

Detectores de ondas gravitacionais

Odylio Denys Aguiar

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Resumo

Neste artigo explicamos o que são as ondas gravitacionais previstas pela teoria da relatividade geral de Einstein, falamos de suas fontes astrofísicas e cosmológicas e dos detectores que foram utilizados para a sua busca. Completamos o artigo com a menção aos detectores futuros, que estão sendo projetados para dar uma nova dimensão à astronomia de ondas gravitacionais e à astronomia multimessenger envolvendo ondas gravitacionais.

Abstract

In this article we explain what are the gravitational waves predicted by Einstein's theory of general relativity, we talk about their astrophysical and cosmological sources and the detectors that were used for their search. We completed the article with the mention of future detectors, which are being designed to give a new dimension to gravitational wave astronomy and multimessenger astronomy involving gravitational waves.

Palavras-chave: astronomia, detectores, ondas gravitacionais.

Keywords: astronomy, detectors, gravitational waves.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n2.35942](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n2.35942)

1 Introdução

A astronomia de ondas gravitacionais se tornou realidade em 14 de setembro de 2015 com a detecção das ondas gravitacionais do evento *GW150914*, oriundas das últimas órbitas e coalescência de uma binária formada por dois buracos negros de 29 e 36 massas solares [1]. Os desafios tecnológicos que tiveram que ser vencidos para que esta detecção se tornasse realidade (de forma inquestionável) foram certamente alguns dos maiores já enfrentados por físicos e engenheiros experimentais do mundo inteiro; talvez maiores até que os enfrentados no Projeto Manhattan ou no Programa Apollo para ir à Lua. Estes projetos, apesar de envolverem muito mais recursos humanos e financeiros, foram realizados com tecnologias dos anos 40 e 60, respectivamente. No caso da detecção de ondas gravitacionais, foram necessários 50 anos, desde as primeiras tentativas com Joseph Weber, nos anos 60, e coincidentemente 100 anos após a sua previsão teórica por Albert Einstein, para que ela ocorresse, inaugurando um novo ramo do conhecimento: a astronomia de ondas gravitacionais.

Para que isto se tornasse realidade, vários tipos

de detectores foram projetados e construídos ao longo desses 50 anos. Alguns deles ainda estão em operação, tentando detectar ondas gravitacionais. Neste artigo, vamos falar sobre eles: os do passado, do presente e do futuro.

Mas antes disso, precisamos explicar rapidamente o que são ondas gravitacionais, como elas se propagam e atuam nos objetos e quais são as suas fontes no Universo.

2 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.

Para Isaac Newton, que formulou a teoria da gravitação, publicada no livro *Principia* em 1687, 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 esteja 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. Segunda 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

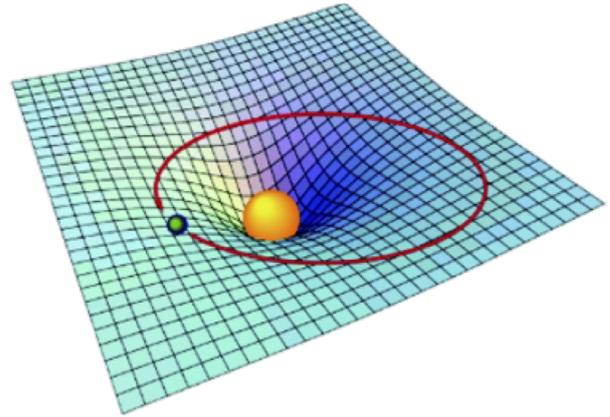


Figura 1: Na teoria da relatividade geral de Einstein, as massas, principalmente as grandes, causariam deformação no espaço-tempo, de forma semelhante à deformação causada por uma bola de boliche em um colchão de borracha.

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 e em potenciais gravitacionais (altitudes) diferentes. 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 (sim, 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 1). O peso dela deforma o colchão, de maneira que as bolas menores (de bilhar) sentem essa 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 essas 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 da pedra. Einstein batizou essas 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 [2]. Também a partir destas equações, ele provou que essas ondas se propagam também à velocidade da luz.

Depois da confirmação por Hertz da existência das ondas eletromagnéticas em 1887, alguns cientistas, como Oliver Heaviside, Lorentz e Poincaré, suspeitaram e, em alguns casos afirmaram, 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 [3].

Concluindo, ondas gravitacionais são variações no espaço e no tempo (distorções ou curvaturas no contínuo espaço-tempo) causadas por movimentos de massa e/ou energia, e que se propagam, segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, com a velocidade da luz (outras teorias de gravitação podem prever velocidades diferentes, mas nunca maiores que a da luz).

As ondas gravitacionais têm muita semelhança com as ondas eletromagnéticas. Estas são produzidas quando cargas elétricas são aceleradas, por exemplo, nas antenas de estações de rádio, televisão ou telefonia celular. De forma semelhante, as ondas gravitacionais são produzidas quando massas são aceleradas. Só que há uma grande diferença: o efeito causado pelas ondas gravitacionais na matéria é absurdamente mais sutil que o causado pelas ondas eletromagnéticas. Isso tem a ver com o fato que a força gravitacional entre partículas é muito menor que a força elétrica entre partículas com carga. Por exemplo, a força gravitacional atrativa entre dois prótons é 36 ordens de magnitude menor que a força repulsiva entre eles. Outro fator que dificulta ainda mais que ondas gravitacionais sejam “detectadas” é que elas só são emitidas na forma quadrupolar ou em multipolo superior ao quadripolar (octopolar, etc). A razão disto se deve à conservação do momento somada à inexistência de massas negativas na natureza. Em uma binária formada por duas estrelas orbitando uma a outra, a componente dipolar que uma das estrelas aceleradas produz é cancelada pela componente que a outra estrela acelerada

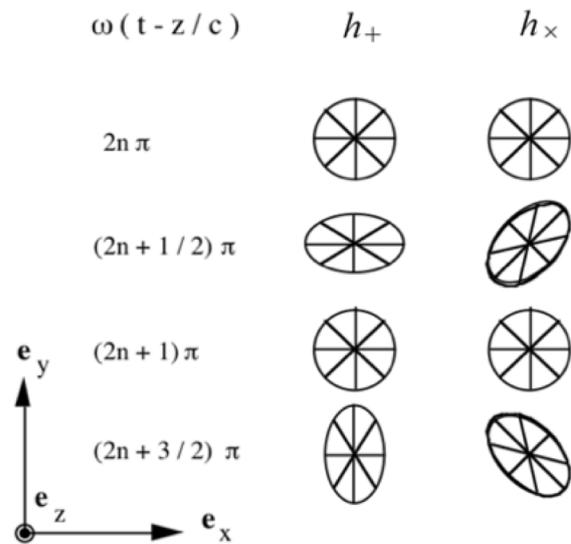


Figura 2: Deformação de um círculo devido a forças induzidas por ondas puras h_+ ou h_x .

produz, porque esta componente está com fase trocada (180° de diferença), devido à conservação do momento. Logicamente, se uma das estrelas fosse formada por massa negativa, as componentes dipolares estariam em fase (0° de diferença) e se somariam, mas a presença de massa negativa não é observada na natureza.

Einstein descobriu, em 1916, que ondas gravitacionais deveriam existir, porque ele as derivou como uma solução das equações de campos da sua teoria da relatividade geral. E em 1918, ele descobriu, também através da sua teoria da relatividade geral, que qualquer onda gravitacional poderia ser representada pela composição de duas polarizações fundamentais: + (mais) e \times (cruzada, ou *cross* em inglês) [4]. Ele também descobriu que, se a teoria da relatividade geral estivesse correta para representar a gravitação no Universo, além dessas previsões, as ondas gravitacionais teriam que se propagar sempre à velocidade da luz. Algumas das outras teorias de gravitação, que foram formuladas por outros pesquisadores depois, preveem outras polarizações e velocidades de propagação menores que a da luz.

Na Figura 2, vemos a deformação que seria causada a um círculo de partículas, caso uma onda gravitacional, com uma das duas polarizações fundamentais, previstas por Einstein, atravessasse perpendicularmente o plano contendo o círculo.

A razão entre o quanto o diâmetro do círculo varia e o próprio diâmetro do círculo é igual à amplitude da onda gravitacional, e é um número adimensional. É esta amplitude, $h \equiv \Delta L/L$, que os detectores de ondas gravitacionais procuram detectar. Uma onda gravitacional composta por essas duas polarizações tem a sua amplitude igual à raiz quadrada da soma quadrática das amplitudes nas duas polarizações.

$$h = \sqrt{h_+^2 + h_\times^2}. \quad (1)$$

Essas polarizações fundamentais são lineares: a polarização *mais* (+) produz contrações e alongações paralelas aos eixos x e y ; e a polarização *cruzada* (\times) produz contrações e alongações formando um ângulo de 45° com os eixos x e y . Podemos formar qualquer outra polarização linear, com estas duas componentes, somando-as em fase (diferença de fase = 0°), basta definirmos as amplitudes dessas componentes. Se colocarmos amplitudes iguais para as duas componentes (+ e \times), teremos uma polarização linear com contrações e alongações formando um ângulo de $22,5^\circ$ com os eixos x e y . Valores de amplitudes diferentes, mantendo a diferença de fase em 0° , mudaria o ângulo que as deformações formam com os eixos.

Um sistema binário de estrelas compactas (buracos negros e/ou estrelas de nêutrons) que estivesse em uma órbita *edge on* em relação à Terra, ou seja, que estivesse orbitando em um plano que contém a Terra (passa pela Terra), seria detectada justamente com uma polarização linear. O ângulo dessa polarização dependeria do ângulo que o plano de órbita do sistema binário forma com o sistema de coordenadas do detector. Se ele estivesse alinhado com o eixo x , seria a polarização +.

Se mudarmos a diferença de fase, de 0° , para outro valor qualquer, deixaremos de ter uma polarização linear para ter uma polarização elíptica. Um caso especial é a polarização circular. Nela a diferença de fase é de 90° e as amplitudes das polarizações + e \times são iguais. Essa polarização seria observada nas ondas gravitacionais oriundas de um sistema binário de estrelas compactas que estivesse posicionado em *face on* em relação à Terra, ou seja, com a Terra na reta que passa pelo centro de massa da binária e que, ao mesmo tempo, é perpendicular ao seu plano de órbita. Para qualquer outra orientação do plano de ór-

bita em relação à Terra, que não fosse *edge on* ou *face on*, as ondas gravitacionais observadas teriam polarização elíptica, cujas componentes de amplitude podem ser quaisquer e a diferença de fase entre as duas componentes lineares é diferente de 0° e 90° .

Então, vemos que se a polarização da onda gravitacional observada for determinada, obteremos a orientação do plano de órbita, em relação ao sistema de coordenadas no sítio do detector, do sistema binário que a produziu.

3 Fontes de ondas gravitacionais

Qualquer sistema composto por massas acopladas que estão em movimentos acelerados em sentidos opostos (por exemplo: um carro em aceleração e a Terra (em reação), um satélite artificial e a Terra (que o atrai e é atraída por ele), uma bola mais o braço de um arremessador e o resto do corpo do arremessador (que recebe o impulso no sentido contrário), ou uma bailarina em rotação (o seu corpo não é simétrico por rotação em torno do seu eixo) emitem ondas gravitacionais.

Porém, ainda vai levar muito tempo para conseguirmos inventar e construir um detector que detecte a amplitude tão diminuta dessas ondas gravitacionais. O próprio Einstein fez algumas contas e achou que essas ondas, mesmo que existissem, nunca seriam detectadas. Isso porque Einstein não tinha ideia que existiam no Universo estrelas compactas, como buracos negros e estrelas de nêutrons e que elas poderiam orbitar com órbitas cada vez mais próximas até se chocarem, emitindo quantidades enormes de ondas gravitacionais que, mesmo a milhões ou bilhões de anos-luz de distância da Terra, ainda assim teriam amplitudes muitas ordens de magnitude maiores que as amplitudes de sinais produzidos na Terra, mesmo utilizando artefatos nucleares (bombas atômicas ou de hidrogênio). Portanto, 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 alguns deles o foram realmente).

Essas fontes astrofísicas de ondas gravitacionais são [5]:

- 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 por rotação (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 essas fontes, as primeiras a serem detectadas foram sistemas binários de buracos negros estelares. São justamente estas fontes astrofísicas e cosmológicas que têm a maior chance de detecção nos detectores atuais, aqueles que estão conseguindo realizar as primeiras detecções.

4 Detectores e métodos de detecção

Os princípios de detecção são baseados em como aproveitar a deformação que a onda gravitacional causa no espaço-tempo quando passa. Levando-se em conta as polarizações lineares puras das ondas gravitacionais, poderiam ser projetados detectores adequados para a detecção dessas ondas.

4.1 Barras ressonantes

Foi Joseph Weber (Figura 3) quem primeiro propôs a construção de um detector de ondas gravitacionais que poderia funcionar [6]. A proposta dele, publicada em 1960, quando implementada, consistia de uma barra maciça de alumínio em formato cilíndrico, de aproximadamente 1,5 metros de comprimento e um metro de diâmetro, e



Figura 3: Joseph Weber e uma das suas barras ressonantes (cortesia do grupo de gravidade da Louisiana State University).

de alta figura de mérito de oscilação mecânica, ressonante em ~ 1660 Hz [7]. Esta barra era suspensa pela região central por uma haste metálica muito fina (poucos milímetros de diâmetro) e forte, cujas duas extremidades eram presas a um arco de alumínio, e este apoiado 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 comprimidos). 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 fraca, ser detectada acima do ruído do circuito. Esses cristais piezoelétricos faziam o papel de transdutores (sensores), que transformavam as energias vibracionais mecâni-

cas 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^{-16} , o que, infelizmente, não foi suficiente para uma detecção, apesar de Weber ter sempre afirmado que havia detectado ondas gravitacionais em 1968 [8] e 1969 [9].

Motivados pelos resultados de Weber, 18 grupos se formaram, principalmente na década de 70, para detectar ondas gravitacionais utilizando barras. Eles foram os grupos de:

- Moscou, na Rússia: dois detectores a 20 km de distância um do outro, compostos por duas barras de liga de alumínio de 1,2 toneladas, 150 cm de comprimento e aproximadamente 60 cm de diâmetro, ressonantes em 1640 Hz e equipadas com transdutores capacitivos [10];
- BTL (Bell Labs), New Jersey, EUA: uma barra de liga de alumínio de 3,7 toneladas, 357 cm de comprimento, cerca de 70 cm de diâmetro, ressonante em 710 Hz, equipada com transdutores PZT-8 [11];
- Rochester, em Rochester (NY), EUA: outra barra de liga de alumínio de 3,7 toneladas, distante 420 km da do grupo BTL acima, com 357 cm de comprimento, 70 cm de diâmetro aproximadamente, ressonante em 710 Hz, equipada com transdutores PZT-8 [12];
- IBM, Yorktown Heights (NY), EUA: uma barra de liga de alumínio de 118 kg, 150 cm de comprimento e 19 cm de diâmetro, ressonante em 1695 Hz, equipada com transdutores PZT-4 [13, 14];
- Bristol, Inglaterra: duas barras divididas e paralelas na mesma câmara de vácuo compostas por duas meias barras de alumínio. Cada barra tinha seu próprio transdutor (feito de material piezoelétrico de niobato de lítio) e amplificador, mas eles compartilhavam uma câmara de vácuo comum e o mesmo sistema de isolamento de vibração. Os sinais das duas barras eram monitorados separadamente e também correlacionados [15];
- Glasgow, Escócia: dois detectores barra separados por 50 m de distância, compostos por duas meias barras de alumínio de 300 kg de massa total e 155 cm de comprimento total, 30 cm de diâmetro, cimentadas por meio de transdutores PZT, ressonantes em 1020 e 1100 Hz [16];
- Reading-Rutherford Lab, Inglaterra: dois detectores barra separados por 30 km de distância, compostos por duas meias barras de liga de alumínio de 625 kg de massa total e 150 cm de comprimento total, 46 cm de diâmetro, cimentadas através de transdutores PZT, ressonantes a 1200 Hz [17];
- Univ. Tóquio, Tóquio, Japão: duas antenas quadradas de 1,4 ton, 165 cm \times 165 cm \times 19 cm feitas de liga de alumínio, ambas no edifício de física, ressonantes a 145 Hz, equipadas com transdutores dc capacitivos [18] (posteriormente, uma dessas antenas foi mecanicamente sintonizada a 60,2 Hz para se tornar *CRAB II* [19]), com sensibilidade $h < 8,4 \times 10^{-21}$ para ondas contínuas; uma antena quadrada de 400 kg, 110 cm \times 110 cm \times 12 cm, feita de liga de alumínio, ressonante a 60,2 Hz, equipada com transdutores dc capacitivos (*CRAB I*) [20], com sensibilidade $h < 1,1 \times 10^{-19}$ para ondas contínuas e algumas outras antenas pequenas ($M < 40$ kg) [21, 22];
- Grupo Munich-Frascati: dois detectores separados por cerca de 700 km de distância (mais tarde, apenas 10 km, quando o detector de Frascati foi movido para Garching) composto por duas barras de liga de alumínio 6061-O de 1,2 tonelada, 154 cm de comprimento por 62,5 cm de diâmetro, ressonante em 1654 Hz, equipado com transdutores piezoelétricos e que pretendia reproduzir a precisão do experimento de Weber, com algumas melhorias de sensibilidade [23–25], e definir os limites superiores mais baixos para as taxas de pulsos de ondas gravitacionais na década de 70 [26]. Eles pegaram um material piezoelétrico com melhores propriedades mecânicas e elétricas e organizaram os piezos de maneira diferente (organizando a deformação e a polarização em paralelo), proporcionando assim um melhor acoplamento. Por causa do novo arranjo topológico dos piezos, eles foram capazes de gerenciar um casamento de impedância entre a “fonte” do sinal, os piezos e a entrada do amplificador. Assim, o detector foi visivelmente melhorado em comparação com a configuração de Weber. Além disso, o processamento do sinal foi realizado com os dois graus de liberdade no espaço de fase, equivalente

à amplitude e fase ou os dois quadrantes independentes, enquanto na maioria dos casos Weber apenas utilizou a energia da barra [27];

- Zhongshan Univ., Guangzhou, China: uma barra de liga de alumínio de 2 ton (1963 kg), 178 cm de comprimento, 71,4 cm de diâmetro, ressonante a 1,5 kHz aproximadamente, usando transdutores PZT-4, e uma antena quadrada de 498 kg, 200 cm², ressonante a 47,3 Hz, equipada com transdutores capacitivos DC [28, 29];

- Beijing Univ., Pequim, China: uma barra de liga de alumínio de 1,3 toneladas, 153 cm de comprimento, 62,5 cm de diâmetro, ressonante a 1687 kHz, equipada com transdutores PZT [30, 31];

- Grupo Meudon, na França: uma antena cônica equipada com transdutores capacitivos [32].

Também seis grupos, Stanford e LSU nos EUA, University of Rome, University of Western Australia (UWA) [33], University of Regina (Canadá) [34, 35], e o grupo de Legnaro, foram formados nas décadas de 60, 70 e 80. Eles decidiram construir detectores de ondas gravitacionais de massa ressonante criogênica (resfriadas a 4,2 K), em vez de detectores de temperatura ambiente, iniciando uma segunda geração de detectores de massa ressonante. Ao mesmo tempo, alguns outros grupos existentes, como os de Tóquio (em colaboração com KEK), Moscou [36], Rochester [37] e Maryland [38] foram mudando para criogenia. Esses grupos fizeram uma série de melhorias significativas em relação ao desenho original de Weber. Uma melhoria foi reduzir a temperatura da barra para as temperaturas do hélio líquido (4,2 K). O segundo foi uma suspensão melhor da barra com maior isolamento de vibração. A terceira foi a utilização de um transdutor ressonante e um amplificador de baixo ruído para observar o movimento da barra.

4.2 As principais barras ressonantes criogênicas

Como já mencionado, a geração seguinte de barras foi criogênica. 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). Dessa forma, o ruído térmico (Browniano) era muito menor. Para ajudar, nessas baixas temperaturas, as figuras de mérito ou fatores de qualidade mecânicos dos sólidos

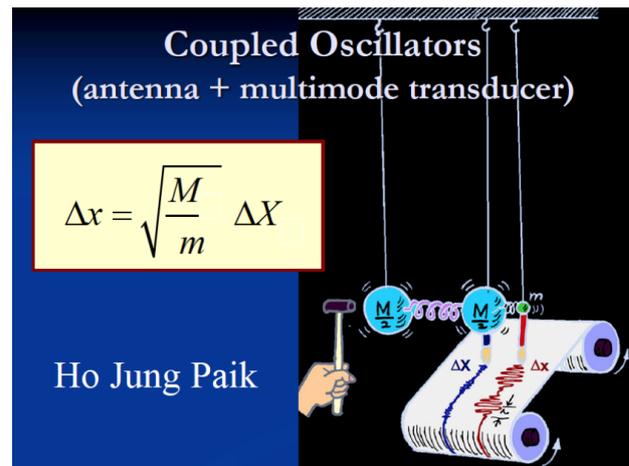


Figura 4: A ideia de osciladores acoplados (todos ressonantes na mesma frequência mecânica da barra) foi inventada por Ho Jung Paik (crédito: Ho Jung Paik).

(Q_m) eram bem maiores que os mesmos fatores de qualidade à temperatura ambiente, e a propriedade de supercondutividade do nióbio poderia ser utilizada para a operação dos transdutores, pois os Q_s elétricos dos circuitos (Q_e) seriam altíssimos. Dessa forma, os novos transdutores puderam “aposentar” os cristais piezoelétricos que estavam sendo utilizados à temperatura ambiente.

No início eram utilizados transdutores supercondutores não ressonantes, munidos com uma massa inercial. Esses transdutores mediam diretamente a amplitude de oscilação das barras em relação a uma massa de referência sua que não saía do lugar. Mas nos primeiros anos da década de 70 foi inventado por Ho Jung Paik, na Universidade de Stanford, os transdutores supercondutores ressonantes [39]. Esses transdutores tinham modos mecânicos que oscilavam na mesma frequência da ressonância da barra. Dessa forma, os modos mecânicos dos transdutores acoplavam com o modo de oscilação da barra e entravam em batimento com eles. Como a massa do último modo mecânico dos transdutores era muito menor que a massa da barra, a amplitude de oscilação da barra era transformada em uma enorme amplitude de oscilação nessa última massa do transdutor (Figura 4).

As barras criogênicas, como eram chamadas, operaram nas décadas de 80, 90 e anos 2000 [40]. Elas agora já estão todas “aposentadas” (*Niobe* aposentada em 2001, *Allegro* (Figura 5) 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



Figura 5: *Allegro*, a barra criogênica americana que operou até 2007 (cortesia do grupo de gravidade da Louisiana State University). Esta foto (com o autor simulando alguma atividade importante) foi tirada em 1990, e permaneceu no site do departamento de física e astronomia da LSU até 2015.

$10^{-21} Hz^{1/2}$, que para sinais bursts (impulsivos), em 100Hz da banda desses detectores, correspondia a um $h \sim 10^{-20}$.

4.3 As esferas ressonantes

A terceira geração de “massas ressonantes”, foram as esferas criogênicas 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 massas de 1300 kg e 1150 kg, respectivamente. O *Mini-GRAIL* operou até 2009 na Universidade de Leiden. O *Schenberg* operou no IFUSP até 2015 (Figura 6) 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 $\sim 70 - 110 Hz$ em torno de $\sim 3k Hz$, com sensibilidade da ordem de $\sim 10^{-20} Hz^{-1/2}$ [41, 42]. Maiores sensibilidades podem ser alcançadas se estes projetos tiverem



Figura 6: A antena ressonante esférica *Schenberg* no seu sítio na sala 107 do Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas (LESBT), do Departamento de Materiais e Mecânica (DMM), no prédio Mário Schenberg do IFUSP (Foto tirada pelo autor).

continuidade. A sensibilidade de projeto é algo em torno de $10^{-22} Hz^{-1/2}$.

4.4 Interferômetros laser

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 entre os espelhos, 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 se baseia na detecção da variação relativa dos comprimentos 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% refletor 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% refletores 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 esses dois feixes fiquem com fases 180° entre si (fases contrárias). Dessa 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 *aLIGO* (*Advanced Laser Interferometer Gravitational wave Observatory*), que realizaram as primeiras detecções de ondas gravitacionais, são um pouco mais complicados/sofisticados do que isso. 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 *aLIGO* têm braços de 4 km de comprimento e estão localizados nos municípios de *Livingston* (Louisiana) e *Hanford* (estado de Washington), nos EUA, separados por cerca de 3 mil km entre si (uma onda gravitacional viajando de um sítio para o outro levaria 10 ms para fazer o percurso) [43]. O comprimento de onda do laser utilizado é de 1064 nm ou $1,064 \mu\text{m}$ (micron) e a faixa de frequências na qual o *aLIGO* tem a sua maior sensibilidade é de 50 Hz até 1 kHz. Em torno de 200 Hz a sua sensibilidade em O3 estava em $\sim 5 \times 10^{-24} \text{Hz}^{-1/2}$, mas vai melhorar ainda mais. O grupo do INPE é um dos dois grupos no Brasil que participam dessa Colabo-



Figura 7: Os interferômetros laser *aLIGO* e *aVirgo*. No topo, à esquerda está o *aLIGO* de Hanford, no estado de Washington, e no topo, à direita está o *aLIGO* de Livingston, na Louisiana, ambos nos EUA. Abaixo está o *Virgo*, em Caccina, perto de Pisa, na Itália (crédito: LIGO lab).

ração Científica LIGO (sigla LSC em inglês). O grupo do INPE participa nela desde 2011. Existem ainda outros interferômetros: o *aVirgo*, em Cascina (perto de Pisa), na Itália, com braços de 3 km [44], o GEO600, em Hannover, na Alemanha, com braços de 600 metros [45], o *KAGRA*, na mina de Kamioka, no Japão, subterrâneo, com braços de 3 km e espelhos resfriados [46], e um projeto em construção na Índia, o *LIGO Índia* [47]. Na Figura 7 vemos os dois *aLIGOs* e o *aVirgo*.

4.5 Grandes interferômetros laser futuros

Além desses projetos de interferômetros laser mencionados acima, existem outros projetos que estão sendo planejados, de grandes interferômetros laser. São eles: o *Einstein Telescope* [48] e o *Cosmic Explorer* [49].

O *Einstein Telescope (ET)* (Figura 8) é um interferômetro planejado para ser construído na Europa. Existem dois sítios finalistas: na ilha de Sardenha (Itália) e na Holanda, perto da fronteira com a Bélgica e Alemanha. Ele vai ser subterrâneo, à semelhança do KAGRA, no Japão, e terá uma configuração triangular, com braços de 10 km. Serão, na verdade, seis interferômetros montados no mesmo sítio, em três grupos de dois ocupando (cada grupo de dois) um dos três possíveis pares de braços adjacentes em forma de V de 60° de ângulo. Cada um dos três grupos de interferômetros será formado por um interferômetro de alta potência de laser nos braços, para ter alta sensibilidade de 30 Hz a 10 kHz, e por outro interferômetro de baixa potência nos braços, para ter

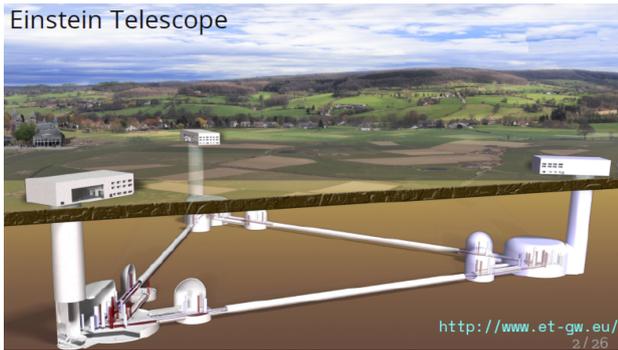


Figura 8: Uma vista artística do interferômetro laser 3G *Einstein Telescope*, que se planeja construir na Europa em futuro próximo (crédito: http://www.et-gw.eu/images/ET_Image_Gallery/artisticview2.jpg).

alta sensibilidade na faixa de 0,5-30 Hz. Vários países europeus estão envolvidos neste projeto.

Já o *Cosmic Explorer (CE)* é um interferômetro que vai ser construído nos EUA e segue o formato tradicional de dois braços perpendiculares. O tamanho dos braços ainda não está completamente definido, pois existe uma dúvida se eles devem ter 40 km cada, como na ideia inicial, ou se devem ter 20 km cada, para otimizar a detecção dos sinais pós-fusão de duas estrelas de nêutrons, muito importante para se determinar a natureza do objeto final da fusão (se é uma estrela de nêutrons mais massiva ou um buraco negro de pouca massa) e como o processo ocorreu, nos seus detalhes, inclusive determinando os limites de massas para estrelas de nêutrons e buracos negros e se existe algum objeto intermediário nessa faixa de 2-5 massas solares.

Estes dois interferômetros são da chamada terceira geração (3G) de interferômetros de solo. Os *aLIGOs* e o *aVirgo* são de segunda geração (2G). Eles ainda vão ser aproveitados com aperfeiçoamentos posteriores, antes de saírem completamente de operação, que os colocariam em um status de 2.5G, semelhante ao *KAGRA*. São os projetos do *LIGO Voyager*, por exemplo, que vai modificar o *aLIGO*, resfriando os espelhos e, dessa forma, diminuindo os ruídos térmicos e, conseqüentemente, melhorando a sensibilidade.

Entretanto, interferômetros 2.5G não conseguiriam complementar a busca de altíssima sensibilidade que o *ET* e o *CE* seriam capazes de fazer. E apenas dois interferômetros não conseguem realizar uma triangulação do céu capaz de determinar a direção de origem da onda gravitacional incidente. Três ou mais interferômetros 3G seriam

desejáveis.

Existem duas possibilidades para um terceiro e quarto interferômetros 3G: Austrália e América do Sul. A Austrália tem um grande número de pesquisadores/professores, pós-doutores e estudantes envolvidos nos projetos de interferometria laser de segunda geração e, portanto, já saiu na frente para preencher essa lacuna. Eles na verdade já têm um projeto, o *NEMO* [50], que vai cobrir a faixa de 1-2,5 kHz com sensibilidade de interferômetro 3G. Essa faixa é importante para estudar aqueles objetos compactos de 2 a 5 massas solares, mencionados acima. A possibilidade para um quarto interferômetro 3G poderia vir, então, da América do Sul.

Esta ideia de um interferômetro 3G na América do Sul, um *South American Gravitational-wave Observatory (SAGO)* [51], é bem interessante para todos os latino-americanos, pois poderíamos contar com um observatório de ondas gravitacionais próximo. Entretanto, não é uma coisa simples e nem fácil de se conseguir. Nenhuma fundação de apoio à pesquisa vai apoiar um projeto proposto que não tenha um número substancial de experimentalistas/observacionais envolvidos com este tipo de instrumentação e a sua análise de dados. A razão é óbvia: quem iria operar e analisar os dados desse observatório? Por causa disto, temos que formar uma massa crítica de pesquisadores/professores, pós-doutores e estudantes na América Latina na chamada ciência da instrumentação de interferômetros laser 3G e na análise de dados desses interferômetros. Isto não é fácil e nem rápido. Mas felizmente já começamos a fazer isso. Contando com os membros dos dois grupos no Brasil que participam da Colaboração Científica LIGO (sigla *LSC*, em inglês) e de outros que estão nos outros projetos, temos mais de 20 latino-americanos participando de alguma dessas colaborações já existentes. Entretanto, precisamos bem mais do que este número para conseguir apoio financeiro para a construção de um interferômetro 3G na América do Sul, que vai demandar algo na casa de US\$ 1 G. Precisamos, então, envolver alunos e pós-doutores latino-americanos nos projetos atuais (*aLIGO*, *aVirgo*, *KAGRA*, *LIGO India*, *ET* e *Cosmic Explorer*) e atraí-los, assim como pós-doutores estrangeiros com conhecimento em 3G para formar grupos na América Latina.

4.6 Interferômetros no espaço

Existem também projetos de interferometria laser no espaço tais como o *LISA* [52], *DECIGO* [53] e *BBO* [54]. O mais famoso deles é o *Laser Interferometer Space Antenna (LISA)* (Figura 9), 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 km 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 na década de 2030. Uma boa parcela do sucesso dessa missão já aconteceu 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.

4.7 Pulsar timing arrays

Outro método de detecção de ondas gravitacionais menos conhecido é o *pulsar timing array* [55]. 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 mantêm uma regularidade excepcional no seu período de rotação. Dessa 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

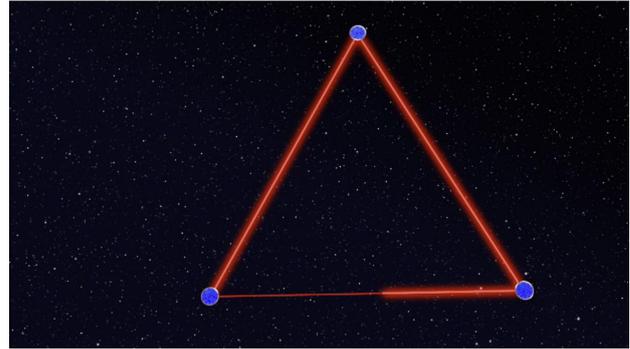


Figura 9: Concepção artística das três espaçonaves *LISA* (*Laser Interferometer Space Antenna*) em uma configuração triangular. Os satélites estão separados por uma distância de 2,5 milhões de km, conectados por feixes de laser que formam os braços de um interferômetro de laser de alta precisão (crédito: <https://www.elisascience.org/multimedia/image/lisa-3-arms>).

em torno do Sol. Comparamos, então, estes momentos teóricos de chegada dos pulsos, 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 (Figura 10). 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 períodos 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.

4.8 Detectores do modo-B da radiação cósmica de fundo em micro-ondas

Em 2014, o grupo do projeto *Bicep2* anunciou que havia detectado ondas gravitacionais. Infelizmente, uma análise dos dados mais detalhada mostrou que isso não havia ocorrido. Entretanto, essa metodologia de busca continua sendo utilizada até hoje. O que estes grupos buscam são indicações da existência da polarização do modo B na radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas [56]. 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) e 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

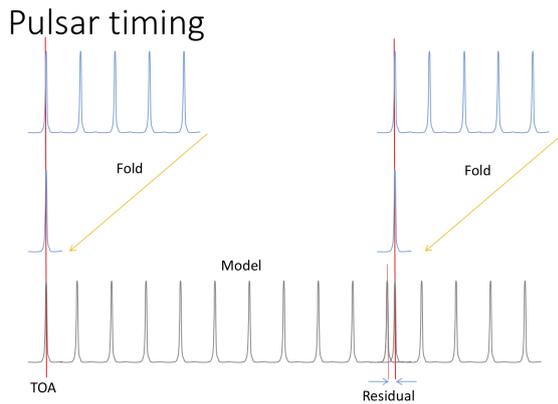


Figura 10: Método utilizado para detectar ondas gravitacionais na frequência de nanoHz. Cerca de 40-50 pulsares extremamente regulares são monitorados por algumas horas a cada ~ 6 meses. Faz-se uma média para se determinar um momento preciso da chegada de um dos pulsos. Compara-se então, os resultados observados com o modelo teórico, supondo as correções Doppler da rotação da Terra em torno de si mesma e da sua translação em torno do Sol. A existência de uma discrepância ou resíduo, poderá ser a indicação da passagem de uma onda gravitacional no caminho que une o Pulsar à Terra (crédito: D. Champion).

denso e passou a ser transparente para estes fótons. Isso ocorreu quando o universo tinha cerca de 380 mil anos de idade, na teoria na qual ele “nasceu” no *Big Bang*.

4.9 Detectores de ondas gravitacionais de alta frequência (acima de 10 kHz)

Existem ainda um número grande de projetos de detectores de ondas gravitacionais para detecção em altas frequências (acima de 10 kHz) [57]. Alguns desses projetos foram construídos ou estão em construção. Os princípios de detecção são os mais variados: interferômetros laser (1-100 MHz), sensores levitados opticamente (10-100 kHz), efeito Gertsenshtein inverso (200 THz a 1,5 EHz), rotação de polarização ressonante eletromagnética (100 MHz a 100 PHz), conversão magnética reforçada (5 GHz), ressonadores de ondas acústicas de massa (MHz-GHz), anéis supercondutores (10 GHz), cavidades de microondas (500 Hz a 10 GHz) e Ressonância Gráviton-Magnon (8-14 GHz).

As fontes de ondas gravitacionais para essas faixas de alta frequência são: Fusões de estrelas de nêutrons, fusões de buracos negros primordiais de massas subsolares, objetos compactos exóticos, superradiação de buraco negros, inflação

cósmica, pré-aquecimento cósmico, transições de fase do Universo, defeitos topológicos do Universo, evaporação de buracos negros primordiais, cenários *brane-world*, cosmologia pré *Big Bang*, inflação quintessencial, *magnetars*, re-aquecimento cósmico, ruído gravitacional térmico do Sol, instabilidades de plasma no Universo e fundo de microondas gravitacional cósmico.

5 Futuro da astronomia de ondas gravitacionais

A existência das ondas gravitacionais, com todas as suas características, era o último teste da teoria da relatividade geral que Einstein havia previsto e que permanecia sem confirmação. Isto tudo mudou em 14 de setembro de 2015, cerca de 100 anos depois da previsão de Einstein e meio século depois de intensa busca por grupos experimentais iniciada por Joseph Weber. Nesse dia, ocorreu a detecção de *GW150914*, um sinal forte em ondas gravitacionais detectado pelos dois *Advanced LIGOs*, localizados nos estados da Louisiana e Washington, nos EUA.

A demora para a ocorrência da primeira detecção se deve a um único motivo: a dificuldade de se detectar ondas gravitacionais. Isso porque elas têm um acoplamento muitíssimo fraco com a matéria (muito menor que o acoplamento dos neutrinos com a matéria). Foram necessários aproximadamente 100 anos para que a tecnologia humana fosse capaz de realizar tal feito. E os primeiros sinais detectados foram os dos eventos mais luminosos (ou “barulhentos”, para reproduzir uma palavra mais adequada para a *astronomia de ondas gravitacionais* que envolve oscilações, ou seja, “som”, no tecido do espaço-tempo), depois do *Big Bang*, que ocorrem no Universo: a coalescência de binárias de buracos negros, que chegam a emitir no pico de luminosidade uma potência de 10^{56} erg/s.

Em cerca de meio século de busca (aproximadamente de 1965 a 2015), iniciada com a proposta de barras ressonantes de Weber, de 1960, a sensibilidade dos detectores teve que aumentar mais de 1 milhão de vezes para que a astronomia de ondas gravitacionais se tornasse uma realidade.

Neste início de 2021, já temos 50 eventos confirmados [58], a maioria de coalescências de binárias de buracos negros, mas também binárias de estrelas de nêutrons e binárias envolvendo buracos ne-

gros e estrelas de nêutrons. A quantidade de novas informações adquiridas com estes 50 eventos é enorme. Um dos 50 eventos, o *GW170817*, contribuiu substancialmente para isto. Ele foi uma coalescência de binária de estrelas de nêutrons que ocorreu no nosso “quintal”, a apenas 40 Mpc ou 130 milhões de anos luz da Terra [59]. A sua localização com três detectores (os dois aLIGO e o aVirgo), permitiu que este evento fosse localizado no céu dentro de uma elipse de 31 graus quadrados, o que possibilitou que vários grupos de astrônomos conseguissem localizar contrapartidas eletromagnéticas [60]. Foi um evento multimessageiro, envolvendo ondas gravitacionais e as janelas eletromagnéticas em rádio, infravermelho, óptico, ultravioleta, raios-X e raios-gama, confirmando o cenário previsto para uma quilonova. Este evento possibilitou também confirmar que a velocidade das ondas gravitacionais é a da luz e forneceu um valor para a constante de Hubble. Todos os eventos detectados também permitiram que a teoria da relatividade geral fosse testada com mais exatidão.

As perspectivas para as corridas observacionais O4 (com início previsto em 2022) e O5 (com início previsto em 2025) dos *aLIGO*, *aVirgo* e *KAGRA* são promissoras, chegaremos a vários eventos detectados por semana, muitos no mesmo dia. Com os projetos futuros, como o *Einstein Telescope* e o *Cosmic Explorer*, iremos chegar a alguns milhares de eventos por dia e observar os mais próximos com um detalhe que permitirá aumentar ainda mais a quantidade de informação nova que vamos aprender do Universo, não só conhecimento astrofísico, mas também cosmológico, pois estaremos observando as coalescências de binárias de buracos negros que ocorrem desde a formação das primeiras estrelas.

O futuro da astronomia de ondas gravitacionais é brilhante/“barulhento” e ele está garantido por dois motivos: ainda existem muitos segredos do Universo para serem revelados pelas ondas gravitacionais (em eventos multimessageiros ou não) e as melhores sensibilidades para se conseguir isto (escutar o “som” do Universo) sempre serão alcançadas em decorrência dos avanços na tecnologia da instrumentação desses futuros observatórios e dos softwares que estarão envolvendo inteligência artificial.

Agradecimentos

O autor agradece ao Prof. Júlio Fabris o gentil convite para produzir este artigo. O autor também agradece ao INPE, ao MCTI, ao CNPq, à CAPES, à FAPESP, à FINEP e à AEB, o suporte à pesquisa de detecção de ondas gravitacionais ao longo dessas últimas quatro décadas.

Sobre o autor

Odylio Denys de Aguiar (odylio.aguiar@inpe.br), é engenheiro eletrônico pelo ITA, Mestre em Física Espacial pelo INPE e Doutor em Física (no tema de detecção de ondas gravitacionais) pela Louisiana State University, EUA. É pesquisador titular e professor do curso de pós-graduação em astrofísica do INPE. Tem experiência na área de física, com ênfase em relatividade e gravitação experimentais, atuando principalmente nos seguintes temas: ondas gravitacionais, detecção de ondas gravitacionais, detector Mario Schenberg, projeto *LIGO* e *LIGO Voyager*. Participou em 1986 da análise dos dados do primeiro experimento mundial de coincidência entre detectores de ondas gravitacionais criogênicos do tipo barra. Ganhou 6 prêmios internacionais e foi coautor dos papers/trabalhos que acarretaram o Prêmio Nobel de Física a Rainer Weiss, Kip Thorne e Barry Barish em 2017.

Referências

- [1] B. P. Abbott, R. Abbott et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [2] A. Einstein, *Näherungsweise integration der feld gleichungen der gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akad. der Wissenschaften, Erster Halbband, Berlin 688 (1916).
- [3] E. Amaldi, *The search for gravitational waves*, in *Cosmic Gamma Rays, Neutrinos, and Related Astrophysics*, editado por M. Shapiro e J. Wefel (Springer, Dorrecht, 1989), Nato Science Series C, 563.

- [4] A. Einstein, *Über gravitationswellen*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akad. der Wissenschaften, Erster Halbband, Berlin 154 (1918).
- [5] K. S. Thorne, *Gravitational radiation*, in *300 Years of Gravitation*, editado por S. W. Hawking e W. Israel (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1987), 330–458.
- [6] J. Weber, *Detection and generation of gravitational waves*, *Phys. Rev.* **117**(1), 306 (1960).
- [7] J. Weber, *Gravitational radiation*, *Phys. Rev. Lett.* **18**(13), 498 (1967).
- [8] J. Weber, *Gravitational-wave-detector events*, *Phys. Rev. Lett.* **20**(23), 1307 (1968).
- [9] J. Weber, *Evidence for discovery of gravitational radiation*, *Phys. Rev. Lett.* **22**(24), 1320 (1969).
- [10] V. B. Braginskii et al., *An upper limit on the density of gravitational radiation of extraterrestrial origin*, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* **39**(3), 387 (1974).
- [11] J. A. Tyson, *Null search for bursts of gravitational radiation*, *Phys. Rev. Lett.* **31**(5), 326 (1973).
- [12] D. H. Douglass, R. Q. Gram et al., *Two-detector-coincidence search for bursts of gravitational radiation*, *Phys. Rev. Lett.* **35**(8), 480 (1975).
- [13] J. L. Levine e R. L. Garwin, *Absence of gravity-wave signals in a bar at 1695 hz*, *Phys. Rev. Lett.* **31**(3), 173 (1973).
- [14] R. L. Garwin e J. L. Levine, *Single gravity-wave detector results contrasted with previous coincidence detections*, *Phys. Rev. Lett.* **31**(3), 176 (1973).
- [15] P. S. Aplin, *An improved detector of gravitational radiation*, *General Relativity and Gravitation* **3**, 111 (1972).
- [16] R. W. P. Drever, J. Hough et al., *Search for short bursts of gravitational radiation*, *Nature* **246**(5432), 340 (1973).
- [17] W. D. Allen e C. Christodoulides, *Gravitational radiation experiments at the University of Reading and the Rutherford Laboratory*, *Journal of Physics A Mathematical General* **8**(11), 1726 (1975).
- [18] H. Hirakawa e K. Narihara, *Search for gravitational radiation at 145 hz*, *Phys. Rev. Lett.* **35**(6), 330 (1975).
- [19] K. Oide, H. Hirakawa e M. Fujimoto, *Search for gravitational radiation from the Crab pulsar*, *Phys. Rev. D* **20**(10), 2480 (1979).
- [20] H. Hirakawa, K. Tsubono e M. Fujimoto, *Search for gravitational radiation from the Crab pulsar*, *Phys. Rev. D* **17**, 1919 (1978).
- [21] K. Iso, K. Kuroda e H. Hirakawa, *Coupling of oscillation modes in an antenna for gravitational radiation*, *Physics Letters A* **103**(5), 262 (1984).
- [22] K. Iso, S. Owa et al., *Search for background gravitational radiation*, *Journal of the Physical Society of Japan* **54**(5), 1697 (1985).
- [23] H. Billing, P. Kafka et al., *Results of the Munich-Frascati gravitational-wave experiment*, *Lett. Nuovo Cimento* **12**, 111 (1975).
- [24] H. Billing e W. Winkler, *The Munich gravitational-wave detector*, *Nuovo Cimento B Serie* **33**(B), 665 (1976).
- [25] D. Bramanti e K. Maischberger, *Construction and operation of a Weber-type gravitational-wave detector and of a divided-bar prototype*, *Lett. Nuovo Cimento* **4**, 1007 (1972).
- [26] P. Kafka e L. Schnupp, *Final result of the Munich-Frascati gravitational radiation experiment*, *A&A* **70**, 97 (1978).
- [27] W. Winkler (2007), comunicação privada.
- [28] H. Enke, G. Tongren et al., *A recent coincidence experiment of gravitational waves with long baseline*, *Chinese Physics Letters* **3**(12), 529-532 (1986).
- [29] N. Zhu et al., in *Experimental Gravitational Physics*, editado por P. F. Michelson, E. K. Hu e G. Pizzella (World Scientific, Singapore, 1988), 367.

- [30] G. Pizzella, in *Experimental Gravitational Physics*, editado por . G. P. P. F. Michelson, E. K. Hu (World Scientific, Singapore, 1988), 52.
- [31] S. Feng et al., in *Third Marcel Grossmann Meeting on General Relativity* (Science Press and North-Holland Publ., Amsterdam, 1983), 707.
- [32] S. Bonazzola e M. Chevreton, *Possible improvements of gravitational antennas*, *Phys. Rev. D* **8**, 359 (1973).
- [33] D. G. Blair, *Progress in the development of high sensitivity gravitational radiation antennas*, *Austral. J. Phys.* **33**(5), 923 (1980).
- [34] G. Papini, *Gravitational radiation and its detection*, *Canadian Journal of Physics* **52**(10), 880 (1974).
- [35] R. Barton et al., *The regina cryogenic experiment to detect gravitational radiation*, in *General Relativity and Gravitation - GR8* (International Society of General Relativity and Gravitation, Waterloo, 1977), 43.
- [36] V. N. Rudenko, V. K. Milyukov et al., *The status of the gravitational wave setups at Moscow University*, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **5**(1), 93 (1994).
- [37] M. F. Bocko, M. W. Cromar et al., *The Rochester gravitational wave detector*, *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **17**(8), 694 (1984).
- [38] W. S. Davis e J. P. Richard, *Observation of well-behaved noise and fluctuations in a gravitational-radiation antenna at liquid-helium temperatures*, *Phys. Rev. D* **22**(10), 2297 (1980).
- [39] H. J. Paik, *Superconducting tunable-diaphragm transducer for sensitive acceleration measurements*, *J. Appl. Phys.* **47**(3), 1168 (1976).
- [40] O. D. Aguiar, *Past, present and future of the resonant-mass gravitational wave detectors*, *Research in Astron. Astrophys.* **11**(1), 1 (2011).
- [41] L. Gottardi, A. de Waard et al., *Sensitivity of the spherical gravitational wave detector MiniGRAIL operating at 5 k*, *Phys. Rev. D* **76**, 102005 (2007).
- [42] N. F. Oliveira Jr e O. D. Aguiar, *The Mario Schenberg gravitational wave antenna*, *Braz. J. Phys.* **46**, 596 (2016).
- [43] *LIGO Scientific Collaboration*. Disponível em <https://www.ligo.org>, acesso em jun. 2021.
- [44] *The Virgo Collaboration*. Disponível em <https://www.virgo-gw.eu>, acesso em jun. 2021.
- [45] *Geo600 gravitational-wave detector*. Disponível em <https://www.geo600.org>, acesso em jun. 2021.
- [46] *KAGRA Observatory*. Disponível em <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>, acesso em jun. 2021.
- [47] *LIGO India*. Disponível em <https://www.ligo-india.in>, acesso em jun. 2021.
- [48] *The Einstein Telescope*. Disponível em <http://www.et-gw.eu>, acesso em jun. 2021.
- [49] *Cosmic Explorer*. Disponível em <https://cosmicexplorer.org>, acesso em jun. 2021.
- [50] *Finding nemo: The future of gravitational-wave astronomy*, OzGrav (2020). Disponível em www.ozgrav.org/news/funding-nemo-building-100m-black-hole-detector-not-pie-in-the-sky, acesso em jun. 2021.
- [51] O. D. Aguiar, *The South American Gravitational wave Observatory (SAGO)*, white paper apresentado na SPAnet, Rede Paulistas de Astronomia, São Paulo, em 25 de outubro de 2019. Também apresentado no Open Symposium on Latin American Research Infrastructures in HECAP (High Energy Physics & Cosmology & Astroparticles), São Paulo, de 5 a 10 de julho de 2020 (2020).
- [52] *LISA Consortium*. Disponível em <https://www.elisascience.org>, acesso em jun. 2021.
- [53] *Decigo*. Disponível em http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/decigo_e.html, acesso em jun. 2021.

- [54] *Big Bang Observer*, Wikipedia. Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang_Observer, acesso em jun. 2021.
- [55] *International Pulsar Timing Array*. Disponível em <http://ipta4gw.org>, acesso em jun. 2021.
- [56] J. T. Sayre, C. L. Reichardt et al., *Measurements of B-mode polarization of the cosmic microwave background from 500 square degrees of SPTpol data*, *Phys. Rev. D* **101**, 122003 (2020).
- [57] N. Aggarwala e al., *Challenges and opportunities of gravitational wave searches at MHz to GHz frequencies*, a ser publicado no Living Reviews in Relativity.
- [58] R. Abbott, T. D. Abbott et al., *GWTC-2: compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the first half of the third observing run*, *Phys. Rev. X* **11**, 021053 (2021).
- [59] B. P. Abbott, R. Abbott et al., *GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017).
- [60] B. P. Abbott, R. Abbott et al., *Multi-messenger observations of a binary neutron star merger*, *The Astrophysical Journal* **848**(2), L12 (2017).