

O que são ondas gravitacionais?

Júnior Diniz Toniato

Universidade Federal de Ouro Preto

Resumo

Neste artigo, iremos revisar, de maneira não técnica, conceitos chaves para o entendimento do que são ondas gravitacionais. Com intuito de abarcar um amplo público, vamos discutir o que são ondas sonoras, ondas eletromagnéticas, a natureza da gravitação e ondas gravitacionais propriamente ditas. Abordaremos também alguns aspectos da detecção da primeira onda gravitacional e as consequências dessa grande conquista para a ciência e nosso conhecimento do universo.

Abstract

In this article we review, using a non-technical language, key concepts for understanding what gravitational waves are. Intending to reach a wide audience, we will discuss what characterizes sound waves and electromagnetic waves, the nature of gravitation and the gravitational waves. We also cover some aspects of the process of detection of the first gravitational wave and the consequences of this great achievement for science and our knowledge of the universe.

Palavras-chave: ondas gravitacionais, gravitação, relatividade geral.

Keywords: gravitational waves, gravitation, general relativity

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n2.35952](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n2.35952)

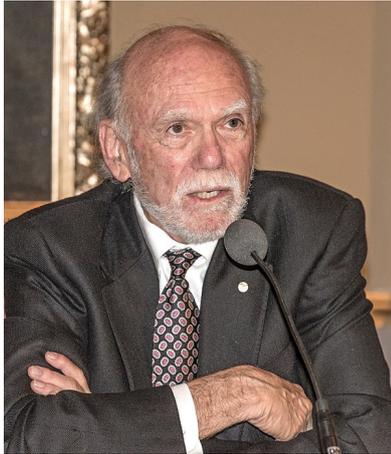
1 Introdução

As ondas gravitacionais são um fenômeno físico previsto pela chamada *relatividade geral*, a teoria padrão utilizada para descrever a gravitação, uma das quatro interações fundamentais da natureza. A física contemporânea reduz toda forma de matéria e energia conhecidas ao que se chama de partículas fundamentais. O Sol e nós, seres humanos, somos compostos de átomos, e o que muda é que, enquanto a estrela central do nosso sistema solar é majoritariamente composta de átomos de hidrogênio e hélio, as células do corpo humano são constituídas em grande parte de hidrogênio, oxigênio e carbono. Somos, em certa medida, feitos da mesma matéria que compõe as estrelas do universo. A diferença entre esses átomos é apenas o número de prótons, nêutrons e elétrons que o formam. Um átomo de carbono, por exemplo, possui 6 de cada uma dessas partículas, já o hidrogênio é composto de um único próton e um único elétron. Prótons e nêutrons possuem subestrutura, ou seja, dentro delas há mais partículas, conhecidas como *quarks*, e estas sim são

partículas fundamentais e não são subdivisíveis. O elétron também é uma partícula fundamental.

Mas tudo isso é apenas uma classificação da estrutura da matéria, todo o funcionamento da natureza se origina a partir das diferentes formas que essas partículas podem interagir entre si, o que se chama de *interações fundamentais*. Duas dessas formas de interação, conhecidas como fraca e forte, não são diretamente perceptíveis no nosso cotidiano, pois são relevantes no mundo subatômico apenas. Ainda assim, a interação nuclear forte é a responsável por manter os átomos coesos. Relembrando que cargas elétricas de mesmo sinal se repelem, esperaríamos que o núcleo atômico, formado por prótons (carga positiva) e nêutrons (sem carga), fosse instável, mas a interação forte mantém essas partículas aglomeradas.

Uma interação fundamental da qual temos evidência todos os dias é a eletromagnética, presente desde um simples ímã de geladeira até os mais sofisticados aparelhos eletrônicos. Por fim, a última interação fundamental é justamente a gravitação,



(a) Barry Barish



(b) Kip S. Thorne



(c) Rainer Weiss

Figura 1: Os ganhadores do prêmio Nobel de Física de 2017, por contribuições decisivas na observação das ondas gravitacionais. Créditos: Bengt Nyman. Fonte: Wikimedia Commons. Licença [CC-BY 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/).

uma forma de força que atua sobre todos os corpos massivos e sempre de forma atrativa.

A gravitação é a interação mais fraca que existe, mas também a de maior alcance. Assim, quando as massas e as distâncias envolvidas em um sistema de estudo são muito grandes, a gravitação se torna a interação dominante. Isso é o que ocorre no estudo dinâmico de satélites planetários, do sistema solar, galáxias e do universo como um todo.

A interação eletromagnética também tem alcance longo, mas nos exemplos citados anteriormente, todos esses corpos são, em geral, eletronicamente neutros ou fracamente carregados. Mas em algumas situações se torna importante considerar as interações eletromagnéticas, como no estudo da dinâmica interna do Sol, onde seu campo magnético desempenha relevante papel [1]. Os *Cadernos de Astronomia*, em seu número inaugural, publicou uma seção temática inteiramente dedicada à gravitação [2].

Como dissemos inicialmente, a teoria física vigente para descrever os fenômenos gravitacionais é a relatividade geral, formulada em 1915 por Albert Einstein (e colaboradores) e que substituiu a gravitação universal de Newton. Dentro dos vários novos fenômenos previstos pela relatividade geral, as ondas gravitacionais foram um dos que mais intrigaram os cientistas. Isso porque, desde a primeira previsão teórica da existência dessa nova forma de onda, em 1916, levou-se 99 anos para que a primeira onda gravitacional fosse detectada, comprovando sua existência.

Essa demora se deu, em grande parte, pela di-

ficuldade de se desenvolver um aparato tecnológico que fosse sensível o suficiente para perceber uma onda gravitacional. A sensibilidade necessária para isso é equivalente a conseguir enxergar um fio de cabelo a 40 trilhões de quilômetros.

A longa busca pelas ondas gravitacionais acabou em 2015, quando o primeiro sinal desse fenômeno pode ser detectado. A importância científica e tecnológica desse feito foi tão significativa que o Prêmio Nobel de Física de 2017 foi dado a três cientistas que desempenharam um papel determinante nessa tarefa, Barry C. Barish, Kip S. Thorne e Rainer Weiss (Figura 1).

Uma janela para o universo se abriu quando nos tornamos capazes de detectar ondas gravitacionais. Inicia-se uma nova era para a astronomia. Para melhor entendermos os impactos desse avanço científico vamos apresentar nesse artigo o conceito de ondas, os diferentes tipos de ondas, para assim compreendermos o que são ondas gravitacionais, como podemos detectá-las e quais são suas origens.

O texto que se segue consiste de uma apresentação do tema de ondas gravitacionais sem especificidades técnicas do assunto, visando um amplo público simpatizante da ciência. Nos demais artigos dessa seção temática dos *Cadernos de Astronomia* o leitor e a leitora encontrarão um maior aprofundamento nas diversas questões técnicas que circundam as ondas gravitacionais.

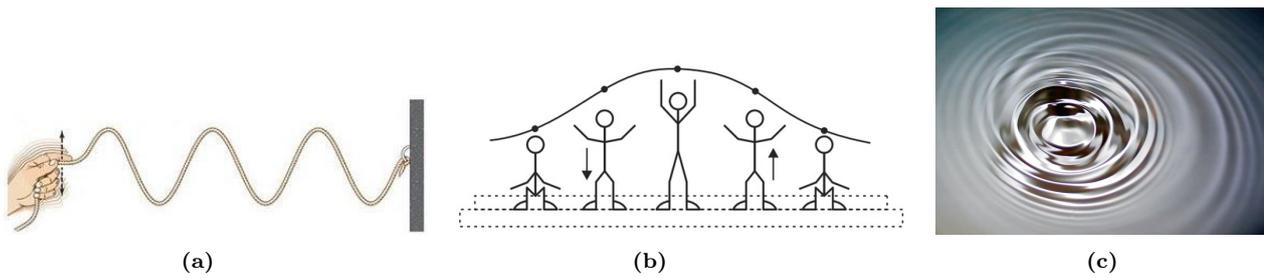


Figura 2: Padrão de onda em diferentes situações. **(a)** Ondas em uma corda: movimentando uma das extremidades para cima e para baixo produz um padrão de onda que se propaga ao longo da corda (Fonte: Explicatorium). **(b)** Ola: cada pessoa se levanta e torna a sentar, a repetição desse movimento por cada pessoa em uma arquibancada forma um padrão de onda (Fonte: Enem, 2013). **(c)** Onda em um lago: qualquer perturbação na água produz ondas que se propagam sobre a superfície do lago (Crédito: Roger McLassus, via Wikimedia Commons).

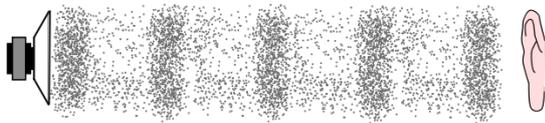


Figura 3: Representação das ondas sonoras. As moléculas que constituem o ar oscilam na mesma direção de propagação da onda.

2 O que são ondas?

De maneira formal, dentro de uma linguagem técnica, ondas são a propagação de um movimento oscilatório. Uma das maneiras mais intuitivas de entendermos esse conceito é através do exemplo de ondas formadas em uma corda. Na Figura 2a vemos que, com uma corda fixa em uma extremidade, basta movimentarmos a outra ponta repetidamente, para cima e para baixo, para que uma onda se forme na corda e se propague sobre ela. Observe que cada ponto da corda somente se move na vertical, descrevendo o que se chama de oscilação, e não há movimento da corda na horizontal. O que acontece é que a mão produz a oscilação vertical na ponta da corda e esse movimento oscilatório é transmitido a cada ponto da corda subsequente.

O que vemos e chamamos de onda é a transmissão do comportamento oscilatório de cada partícula da corda. Uma “ola”, tão frequente em estádios de futebol, pode também ser entendida como uma onda. Cada pessoa apenas se movimenta na vertical, levantando e tornando a sentar, mas ao olharmos de longe, percebemos um padrão de onda se propagando sobre as arquibancadas. O princípio é o mesmo para ondas sobre a superfície de um lago que podem ser produzidas, por exemplo, ao deixarmos cair sobre ele uma pequena pedra.

Em todos esses casos discutidos acima há algo oscilando em uma direção (partes da corda, pessoas, moléculas de água) enquanto a onda se propaga em uma direção transversal às oscilações. Por isso essas são chamadas de ondas transversais.

Uma outra forma de onda que está presente no nosso dia a dia é a onda sonora. Quando falamos, ou tocamos algum instrumento musical, por exemplo, estamos induzindo um movimento oscilatório nas moléculas que constituem o ar à nossa volta e a propagação desse comportamento ocorre também na forma de uma onda (Figura 3). Uma diferença nesse tipo de onda é que a direção de oscilação e da propagação são as mesmas e, por isso, são classificadas como ondas longitudinais. Instrumentos musicais de cordas, como o violão, utilizam de ondas em uma corda para produzir ondas sonoras que são amplificadas na caixa acústica.

Na Figura 4 vemos uma foto retirada de dentro de um violão enquanto suas cordas eram postas para vibrarem. Percebesse que as cordas superiores produzem menos pulsos de onda do que as cordas inferiores. Ou seja, as ondas produzidas nas cordas de cima ocorrem em menor frequência do que aquelas produzidas nas cordas de baixo. Isso se dá basicamente devido a diferença de densidade entre cada corda do violão. Quanto menor a frequência de uma onda dizemos que mais grave é o som produzido, enquanto ondas de maior frequência produzem sons mais agudos. Isso mostra uma conexão entre uma propriedade física de ondas, a frequência, e um efeito perceptível por nossos ouvidos, um som grave ou agudo.

Todos esses tipos de ondas que exemplificamos nos parágrafos acima são classificadas como ondas mecânicas, pois necessitam de um meio material

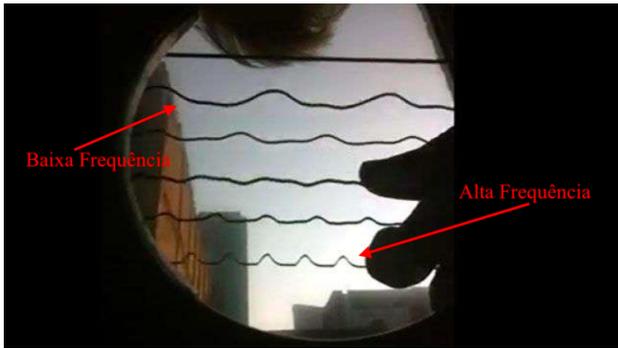


Figura 4: Captura das cordas de um violão em um instante de tempo. Pode-se ver as ondas induzidas pelo(a) musicista nas cordas do instrumento. As vibrações dessas cordas são transmitidas ao ar que transmite as ondas sonoras correspondentes. Nota-se que as cordas superiores (mais densas) produzem ondas de menor frequência e sons mais graves, enquanto as cordas inferiores (menos densas) produzem ondas de maior frequência, originando sons mais agudos.

para se propagarem. São oscilações mecânicas produzidas em algum meio (corda, água, ar...) que se propagam como uma onda. Por isso o som não se propaga no vácuo. Na próxima seção, apresentaremos um tipo de onda não mecânica, que pode se propagar mesmo no vazio.

3 Ondas eletromagnéticas

É bem conhecido o fato de que cargas elétricas de mesmo sinal se repelem, enquanto que cargas elétricas de sinais opostos se atraem, independente de estarem ou não em contato. Isso dá origem ao que se chama de interação à distância. Não podemos ver de que forma as cargas se comunicam, mas podemos detectar essa interação, por exemplo, quando vamos aproximando, aos poucos, um ímã da geladeira e podemos sentir uma força a puxar, cada vez mais forte, o ímã de nossa mão. Esse comportamento das forças elétricas e magnética levaram os físicos a desenvolverem o conceito de campos elétrico e magnético. Toda carga elétrica ocupa o espaço à sua volta com um campo elétrico e, uma vez que outra carga entra em contato com este campo ela começa a sofrer a atuação de uma força elétrica correspondente.

O conceito de campo elétrico pode ser um pouco abstrato mas é possível, através de experimentos, produzirmos uma materialização desse campo. Ao aproximarmos cargas elétricas de sinais oposto sobre um líquido contendo limalhas de ferro, vemos que estas pequenas partículas me-

tálicas tendem a se alinhar formando as chamadas linhas de força de um campo. Essas linhas podem ser deduzidas teoricamente e representam as direções de atuação da força elétrica gerada pelas cargas em cada ponto do espaço. Uma exemplificação teórica e experimental das linhas de força pode ser vistas na Figura 5.

A configuração da Figura 5 é estática, já que as cargas não estão em movimento. Se uma dessas cargas mudar de posição, todo desenho das linhas de força irá se modificar. Não é difícil concluir, portanto, que cargas elétricas oscilando produzirão vibrações nos campos elétrico e magnético, e essas oscilações se propagam como uma onda: a onda eletromagnética. Aqui cabe lembrar ao leitor que uma carga elétrica parada produz apenas um campo elétrico, mas cargas elétricas em movimento também produzem um campo magnético, de modo que uma onda eletromagnética sempre envolve vibrações simultâneas nesses dois campos.

As ondas eletromagnéticas também estão presentes no nosso dia a dia. A luz talvez seja o principal exemplo de uma onda eletromagnética. São essas vibrações do campo eletromagnético que os olhos detectam e transmite ao cérebro para que seja formada as imagens. Assim como no caso das ondas sonoras, onde a frequência está ligada com o grave e o agudo de um som, as cores que somos capazes de identificar estão ligadas com a frequência das ondas eletromagnéticas. Na verdade, a luz visível constitui apenas uma pequena faixa do chamado espectro eletromagnético, uma classificação das ondas eletromagnéticas dentro da infinidade de frequências possíveis, conforme mostrado na Figura 6. Praticamente toda tecnologia eletrônica que utilizamos diariamente utiliza-se de ondas eletromagnéticas para funcionar. Os celulares se comunicam por meio de ondas de rádio, assim como os televisores e rádios. Os controles remotos de TVs usam ondas no infravermelho para transmitir um comando. Ondas na faixa dos raios X são utilizadas para fazer diagnósticos médicos por imagem e o uso de raios gama são frequentes no tratamento contra o câncer.

Uma vez que as ondas eletromagnéticas são a transmissão de oscilações no campo eletromagnético, diferentemente das ondas mecânicas, elas não necessitam de um meio material para se propagarem. Em outras palavras, as ondas eletromagnéticas podem viajar pelo vácuo. Isso as tor-

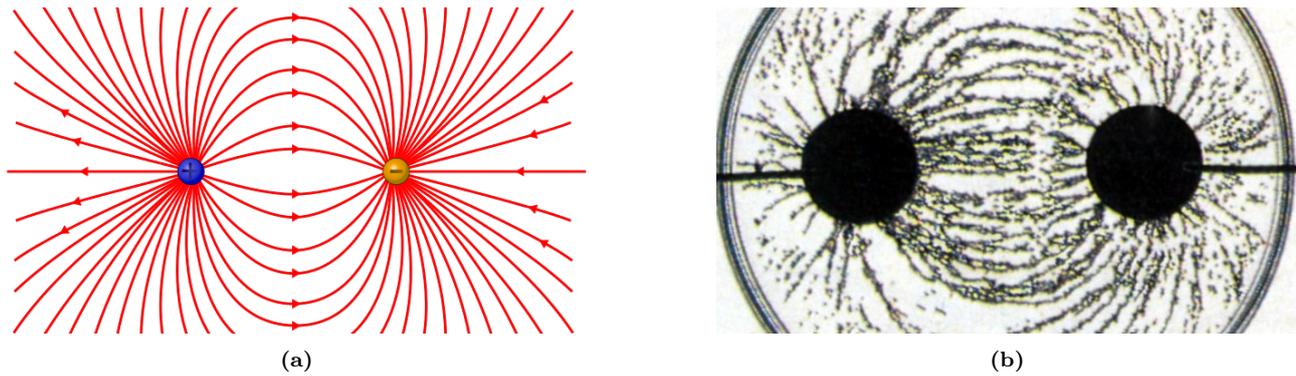


Figura 5: Linhas de força do campo elétrico de um dipolo (uma carga positiva e outra negativa). (a) Previsão teórica das linhas de força do dipolo elétrico (Créditos: Sharayanan, licenciada sobre [CC BY-SA 3.0](#), via [Wikimedia Commons](#)). (b) Materialização das linhas de força. Os círculos em preto estão carregados eletronicamente com sinais opostos e postos sobre um óleo onde contém limalha de ferro. As partículas metálicas tendem a se alinharem sobre as linhas de campo, permitindo sua visualização (Créditos: SVGguru, licenciada sobre [CC BY-SA 4.0](#), via [Wikimedia Commons](#)).

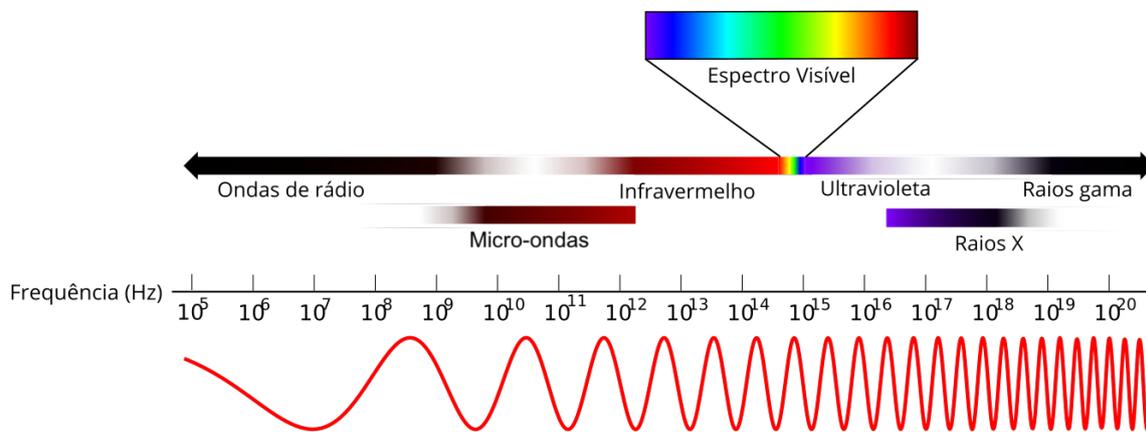


Figura 6: Espectro de frequências das ondas eletromagnéticas. A frequência, medida em unidades de Hertz (Hz), aumenta da esquerda para direita, conforme ilustrado pelo padrão de onda na parte inferior da figura. O espectro visível diz respeito às frequências que o olho humano consegue captar. Abaixo dele temos a radiação infravermelha, emitida pelo corpo de animais por exemplo, micro-ondas, usada nos eletrodomésticos de mesmo nome para aquecer alimentos, e ondas de rádio e TV. Acima do espectro visível, temos os raios ultravioletas, raios X e raios gama, prejudiciais à saúde humana por serem muito energéticos (Créditos: DrSciComm, licenciada sobre [CC BY-SA 4.0](#), via [Wikimedia Commons](#)).

nam a principal ferramenta usada por astrônomas e astrônomos para explorar o universo. O espaço entre a Terra e os corpos celestes (planetas, estrelas, galáxias e etc) é majoritariamente vazio, de modo que as ondas eletromagnéticas emitidas por esses astros é tudo que pode chegar até nossos telescópios.

Os corpos celestes emitem ondas eletromagnéticas em um vasto número de frequências, de modo que, a filtragem desses sinais em diferentes bandas nos permite ver um mesmo objeto de formas distintas. A Figura 7 mostra o Sol observado sob diferentes frequências de ondas eletromagnéticas. Pode-se notar como cada frequência evidencia características distintas da estrela de nosso sistema planetário.

4 Ondas gravitacionais

A descrição física do som foi algo que nasceu a partir da investigação do fenômeno. Desde o princípio os seres humanos têm contato com o som, a descrição física desse fenômeno como uma onda sonora veio posteriormente, à medida que a ciência e cientistas evoluíam na sua compreensão da natureza. Com as ondas eletromagnéticas, aconteceu o contrário: primeiro veio a previsão teórica de que a interação eletromagnética viaja como uma onda, e depois a constatação experimental desse fenômeno. O próprio entendimento de que a luz é uma onda eletromagnética surgiu após a demonstração do físico James Clerk Maxwell (1831 - 1879) de que a velocidade de propagação desses fenômenos eram iguais.

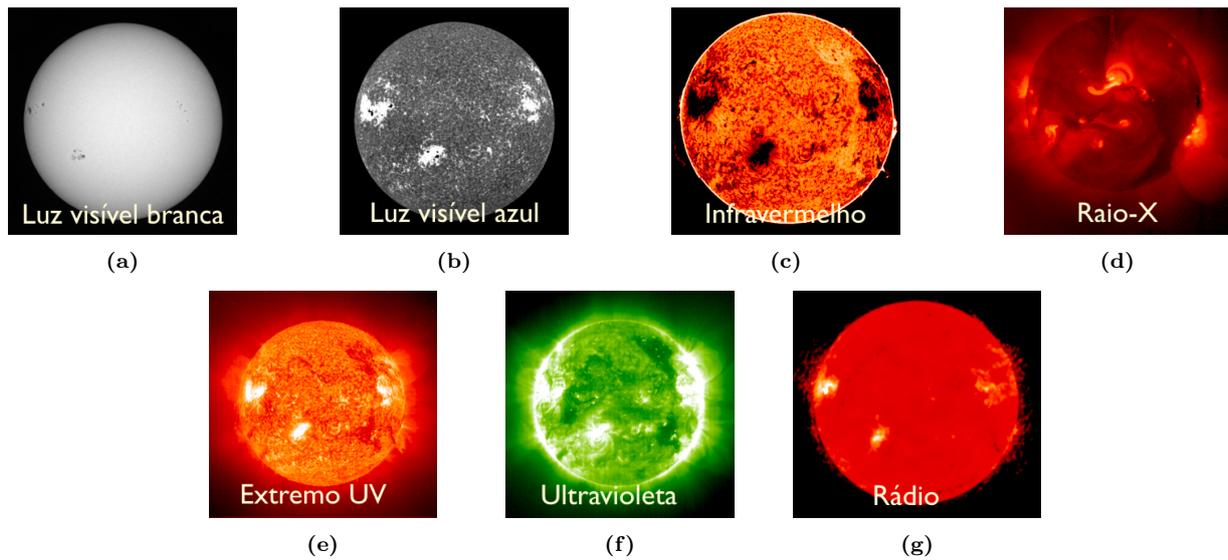


Figura 7: O Sol observado em diferentes frequências. (a) Luz visível branca. (b) Luz visível azul. (c) Infravermelho. (d) Raio X. (e) Extremo ultravioleta. (f) Ultravioleta. (g) Rádio. (Créditos: NASA/Solar Dynamics Observatory).

Na mesma época em que o conceito de onda eletromagnética surgiu, a teoria gravitacional vigente era a gravitação universal de Isaac Newton (1643 - 1727). Essa teoria também define um campo gravitacional, de forma semelhante ao campo eletromagnético: uma massa cria no espaço à sua volta um campo gravitacional e, sempre que outra massa qualquer entra em contato com este campo ela passa a sofrer a ação da força gravitacional correspondente. No entanto, a teoria de Newton da gravitação é inconsistente com a ideia de ondas gravitacionais. Ela prevê que a interação gravitacional é transmitida instantaneamente, ou seja, se o Sol perdesse metade da sua massa de uma forma mágica, exatamente no mesmo instante as órbitas planetárias seriam reajustadas a essa nova massa, sem que houvesse um tempo para que as mudanças fossem percebidas pelos planetas. Portanto, a gravitação universal de Newton não permite prever a existência de ondas gravitacionais, ao contrário da teoria eletromagnética de Maxwell.

O próprio Newton sabia que isso representava um problema. Não por que sua teoria não prevê a existência de ondas gravitacionais, mas pelo fato de a interação gravitacional nela ocorrer de forma instantânea. Isso implica dizer que a informação no campo gravitacional viaja a uma velocidade infinita. E físicos não gostam de infinitos, pois representam algo não mensurável. No entanto, vendo que sua teoria funcionava muito bem para explicar os fenômenos observados no dia a dia,

como as quedas de corpos e as órbitas planetárias, Newton relegou às futuras gerações a resolução dessa inconsistência da ação à distância instantânea.

A questão foi enfim solucionada com advento da teoria da relatividade geral, cuja formulação é atribuída principalmente a Albert Einstein (1879 - 1955), mas tendo sido fruto também da contribuição de vários outros cientistas como Marcel Grossmann (1878 - 1936), Tullio Levi-Civita (1873 - 1948), Gregorio Ricci-Curbastro (1853 - 1925) e David Hilbert (1862 - 1943). A relatividade geral mudou por completo a forma como nós entendemos a interação gravitacional. Na gravitação de Newton, todo objeto massivo exerce uma força gravitacional atrativa sobre outros corpos massivos. É dessa forma que se explica os movimentos orbitais como, por exemplo, o movimento da Lua em torno da Terra, ou da Terra em torno do Sol. Na relatividade geral, a interação gravitacional deixa de ser entendida como uma força e passa a ser vista como um fenômeno geométrico. Vamos explicar melhor isso a seguir.

Na física newtoniana, o espaço tridimensional e o tempo são quantidades absolutas. Em outras palavras, eles são imutáveis, principalmente o tempo, que é considerado ser o mesmo para todos. Na relatividade geral, o tempo não é mais absoluto, ele depende da velocidade com que cada pessoa se movimenta e, quanto mais rápido uma pessoa se movimenta, mais lentamente para ela o tempo passa. Conseqüentemente, o espaço tam-

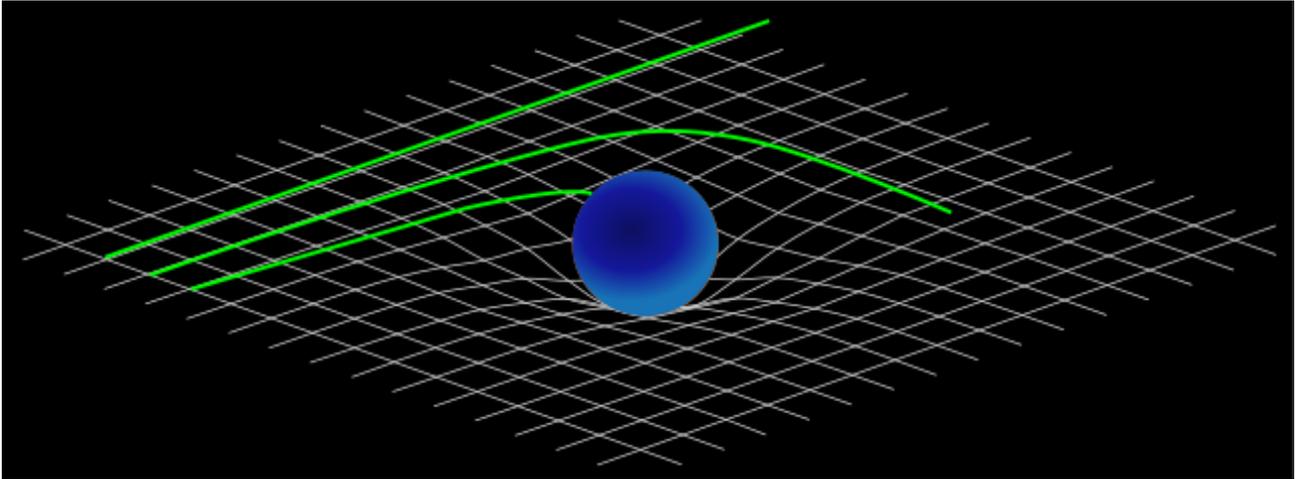


Figura 8: Gravitação como uma consequência da curvatura do espaço-tempo. Um objeto deforma o espaço-tempo de forma semelhante ao que ocorre em uma cama elástica. A trajetória de outros objetos pode ser alterada se eles passarem suficientemente próximos à região curvada do espaço-tempo.

bém não é absoluto, e cada pessoa pode medir distâncias diferentes, dependendo da sua velocidade de movimento. Por isso, tempo e espaço deixam de ser grandezas independentes e passam a formar o chamado espaço-tempo, a estrutura geométrica do universo. Dentro desse conceito de espaço-tempo, a interação gravitacional é entendida da seguinte forma: toda forma de matéria e energia deforma o espaço-tempo, e qualquer objeto terá sua trajetória modificada em consequência dessa deformação.

Uma forma lúdica de se visualizar o conceito de espaço-tempo curvo é imaginar o espaço tempo como uma cama elástica. Se não há nenhum objeto nele, a cama elástica se mantém plana e, uma pequena bola pode atravessar essa cama elástica rolando em linha reta. Agora, imagine um objeto pesado no centro dessa cama elástica, como uma bola de boliche. A cama irá se curvar nas proximidades da bola de boliche e, a pequena bola não mais poderá atravessar a cama elástica em linha reta, pois sua trajetória mudará ao passar perto da deformação causada pela bola de boliche. A Figura 8 ilustra essa ideia.

Além da concepção da gravitação como uma consequência da curvatura do espaço-tempo, a relatividade geral também prevê que a informação no campo gravitacional viaja como uma onda. Seguindo o exemplo da cama elástica, não deve ser difícil imaginar que, à medida que os objetos se movem no espaço-tempo, eles produzem oscilações que se propagam como ondas. É como se fizéssemos a bola de boliche oscilar, perturbando ainda mais a trajetória da pequena bola

que atravessa a cama elástica. Essa são as ondas gravitacionais: a propagação de oscilações no espaço-tempo.

Ondas gravitacionais, portanto, são emitidas por objetos massivos em movimento (acelerado). Os planetas ao orbitarem em torno do Sol, estão emitindo ondas gravitacionais continuamente. No entanto, como dito anteriormente, a interação gravitacional é a mais fraca que existe e, com isso, as ondas gravitacionais, no geral, são extremamente fracas, o que praticamente impossibilita a detecção de ondas gravitacionais proveniente do movimento orbital de planetas, por exemplo. É necessário sistemas com muita massa, e se movendo a altas velocidades, para que sejam emitidas ondas gravitacionais fortes o suficiente para serem detectadas na Terra. Isso torna os sistemas binários de buracos negros ou estrelas de nêutrons as principais fontes de ondas gravitacionais passíveis de detecção, devido a alta densidade de matéria envolvida.

Esses objetos astronômicos, que mutualmente orbitam um ao outro, à medida que vão emitindo ondas gravitacionais vão também perdendo energia, e a distância média entre eles vai diminuindo. Estando cada vez mais próximo um do outro, a intensidade da interação gravitacional se intensifica, aumentando gradualmente a amplitude das ondas gravitacionais emitida. O sistema binário vai espiralando até que uma colisão ocorre, restando um único buraco negro como produto final dessa coalescência.

A primeira detecção de uma onda gravitacional, ocorrida em 2015, correspondeu a uma situ-

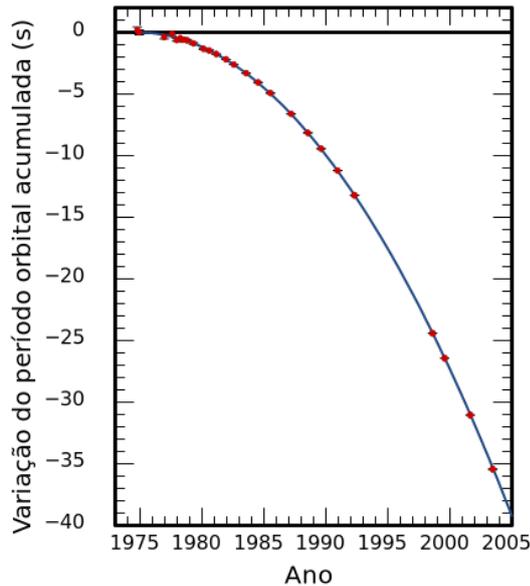


Figura 9: O gráfico mostra a variação do período orbital do pulsar binário de Hulse e Taylor (identificado como PSR 1913+16) acumulada ao longo de 30 anos. A linha contínua é a previsão da relatividade geral, estando em perfeito acordo com os dados observacionais, representados pelos pontos (Créditos: J. M. Weisberg e J. H. Taylor, via referência [3], e adaptada pelo autor).

ação tal como a descrita no parágrafo acima. Os laboratórios da colaboração internacional LIGO, sigla em inglês para Observatório de Ondas Gravitacionais de Interferômetro a Laser (tradução do autor).

5 Detecção de ondas gravitacionais

Ondas sonoras representam um caso em que o fenômeno antecede a descrição teórica. Com as ondas eletromagnéticas, no entanto, houve a previsão teórica, feita por Maxwell e a posterior confirmação experimental quando Heinrich Hertz (1857 - 1894) emitiu e detectou ondas eletromagnéticas em um laboratório. Para as ondas gravitacionais, temos um processo semelhante, mas com uma longa história entre a previsão teórica e a detecção direta de uma dessas ondas. Muito disso deveu-se ao fato de que era necessário uma tecnologia extremamente sofisticada para o desenvolvimento de um aparato capaz de detectar a passagem de uma onda gravitacional pela Terra. Enquanto Hertz já possuía tecnologia adequada para detecção de ondas eletromagnéticas.

Na década de 1970, houve a primeira confirmação indireta da existência de ondas gravitacionais

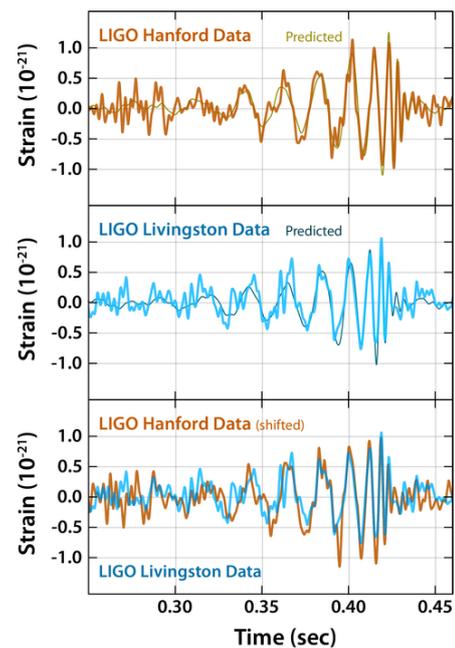


Figura 10: Sinal da primeira onda gravitacional detectada pelo observatório LIGO. O primeiro gráfico mostra a forma da onda detectada nas instalações em Hanford/EUA, enquanto que o segundo gráfico corresponde ao sinal medido em Livingston/EUA. Ambas medidas estão superpostas à previsão teórica da relatividade geral para um sistema binário de buracos negros. No último gráfico, temos os dois sinais sobrepostos, mostrando a concordância entre as duas medições (Créditos: Caltech/MIT/LIGO Lab, licenciada sobre [CC0 1.0 \(domínio público\)](#), via [Wikimedia Commons](#)).

através da descoberta do primeiro pulsar binário, feita por Russel Alan Hulse (1950 -) e Joseph Hooton Taylor Jr. (1941 -). Pulsares são estrelas altamente magnetizadas que emitem feixes de ondas eletromagnéticas a partir de seus polos. Essa radiação só pode ser observada quando o feixe aponta diretamente para a Terra, o que ocorre periodicamente à medida que o pulsar gira e orbita a sua estrela companheira. Isso permite uma precisa medição do período orbital do pulsar, incluindo a taxa com que esse período diminui com o passar do tempo. Conforme dito antes, essa variação no período orbital do sistema binário é consequência da emissão de ondas gravitacionais, e os dados de Hulse e Taylor concordam satisfatoriamente com a previsão teórica da relatividade geral (Figura 9).

Embora tenha sido uma forte evidência para as ondas gravitacionais, a variação orbital do pulsar de Hulse e Taylor não configura uma detecção direta de ondas gravitacionais. Foi necessário mais

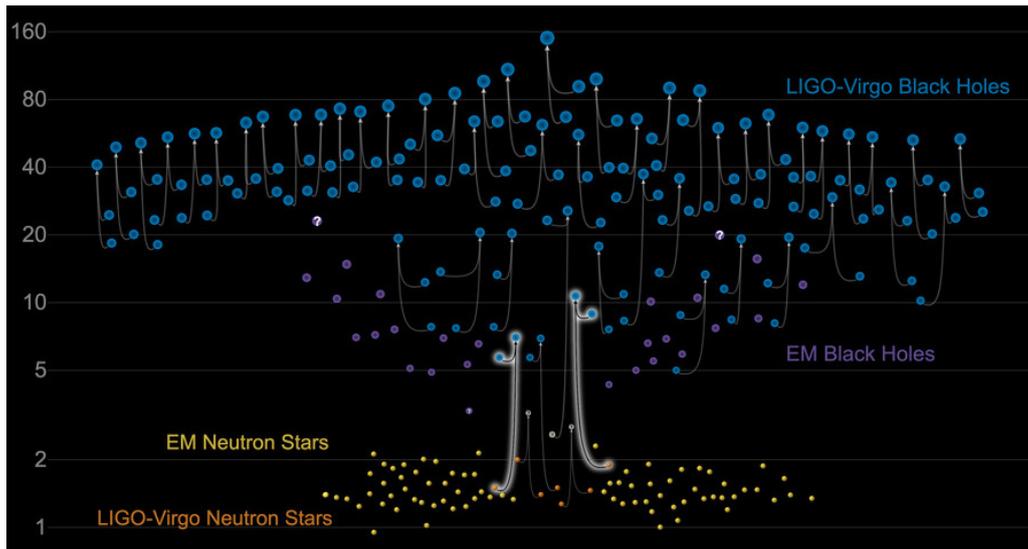


Figura 11: Massas das fontes dos sinais de ondas gravitacionais já detectados. Cada detecção provém do processo de coalescência e colisão de um sistema binário, originando um buraco negro como resultado. Esse processo está indicado através das setas brancas que ligam dois objetos no quadro acima até o buraco negro final. Em azul estão representados os buracos negros observados através das detecções do LIGO e Virgo; em roxo os buracos negros previamente conhecidos através de sinais indiretos de ondas eletromagnéticas; em amarelo as estrelas de nêutrons conhecidas também de observações de ondas eletromagnéticas; e em laranja as estrelas de nêutrons observadas com as detecções do LIGO e Virgo. O eixo vertical à esquerda mostra os valores das massas desses objetos em unidades de massas solares (Créditos: LIGO-Virgo / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern University, licenciada sobre domínio público, via [Ligo Caltech](#)).

algumas décadas de trabalho para que a tecnologia disponível atingisse a sensibilidade necessária para essa tarefa. Os esforços foram compensados em 2015 (um século após a formulação da teoria da relatividade geral), quando as duas instalações do observatório LIGO, nos Estados Unidos, foram capazes de detectar a passagem de uma onda gravitacional. A Figura 10 mostra a forma da onda detectada e a concordância com a previsão teórica extraída da relatividade geral.

Ao encontrar a forma de onda prevista pela relatividade geral que coincide com o sinal observado, os cientistas são capazes de identificar que evento originou essa onda a que distância de nós e quando ele ocorreu. Os dados revelam que a fonte do sinal foi um sistema binário de buracos negros, um com 36 massas solares e outro com 29 massas solares, aproximadamente, e que colidiram formando um buraco negro final de cerca de 62 massas solares. Com isso, cerca de 3 massas solares foram emitidas na forma de ondas gravitacionais, uma quantidade de energia imensa, equivalente a 50 vezes mais do que a luz emitida por todas as estrelas observadas no universo. Felizmente, essa catastrófica colisão ocorreu a 1,4 bilhões de anos-luz de nós.

Atualmente, o número de sinais de ondas gra-

vitacionais detectadas é de aproximadamente 50 eventos. Desses, a grande maioria é proveniente de sistemas binários de buracos negros, mas a colisão de duas estrelas de nêutrons e de uma estrela de nêutron e um buraco negro também já foram detectadas. A Figura 11 mostra um catálogo dos eventos de ondas gravitacionais já detectados, apontando a fonte de cada um, o resultado final da colisão e as massas envolvidas nesses estágios.

6 Uma nova era da astronomia

A astronomia tradicional tem se desenvolvido basicamente com a observação de estrelas, galáxias o universo como um todo, através da detecção das ondas eletromagnéticas emitidas por estes variados objetos astronômicos. Conforme ilustrado na Figura 7, cada nova faixa de frequência filtrada nessas observações revela diferentes perspectivas que muito contribuem para a evolução do nosso conhecimento acerca do universo onde habitamos. A observação direta de ondas gravitacional, por sua vez, fornece mais ingredientes para as observações astronômicas e uma nova gama de dados que nos permite aumentar o nosso “campo de visão” sobre o universo. Por exemplo,

somente através das ondas gravitacionais podemos obter informações específicas sobre massa e tamanho de buracos negros.

Inaugura-se, assim, a chama era da *astronomia de multimensageiros*, onde um mesmo evento pode ser estudado a partir de distintas fontes de dados. Nesse sentido, as observações das colisões envolvendo estrelas de nêutrons são de particular importância por permitirem uma contrapartida no campo das ondas eletromagnéticas.¹

A constante detecção de ondas gravitacionais também nos permitirá enxergar o que é considerado “invisível” para telescópios que captam sinais eletromagnéticos. Por interagir fracamente com a matéria, as ondas gravitacionais podem viajar por longas distâncias no universo, atravessando regiões altamente massivas, sofrendo pouca atenuação. Isso não acontece com as ondas eletromagnéticas que, ao atravessarem estrelas e galáxias, são absorvidas e re-emitidas de uma forma que dificulta a extração de informação sobre suas fontes emissoras. Assim, ondas gravitacionais podem nos permitir obter informações de sistemas altamente complexos, como o núcleo de uma explosão supernova ou nebulosas estelares, além dos binários de buracos negros que têm sido observados.

7 Considerações finais

A conquista das ondas gravitacionais representa um marco na evolução do conhecimento científico [4]. Abre-se uma nova janela para o universo, pavimentando um novo caminho de descobertas. E não só pelo potencial proporcionado quanto à expansão da nossa sabedoria acerca da natureza e seu funcionamento, mas também pelas várias recompensas, científicas e tecnológicas, em outras áreas do conhecimento. As décadas de esforços, teóricos e experimentais, que levaram à elaboração e construção dos observatórios de ondas gravitacionais retribuíram com inovações na óptica, lasers, tecnologias de vácuo, química, engenharia de programação computacional, entre outros seguimentos [5].

É mais um exemplo de como os esforços cien-

tíficos são sempre um ato conjunto e que, ainda que o objetivo seja específico, os ganhos são sempre amplos e até imprevisíveis. Uma descoberta da ciência, seja ela em qualquer área do conhecimento, representa sempre uma infinidade de possibilidades para toda a humanidade.

Sobre o autor

Júnior Diniz Toniato (junior.toniato@ufop.edu.br) é Doutor em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), tendo recebido o prêmio de Melhor Tese de Doutorado defendida em 2014 no CBPF. Atualmente é professor efetivo do Departamento de Física da Universidade Federal de Ouro Preto, onde também desenvolve pesquisas científicas na área de gravitação e cosmologia.

Referências

- [1] C. Fioravanti, *Efeitos dos campos magnéticos do sol* (2019), Pesquisa FAPES. Disponível em <https://revistapesquisa.fapesp.br/efeitos-dos-campos-magneticos-do-sol/>, acesso em mai. 2021.
- [2] J. C. Fabris, O. F. Piattella et al., *Gravitação - Seção Temática*, Cadernos de Astronomia **1**(1), 5 (2020). Disponível em <https://www.periodicos.ufes.br/astrofisica/issue/view/1212>, acesso em jul. 2021.
- [3] J. M. Weisberg e J. H. Taylor, *Relativistic binary pulsar B1913+16: Thirty years of observations and analysis*, ASP Conf. Ser. **328**, 25 (2005). [ArXiv:astro-ph/0407149](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0407149).
- [4] M. Greshko, *Conheças as 20 principais descobertas científicas da década* (2020), national geographic. Disponível em <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2019/12/conheca-20-principais-descobertas-cientificas-da-decada>, acesso em jul. 2021.
- [5] *Ligo's impact on science and technology*, LIGO Caltech. Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/page/science-impact>, acesso em jul. 2021.

¹Buracos negros são objetos extremamente compactos, com um campo gravitacional tão intenso, que nada escapa de seu interior (a região delimitada pelo chamado horizonte de eventos). Já estrelas de nêutron, embora também sejam objetos compactos, emitem radiação eletromagnética.