

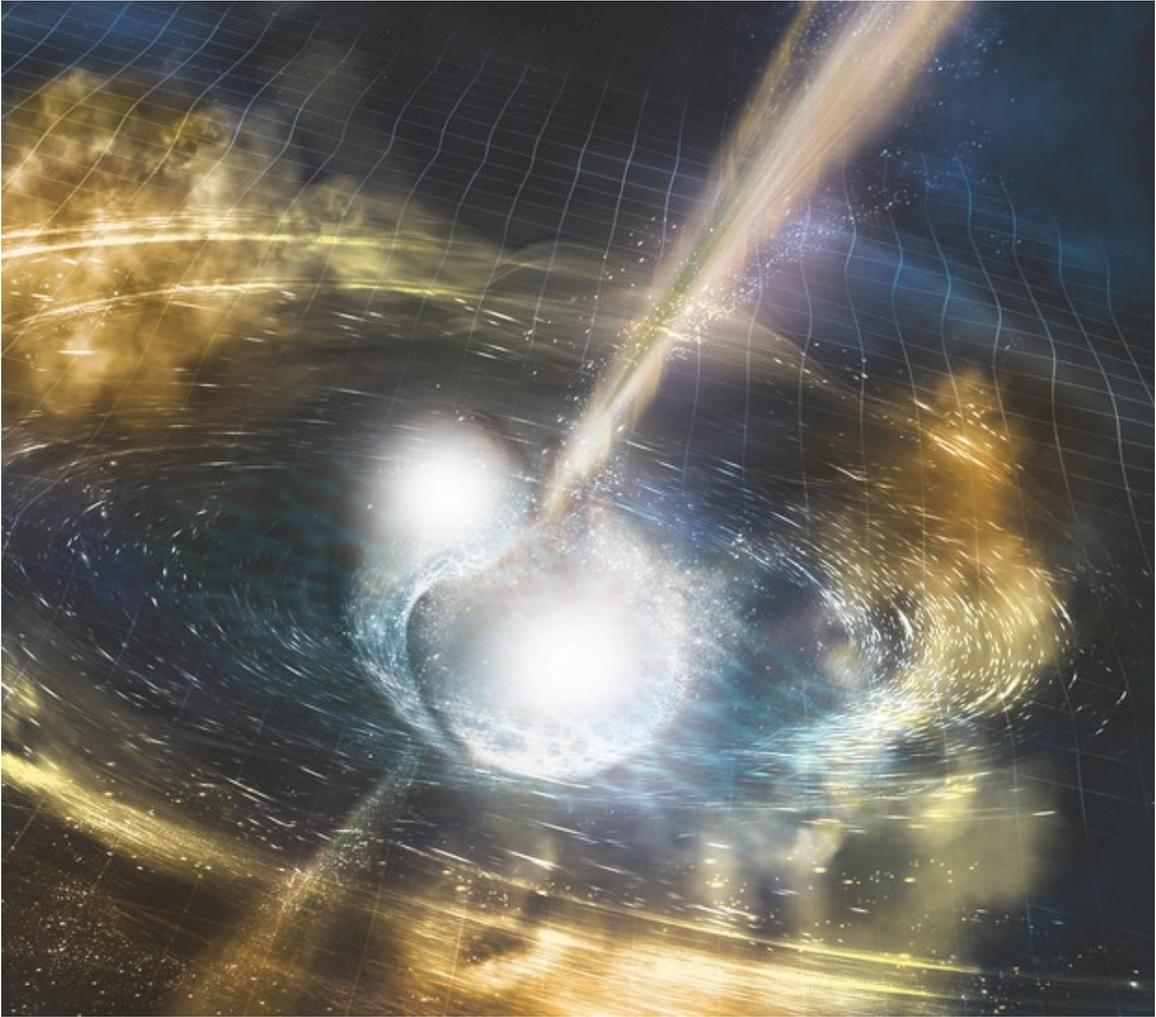
Capítulo 10

ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS*

Odylio Denys Aguiar**

*Primeira versão Maio/2018.

** e-mail: odylio.aguiar@inpe.br



Credit: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS

LISTA DE FIGURAS	10-4
LISTA DE TABELAS	10-5
10.1 O QUE SÃO ONDAS GRAVITACIONAIS?	10-6
10.2 COMO PODEMOS DETECTAR/OBSERVAR ONDAS GRAVITACIONAIS?	10-8
10.2.1 PROVA DE QUE ELAS EXISTIAM	10-11
10.2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS	10-13
10.3 FONTES ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS	10-18
10.4 A ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS FOI INAUGURADA!	10-19
10.5 O QUE APRENDEMOS COM AS PRIMEIRAS ONDAS GRAVITACIONAIS OBSERVADAS?	
10-22	
10.6 QUAL O FUTURO DA ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS?	10-27
10.7 BIBLIOGRAFIA	10-30

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 10.1 - NA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN, AS MASSAS, PRINCIPALMENTE AS GRANDES, CAUSARIAM DEFORMAÇÃO NO ESPAÇO-TEMPO, DE FORMA SEMELHANTE À DEFORMAÇÃO CAUSADA POR UMA BOLA DE BOLICHE EM UM COLCHÃO DE BORRACHA.....	10-8
FIGURA 10.2 - DEFORMAÇÃO DE UM CÍRCULO DEVIDO A FORÇAS INDUZIDAS POR ONDAS H^+ OU H^\times PURAS	10-9
FIGURA 10.3 - ONDAS GRAVITACIONAIS DE GW150914	10-20

LISTA DE TABELAS

TABELA 10.1 - PARÂMETROS DOS EVENTOS ENVOLVENDO PARES DE BURACOS NEGROS (A-L É ANOS-LUZ).....	10-22
TABELA 10.2 - PARÂMETROS DO EVENTO GW170817 (A-L É ANOS-LUZ).....	10-24

10.1 O QUE SÃO ONDAS GRAVITACIONAIS?

O conceito de ondas gravitacionais só pode ser entendido à luz da teoria da relatividade geral de Albert Einstein. Sem ela não podemos entender o que são ondas gravitacionais. Mas vamos explicar isto melhor mais adiante.

Começemos com a teoria da gravitação de Isaac Newton, publicada no livro “Principia” em 1687. Para Newton a gravidade era uma força invisível que agia à distância, proporcional ao produto das duas massas, que se atraíam, e ao inverso do quadrado da distância entre elas. Esta lei da gravitação, como ficou conhecida, não dizia nada sobre a velocidade de propagação da força gravitacional. Aliás, este foi um assunto de debate por mais de dois séculos: qual seria a velocidade de propagação da força da gravidade? O próprio Newton não tinha certeza da resposta.

Hoje muitos cientistas interpretam que a lei da gravitação de Newton implicava que a velocidade de propagação da força da gravidade era infinita e, portanto, segundo esta lei, se uma massa mudasse a sua posição todo o Universo receberia esta informação instantaneamente. Porém, isto não parece correto. Se no lugar de conhecermos todas as equações de Maxwell, conhecêssemos apenas a lei de Coulomb para as cargas elétricas, também seríamos levados a pensar, erroneamente, que a força elétrica se propagava instantaneamente. A lei da gravitação é para a gravitação o mesmo que a lei de Coulomb para o eletromagnetismo, um pedaço do todo, não a teoria completa. De posse de todas as equações de Maxwell, podemos provar que as ondas eletromagnéticas existem e elas, assim como a força elétrica e a força magnética, se propagam com a velocidade da luz. Também podemos provar o mesmo para a gravitação, mas para isto foi necessária uma teoria mais completa que a teoria de Newton, foi preciso a teoria da relatividade geral de Einstein.

Einstein foi o primeiro cientista a perceber que nenhuma informação poderia viajar à velocidade maior que a da luz. Ele percebeu isto já na sua teoria da relatividade especial, publicada em 1905. Como consequência deste limite de velocidade para todas as coisas, Einstein percebeu também que o espaço não era independente do tempo, mas formava com ele uma entidade que ele chamou de espaço-tempo. Por que ele concluiu isto? Muito simples. Imagine que você está viajando em um foguete com velocidade

próxima da velocidade da luz e que um colega ou uma colega sua esteja em outro foguete também com velocidade próxima da velocidade da luz, porém em direção oposta, se aproximando de você. Segundo a teoria da relatividade especial, a velocidade relativa entre os dois foguetes é a velocidade da luz, e não duas vezes a velocidade da luz. Ora, para conciliar esta mágica matemática o espaço precisa estar ligado ao tempo e vice-versa. Quanto maior a velocidade do referencial, mais o espaço se contrai e o tempo se dilata. Se você tivesse um irmão ou irmã gêmea e viajasse naquele foguete por muito tempo, quando voltasse à Terra, o seu irmão ou irmã, já estariam velhinhos e você não teria envelhecido quase nada. Este efeito é real, o sistema GPS para funcionar direito vive corrigindo os tempos dos satélites em relação ao tempo na Terra, porque os satélites estão com velocidades maiores. Mas o mais surpreendente Einstein ainda estava por descobrir.

Se você acha que a velocidade da luz ser a velocidade limite para todas as coisas ou que o tempo estar ligado ao espaço são conceitos estranhos e difíceis de acreditar, você nem imagina o que Einstein descobriu 10 anos depois, com a sua teoria da relatividade geral, publicada em 1915. Ele descobriu que quando o espaço-tempo se curvava (entortava), ele produzia o efeito gravitacional, ou seja, ele descobriu a origem da gravitação. Dessa forma, os corpos com massa não se atraíam por causa de uma força invisível, mas sim porque eles sentiam o espaço-tempo em volta deles curvo e, portanto, “escorregavam” um em direção ao outro. É como você imaginar uma bola de boliche em cima de um colchão de borracha (FIGURA 10.1). O peso dela deforma o colchão, de maneira que as bolas menores (de bilhar) sentem esta deformação e “escorregam” em direção à bola de boliche.

Agora para explicar as ondas gravitacionais fica fácil. Imagine duas estrelas orbitando uma em torno da outra. Cada uma delas deforma o espaço-tempo em volta dela, mas como elas estão em órbita, uma em torno da outra, elas carregam estas deformações com elas. Neste momento acontece uma coisa diferente. Se as deformações ficassem paradas, nada aconteceria, mas estando em movimento elas se propagam para fora, da mesma forma que não conseguimos evitar que as ondas produzidas pela queda de uma pedra na superfície de um lago se propaguem em todas as direções, para fora do ponto da queda. Einstein batizou estas deformações se propagando para fora dos corpos em órbita, que as produziram, de ondas gravitacionais. Ele descobriu isto em 1916, a partir

das equações da sua teoria da relatividade geral. Também a partir destas equações, ele provou que estas ondas se propagam também à velocidade da luz.

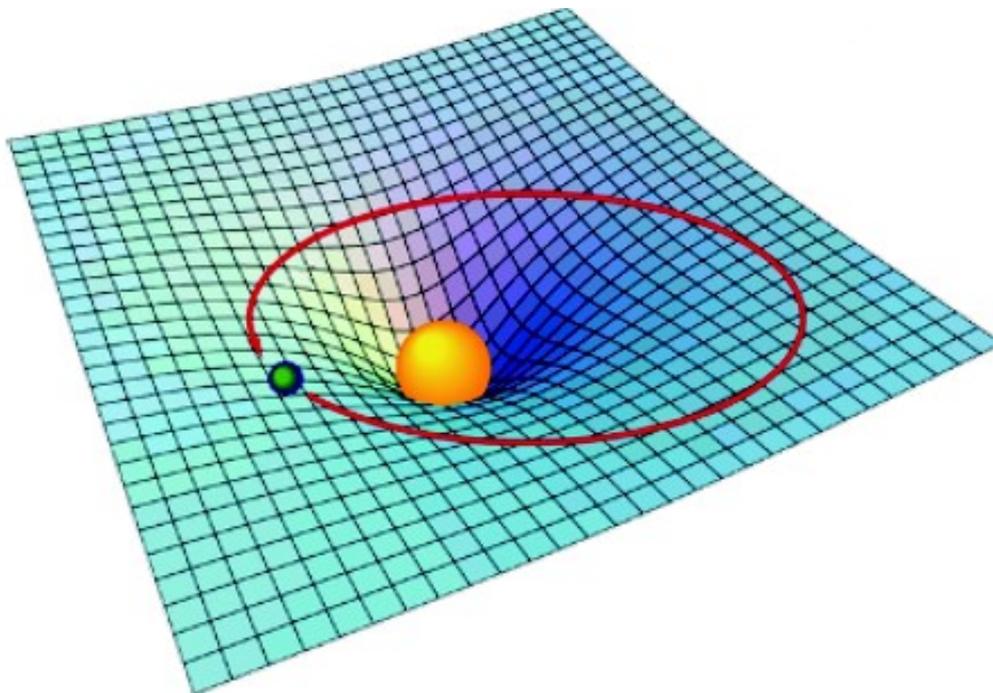


Figura 10.1: Na teoria da Relatividade Geral de Einstein, as massas, principalmente as grandes, causariam deformação no espaço-tempo, de forma semelhante à deformação causada por uma bola de boliche em um colchão de borracha.

Alguns cientistas, como Oliver Heaviside, Lorentz e Poincaré, depois da confirmação por Hertz da existência das ondas eletromagnéticas, já haviam suspeitado e, em alguns casos afirmado, que a velocidade da força da gravidade era a mesma que a da luz, mas foi Einstein que conseguiu provar matematicamente que isto era verdade.

10.2 COMO PODEMOS DETECTAR/OBSERVAR ONDAS GRAVITACIONAIS?

Em 1918, Einstein descobriu, a partir da sua teoria da relatividade geral, que as ondas gravitacionais são produzidas quando existe uma variação do momento de quadrupolo de massa de um objeto ou sistema e que, por causa disto, devem apresentar duas polarizações fundamentais lineares, chamadas de polarizações mais (+) e cruzada (\times), a partir das quais todas as outras polarizações podem ser obtidas. Polarização em uma

onda gravitacional é mais ou menos a forma como ela oscila no espaço. Vamos explicar isto melhor. Suponha que uma onda gravitacional esteja se deslocando ao longo do eixo z , no sentido $z+$ (FIGURA 10.2), perpendicular ao plano xy . A polarização mais (+) causaria uma circunferência de partículas teste (no formato de um bambolê) oscilar de forma a se esticar e contrair nas direções perpendiculares x e y . Já a polarização cruzada (\times) faria a circunferência de partículas oscilar no plano perpendicular ao eixo z , mas com contrações e alongações em direções formando ângulos de 45° com os eixos x e y .

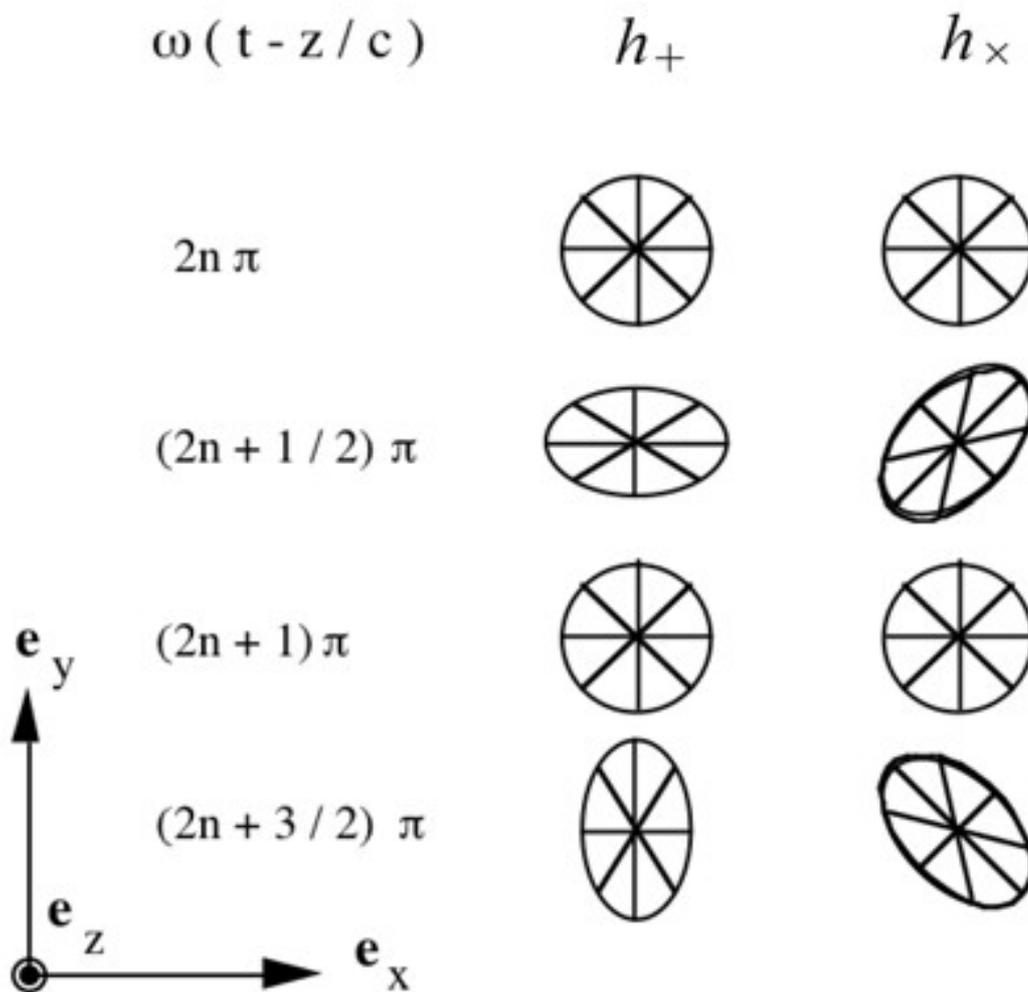


Figura 10.2: Deformação de um círculo devido a forças induzidas por ondas h_+ ou h_\times puras.

Poderíamos definir uma amplitude h para a onda gravitacional como sendo a razão entre a deformação espacial ! L que ela causa num determinado comprimento L , sobre este

comprimento L , ou seja, $h = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} / L$. Note que esta amplitude, como foi definida, é adimensional (sem dimensão). Esta amplitude h seria uma composição das duas amplitudes das polarizações mais e cruzada.

$$h = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} / L = ((h_+)^2 + (h_\times)^2)^{1/2}$$

(Equação 10.1)

Uma onda, com uma determinada amplitude e polarização, poderia ser decomposta nas duas polarizações lineares puras mais (+) e cruzada (\times), com amplitudes que satisfizessem a equação acima e fases que pudessem compor a polarização da onda original. Para o caso especial, no qual a diferença de fase entre as duas polarizações lineares puras é de 0° , a polarização formada ainda é uma polarização **linear**, mais o ângulo que as contrações e alongações formam com os eixos x e y vai depender das amplitudes das duas polarizações puras. Se as amplitudes forem iguais, o ângulo será de $22,5^\circ$. Se as amplitudes forem diferentes, o ângulo vai ser mais próximo da polarização linear pura que tiver a maior amplitude.

Para um outro caso especial da diferença de fase entre as polarizações lineares mais (+) e cruzada (\times) ser de 90° e elas terem a mesma amplitude, a polarização resultante será **circular**, e veremos a circunferência de partículas passar a ter o formato de uma elipse em rotação no plano x - y (perpendicular a z).

No caso geral, de um ângulo diferente de 0° , 90° , 180° e 270° e amplitudes quaisquer, a polarização é a **elíptica**, que corresponde as partículas teste descreverem uma elipse em rotação, cuja excentricidade estaria variando à medida que a elipse rodasse.

As ondas gravitacionais que chegassem à Terra produzidas por um sistema binário composto por dois buracos negros ou estrelas de nêutrons, por exemplo, apresentariam polarização linear, circular ou elíptica, se o sistema estivesse orientado “edge-on”, “face-on”, ou em qualquer outra orientação diferente destas duas, respectivamente.

Bom, então, a conclusão é que se uma onda gravitacional passasse por nós, ela iria provocar um contração e alongação dos nossos corpos, de forma que uma hora ficaríamos baixinhos e gordos e outra hora ficaríamos altos e magros. Nisto você se perguntaria: eu não sinto nada disto, portanto, estas ondas não devem existir!

Não, as ondas existem sim, a explicação é que ela tem uma amplitude muito, muito, muito pequena. Uma onda gravitacional gigantesca, digamos uma onda “tsunami” com

amplitude $h \sim 10^{-18}$, raríssima, que ocorre a cada ~ 100 anos, que passasse por nós, não conseguiria mudar a nossa altura mais do que a milésima parte do diâmetro de um próton! Portanto, felizmente as ondas gravitacionais não vão causar nenhuma dor nos nossos corpos, por mais fortes que elas sejam. Por outro lado, infelizmente, elas são muito difíceis de serem detectadas, por causa das amplitudes tão pequenas que possuem. Só com instrumentos muito sensíveis, construídos com altíssima tecnologia, é que foi possível detectá-las.

10.2.2 PROVA DE QUE ELAS EXISTIAM

Muito antes de conseguirmos detectar ondas gravitacionais, a comunidade científica da área de relatividade geral e gravitação já tinha certeza de que elas existiam. Primeiro houve um convencimento do ponto de vista teórico e depois um do ponto de vista observacional, apesar de indireto.

O convencimento do ponto de vista teórico não ocorreu quando Einstein propôs a existência das ondas gravitacionais em 1916, mas sim meio século depois. Durante cinco décadas ocorreu um debate teórico na comunidade científica especializada em relatividade geral e gravitação a respeito da existência física das ondas gravitacionais. Muitos achavam que as ondas gravitacionais eram apenas um artifício matemático derivado da teoria da relatividade geral, sem existência real física. O próprio Einstein chegou a duvidar que elas fossem reais. Ele quase publicou um artigo na década de 30 negando a existência dessas ondas. Felizmente o trabalho dele foi modificado antes da publicação, graças ao cientista encarregado para julgar o trabalho, H. P. Robertson, que não concordou com Einstein. Porém, Einstein, até a sua morte em 1955, não tinha certeza se afinal as ondas gravitacionais que ele tinha derivado a partir da sua teoria da relatividade geral tinham realmente existência física.

Somente na década de 60, que trabalhos foram publicados demonstrando que ondas gravitacionais realmente carregavam energia e, portanto, teriam existência física. Entretanto, sempre continuaram a existir alguns céticos (até hoje).

A prova observacional da existência de ondas gravitacionais ocorreu na segunda metade da década de 70. Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram em 1974 um sistema

binário formado por duas estrelas de nêutrons, das quais uma delas era um *pulsar*. Uma estrela de nêutrons é um objeto astrofísico formado principalmente por nêutrons, que tem um diâmetro de aproximadamente 20 km e uma massa um pouco maior que a do Sol. Um *pulsar* é uma estrela de nêutrons que apresenta o produto do campo magnético com a rotação suficientemente alto para emitir um feixe de rádio capaz de ser detectado na Terra, se este feixe “varrer” o nosso planeta na rotação da estrela, da mesma forma como o feixe de luz de um farol “varre” o nosso rosto.

O feixe de rádio era detectado pelo radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, aquele mesmo radiotelescópio do filme “Contato”. Como o *pulsar* tinha uma rotação extremamente regular, conhecia-se o seu período de rotação com 14 casas decimais significativas (o seu período era de 0,059029997929613 s)! Dessa forma, Hulse pode observar a variação da chegada dos pulsos do pulsar à medida que este orbitava a outra estrela de nêutrons, graças ao efeito Doppler. Quando o *pulsar*, durante a órbita, se aproximava da Terra, os pulsos chegavam em intervalos menores que aquele período do *pulsar*. Quando ele se afastava, o contrário ocorria, os pulsos se intervalavam de um tempo maior que o período do *pulsar*. Ficava claro que esta sequência se repetia, e, logicamente, o período dessa repetição cíclica era o outro período, o período da órbita do *pulsar* em torno da sua estrela de nêutrons companheira. Era o primeiro sistema binário formado por duas estrelas de nêutrons descoberto. Outros sistemas como este seriam descobertos anos depois. Porém, o mais interessante estava para ser descoberto. Taylor continuou a medir o período orbital desse sistema nos anos que se seguiram e os resultados mostravam que este período estava diminuindo, na mesma proporção prevista pela teoria da relatividade geral em razão da emissão de ondas gravitacionais pelo sistema binário. Já em 1979, havia dados suficientes para ficar clara esta concordância. Taylor continuou a fazer as contas nos anos seguintes e, finalmente, em 1993, a Academia Sueca deu a eles (Hulse e Taylor) o prêmio Nobel de Física, por causa desta descoberta. As ondas gravitacionais não estavam sendo detectadas, mas o efeito de retirada de energia do sistema na emissão dessas ondas estava sendo observado, portanto era uma prova indireta da existência de ondas gravitacionais.

10.2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Ora, se ondas gravitacionais retiram energia de um sistema mecânico formado por duas estrelas de nêutrons no processo de emissão, então, deveria ser possível absorver energia dessas ondas no processo inverso, o de detecção. Levando-se em conta as polarizações lineares puras das ondas gravitacionais, poderiam ser projetados detectores adequados para a detecção dessas ondas.

Foi Joseph Weber quem primeiro propôs a construção de um detector de ondas gravitacionais que poderia funcionar. A proposta dele, publicada em 1960, consistia de uma barra maciça de alumínio em formato cilíndrico, de aproximadamente 1,5 metros de comprimento e um metro de diâmetro, e de alta figura de mérito de oscilação mecânica. Esta barra era suspensa pela região central por uma haste muito fina (poucos milímetros de diâmetro) e forte, cujas duas extremidades eram presas, cada uma, a duas pilhas de blocos de aço e borracha, para amortecer as vibrações do chão do laboratório, e mantida dentro de uma câmara de vácuo de forma a deixá-la livre para oscilar, sem a influência de ruído sonoro ou sísmico. Dezenas de cristais piezoelétricos eram colados na região central da barra e conectados em série. Cristais piezoelétricos, quando deformados, produzem voltagens (eles são usados, por exemplo, em acendedores de fogão). Quando eles são conectados em série, a voltagem resultante é a soma das voltagens de todos os cristais. Mesmo para pequenas deformações da barra, causadas pela passagem de uma onda gravitacional, a voltagem resultante poderia, se não fosse tão franca, ser detectada. Esses cristais piezoelétricos faziam o papel de transdutores (sensores), que transformavam as energias vibracionais mecânicas em elétricas. Quando a onda gravitacional passasse, parte da energia da onda era convertida em energia mecânica de oscilação da barra. A conversão era maximizada se a onda chegasse perpendicular à barra e tivesse polarização mais (+), considerando que o eixo da barra estava alinhado com o eixo x (ou y). Utilizando este princípio, essas barras de Weber chegaram a ter sensibilidade para medir uma onda com amplitude adimensional h da ordem de 10^{-15} , o que, infelizmente, não foi suficiente para uma detecção, apesar de Weber ter sempre afirmado que havia detectado ondas gravitacionais em 1969.

A geração seguinte de barras foi construída a partir da década de 70. Elas eram, na sua maioria, barras com 3 metros de comprimento e 60 cm de diâmetro e eram todas resfriadas a temperaturas próximas da temperatura de ebulição do hélio líquido (4,2 K). Desta forma, o ruído térmico (Browniano) era muito menor. Para ajudar, nestas baixas temperaturas, as figuras de mérito mecânica dos sólidos (Q_m) eram bem maiores que as mesmas à temperatura ambiente, e a propriedade de supercondutividade do nióbio poderia ser utilizada para a operação dos transdutores. Desta forma, os novos transdutores puderam “aposentar” os cristais piezoelétricos que estavam sendo utilizados à temperatura ambiente. As barras criogênicas, como eram chamadas, operaram nas décadas de 80, 90 e anos 2000. Elas agora já estão todas “aposentadas” (Niobe aposentada em 2001, Allegro em 2007, Explorer em 2010, Nautilus e Auriga em 2014). Elas chegaram a sensibilidades, em uma banda de 30 Hz em torno de 900 Hz, da ordem de $10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$, que para sinais *bursts* (impulsivos), em $\sim 100\text{Hz}$ da banda desses detectores, correspondia a um $h \sim 10^{-20}$.

A terceira geração de “barras”, na verdade melhor chama-las de “massas ressonantes”, foram as esferas de cobre-alumínio que compunham os detectores Mini-GRAIL, construído na Holanda, e o Mario Schenberg, construído no Brasil. O princípio ainda era o mesmo, de absorção de parte da energia da onda gravitacional, agora por esferas de 68 cm e 65 cm de diâmetro, que correspondiam a 1300 kg e 1150 kg, respectivamente. O Mini-GRAIL operou até 2009 na Universidade de Leiden. O Schenberg operou no IFUSP até 2015 e encontra-se desmontando no INPE, aguardando uma oportunidade para ser remontado no laboratório de ondas gravitacionais Sérgio Ricardo Furtado, no INPE. Ambos chegaram a operar em uma banda de ~ 70 Hz em torno de ~ 3 kHz Hz, com sensibilidade da ordem de $10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$. Maiores sensibilidades podem ser alcançadas se estes projetos tiverem continuidade. A sensibilidade de projeto é algo em torno de $10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$.

Também na década de 70, foram construídos os primeiros interferômetros laser para detecção de ondas gravitacionais. De maneira semelhante a um interferômetro Michelson-Morley, os braços do interferômetro para detecção de ondas gravitacionais são horizontais e perpendiculares entre si. O princípio de detecção dos interferômetros se baseia na simples variação das distâncias relativas produzida pela passagem de uma onda gravitacional. O sinal é maximizado, quando a onda gravitacional chega

perpendicular ao plano que contém o interferômetro e com a polarização mais (+), supondo que os braços estão alinhados com as direções x e y, respectivamente. O princípio de funcionamento do interferômetro do tipo Michelson-Morley detecta esta variação de comprimento dos braços, vejamos por que: O feixe que sai do laser é inicialmente dividido em dois feixes perpendiculares, por um divisor de feixes (um espelho 50% transparente colocado em um ângulo de 45° com o feixe inicial. Cada um dos feixes divididos percorre um dos braços perpendiculares. Ao final de cada braço, esses feixes encontram espelhos 100% refletivos que os enviam de volta ao ponto de partida, o divisor de feixes, que os divide novamente. Parte do feixe que voltou de um braço é juntada com parte do feixe que voltou do outro braço e enviada a um sensor de luz (fotodiodo ou fotodetector). Então, as distâncias entre os espelhos são ajustadas para que os dois feixes fiquem com fases 180° entre si (fases contrárias). Desta forma, não é registrada nenhuma luz no fotodetector. A chegada de uma onda gravitacional muda esta situação de interferência máxima, fazendo com que alguma luz seja registrada no fotodetector.

Na prática, os interferômetros LIGO, que realizaram as primeiras detecções de ondas gravitacionais, são um pouco mais complicados do que isto. Primeiro, porque os feixes de luz em cada braço não vão e voltam apenas uma vez, mas várias. Existem espelhos quase 100%, mas não exatamente 100%, que são colocados próximos do divisor de feixe, formando as chamadas cavidades de Fabry-Perot com os espelhos 100% no final de cada braço. Estes espelhos adicionais fazem com que os feixes façam várias viagens de ida e volta ao longo dos braços, acumulando uma potência em circulação nos braços que pode chegar 100 kW ou mais, apesar da fonte de laser ser de apenas algumas poucas dezenas de Watts (20 W, por exemplo). Segundo, porque existem espelhos que refletem a luz laser que tenta voltar para a fonte de laser, são os chamados espelhos de reciclagem de energia, para não desperdiçar luz laser no detector, aproveitando toda ela. E terceiro, porque também existem espelhos que ficam na frente dos fotodetectores, os chamados espelhos de reciclagem de sinal. Eles têm a finalidade de aumentar a sensibilidade do interferômetro para frequências específicas (desde que esteja dentro da faixa de sensibilidade do interferômetro), em busca de sinais periódicos nessas frequências específicas.

Os interferômetros LIGO tem braços de 4 km de comprimento e estão localizados em Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington), nos EUA, separados cerca de 3 mil km entre si (uma onda gravitacional viajando de um sítio para o outro levaria 10 ms para fazer o percurso). O comprimento de onda do laser utilizado é de 1064 nm ou 1,064 μ m (micron) e a faixa de frequências na qual o LIGO tem a sua maior sensibilidade é de 50Hz até 1kHz. Em torno de 200 Hz a sua sensibilidade chega a $\sim 10^{-23}$ Hz^{-1/2}, mas vai melhorar ainda mais. O grupo do INPE é um dos dois grupos no Brasil que participam desta Colaboração Científica LIGO (sigla LSC em inglês). Ele participa nela desde 2011. Existem ainda outros interferômetros: o Virgo, em Cascina (perto de Pisa), na Itália, com braços de 3 km, GEO600, em Hannover, na Alemanha, com braços de 600 metros, KAGRA, na mina de Kamioka, no Japão, subterrâneo, com braços de 3 km e espelhos resfriados, e um projeto de construção na Índia, o LIGO Índia.

Existem também projetos de interferometria laser no espaço tais como o LISA, DECIGO e BBO. O mais famoso deles é o *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA), desenvolvido pela ESA e a NASA, que pretende colocar três espaçonaves em órbita do Sol, à mesma distância que a Terra se encontra dele, mas cerca de 20° atrasada em relação à órbita da Terra. Estas três espaçonaves formariam um triângulo equilátero de 2,5 milhões de quilômetros de lado. Feixes de laser de 2 W seriam enviados de cada espaçonave para as duas outras e recebido por elas por telescópios refletores. O lançamento está previsto para ocorrer antes de 2030. Uma boa parcela do sucesso desta missão já ocorreu no lançamento e funcionamento do *LISA Pathfinder*. A sensibilidade alcançada em aceleração medida ultrapassou todos os requisitos previstos para o *LISA Pathfinder* e inclusive os necessários para o LISA. Diante deste excelente desempenho e da recente detecção de ondas gravitacionais por interferometria laser, o projeto LISA recebeu várias aprovações que o colocaram novamente na previsão de lançamento e voltou a receber apoio da NASA. O LISA vai ter a sua melhor sensibilidade na faixa em frequências de 1 a 100 mHz e o DECIGO na faixa de 100 mHz a 10 Hz. O BBO (*Big Bang Observer*) também vai ter sensibilidade nessa faixa do DECIGO e pretende descobrir se o universo “nasceu” no Big Bang ou teve uma existência anterior e, neste caso, o Big Bang não existiu exatamente como descrito no modelo padrão.

Outro método de detecção de ondas gravitacionais menos conhecido é o *Pulsar timing array*. Trata-se do uso de radiotelescópios para monitorar a chegada dos pulsos dos

pulsares mais regulares que existem sendo observados. Atualmente são cerca de 40 a 50 o número de pulsares regulares que são observados. Eles são pulsares isolados, que mantem uma regularidade excepcional no seu período de rotação. Desta forma, podemos prever com precisão os momentos exatos da chegada dos seus pulsos, levando-se em conta as correções Doppler devidas à rotação da Terra em torno de si mesma e devidas à translação da Terra em torno do Sol. Comparamos, então, estes momentos teóricos previstos pelo modelo com os momentos reais observados com radiotelescópios, procurando por desvios ou resíduos, ou seja, discrepâncias entre os tempos teóricos previstos e os medidos/observados. Estes resíduos seriam indícios de que uma onda gravitacional passou pelo pulsar ou pela Terra. A maior sensibilidade destes projetos está na faixa de 10^{-9} a 10^{-8} Hz, que corresponde a período da ordem de décadas. Portanto, os 40-50 pulsares não precisam ser monitorados continuamente. Basta que observemos cada um por cerca de algumas horas a cada 6 meses.

Em 2014, o grupo do projeto *Bicep2* anunciou que havia detectado ondas gravitacionais. Infelizmente, uma análise dos dados mais detalhada mostrou que isto não havia ocorrido. Entretanto, esta metodologia de busca continua sendo utilizada até hoje. O que estes grupos buscam são indicações de polarização do modo B na radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas. Elas seriam evidências de ondas gravitacionais na faixa de frequência de 10^{-18} a 10^{-15} Hz, que correspondem a comprimentos de onda da ordem do universo observável, teriam origem no Big Bang e no período do universo que ele sofreu a inflação e estariam registradas nos fótons que conseguiram desacoplar com a matéria quando o universo foi ficando cada vez menos denso e passou a ser transparente para estes fótons. Isto ocorreu quando o universo tinha cerca de 380 mil anos de idade, na teoria na qual ele “nasceu” no Big Bang.

Existem ainda outros métodos de detecção, porém menos explorados. Existem poucos e são pequenos os grupos tentando estes métodos. Eles procuram detectar ondas gravitacionais em frequências mais altas (acima de 100 kHz), mas como não são previstos processos físicos/astrofísicos eficientes para a produção de ondas gravitacionais nessas faixas de frequências e as sensibilidades destes detectores não são muito boas ou promissoras, estes métodos não serão mencionados nesta apostila.

10.3 FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Todas as tentativas de produção artificial de ondas gravitacionais pelo homem capazes de serem detectadas pelos detectores atuais estão condenadas ao fracasso, mesmo envolvendo energias fornecidas por bombas atômicas ou de hidrogênio. As amplitudes produzidas estão ordens e ordens de magnitude aquém do detectável.

Entretanto, existem fontes astrofísicas no universo capazes de produzir sinais tão fortes em ondas gravitacionais (variações significativas de momento de quadrupolo de massa), que mesmo estando a milhões ou bilhões de anos-luz (a-l) da Terra, os sinais poderiam ser detectados (como foram realmente).

Existem várias fontes astrofísicas de ondas gravitacionais:

- sistemas binários compactos, tais como pares de buracos negros (estelares ou supermassivos), pares de estrelas de nêutrons ou pares envolvendo um buraco negro e uma estrela de nêutrons, tanto na sua fase orbital, como na coalescência e *ring-down*;
- sistemas binários de outras estrelas (anãs-brancas e/ou estrelas comuns);
- supernovas;
- buracos negros em oscilação, por causa de algo que caiu neles;
- estrelas de nêutrons em oscilação, por causa de algo que caiu nelas;
- estrelas de nêutrons em rotação não axialmente simétrica (presença de uma “montanha”, por exemplo);
- o Big Bang e o período inflacionário;
- objetos astrofísicos exóticos, cuja existência ainda não foi confirmada, tais como: cordas cósmicas, buracos negros primordiais, bolhas cósmicas, estrelas de bósons e estrelas estranhas;
- fundo cosmológico produzido por um conjunto muito grande de fontes astrofísicas (sistemas binários e supernovas, principalmente).

De todas estas fontes, as primeiras a serem detectadas forma sistemas binários de buracos negros e estrelas, como vamos ver na próxima seção.

10.4 A ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS FOI INAUGURADA!

Em 14 de setembro de 2015, ainda durante o período de testes de engenharia (chamado de ER8), as versões avançadas dos interferômetros LIGO (os aLIGO) detectaram um sinal forte de ondas gravitacionais vindo de uma região do céu próxima do polo sul da Terra. Foi uma surpresa, por dois aspectos: primeiro, porque os aLIGO iam entrar em operação de busca astrofísica (a chamada O1) somente a partir do dia 18 de setembro e, portanto, ninguém estava esperando uma detecção tão cedo (o fato é que eles já estavam com excelente sensibilidade); segundo, porque o sinal era muito forte ($h \sim 10^{-21}$) e com componentes em frequências (de 30Hz a 250Hz) exatamente na faixa de maior sensibilidade dos aLIGO. Parecia um sinal artificial introduzido no sistema de aquisição de dados, num processo conhecido por injeção de sinal, já utilizado algumas vezes para se verificar se os programas computacionais construídos eram capazes de detectar sinais de ondas gravitacionais nos dados. Entretanto, foi verificado que não ocorreram injeções artificiais e após um mês de análises, os membros das colaborações LIGO e Virgo tinham mais de 5! em significância estatística que estavam lidando com um sinal verdadeiro, que foi batizado de GW150914, em razão da data na qual foi detectado.

O sinal, com duração de aproximadamente 0,2 segundos, começou a ser detectado primeiro no interferômetro de Livingston (Louisiana) e cerca de 7 milissegundos mais tarde no de Hanford (estado de Washington). Após a análise completa, concluiu-se que se tratava do sinal das ondas gravitacionais emitidas nas últimas ~ 5 órbitas e coalescência de dois buracos negros estelares pertencentes a um sistema binário. As massas dos buracos negros eram de 36 e 29 massas solares. Após a coalescência restou um buraco negro de 62 massas solares com um spin igual a 0,65 (1 é o máximo). Cerca de 3 massas solares foram emitidas no pulso final de ondas gravitacionais. A energia libertada pelo pico do evento GW150914 foi mais do que seis vezes maior do que a luz combinada de todas as estrelas e galáxias no universo observável. A potência no pico da emissão foi de $3,6 \times 10^{56}$ erg/s. Este evento ocorreu a uma distância de 1,3 bilhões de anos-luz da Terra. Os buracos negros, antes do choque, chegaram a orbitar entre si com 60% da velocidade da luz! Imagine dois gigantes num “pega” a essa velocidade! Para os

aLIGO detectarem eles foram capazes de perceber uma variação na distância entre os espelhos de apenas $\sim 10^{-18}$ metros, o que é mil vezes menor que o diâmetro de um próton! Uma imagem dessas ondas pode ser vista na FIGURA 10.3.

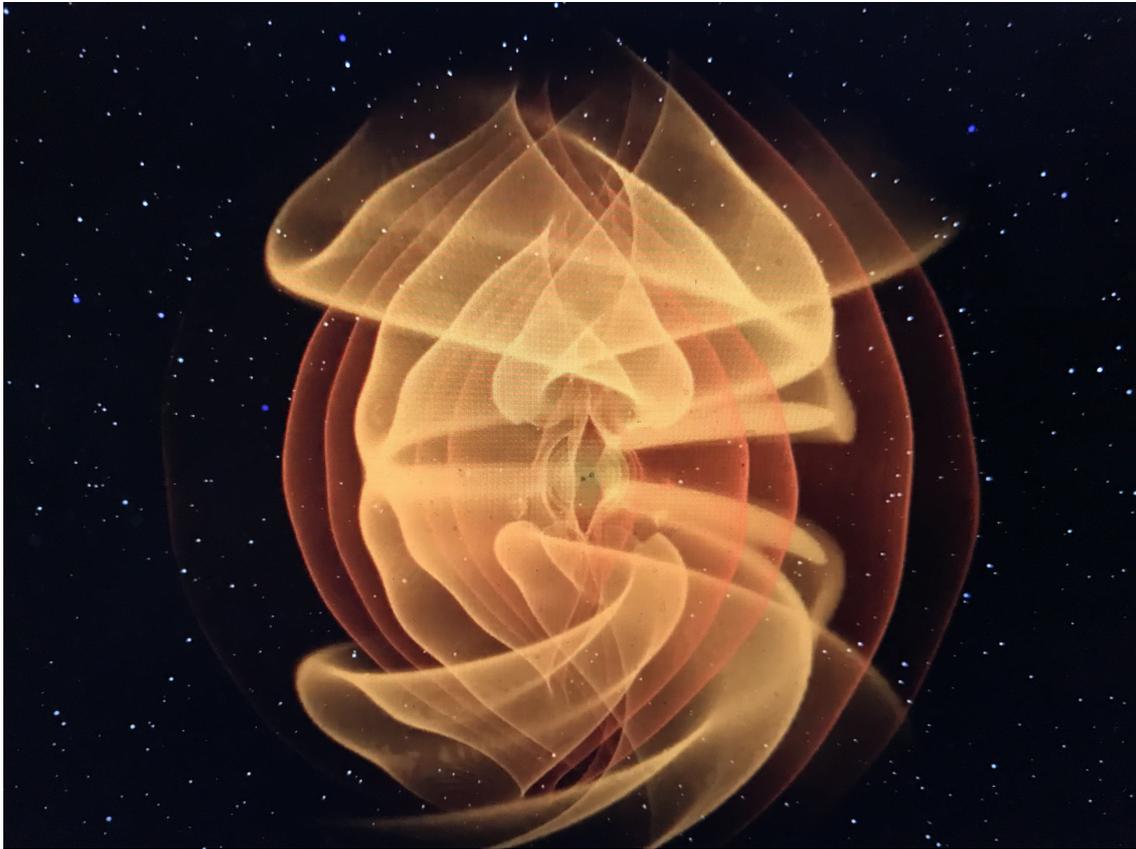


Figura 10.3: Ondas gravitacionais de GW150914 <https://www.youtube.com/watch?v=kkKDs59zcdI>

Em 12 de outubro de 2015 foi detectado outro evento na corrida O1, mas a significância estatística era baixa (menor que 2σ) e, portanto, não foi levado muito a sério. Porém, em 26 de dezembro chegou outro também com significância estatística em torno de 5σ . No total foram detectadas, com alta significância estatística e até o final da corrida O2 (a qual se encerrou em 25 de agosto de 2017), as últimas órbitas e coalescência de cinco binárias de buracos negros (batizadas, respectivamente de GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814), além de uma binária de estrelas de nêutrons. Esta última binária (GW170817), detectada no dia 17 de agosto de 2017, deu um show após a coalescência das estrelas de nêutrons.

Com o evento GW150914 foi inaugurada a Astronomia ou Astrofísica de Ondas Gravitacionais, uma nova janela para se observar o universo, mas com o evento

GW170817 foi inaugurada uma outra nova astronomia, a Astronomia Multimessageira com Ondas Gravitacionais que talvez, com mais probabilidade que a primeira, vá revolucionar o conhecimento que temos do universo.

Essas descobertas foram tão importantes que rederam o prêmio Nobel de Física de 2017. Os três agraciados: Rainer Weiss, Kip S. Thorne e Barry C. Barish, representam bem a colaboração que detectou estes eventos.

10.5 O QUE APRENDEMOS COM AS PRIMEIRAS ONDAS GRAVITACIONAIS OBSERVADAS?

Como mencionado na seção anterior, até a segunda corrida observacional O2, que se encerrou em 25 de agosto do 2017, foram detectados, com alta significância estatística, cinco eventos envolvendo pares de buracos negros e um evento envolvendo um par de estrelas de nêutrons. Na tabela 10.1, são resumidos os parâmetros principais obtidos para os pares de buracos negros detectados através da análise dos sinais *chirp* (gorjeio) da evolução das suas órbitas, seguidos da coalescência e *ring down* (ressoar) devido ao choque do par.

	GW150914	GW151226	GW170104	GW170608	GW170814
Razão S/R	23,7	13,0	13	13	15
Taxa de falso alarme	(~ 400 mil anos) ⁻¹	(~ 400 mil anos) ⁻¹	(70 mil anos) ⁻¹	(160 mil anos) ⁻¹	(140 mil anos) ⁻¹
M primária	36,2 M _☉	14,2 M _☉	31,2 M _☉	12 M _☉	30,5 M _☉
M secundária	29,1 M _☉	7,5 M _☉	19,4 M _☉	7 M _☉	25,3 M _☉
Massa total	65,3 M _☉	21,8 M _☉	50,7 M _☉	19 M _☉	55,9 M _☉
Massa final	62,3 M _☉	20,8 M _☉	48,7 M _☉	18,0 M _☉	53,2 M _☉
Spin final	0,68	0,74	0,64	0,69	0,70
E irradiada	3,0 M _☉ c ²	1,0 M _☉ c ²	2,0 M _☉ c ²	0,85 M _☉ c ²	2,7 M _☉ c ²
Pico de Luminosidade	3,6 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,3 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,1 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,4 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,7 x 10 ⁵⁶ erg/s
Distância de luminosidade	420 Mpc (1,4 G a-l)	440 Mpc (1,4 G a-l)	880 Mpc (2,9 G a-l)	340 Mpc (1,1 G a-l)	540 Mpc (1,8 G a-l)
<i>Redshift</i>	0.09	0,09	0,18	0,07	0,11

Tab. 10.1–Parâmetros dos eventos envolvendo pares de buracos negros (a-l é anos-luz)

Diferentemente dos quatro primeiros, que foram detectados apenas pelos dois interferômetros aLIGO, o último, GW170814, também foi detectado pelo interferômetro Virgo. Por esta razão, a localização do último evento foi muito mais precisa que as dos anteriores. Se apenas usássemos as informações dos dois aLIGO, o evento GW170814 seria localizado em uma área de 1160 graus (com 90% de credibilidade). Adicionando

as informações do interferômetro Virgo, a área de localização fica reduzida para apenas 60 graus!

A detecção tripla de GW170814 também permitiu que fosse possível se testar a natureza das polarizações das ondas gravitacionais, permitindo assim uma nova classe de testes fenomenológicos da gravitação e da teoria da Relatividade Geral de Einstein. Foi encontrado que os dados favorecem fortemente as polarizações tensoriais puras de ondas gravitacionais, sobre as polarizações escalares ou vetoriais puras. Um resultado que vai no sentido da comprovação da relatividade geral, já que ela só prevê as componentes tensoriais (mais e cruzada).

Em média, as massas encontradas para os buracos negros detectados foi um pouco maior do que se esperava, com base no conhecimento que tínhamos dos sistemas binários emissores de raios-X. Isto fez com que a própria teoria de evolução estelar, para explicar como esses buracos negros com mais massa foram formados, fosse colocada em cheque. Por outro lado, também levantou a hipótese de que estes buracos negros mais massivos não teriam origem na evolução estelar, mas seriam produtos do universo primordial, ou seja, teriam origem no nascimento do universo, como defeitos topológicos do Big Bang. Nesta hipótese eles estariam contribuindo para uma parcela da massa da matéria escura no universo.

Essas detecções também serviram para se limitar a massa da partícula gráviton, que na teoria quântica seria o quantum do campo de ondas gravitacionais e, portanto, a sua partícula mediadora. A massa do gráviton, caso ele tenha massa (a teoria da relatividade geral postula que ele não tem, ou seja, que a massa dele é zero), não poderia ser maior que 10^{-58} kg!

Vários outros testes de teorias da gravitação (que incluem a relatividade geral), foram feitos com os resultados destes cinco eventos envolvendo binárias de buracos negros, porém eles estão fora do escopo desta apostila, em razão de serem de um nível mais técnico e avançado da física.

Distintamente de todos os cinco eventos descritos anteriormente, envolvendo pares de buracos negros, o sexto evento, observado em 17 de agosto de 2017 e, portanto, batizado de GW170817, emitiu muita radiação no espectro eletromagnético.

O evento GW170817 tratava-se das ondas gravitacionais observadas das últimas ~1500 órbitas e coalescência de um par de estrelas de nêutrons. A duração do evento registrado foi de aproximadamente 56 segundos! Batendo de longe o recorde anterior de GW151226, o mais longo dos eventos envolvendo buracos negros, que havia demorado ~1,7 segundos! Ele também foi o mais próximo, distante “apenas” 40 Mpc (130 M a-l). Os parâmetros deste evento são apresentados na tabela 10.2, supondo que as estrelas de nêutrons não tinham muita rotação.

Razão S/R	32,4
Taxa de falso alarme	(1,1 milhões anos) ⁻¹
M primária	1,48 M _☉
M secundária	1,26 M _☉
Massa total	2,74 M _☉
Massa final	2,71 M _☉
E irradiada	> 0,025 M _☉ c ²
Pico de Luminosidade	3,6 x 10 ⁵⁶ erg/s
Distância de luminosidade	40 Mpc (130 M a-l)
<i>Redshift</i>	0,008

Tabela 10.2–Parâmetros do evento GW170817 (a-l é anos-luz).

Por ter sido detectado por três interferômetros, a localização do evento, com 90% de confiança, ficou restrita a uma área no céu menor que 55°. Isto ajudou muito todos os outros grupos de astrônomos que observam no espectro eletromagnético a localizarem em qual galáxia o evento ocorreu. E eles tinham muitas razões para fazerem isto. Cerca de 1,7 segundos depois do horário que os interferômetros laser haviam registrado que as estrelas de nêutrons haviam coalescido, os satélites *Fermi* (NASA) e *INTEGRAL* (ESA) detectaram um pulso de raios-gama. Ficava claro que se tratava de uma coalescência de estrelas de nêutrons e que elas realmente, como se suspeitava, eram a causa de *bursts* de raios-gama de curta duração. Foi um alarme geral para a comunidade de astrônomos que havia assinado acordos de busca multimessageira com a Colaboração Científica LIGO.

Esta comunidade, formada por cerca de 70 grupos, começou uma busca implacável por sinais eletromagnéticos nas bandas de rádio, infravermelho, óptico, ultravioleta, raios-X e por raios cósmicos e neutrinos. Tanto a busca, como os resultados da busca foram interessantíssimos e os resultados acabaram sendo publicados em um trabalho com mais de 3700 autores.

O primeiro sinal eletromagnético detectado depois das ondas gravitacionais e do pulso de raios-gama foi um sinal no óptico. Ele foi encontrado pelo grupo do telescópio Swope, quase 11 horas depois, na galáxia NGC4993, que justamente está localizada dentro da área no céu que os interferômetros laser disseram ter ocorrido o evento e dista 130 milhões de anos-luz da Terra, a mesma distância na qual eles haviam dito que o evento ocorrera. Vários outros grupos, observando no óptico, detectaram em seguida. Entre eles estão o da *Dark Energy Camera* e do *T80 South*, ambos com participação de brasileiros (e brasileiras). Em seguida, foi detectado sinal, ainda dentro das primeiras 24 horas da coalescência, no infravermelho e no ultravioleta. Sinais em raios-X e rádio só apareceram 9 e 16 dias depois, respectivamente, quando os sinais no ultravioleta e no óptico já tinham desaparecido e o em infravermelho estava por terminar. O sinal de raios-X durou apenas poucas horas. Porém, o de rádio foi o de mais longa duração. Ele durou meses, com um pico a 149 dias depois da coalescência.

A primeira conclusão de toda esta observação multimessageira, pelo fato do pulso de raios-gama ter chegado apenas 1,7 segundos depois da coalescência das duas estrelas de nêutrons, foi que a velocidade das ondas gravitacionais não pode diferir mais do que uma parte em 10^{15} da velocidade das ondas eletromagnéticas. Desta forma, uma série de teorias de gravitação que previam diferenças de velocidades maiores do que esta, tiveram que ser descartadas ou revisadas.

As ondas gravitacionais sozinhas forneceram elementos suficientes no caso de GW170817 para se tirar três conclusões (entre outras tantas): novamente, as polarizações das ondas gravitacionais são consistentes com a natureza tensorial e a massa do gráviton não poderia ser maior que 10^{-58} kg, resultados que estão em concordância com a teoria da Relatividade Geral, e pôde-se dizer algo sobre a equação de estado da matéria nuclear de estrelas de nêutrons.

Também foi concluído, agora a partir das curvas de luz no espectro eletromagnético, que o choque das duas estrelas de nêutrons desencadeou um evento chamado na literatura de *Quilonova*, o qual, no caso de GW170817, teria sido o responsável por produzir, pelo menos, $\sim 0,05$ massas solares (ou cerca de 17 mil Terras) de elementos pesados, com número atômico maior que o do ferro, incluindo ouro, platina e urânio, demonstrando que coalescências de estrelas de nêutrons desempenham um papel no processo r de nucleossíntese no Universo.

Finalmente, a observação de GW170817 permitiu o cálculo da constante de Hubble de forma independente dos métodos astronômicos clássicos. O resultado foi consistente com os valores obtidos anteriormente por observações no espectro eletromagnético. Precisão maiores são previstas em detecções futuras de ondas gravitacionais.

Infelizmente, não foi possível se determinar se as duas estrelas de nêutrons, após coalescerem, formaram uma estrela de nêutrons mais massiva (de $2,74 M_{\odot}$) ou um buraco negro. O sinal em ondas gravitacionais que indicaria qual teria sido o produto final, foi fraco demais para ser detectado pelos interferômetros laser aLIGO e Virgo. No futuro, estes detectores deverão estar operando com maior sensibilidade e/ou podemos ter sorte de observar coalescência mais próximas de estrelas de nêutrons.

10.6 E QUAL É O FUTURO DA ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS?

Detectores de ondas gravitacionais, desde os tempos de Weber, sempre estiveram em continuo aperfeiçoamento. Não foi diferente com o LIGO e o Virgo. Neste processo de aperfeiçoamento estes dois últimos acabaram detectando ondas gravitacionais de fato: o LIGO, na sua versão aLIGO, pela primeira vez em 2015, e o Virgo em 2017. Eles vão continuar a serem aperfeiçoados, com o objetivo de observarem mais eventos, mais fracos e/ou mais distantes. A próxima versão do LIGO, que vai substituir o aLIGO, é o A+, que vai entrar em operação no final de 2018, juntamente com uma versão aperfeiçoada do Virgo avançado, na chamada terceira corrida observacional (O3). Nessa versão A+ do LIGO, será realizada *squeezing* da luz laser, uma técnica que melhora a precisão das medidas e, com isto, a sensibilidade do interferômetro. O A+ vai sofrer

alguns ajustes e ainda operar por mais duas corridas O4 e O5. Depois ele sofrerá modificações substanciais. Os espelhos de 40 kg de sílica (vidro) serão trocados por espelhos de 200 kg de silício, os quais serão resfriados e mantidos a temperatura de 123K, na qual o silício apresenta um ruído térmico muito reduzido por causa de uma variação anômala na sua expansão térmica nesta temperatura. Esta versão se chama *LIGO Voyager*, e o grupo de ondas gravitacionais do INPE (GWINPE) tem participação direta no desenvolvimento deste projeto, que deverá estar operacional em torno de 2027. Uma outra parte do GWINPE trabalha na identificação dos ruídos na análise de dados e vai estar trabalhando em todas essas corridas, inclusive nas do *LIGO Voyager*.

A sensibilidade da versão A+ na corrida O5 será cerca de 3 vezes melhor em amplitude que a versão que operou em O2. Isto significa que os interferômetros LIGO A+ vão conseguir observar a distâncias 3 vezes maiores, ou seja, volumes do universo 27 vezes maiores (o volume vai com o cubo do raio). A consequência disto é muito animadora. Ora, detectamos até agora cinco pares de buracos negros e um par de estrelas de nêutrons e O5 vai ser uma corrida mais longa que O1 e O2 juntas, portanto, espera-se mais de uma centena de observações para O5, e a versão *LIGO Voyager* deve observar centenas a cada ano, depois que todos os ajustes forem feitos nela.

Paralelamente à operação do *LIGO Voyager* será iniciada a construção de um outro interferômetro, em outro local dos EUA, o chamado *Cosmic Explorer*. Além de também ter os espelhos resfriados, para diminuir o ruído Browniano, ele terá braços de 40 km! A previsão é que ele vai ser capaz de observar centenas de milhares de eventos em alguns anos de operação. Mas para isto, ele não pode trabalhar sozinho. Um grande interferômetro também será construído na Europa, chamado de *Einstein Telescope* ou ET, com braços de 10 km, em forma triangular, também com espelhos resfriados e subterrâneo, como o KAGRA japonês.

Estes novos interferômetros *Cosmic Explorer* e ET estarão operando a partir da década de 2030, juntamente com o LISA. Outra coisa muito interessante é que binárias de buracos negros estelares e estrelas de nêutrons que o LISA detectar entrarão na faixa de detecção daqueles interferômetros de solo cerca de 10 anos depois, para coalescerem! Portanto, poderemos prever com dez anos de antecedência o momento e local exato dessas coalescências, permitindo que os astrônomos/astrofísicos multimensageiros planejem com bastante antecedência programas de observação. Vai haver até tempo

para submeterem projetos de observação nas agências de fomento à pesquisa! Paralelamente, as técnicas de *Pulsar Timing* e Modo B da radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas já deverão ter frutos observacionais.

Desta forma, tudo indica que o futuro para a Astrofísica de Ondas Gravitacionais neste século XXI e nos subseqüentes será brilhante.

Um aspecto muito interessante, é que a observação de ondas gravitacionais vai permitir que se descubra se o universo “nasceu” no Big Bang ou teve uma existência anterior ao momento que dizemos ter ocorrido o Big Bang (há 13,8 bilhões de anos atrás), isto porque, diferentemente das ondas eletromagnéticas, o universo sempre foi transparente para as ondas gravitacionais, mesmo durante a monstruosa densidade no momento do Big Bang. Desta forma, as ondas gravitacionais poderão nos dizer exatamente o que ocorreu com o universo. Esta informação vai estar registrada no espectro da radiação de fundo cosmológica em ondas gravitacionais. Se houve um Bing Bang o espectro vai ter uma “cara”. Se, por outro lado, houve uma fase do universo anterior, este se contraiu, mas não chegou a se reduzir a um ponto, mas sim a um volume finito não nulo, o espectro de fundo vai ter outra “cara”, diferente da primeira. Sabemos identificar, a partir da “cara” dos espectros de fundo, o que aconteceu com o universo, portanto, seremos capazes de descobrir como o universo nasceu, basta que consigamos medir este espectro de fundo cosmológico em ondas gravitacionais.

Além de nos dizer como o universo teve início, a astronomia de ondas gravitacionais vai revolucionar o nosso conhecimento da física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade, tais como a matéria escura e a energia escura.

Provavelmente uma nova física vai ser reescrita com informações obtidas através das observações multimessageiras envolvendo ondas gravitacionais. Certamente engenheiros no futuro vão, a partir desta nova física, desenvolver novas tecnologias, que revolucionarão a maneira como vivemos o dia-a-dia.

10.7 BIBLIOGRAFIA

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K., et al. ; Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters (Print)*, v. 116, p. 061102-1-061102-16, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K. , et al. ; GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence. *Physical Review Letters (Print)*, v. 116, p. 241103, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K. , et al. ; Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run. *Physical Review X*, v. 6, p. 041015-1-041015-36, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G.

ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al. ; GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. PHYSICAL REVIEW LETTERS **JCR**, v. 118, p. 221101-1-221101-17, 2017.

ABBOTT, B. P. ABBOTT, R. ABBOTT, T. D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R. X. ADYA, V. B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. Aguiar, O. D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P. A. AMATO, A. , et al. ; GW170608: Observation of a 19 Solar-mass Binary Black Hole Coalescence. The Astrophysical Journal, v. 851, p. L35, 2017.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al. ; GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. PHYSICAL REVIEW LETTERS **JCR**, v. 119, p. 141101, 2017.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al.; GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. PHYSICAL REVIEW LETTERS **JCR**, v. 119, p. 161101, 2017.

Aguiar, Odylio Denys. Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors. Research in Astronomy and Astrophysics, v. 11, p. 1-42, 2011.

Aguiar, O D; BARROSO, Joaquim José Carvalho N C CASTRO, Pedro José de Cedeño M, C E Da Silva Costa, C F de Araujo, J C N Evangelista, E F D Furtado, Sergio R Miranda, O D Moraes, P H R S Pereira, E S Silveira, P R Stellati, C OLIVEIRA JR, Nei Fernandes de Gratens, Xavier de Paula, L A N de Souza, Sérgio T Marinho Jr, R.M. Oliveira, F G Frajuca, C Bortoli, F S Pires, R Bessada, D F A Magalhães, Nadja S. , et al. ; Status Report of the Schenberg Gravitational Wave Antenna. Journal of Physics. Conference Series (Print), v. 363, p. 012003, 2012.

LIGO, <http://www.ligo.org/> e <http://www.ligo.caltech.edu/>

VIRGO, <http://www.virgo-gw.eu>

GEO600, <http://www.geo600.org/>

KAGRA <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

LIGO-Índia <http://gw-indigo.org/tiki-index.php?page=LIGO-India>

LISA, <http://sci.esa.int/lisa/> and <http://lisa.nasa.gov/>

DECIGO <http://sites.google.com/site/amaldi8projectwednesday624/abstracts>

Big Bang Observer (BBO), http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang_Observer

NANOGrav, <http://www.nanograv.org/>

Parkes Pulsar Timing Array (PPTA), <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ppta>

European Pulsar Timing Array (EPTA), <http://www.epta.eu.org>

Square Kilometre Array (SKA), <http://www.skatelescope.org/>

EINSTEIN Telescope, <http://www.et-gw.eu/>

Mario SCHENBERG, <http://www.das.inpe.br/graviton/index.html>

and <http://www.das.inpe.br/video/>

MINIGRAIL, <http://www.minigrail.nl/>

HFGW <http://www.sr.bham.ac.uk/gravity/project.php?project=MHzDetector>