

Cosmologia e ondas gravitacionais: o nascimento da cosmologia moderna

Pedro G. Ferreira

Astrophysics, University of Oxford, Oxford OX2 8LN, UK

pedro.ferreira@physics.ox.ac.uk

O nascimento da cosmologia moderna

Se quisermos compreender o papel que as ondas gravitacionais desempenham na cosmologia, temos de compreender primeiro como é que a própria cosmologia se tornou a joia da coroa da física moderna. A cosmologia - a ciência da origem e evolução do Universo - tem raízes antigas, com filósofos e astrónomos a debaterem durante milénios a melhor forma de descrever o Universo como um todo. Mas só no século passado é que a cosmologia se transformou numa ciência quantitativa e preditiva. O ponto de viragem ocorreu com a Teoria Geral da Relatividade de Albert Einstein, em 1915, que forneceu um quadro matemático revolucionário para a gravidade e para o espaço-tempo à escala cósmica. Com a Relatividade Geral, os físicos dispunham finalmente de um modelo para descrever a estrutura em grande escala do Universo e puderam começar a fazer previsões testáveis sobre o seu comportamento.

O próprio Einstein aplicou a sua nova teoria ao Universo. Em 1917, guiado pela crença predominante de que o Universo era estático, construiu um modelo cosmológico que tentava equilibrar a gravidade e atingir um estado estacionário. Para o fazer, introduziu um termo adicional nas suas equações - a constante cosmológica - uma espécie de força repulsiva para contrariar a gravidade e manter o Universo em equilíbrio. Esta constante impediu o espaço de colapsar sob o seu próprio peso e produziu um universo finito e estático (frequentemente designado por universo estático de Einstein). A insistência de Einstein num cosmos estático foi um passo em falso. Dez anos depois, as observações provaram que o Universo não é de todo estático. Einstein viria a chamar à constante cosmológica o seu "maior erro", embora as recentes descobertas da energia escura tenham de certa forma reintroduzido a ideia.

Independentemente do modelo estático de Einstein, outros pioneiros levaram a Relatividade Geral numa nova e ousada direção. Nos anos 20, o matemático Alexander Friedmann, na Rússia, e o astrónomo Belga (e padre) Georges Lemaître encontraram soluções para as equações de Einstein que não exigiam um universo estático. Os seus cálculos mostraram que o próprio tecido do espaço-tempo pode expandir-se ou contrair-se. Uma previsão clara destes modelos dinâmicos foi que as galáxias distantes devem estar a afastar-se de nós - quanto mais longe, mais rápida a recessão - devido à expansão cósmica. Este fenómeno revelar-se-ia como um desvio para o vermelho da luz de galáxias distantes (um alongamento dos comprimentos de onda em direção à extremidade vermelha do es-

petro). O físico holandês Wilhelm de Sitter, trabalhando com a nova teoria da relatividade, também mostrou que um modelo de universo em expansão produz naturalmente uma relação entre a distância de uma galáxia e a sua velocidade de recessão. Essencialmente, a matemática da Relatividade Geral estava a dizer-nos que o nosso Universo deveria estar em expansão - uma ideia radical à espera de confirmação observacional.

A confirmação veio em 1929, quando o astrónomo americano Edwin Hubble, assistido por Milton Humason, publicou medições das distâncias e velocidades das galáxias. Hubble encontrou uma tendência clara: as galáxias mais distantes estão a afastar-se mais rapidamente do que as mais próximas, tal como os modelos dinâmicos previam. As observações de Hubble provaram que o Universo está a expandir-se e validaram os modelos relativistas de Friedmann, Lemaître e de Sitter. O Universo em expansão passou a ser o novo paradigma e Einstein abandonou o seu modelo estático. A velocidade de expansão passou a ser conhecida como a constante de Hubble, um número que os cientistas se têm esforçado por medir desde então. Com o trabalho de Hubble, a cosmologia teve a sua primeira base empírica sólida apoiada pela Relatividade Geral.

Durante as décadas seguintes, houve pouco progresso na cosmologia. Os astrónomos tentaram obter medições cada vez mais exatas da constante de Hubble (a taxa de expansão), mas os resultados que obtinham através de diferentes métodos eram frequentemente discordantes. Nos meados do século XX, a cosmologia ainda era vista como algo especulativo - aquilo a que um dos principais cosmólogos, Jim Peebles, chamou mais tarde "um assunto limitado... com dois ou três números" que caracterizavam todo o Universo, que para ele "sempre pareceu... bastante desolador". Nessa altura, esses "dois ou três números" incluíam a constante de Hubble e talvez a densidade média da matéria, e pouco mais. A cosmologia não dispunha da abundância de medições precisas que temos hoje em dia.

Nos anos 40 e 50 houve, no entanto, progresso teórico. Em 1948, o físico George Gamow e os seus colegas calcularam que, se o Universo tivesse começado num estado quente e denso (a ideia do "Big Bang"), arrefeceria à medida que se expandisse e deixaria para trás um fundo de radiação de micro-ondas que preenche o espaço. Mostraram também que, numa fase inicial tão quente, as reações nucleares sintetizariam elementos leves como o hélio. Estas

eram previsões arrojadas: uma bola de fogo cósmica no passado que deixou um brilho residual e criou hélio primordial. Durante muito tempo, esta foi considerada uma teoria interessante, mas não confirmada. Até que, em 1965, os radioastrónomos Arno Penzias e Robert Wilson descobriram, por acaso, um sinal fraco de micro-ondas isotrópico - o fundo cósmico de micro-ondas (CMB de "Cosmic Microwave Background") - a uma temperatura de cerca de 3 graus acima do zero absoluto. Esta era a radiação que o grupo de Gamow previra, uma prova impressionante de que o Universo começou de facto num estado quente e denso. A descoberta do CMB transformou a cosmologia de especulação em ciência quase de um dia para o outro.

Jim Peebles e outros (como Robert Dicke e Yakov Zel'dovich) aperceberam-se de que o CMB não era apenas uma confirmação do Big Bang - as pequenas variações da sua temperatura podiam revelar a forma como a matéria estava distribuída no Universo primordial. Peebles ajudou a desenvolver a teoria de como pequenas inhomogeneidades cresceriam através da gravidade para formar galáxias e enxames de galáxias ao longo de milhares de milhões de anos. Durante os finais dos anos 60 e os anos 70, estes teóricos lançaram as bases para a teoria do crescimento da estrutura cósmica - como as galáxias se formam e se aglomeram numa imensa teia cósmica (Figura 1) de aglomerados, filamentos e vazios. A cosmologia estava a tornar-se uma ciência preditiva: se fosse possível medir o padrão estatístico do brilho do CMB, poder-se-ia inferir muito sobre a composição e a história do Universo.

Só no fim dos anos 90 é que a tecnologia conseguiu recuperar o atraso e mapear em pormenor essas pequenas flutuações de temperatura. Em 1992, o satélite COBE (Cosmic Background Explorer) da NASA revelou a primeira deteção definitiva de anisotropias do CMB (as tênues irregularidades na radiação de fundo). O mapa do COBE

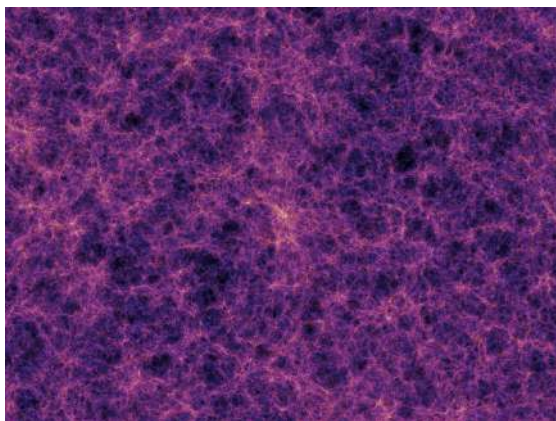


Figura 1 - Teia Cósmica. Créditos: Volker Springel (Max Planck Institute for Astrophysics) et al., <https://esahubble.org/images/heic2003b/>

tinha uma resolução relativamente baixa, mas foi uma descoberta monumental. De facto, confirmou que o Universo primordial tinha o tipo certo de flutuações primordiais para se transformar nas estrelas, galáxias e aglomerados atuais. Os líderes da equipa do COBE, George Smoot e John Mather, ganharam o Prémio Nobel em 2006 por este trabalho. O COBE inaugurou uma época de ouro da cosmologia, uma vez que as experiências que vieram a seguir (Boomerang, MAXIMA, e especialmente a Wilkinson Microwave Anisotropy Probe em 2003 e o satélite Planck em 2013) mapearam o CMB com uma precisão cada vez maior. Cada experiência melhorou cada vez mais as medições de parâmetros cósmicos

fundamentais - a idade do Universo, a constante de Hubble, a densidade da matéria, etc. - transformando a cosmologia naquilo a que agora se chama "cosmologia de precisão", um domínio em que os parâmetros são conhecidos com uma precisão elevadíssima. Hoje em dia, graças ao CMB e aos grandes estudos de galáxias (como o Sloan Digital Sky Survey e o recente projeto DESI), temos um Modelo Padrão da cosmologia - frequentemente designado por modelo Λ CDM - que é consistente com uma espantosa variedade de dados. Neste modelo, o Universo tem cerca de 13,8 mil milhões de anos, é composto por cerca de 5 % de matéria ordinária, 27 % de matéria escura e 68 % de energia escura, e sofreu uma breve explosão de hiperexpansão (inflação) na sua primeira fração de segundo.

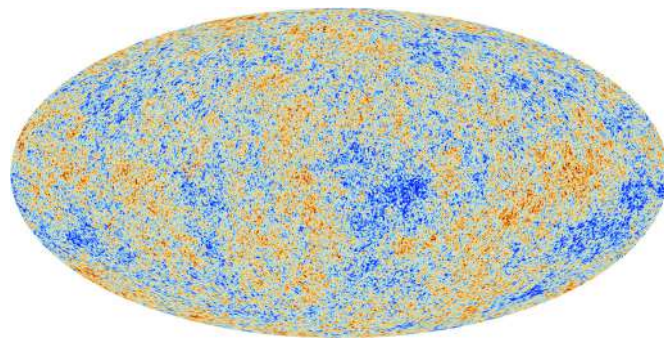


Figura 2 - Mapa Planck do fundo cósmico de micro-ondas (CMB). Foto: ©ESA e colaboração Planck. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB

O modelo cosmológico tem, como parte fundamental, três componentes misteriosos. A inflação, a hipotética expansão exponencial nos primeiros instantes do Universo, parece criar as condições iniciais que observamos - no entanto, o campo - "o inflatão" - responsável por este período de expansão permanece desconhecido. A matéria negra, uma forma invisível de matéria que constitui a maior parte da massa das galáxias, até agora só foi observada através dos seus efeitos gravitacionais. E a energia escura, um termo que usamos para a aparente aceleração cósmica observada atualmente na expansão do Universo, é um enigma - pode ser a constante cosmológica de Einstein ou algo mais exótico. Determinar a natureza destes componentes - o campo responsável pela inflação, a matéria escura, e a energia escura - é o objetivo central da cosmologia moderna. Atualmente, dispomos de instrumentos para medir o Universo com uma precisão extraordinária; o desafio é compreender a nova física que estas medições nos revelam.

Ondas Gravitacionais e o Fundo Cósmico de Micro-ondas

Muito antes de as ondas gravitacionais serem descobertas, já eram tópicos de especulação teórica. A ideia de ondas gravitacionais emergiu da Relatividade Geral de Einstein apenas um ano depois da própria teoria. Mas a deteção destas ondas estava muito para além da tecnologia do tempo de Einstein, e durante décadas as ondas gravitacionais permaneceram uma ideia teórica. Foi apenas em 2015 que o Observatório Interferómetro Laser de Ondas Gravitacionais (LIGO) fez a primeira deteção direta histórica de uma onda gravitacional - gerada pela colisão de dois buracos negros a milhares de milhões de anos-luz de distância. Este feito, anunciado em 2016, abriu uma nova era na astronomia de ondas gravitacionais.

No entanto, mesmo antes do triunfo do LIGO, os cosmólogos já

tinham reconhecido que as ondas gravitacionais devem desempenhar um papel importante na história do Universo, em particular, durante as primeiras frações de segundo após o Big Bang. Durante a inflação, pequenas flutuações quânticas em escalas subatómicas foram ampliadas para escalas astronómicas. A inflação explica a origem das ligeiras flutuações de densidade que mais tarde se transformaram em galáxias (estas provêm de flutuações quânticas nos campos de matéria). Mas a inflação teria também ampliado as flutuações quânticas do próprio espaço-tempo - deveria ter criado um banho de ondas gravitacionais que permeavam o Universo. Estas ondas gravitacionais primordiais são essencialmente flutuações do Universo primordial, ampliadas pela inflação e que se propagam pelo espaço-tempo desde então. Ao contrário das ondas gravitacionais que o LIGO detetou, as ondas gravitacionais inflacionárias formariam um fundo difuso e omnipresente - uma espécie de ruído ténue de ondas gravitacionais oriundas do Big Bang.

As ondas gravitacionais primordiais teriam deixado uma marca na própria radiação cósmica de fundo em micro-ondas (Figura 2). O CMB é luz polarizada - e prevê-se que as ondas gravitacionais da inflação imprimam um padrão de polarização distinto no CMB, conhecido como polarização de modo B. Em termos mais simples, à medida que as ondas gravitacionais do Universo primordial comprimiam e esticavam o espaço, induziram subtis redemoinhos na orientação da luz do CMB. Encontrar esse sinal específico de polarização seria uma prova irrefutável da existência de ondas gravitacionais inflacionárias.

Ao longo das décadas de 2000 e 2010, equipas de cosmólogos construíram telescópios de micro-ondas ultra-sensíveis para procurar este sinal. Em 2014, uma equipa que utilizava o telescópio BICEP2 no Pólo Sul anunciou que tinha encontrado sinais de polarização em modo B, consistentes com um forte sinal de ondas gravitacionais inflacionárias. O resultado fez manchetes em todo o mundo - se fosse verdade, significava que estávamos a ver ecos da época inflacionária do Big Bang, uma descoberta digna de um Nobel. No entanto, o entusiasmo durou pouco tempo. Nos meses que se seguiram, o exame minucioso de outros cientistas revelou uma falha: a equipa do BICEP2 tinha subestimado a emissão polarizada da poeira na nossa própria galáxia Via Láctea. O que tinham detetado não eram de todo ondas gravitacionais primordiais, mas radiação de poeira interestelar que pode imitar o sinal cósmico de que se estava à procura. No final de 2014, o consenso era que a "descoberta" do BICEP2 era um falso alarme e que o fundo de ondas gravitacionais inflacionárias continuava por detetar. Ficou claro que estas medições são extraordinariamente delicadas; separar um sinal cosmológico ténue do "ruído" de fontes mais próximas (como a poeira galáctica) é extremamente difícil.

Apesar deste contratempo, a caça às ondas gravitacionais primordiais continua com um vigor renovado. Estamos numa era de grande atividade na observação do CMB, com uma nova geração de observatórios que pretende atingir a precisão necessária. Um exemplo notável é o Simons Observatory, em construção no deserto de Atacama, no Chile. Este observatório - com um conjunto de potentes telescópios e detetores supercondutores de última geração - irá mapear a temperatura e a polarização da radiação cósmica de fundo em micro-ondas com uma precisão sem precedentes. Paralelamente, outros projetos, como o BICEP-Array (sucessor do BICEP2), o South Pole Telescope e um satélite proposto no Japão,

chamado LiteBIRD, pretendem detetar estas ondas primordiais.

Ondas Gravitacionais do Universo Primordial: Transições de Fase e Cordas Cósmicas

O Universo primordial foi uma época turbulenta, e vários processos nesses primeiros momentos poderiam ter produzido um fundo estocástico de ondas gravitacionais - um ruído aleatório e persistente de vibrações do espaço-tempo que não provêm de uma única fonte, mas do efeito combinado de inúmeros acontecimentos microscópicos. Ao contrário dos sinais limpos de "chirp" de colisões individuais de buracos negros ou de estrelas de neutrões que o LIGO deteta, este fundo primordial de ondas gravitacionais soaria mais como ruído estático num detetor - um ruído persistente e fraco sem qualquer padrão particular. Detetá-lo é um pouco como tentar ouvir um murmúrio suave numa sala cheia de conversas mais altas.

Um dos alvos principais são as ondas gravitacionais das transições de fase cósmicas. Nas primeiras frações de segundo de existência, o Universo era extremamente quente e denso e, à medida que se expandiu e arrefeceu, passou por uma série de transições de fase semelhantes ao congelamento da água ou à condensação do vapor, mas envolvendo forças e campos fundamentais. Por exemplo, logo após o Big Bang, as forças nucleares eletromagnética e fraca "separaram-se" (um processo conhecido como transição de fase eletrofraca). Se essa transição de fase fosse violenta poderia ter gerado ondas gravitacionais. Nessa transição, as bolhas da nova fase (pensem nas bolhas de líquido que se formam na água a ferver) nucleariam e cresceriam e, quando essas bolhas colidissem ou convertessem a sua energia em movimento, poderiam agitar o plasma e o próprio espaço-tempo, emitindo ondas gravitacionais. Acredita-se que a transição de fase eletrofraca no Modelo Padrão da física de partículas tenha sido, na verdade, um cruzamento relativamente suave, e não uma transição violenta. Mas muitas extensões do Modelo Padrão poderiam torná-la mais violenta. Da mesma forma, ainda mais cedo, se a inflação terminasse de uma forma complexa, poderia produzir uma explosão de ondas gravitacionais. Logo a seguir, cerca de 1 microssegundo após o Big Bang, os quarks livres do plasma de "quark-gluon" passaram para estados ligados (prótons e neutrões) no que se chama a transição de fase QCD (Cromodinâmica Quântica). Detetar um fundo de ondas gravitacionais geradas por uma transição de fase seria revolucionário: forneceria uma sonda direta das condições físicas a energias e temperaturas muito para além de qualquer experiência laboratorial.

Outra fonte de ondas gravitacionais primordiais são os defeitos topológicos formados no Universo primordial. Defeitos topológicos são estruturas estáveis que podem aparecer quando os campos fundamentais sofrem transições de fase que quebram a simetria. Um exemplo famoso é a corda cósmica - essencialmente um filamento estreito e ultra denso de energia, que se poderia formar se a configuração dos campos do Universo primordial mudasse para um estado de energia mais baixa, deixando defeitos semelhantes a tubos. (As cordas cósmicas são conceitualmente análogas às fendas que se formam quando o gelo da água congela - um defeito unidimensional num meio que, de outro modo, seria uniforme). As cordas cósmicas, se existirem, seriam extraordinariamente maciças (um pequeno pedaço poderia pesar tanto como uma montanha) e, ao moverem-se, criariam ondulações no espaço-tempo. Duas cordas que se cruzassem poderiam mesmo formar laços que oscilam

e decaem gradualmente, emitindo ondas gravitacionais. O resultado seria um fundo estocástico de ondas gravitacionais provenientes de cordas cósmicas, potencialmente abrangendo uma vasta gama de frequências.

Há vários mecanismos que poderiam encher o cosmos de ondas gravitacionais: transições de fase rápidas que fazem soar o espaço-tempo como um sino, laços de cordas cósmicas oscilantes ou mesmo a expansão abrupta da própria inflação. Todos estes são exemplos de fundos estocásticos - sinais aleatórios e persistentes provenientes de uma única direção. A detecção de tais fundos é extremamente difícil. Uma das razões é que se espera que sejam muito tênues - falamos de processos que ocorreram a densidades de energia muito superiores às da física padrão, mas que depois se diluíram em 14 mil milhões de anos de expansão. Outra dificuldade é que, mesmo que os nossos detetores sejam suficientemente sensíveis, o sinal aparecerá como uma espécie de ruído, e é preciso distingui-lo do ruído do próprio instrumento ou de fundos produzidos por fontes astrofísicas mais mundanas.

A estratégia para detetar um sinal estocástico é procurar um sinal correlacionado. O ruído aleatório instrumental não está correlacionado entre diferentes detetores; um fundo real de ondas gravitacionais, no entanto, afetaria detetores separados em sincronia, produzindo padrões correspondentes de flutuações minúsculas. Os observatórios LIGO, Virgo e KAGRA - a atual rede global de interferómetros terrestres - estão a procurar na banda de alta frequência (dezenas a centenas de Hz) sinais de um fundo estocástico. Mas, até agora, não foi feita qualquer detecção definitiva de ondas gravitacionais primordiais, para além da marca indireta que podem ter deixado na polarização do CMB.

As próximas gerações de observatórios de ondas gravitacionais irão aumentar consideravelmente a nossa capacidade de detetar um fundo primordial - ou excluir definitivamente muitas possibilidades. Na Terra, projetos como o Telescópio Einstein (ET), na Europa, e o Cosmic Explorer (CE), nos EUA, propõem interferómetros de terceira geração com uma sensibilidade muito maior numa vasta gama de frequências. O Telescópio Einstein, por exemplo, foi concebido como um detetor triangular subterrâneo com uma extensão de 10 km, que funcionará a temperaturas criogénicas para reduzir o ruído. Aumentaria a sensibilidade numa ordem de grandeza e alargaria o alcance de baixas frequências (até ~1 Hz ou menos), onde alguns sinais primordiais poderão estar escondidos. O Cosmic Explorer, terá uma extensão de 40 km (dez vezes o comprimento do LIGO). Estes detetores estarão principalmente ocupados com fontes astrofísicas (por exemplo, colisões de buracos negros), mas no ruído de todos esses eventos, poderão detetar o tal ruído omnipresente do Universo primordial.

No espaço, podemos construir observatórios de maior extensão e aceder a diferentes bandas de frequência sem o ruído sísmico da Terra. O LISA (Laser Interferometer Space Antenna) da Agência Espacial Europeia - cujo lançamento está previsto para a década de 2030 - funcionará com uma extensão de milhões de quilómetros, sensíveis a ondas gravitacionais de baixa frequência (cerca de um milihertz). Embora os alvos principais do LISA sejam a colisão de buracos negros muito grandes (com massa de a ordem 10^6 a massa do Sol) e sistemas estelares extremos, também foi concebido para detetar um fundo cósmico de ondas gravitacionais na sua banda.

O Japão também propôs uma missão ambiciosa chamada DECIGO (Deci-Hertz Interferometer Gravitational-Wave Observatory), que visa frequências à volta de 0,1 Hz a 1 Hz (entre as bandas do LISA e do LIGO). O objetivo mais importante do DECIGO é detetar ondas gravitacionais provenientes da inflação cósmica, que nenhum outro instrumento poderia alcançar diretamente.

Os *pulsar timing arrays* (PTAs) complementam os interferómetros laser na busca de ondas gravitacionais a frequências extremamente baixas (nanohertz). Os PTAs utilizam uma rede de pulsares de milissegundos como detetores naturais: a passagem de uma onda gravitacional alteraria subtilmente os tempos de chegada dos impulsos. Recentemente, colaborações de PTA na América do Norte (NANOGrav), Europa, Austrália e China anunciaram provas de um sinal comum que pode ser o primeiro indício de um fundo de ondas gravitacionais na gama dos nanohertz. A principal explicação é um fundo de ondas gravitacionais provenientes da colisão de buracos negros supermassivos ao longo da história cósmica. No entanto, o sinal é um pouco mais forte do que o esperado, o que levou os cientistas a especular sobre contribuições adicionais - por exemplo, talvez cordas cósmicas ou mesmo um fundo inflacionário possam estar a contribuir.

Os desafios da detecção de um fundo primordial de ondas gravitacionais são imensos. É preciso isolar um sinal fraco e aleatório do ruído dos instrumentos e das fontes astrofísicas mais próximas. São necessários múltiplos detetores, tecnologia ultrassensível e anos de dados. Mas a recompensa seria igualmente imensa: uma detecção mudaria radicalmente a nossa compreensão do Universo primordial.

Ondas Gravitacionais como Sondas do Universo Recente

As ondas gravitacionais são ferramentas poderosas para estudar o Universo mais recente - a era das galáxias, das estrelas e da expansão acelerada em que vivemos atualmente. Na cosmologia tradicional, os astrónomos há muito que se baseiam em sinais eletromagnéticos (como a luz das supernovas ou das galáxias) como "velas padrão" para medir as distâncias e a expansão cósmicas. Agora, as ondas gravitacionais oferecem um método independente: chamamos-lhes "sirenes padrão". A ideia, proposta pela primeira vez por Bernard Schutz em 1986, é simples. Quando o LIGO ou outro detetor observa um sinal de ondas gravitacionais de uma colisão distante (por exemplo, duas estrelas de neutrões em espiral), a forma desse sinal codifica a intensidade absoluta das ondas - o que, por sua vez, nos indica a distância à fonte. Com as ondas gravitacionais, a forma de onda *chirp* revela as massas dos objetos em colisão e a amplitude intrínseca do sinal; medindo a intensidade do sinal, os cientistas podem inferir a distância que as ondas percorreram. Esta medida de distância a partir da gravidade é incrivelmente valiosa, porque não depende da escala de distâncias cósmicas nem das calibrações que os métodos óticos necessitam. É uma leitura direta da extensão do espaço entre nós e a fonte. Chamamos-lhe sirene padrão (referente ao "som" de um sinal de onda gravitacional) em analogia com as velas padrão na luz.

A primeira demonstração no mundo real de uma sirene padrão ocorreu com o evento GW170817. Corresponde à onda gravitacional de uma colisão binária de estrelas de neutrões detetada em agosto de 2017, que - crucialmente - foi acompanhada por um flash de luz (uma curta explosão de raios gama e uma kilonova ótica).

Dezenas de telescópios captaram o brilho posterior, identificando a galáxia (NGC 4993) onde ocorreu a colisão. Isto foi um triunfo da astronomia “multi-mensageiro”: pela primeira vez, um evento astronômico foi observado tanto em ondas gravitacionais como em ondas eletromagnéticas. As equipas do LIGO e do Virgo conseguiram calcular a distância à colisão a partir dos dados das ondas gravitacionais (cerca de 140 milhões de anos-luz). Entretanto, ao identificar a galáxia hospedeira, os astrónomos puderam medir a velocidade a que essa galáxia se está a afastar (o seu desvio para o vermelho, relacionado com a expansão do Universo). A combinação destes dados permitiu obter uma estimativa direta da constante de Hubble - a atual taxa de expansão do Universo. O resultado, cerca de 70 (km/s)/Mpc (quilómetros por segundo por megaparsec), foi amplamente consistente com os métodos tradicionais. Embora a incerteza fosse grande (cerca de 15 %, uma vez que se tratou apenas de um evento), demonstrou o potencial das sirenes padrão.

Nos anos que se seguiram ao GW170817, o LIGO e o Virgo detetaram dezenas de colisões de dois buracos negros e algumas colisões de estrelas de neutrões. A maioria destes eventos de buracos negros não são observadas através de ondas eletromagnéticas (os buracos negros que se fundem no escuro não produzem luz), o que significa que não sabemos a sua localização exata nem o seu desvio para o vermelho - por isso, não podem ser usados individualmente como sirenes padrão. No entanto, há métodos estatísticos para extrair informação cosmológica destes processos. Usando catálogos de galáxias como potenciais hospedeiras destas colisões e combinando a informação sobre a distância de muitos eventos de ondas gravitacionais (por vezes chamadas “sirenes escuras”, quando não se vê luz), é possível inferir estatisticamente a constante de Hubble. Estas análises estão em curso; os resultados atuais são ainda bastante grosseiros. Esperamos que, no final desta década, poderemos ter uma medição independente da expansão cósmica baseada em ondas gravitacionais que seja tão precisa como as tradicionais.

As ondas gravitacionais podem também ser utilizadas para testar a Relatividade Geral em novas escalas e regimes. O evento GW170817 (Figura 3) forneceu uma confirmação dramática de que as ondas gravitacionais viajam essencialmente à velocidade da luz. Quando as estrelas de neutrões colidiram, o LIGO detetou o sinal da onda gravitacional; cerca de 1,7 segundos depois, uma explosão de raios gama foi detetada por telescópios espaciais. Tomando

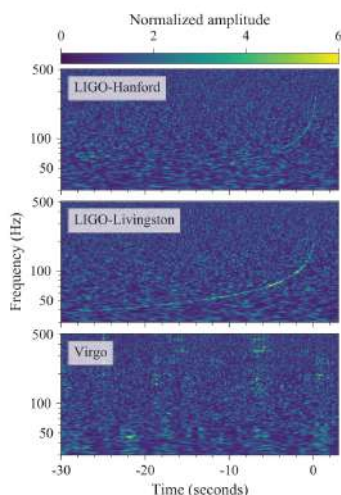


Figura 3 - O sinal GW170817 medido pelos detetores de onda gravitacionais LIGO e VIRGO. Créditos: LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, via Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/GW170817>

em conta que estes sinais viajaram ~140 milhões de anos-luz, um atraso de 1,7 s é insignificante - implica que a velocidade das ondas gravitacionais é igual à velocidade da luz com uma aproximação de um parte em 10^{15} . Isto representa uma melhoria de mil milhões de vezes em relação as medidas anteriores, e exclui muitas teorias alternativas da gravidade de uma só vez. Isto reforça a ideia de que a teoria de Einstein, com um século de idade, continua a ser a teoria correta mesmo nas condições mais extremas (buracos negros em colisão, colisões de estrelas de neutrões) que podemos observar.

Conclusão

Há pouco mais de cem anos, Einstein deu-nos as ferramentas para pensar cientificamente sobre o Universo como um todo e, desde então, a cosmologia deixou de ser um campo carente de dados com “dois ou três números” para se tornar numa ciência de alta precisão. Mapeámos a radiação cósmica de fundo em micro-ondas, analisámos milhões de galáxias e medimos a composição do Universo com uma precisão extraordinária. Agora, as ondas gravitacionais estão a acrescentar uma nova dimensão. Permitem-nos “ouvir” o Universo, para além de o vermos.

Temos que ser pragmáticos em relação às ondas gravitacionais. Os desafios são grandes: os sinais são minúsculos e os detetores têm de ser extraordinariamente sensíveis. É possível que o ruído estocástico do Universo primordial, seja tão fraco que mesmo os observatórios da próxima geração tenham dificuldade em detetá-los. Pode também acontecer que as ondas gravitacionais de fundo da inflação ou das transições de fase estejam mesmo abaixo dos limiares dos instrumentos planeados, limitando o que podemos aprender sobre esses momentos primordiais. Temos de moderar as nossas expectativas de que as ondas gravitacionais resolverão subitamente todos os mistérios cósmicos.

No entanto, a história da ciência mostra que, sempre que abrimos uma nova janela para o universo, descobrimos o inesperado. A astronomia das ondas gravitacionais ainda está a dar os primeiros passos - tem apenas alguns anos - e já nos surpreendeu. À medida que os nossos detetores forem melhorando, poderemos detetar algo inesperado - um sinal de ondas gravitacionais que não corresponde a nenhuma causa astrofísica conhecida, talvez sugerindo uma nova física exótica.

Referências

- [1] P. G. Ferreira, “Uma Teoria Perfeita” Editorial Presença (2014)
 - [2] C. Caprini & D. Figueroa, “Cosmological Backgrounds of Gravitational Waves”, Class. Quant. Grav. 35, 163001 (2018)
 - [3] J. Romano & N. Cornish, “Detection methods for stochastic gravitational-wave backgrounds: a unified treatment”, Living Rev. Relativity 20, 2 (2017)
 - [4] N. Christensen, “Stochastic Gravitational Wave Backgrounds,” Rep. Prog. Phys. 82, 016903 (2019)
- Imagens**
 Mapa Planck do CMB: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB
 Teia Cósmica: <https://esahubble.org/images/heic2003b/>
 GW170817: <https://en.wikipedia.org/wiki/GW170817>



Pedro G. Ferreira é professor de astrofísica na Universidade de Oxford. Estudou e trabalhou no Imperial College, em Londres, na Universidade da Califórnia, em Berkeley, e no CERN, em Genebra. Foi professor visitante na Universidade de Edimburgo, no Instituto Albert Einstein, em Berlim, e na Universidade de Columbia, em Nova Iorque. Ganhou o Prémio Gerald Whitrow 2022 e a Medalha Eddington 2024 da Royal Astronomical Society. Atualmente, é presidente do departamento de Astrofísica e diretor do Instituto Beecroft de Física de Partículas e Cosmologia em Oxford. Sua área de especialização é a cosmologia, onde estudou a radiação remanescente do Big Bang, a natureza da matéria escura e da energia escura, e liderou o estudo de alternativas à teoria da Relatividade Geral de Einstein. Ele também se concentrou na teoria e análise das ondas gravitacionais e no uso de “Machine Learning” na análise de dados cosmológicos. O seu livro, “The Perfect Theory: A Century of Geniuses and the Battle over General Relativity” (A Teoria Perfeita: Um Século de Gênios e a Batalha pela Relatividade Geral), foi selecionado para o Prémio Royal Society Winton Science Book de 2014.