

# Reflexões acerca das ondas gravitacionais: O que aprendi na Iniciação Científica Junior

Ana Júlia de Paula Poloni, Leandro da Silva Barcellos e Wanessa Santos Santana

EEEM Emir de Macedo Gomes

---

## Resumo

Apresentamos parte do trabalho desenvolvido durante um projeto de Iniciação Científica Júnior e da participação na Mostra de Astronomia do Espírito Santo. Este texto tem como objetivo divulgar estes assuntos para um amplo público. Realizamos um levantamento bibliográfico de dados sobre ondas gravitacionais, evolução de aparatos tecnológicos de detecção e análise dessas ondas e participação do Brasil nesse contexto. Para isso, nos debruçamos sobre referenciais bibliográficos publicados nos periódicos Cadernos de Astronomia, Revista Brasileira de Ensino de Física e Revista Exame. Esperamos que este texto desperte o interesse e a curiosidade do leitor.

## Abstract

We show part of the work developed in Junior Scientific Initiation and Mostra de Astronomia do Espírito Santo. This article aims to disseminate those topics for the public. We realized a bibliographical survey about Gravitational Waves, the progress of technological artifacts to detection and analyze those waves and the participation of Brazilian scientists in that context. For that, we consult de data of Caderno de Astronomia, Revista Brasileira de Ensino de Física and Revista Exame. We hope this text awaken the interest and curiosity of the public.

---

**Palavras-chave:** Astronomia, ondas gravitacionais, gravitação.

**Keywords:** Astronomy, gravitational waves, gravitation.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n1.39889](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n1.39889)

## 1 Introdução

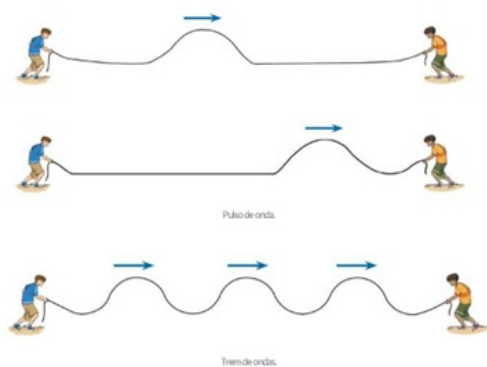
Ondas são movimentos causados por perturbações que se propagam em um determinado meio material ou vácuo. Na física, uma onda pode ser entendida como um mecanismo para transportar energia de uma região para outra, sem necessariamente transportar matéria [1].

Uma maneira intuitiva de compreender esse conceito é observar ondas formadas em cordas fixadas em uma extremidade, sob a ação de uma perturbação. O movimento produzido na vertical é transmitido a cada ponto da corda subsequente, o que descreve uma oscilação. Desse modo, é possível perceber a propagação do comportamento oscilatório transmitido a cada ponto da corda [2]. Um pulso de onda pode ser entendido como a propagação de uma onda única ao longo de uma corda subindo e descendo. Já um trem de ondas é quando há mais de uma oscilação, ou seja,

mais de um pulso de onda, conforme a figura 01 abaixo:

As ondas obedecem a padrões que são quantificados por algumas grandezas como: amplitude (distância entre o ponto mais alto, “crista”, e o ponto mais baixo, “vale”), período (intervalo de tempo para completar um ciclo), frequência (número de oscilações por segundo), velocidade (a rapidez com que a onda se propaga) e comprimento de onda (tamanho de um ciclo completo). Além disso, é possível classificá-las a partir da direção de propagação (unidimensional, bidimensional ou tridimensional) e de acordo com a direção de vibração (longitudinal e transversal).

Quanto à natureza, podemos classificá-las em: mecânicas, eletromagnéticas e gravitacionais. A primeira se refere a ondas que necessitam de um meio material para se propagar, como ondas em cordas, lagos ou sonoras. Já as ondas eletromagnéticas são oscilações provocadas por cargas



**Figura 1:** Padrão de onda em corda. Na primeira e na 2ª situação um único pulso sendo propagado ao longo de uma corda e na 3ª situação um trem de ondas sendo propagado em uma corda. (Crédito: Geekie one).

elétricas, produzindo vibrações nos campos elétricos e magnéticos. Tais oscilações se propagam como uma onda eletromagnética. Uma carga elétrica parada possui apenas um campo elétrico, porém, cargas elétricas em movimento produzem um campo magnético. Sendo assim, uma onda eletromagnética sempre envolverá vibrações simultâneas entre esses dois campos.

Por fim, as ondas gravitacionais são perturbações que se propagam no tecido espaço tempo e foram previstas a partir do desenvolvimento da teoria da relatividade geral, fruto do trabalho de Albert Einstein (1879-1955), a partir de avanços significativos por parte de outros cientistas, como Marcel Grossmann (1878-1936), Tullio Levi-Civita (1873-1948), Gregório Ricci-Curbastro (1853-1925) e David Hilbert (1862-1943). Em 1905, Einstein começa a se deparar com questões relacionadas ao princípio da relatividade e sua incompatibilidade com a teoria Newtoniana, a qual previa uma propagação instantânea para força gravitacional. Essas reflexões culminaram na proposição do princípio da equivalência, que postula que um sistema de referência uniformemente acelerado é fisicamente equivalente a um campo gravitacional uniforme.

A teoria da relatividade sugerida por Einstein e colaboradores descreve as três dimensões do espaço e a dimensão do tempo juntas, como uma espécie de tecido que nos rodeia e que é deformado pela presença dos corpos celestes massivos, como planetas e estrelas. Ao incluir campos gravitacionais, a teoria descreve os movimentos de objetos não mais como ação de forças, mas sim como trajetórias sobre a superfície espaço-tempo.

Essas deformações criam o que chamamos de gravidade. Então a Terra e outros planetas permanecem em órbita não porque o Sol os atrai, como pensava Newton. De acordo com a Teoria da relatividade, isso ocorre porque o Sol é uma estrela tão massiva que os outros corpos seguem a curvatura que ela gera no tecido do espaço-tempo.

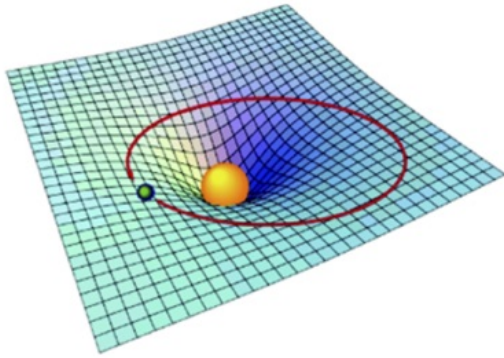
Compreender a natureza e as características de ondas mecânicas e eletromagnéticas é importante para entender como as ondas gravitacionais puderam ser previstas. Além disso, para criar tecnologias capazes de identificar esse padrão de vibração, foi necessário utilizar todo o conhecimento científico desenvolvido e aprimorado durante séculos, por cientistas e pesquisadores que observaram modelos capazes de descrever as ondas mecânicas e eletromagnéticas. Modelos esses que estão retratados hoje de forma fragmentada nos livros didáticos, sendo necessária a realização de ações que tornam acessíveis as informações sobre esse assunto importante e complexo.

Nesse sentido, a primeira autora submeteu proposta para apresentar, de forma oral, uma pesquisa sobre ondas gravitacionais na Mostra de Astronomia do Espírito Santo. A pesquisa ficou entre as dez melhores do evento em 2021, o que concedeu uma bolsa de Iniciação Científica Júnior (ICJr). O trabalho na ICJr consistiu em uma revisão bibliográfica, realizada em 2021/2022, envolvendo textos de divulgação científica sobre ondas gravitacionais publicados nos periódicos: Caderno de Astronomia da UFES, Revista Brasileira de Ensino de Física e revista EXAME. Selecionamos a base de dados devido à sua importância e confiabilidade no cenário de publicações e pesquisas de divulgação científica na Astronomia e no Ensino de Física.

No próximo tópico vamos descrever de maneira detalhada a natureza das ondas gravitacionais e como tem sido o desenvolvimento de aparatos tecnológicos relacionados a esse fenômeno. Esperamos que o público se encante tanto quanto nós ao compreender as diversas áreas de atuação profissional que se pode atuar nesse ramo de pesquisa.

## 2 Mas afinal, o que são ondas gravitacionais?

Para entender o conceito de ondas gravitacionais é necessário compreender primeiro a teoria da relatividade geral. Desse modo, faremos



**Figura 2:** Espaço tempo sendo deformado por um objeto massivo. (Crédito: Aguiar 2021).

uma breve revisão da história da física para uma melhor assimilação dessa nova ideia. Iniciaremos falando da teoria da gravitação formulada por Newton, publicada no livro *Principia*, em 1687. Nesse livro, Newton descreveu gravidade como uma força invisível que agia à distância, proporcional ao produto de duas massas, que se atraíam inversamente ao quadrado da distância entre elas.

Entretanto, a lei da gravitação formulada por Newton não informava nada sobre a velocidade de propagação da força gravitacional e esse passou a ser um problema em aberto por mais de dois séculos. Atualmente, a comunidade científica interpreta que a lei da gravitação de Newton se propaga com velocidade infinita, ou seja, instantaneamente. Sendo assim, em concordância com essa lei, se uma massa mudasse sua posição todo o universo receberia essa informação no mesmo instante [3].

Einstein foi o primeiro cientista a notar que nenhuma informação seria capaz de viajar a uma velocidade superior à da luz. Em 1905 ele publicou a teoria da relatividade restrita postulando o mesmo limite de velocidade para todas as interações físicas, ou seja, a maior velocidade que pode ser alcançada é a da luz. Einstein também concluiu que o espaço não era independente do tempo, formando assim uma única entidade que ele chamou de espaço-tempo (figura 02). Esse entendimento culminou na formulação da teoria da relatividade geral publicada em 1915 cuja a verificação foi feita também no Brasil, em 29 de maio de 1919, durante um eclipse solar em Sobral no Ceará (figura 03).

A comprovação da teoria da relatividade geral, a partir de um eclipse, teve início em 1912. A primeira tentativa de registrar fotos durante



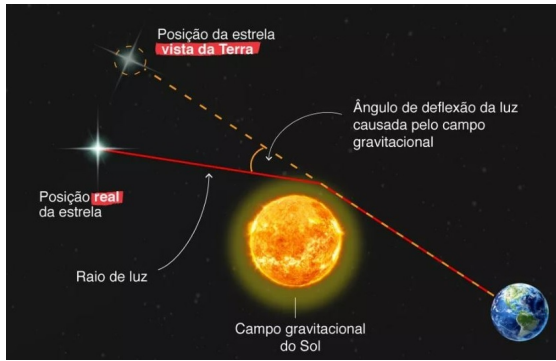
**Figura 3:** Foto do Sol no momento do eclipse capturada em Sobral-Ceará em 1919. (Crédito: BBC News Brasil 2019)

um eclipse foi realizada no sul de Minas Gerais, Brasil, em 1912. No entanto, a chuva torrencial impediu o registro do fenômeno. Esse contratempo não desanimou a comunidade internacional de astrônomos. Em 1919, Charles Perrine, astrônomo norte americano e diretor do Observatório de Córdoba (Argentina), contactou Henrique Morize, que começou a trabalhar em um relatório indicando que a Ilha do Príncipe, localizada na costa ocidental da África, e a cidade de Sobral, no Ceará, seriam excelentes locais de observação de um possível eclipse que estava para ocorrer em maio daquele ano.

O relatório de Morize foi acolhido pelo Joint Permanent Eclipse Committee, órgão oficial da *Royal Astronomical Society* para eclipses, onde Eddington era o secretário geral da associação. Atualmente, sabe-se que foi Eddington o principal responsável por organizar e enviar duas expedições (uma para Sobral, no Brasil, e outra para Ilha do Príncipe, na África). O dia 29 de maio de 1919 amanheceu nublado, mas as nuvens se dissiparam e um clarão abriu-se sobre elas permitindo registros fotográficos do eclipse na cidade de Sobral. Na Ilha do Príncipe choveu torrencialmente, o que implicou na qualidade das fotos capturadas no local [4].

Durante o eclipse de Sobral, cientistas calcularam o ângulo de deflexão da luz<sup>1</sup> das estrelas devido a presença do Sol (figura 4). A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que a massa deforma o espaço-tempo, segundo a previsão da teoria da relatividade. Esse efeito gravitacional

<sup>1</sup>A deflexão da luz pode ser entendida como mudança na trajetória da luz que ocorre na presença de um campo gravitacional massivo, ou seja, na presença desse campo a luz se curva. Essa curvatura pode ser observada a partir do ângulo de deflexão. No caso do eclipse de Sobral o ângulo foi de 1,75 segundos de arco [5].



**Figura 4:** Imagem representativa do ângulo de deflexão da luz. (Crédito: BBC)

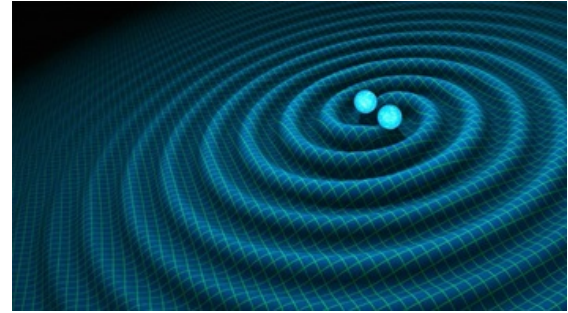


**Figura 5:** Imagem representativa do espaço-tempo sendo deformado por objetos massivos. (Crédito: YouTube).

de espaço-tempo curvado é o que chamamos de gravidade. No contexto da Teoria da Relatividade geral, as estruturas sentem o espaço-tempo curvo e, portanto, “escorregam” um em direção ao outro [3].

Para melhor entendimento, imagine como se o espaço-tempo fosse um grande lençol de borracha deformável por objetos que possuem massa grande o bastante, como uma bola de boliche em um trampolim (figura 05). Quanto maior a massa, maior é a curvatura e a distorção do espaço. Sendo assim, se você tentar se mover em linha reta ao redor dessa grande distorção, você, na verdade, estará se movendo em um círculo [2].

Essa compreensão também permite entender como funcionam as órbitas dos planetas e as interações entre objetos massivos no universo, como estrelas, galáxias, aglomerados de galáxias, buracos negros e a própria luz. Na verdade, não há uma força provocando as órbitas desses corpos e sim a curvatura no espaço-tempo é quem é responsável por essa influência mútua entre esses objetos. Einstein sugeriu que a interação ou colisão de objetos massivos poderiam causar variações no espaço-tempo [6]. Essas variações seriam causadas por distorções ou curvaturas no espaço,



**Figura 6:** Imagem representativa de ondas gravitacionais (Crédito: ShareAmérica).

a partir do movimento de massa e/ou energia que se propagam na velocidade da luz. Ele batizou de ondas gravitacionais (figura 6) essas deformações se propagando para fora dos corpos em órbitas.

As ondas gravitacionais emergem da derivação das equações de campo da teoria da relatividade geral de Einstein. Essa teoria permitiu prever que objetos massivos em movimento (acelerado) podem gerar ondulações no espaço, as quais deveriam viajar a velocidade da luz. Entretanto, foi necessário um século de avanços para desenvolver aparatos tecnológicos capazes de detectar essa interação.

## 2.1 Como observar uma onda no espaço-tempo?

Observar ondas gravitacionais não é fácil! Estamos tratando de oscilações que necessitam de aparatos tecnológicos extremamente sensíveis. De acordo com a analogia sugerida por Junior Diniz Toniato, em uma versão anterior desse mesmo periódico, a sensibilidade necessária para detectar ondas gravitacionais equivale a conseguir enxergar um fio de cabelo a 40 trilhões de quilômetros.

É importante salientar que, dentro da teoria da relatividade geral, o espaço deixa de existir de forma tridimensional e o tempo deixa de ocorrer em quantidades absolutas. Surge, assim, o espaço-tempo onde o tempo não é mais absoluto, pois depende da velocidade em que o observador se movimenta. E com base na Teoria da Relatividade Restrita, quanto mais rápido a pessoa se movimenta, mais lentamente o tempo passa para ela. Em consequência disso, o espaço também não é absoluto e cada observador pode aferir medidas de distâncias diferentes dependendo de sua velocidade, conforme previsto nessa teoria.

Dentro desse conceito de espaço tempo geométrico, não a concepção de gravitação é alterada

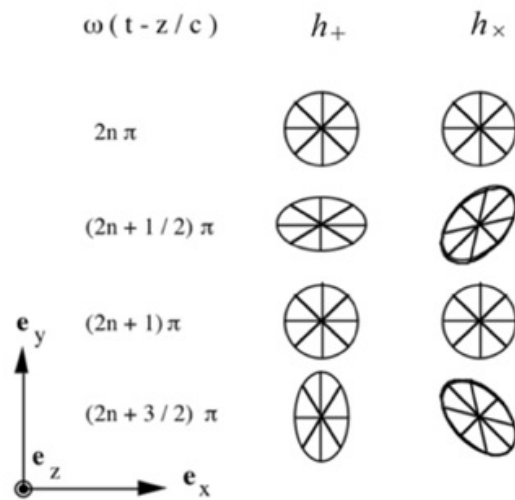


(deixando de ser uma força invisível e misteriosa que age a distância e passando a ser observada como deformação no tecido espacial), como também prevê que a informação no campo gravitacional viaja na forma de onda. Assim sendo, a gravitação descrita por Einstein pode ser entendida como o escorregar dos corpos em um espaço-tempo curvado pela presença de objetos massivos.

Voltando a analogia do lençol de borracha (figura 05), se fizéssemos a bola de boliche oscilar, haveria uma perturbação que poderia se propagar atravessando a cama elástica. É assim que compreendemos as ondas gravitacionais estendendo-se no espaço-tempo, ou seja, como propagações de oscilações ao longo do tecido espacial. Se imaginarmos um universo estático, não haveria movimento entre os corpos, cada corpo com massa deforma o espaço-tempo em volta dele e tudo permaneceria inerte. Porém, como há movimento, assumindo um referencial capaz de observar a interação entre dois corpos em órbita, é possível notar que eles arrastam com eles suas respectivas deformações do espaço-tempo. De acordo com as previsões de Einstein, essas deformações são propagadas para fora de suas órbitas.

Podemos imaginar ondas em um lago, provocadas pela queda de uma pedra. É como se no momento da queda, essas deformações fossem ganhando vida, sendo empurradas para fora no próprio lago. As ondas gravitacionais ocorrem de forma semelhante no tecido espacial, ou seja, corpos em órbitas deformam o espaço-tempo e essa deformação é capaz de se arrastar para fora de sua órbita. Isso ocorre com planetas, satélites, estrelas e todos os objetos celestes. Planetas que orbitam estrelas emitem ondas gravitacionais continuamente. O fato de a interação gravitacional ser a mais fraca dentre as interações fundamentais dificulta a detecção de ondas gravitacionais produzidas por corpos menos massivos. Apenas interações entre sistemas com muita massa, acelerados a altas velocidades, podem ser detectadas aqui da Terra, considerando o estágio atual da tecnologia.

Ainda de acordo com as previsões de Einstein, para identificar as ondas gravitacionais aqui da Terra é necessário que os padrões de vibração estejam de acordo com duas polarizações: + (mais), que produz contrações e alongações paralelas aos eixos x e y; e a polarização × (cruzada) que produz contrações e alongações formando um ângulo



**Figura 7:** Deformação de um círculo devido a forças (Crédito: Aguiar,2021)

de 45° com os eixos x e y (figura 07).

Na polarização + (mais) a onda se deslocando na direção z do plano cartesiano, provoca deformações paralelas aos eixos de referências x e y. No caso da polarização cruzada é o mesmo princípio aplicado a um ângulo de 45°. Outra maneira de detectar essas ondas seria mudar a diferença de fase de 0° para um valor qualquer, no intuito de ter uma polarização elíptica. Se obtermos uma diferença de fase de 90° a amplitude da polarização + e × passam a ser iguais. De qualquer modo, independente da orientação do plano de órbita em relação à Terra, as ondas gravitacionais detectadas obedeceriam um padrão de polarização elíptica.

Na figura 6 é possível observar a deformação que seria causada a um círculo de partículas ao ser atravessado por uma onda gravitacional com uma das polarizações fundamentais previstas por Einstein, de modo perpendicular [3]. De acordo com o autor, a razão entre o quanto o diâmetro do círculo varia e o próprio diâmetro é igual a amplitude da onda gravitacional, e é um número adimensional. Assim temos:

$$h \equiv \frac{\Delta L}{L} \tag{1}$$

A amplitude da onda gravitacional seria assim uma composição das duas polarizações:

$$h = \sqrt{h_+^2 + h_\times^2} \tag{2}$$

Qualquer deformação causada pela passagem de uma onda poderia ser decomposta nessas duas



**Figura 8:** Joseph Weber e uma de suas barras ressonantes. (Crédito: Aguiar, 2021)

polarizações. Além disso, com a informação da polarização é possível descobrir o plano de órbita de corpos a anos luz de distância da Terra, pois a polarização é capaz de revelar a inclinação do ângulo do plano de órbita desses objetos.

### 3 A evolução dos detectores e dos métodos de detecção

Na década de 60, Joseph Weber propôs a construção do primeiro detector de ondas gravitacionais conforme figura 08. O aparato consistia de uma barra maciça de alumínio em formato cilíndrico. Essa barra era mantida dentro de uma câmara de vácuo, suspensa por uma haste de metal fina, com poucos centímetros de diâmetro. Suas extremidades eram presas a um arco de alumínio e apoiado a duas pilhas de blocos de aço e borracha [3].

Haviam dezenas de cristais piezoelétricos conectados em série e colados na região central da barra. Esses cristais cumpriam o papel de transdutores (sensores), cujo o objetivo era transformar as vibrações em mecânicas em sinais elétricos. Assim, no momento em que a onda gravitacional atravessasse a barra e tivesse a polarização + (mais), a energia da onda era convertida em energia mecânica de oscilação da barra, pois os

cristais piezoelétricos faziam o papel de sensores, convertendo energia mecânica em sinais elétricos. Esse detector foi projetado para aferir padrões de vibração na ordem de  $10^{-16}$ , contudo, isso não foi suficiente, embora Weber tenha publicado artigos onde afirmava ter detectado sinais de ondas gravitacionais.

Motivados pela suposta detecção de Weber, na década de 70 dezoito novos grupos de investigação se formaram, para detectar ondas gravitacionais utilizando barras ressonantes, sendo os principais: Moscou, na Rússia; Bell Labs, New Jersey (EUA); Rochester, Nova York (EUA); IBM, Nova York (EUA); Bristol, Inglaterra; Glasgow, Escócia; Reading-Rutherford Lab, Inglaterra; Univ. Tóquio, Japão; Grupo Munich-Frascati; Zhongshan Univ., China; Beijing Univ., China; Grupo Meudon, França.

Detectores de segunda geração foram desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1990, outros seis grupos desenvolveram detectores de segunda geração em em Roma, EUA, Austrália e Canadá. Essa nova tecnologia consistia em barras esféricas de massa ressonante resfriadas a temperaturas próximas da ebulição do hélio líquido (4,2 K/−268,95 °C). A terceira geração foi a de esferas criogênicas de cobre-alumínio que compunham os detectores Mini-GRAIL na Holanda e Mario Schenberg, construído no Brasil. O Schenberg foi construído no laboratório de física da USP e contou com a colaboração de várias instituições (INPE, USP, ITA, IFSP, UNI FESP, UNESP, UNICAMP, UESC, IAE, UFABC, PUC-Rio, UNIPAMPA, CBPF, Leiden Cryogenics, UWA, LSU, OCA E FAPESP). Operou até 2015 e atualmente encontra-se desmontado no INPE.

Nesse mesmo período foram construídos os primeiros interferômetros a laser. Eles funcionam de forma similar ao interferômetro Michelson-Morley utilizando braços horizontais e perpendiculares entre si para detecção das ondas gravitacionais. Nesse caso, o sinal chega perpendicular ao plano que contém o interferômetro com a polarização mais (+). Os interferômetros são ajustados para não sofrer interferência na luz dos feixes de laser e essa condição só é destruída quando há interação com a onda gravitacional.

Vale destacar que o interferômetro de Michelson-Morley é conhecido pela sua utilização em um dos mais notáveis experimentos na história da física. No final do século XIX,

Michelson, físico experimental especialista em medir a velocidade da luz, imaginou que se a Terra se move com velocidade em um espaço pleno de éter em repouso. Então, no referencial terrestre deveria haver um vento de éter no sentido contrário do movimento, do mesmo modo que a resistência do ar atua no rosto de um ciclista [7]. Considerando que a Terra gira em seu movimento diário e também muda sua velocidade ao longo do ano, era esperado um deslocamento das franjas de interferência produzidas entre raios paralelos e perpendiculares ao vento de éter. Apesar da sofisticação de seus recursos, Michelson não conseguiu detectar nenhuma diferença na velocidade dos raios, o que acarretava uma enorme imobilidade das franjas de interferência obtidas com seu aparato. Ele repetiu a experiência em Cleveland (EUA) e, desta vez, contou com a colaboração de Edward Morley, optando por usar aparelhos mais sensíveis. A construção do aparelho rendeu a Michelson o Nobel de Física de 1907. No entanto, ele nada encontrou.

A crença de Michelson no éter era tão intensa e persistente que o físico chegou a repetir o experimento, ao ar livre, no alto de uma montanha, por acreditar que as paredes do seu laboratório pudessem estar bloqueando o vento de éter. Para seu desapontamento, mesmo ao ar livre os resultados foram negativos. Várias outras hipóteses tentaram em vão “salvar o éter”: teoria de que o éter teria a mesma velocidade da Terra 30 km/s; a hipótese de Lorentz & Fitzgerald na qual acreditavam que o braço do interferômetro se contrairia na direção paralela do éter, dando o mesmo tempo de percurso que o raio que segue o outro braço, teoria da emissão de Walter Ritz, entre outras teorias que falharam em explicar a existência do éter.

A experiência de Michelson-Morley é de grande relevância na história da física e seu desfecho ajudou a sepultar a ideia de que espaço e tempo são grandezas dissociáveis e absolutas. Abrir mão dessas concepções foi difícil e incômodo para a ciência daquele período, até porque, de imediato, não havia outro modelo satisfatório que fosse capaz de explicar a aparente incoerência com a mecânica que se conhecia. As tecnologias empregadas no interferômetro de Michelson-Morley foram aprimoradas com o tempo e possibilitaram o desenvolvimento de aparatos cada vez mais sensí-

veis, como o *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)*, *VIRGO Advanced* e o KAGRA.

Na prática, o funcionamento de interferômetros como LIGO e VIRGO, que realizaram as primeiras detecções de ondas gravitacionais, são um pouco mais complicados e sofisticados que isso. Esses interferômetros modernos são instrumentos ópticos capazes de detectar pequenas variações em um feixe de luz que é dividido em dois. Vale ressaltar que são necessários detectores separados por uma grande distância para que os dados coletados possam ser precisos. Isso ocorre devido à baixa intensidade do sinal, que é muito menor do que os ruídos existentes, tornando necessário que os padrões de onda sejam coincidentes entre os detectores.

Cada feixe de luz caminha por um dos braços do interferômetro, a uma determinada distância, até encontrar um espelho fazendo o caminho inverso. Então, os feixes se recombina obedecendo o princípio da superposição de ondas de modo a ter efeitos de interferência construtiva ou destrutiva dependendo da distância percorrida entre os dois feixes [8]. Ao observar o anteparo, é possível obter informações sobre a diferença entre os caminhos percorridos pelos feixes antes de se recombinarem, e a precisão é dada pelo comprimento da onda. Recomendamos a leitura dos manuscritos dos Cadernos de Astronomia, caso o leitor sintá-se engajado em compreender melhor a física envolvida nesse processo .

Lembrando que o sinal que buscamos é extremamente pequeno. As flutuações geradas pelas ondas gravitacionais têm amplitude menor que a do núcleo atômico, sendo assim, alguns efeitos que parecem desprezíveis devem ser considerados. Um exemplo é que o laser empurra os espelhos, e mesmo que esse deslocamento seja minúsculo, é algo apreciável neste experimento. Até mesmo as moléculas que compõem um ar podem desviar a trajetória do laser ou até mesmo empurrar os espelhos e demais componentes, criando a necessidade de realizar o experimento no vácuo. Ademais, existem as vibrações sísmicas, que são fontes de ruídos indesejados ao experimento.

Dada toda a dificuldade de realizar o experimento, não é de se espantar que as pessoas desconfiem dos dados do LIGO, pois, uma pequena vibração poderia ser mal interpretada como uma possível onda gravitacional. E é exatamente por

isso que precisamos de no mínimo dois laboratórios, assim só confiamos nas detecções feitas pelos dois laboratórios, porque é preciso que os dois experimentos vejam o mesmo padrão de onda em um intervalo de 10 ms (o tempo para chegar até o outro laboratório na velocidade da luz). Além disso, com mais de um laboratório podemos estimar de que direção as ondas gravitacionais estão sendo emitidas.

Atualmente existem diversos projetos de interferômetros sendo planejados ao redor do mundo. Os principais são: *Einstein Telescope*, Europa; *Cosmic Explorer*, EUA; *South American Gravitational-wave Observatory*, America do Sul; e LISA, um detector a ser implantado no espaço, uma parceria da NASA e ESA.

#### 4 A colaboração do Brasil nesse novo empreendimento científico

No Brasil, existem dois grupos que participam oficialmente em colaboração científica com LIGO, auxiliando em pesquisas para evolução tecnológica de detectores de ondas gravitacionais. O primeiro deles está na divisão de astrofísica do INPE, em São José dos Campos. Esse grupo é liderado por Odylio Aguiar e tem por objetivo o aperfeiçoamento da instrumentação e isolamento térmico vibracional do LIGO na sua futura atuação com espelhos resfriados. Essa tecnologia é capaz de aumentar a sensibilidade dos detectores, aprimorando os sensores, potencializando a identificação de fenômenos geradores de ondas gravitacionais.

Já o segundo grupo esteve localizado no Instituto Internacional de Física, no Rio Grande do Norte, em Natal. O grupo trabalha na modelagem e análise de dados de sinais e sistemas estelares binários coalescentes. A modelagem é particularmente importante porque as ondas gravitacionais têm interação muito fraca com toda a matéria. Dentro desse contexto, faz-se necessário além de detectores de auto desempenho, técnicas e análises eficazes de uma modelagem teórica precisa dos sinais.

Ademais, existem brasileiros trabalhando fora do país no ramo de pesquisa das ondas gravitacionais. Enfatizamos o trabalho da pesquisadora Marcelle Soares Santos, que coordena o grupo que busca por emissões luminosas associadas à emissões de ondas gravitacionais. Marcelle trabalha

no *Fermi National Accelerator Laboratory*, o Fermilab, um dos maiores laboratórios de física de partículas do mundo. Destacamos aqui o enorme potencial que o Brasil tem na produção de ciência e tecnologia, e na formação de cientistas, mesmo diante do precário investimento governamental.

#### 5 Considerações finais

A detecção das ondas gravitacionais é o resultado de um esforço conjugado da ciência básica, engenharia e análise de dados. O sucesso que foi a detecção direta de ondas gravitacionais não pode ser atribuído apenas a Newton e Einstein. Esse feito possui nada menos que 50 anos de esforços, desde as primeiras barras ressonantes, concebidas na década de 1960, até os interferômetros LIGO e VIRGO.

As dificuldades para detectar um sinal de onda gravitacional eram consideráveis e muitos pensavam que ainda tardaríamos, talvez muitas décadas antes de encontrar algum resultado.

Esse feito teve tamanha relevância científica que rendeu o prêmio Nobel de física, em 2017, a Barry C. Barish, Kip S. Thorne e Rainer Weiss pelo trabalho colaborativo sobre esse fenômeno. A detecção das ondas gravitacionais representa um marco na evolução do conhecimento científico, abrindo uma nova janela para o universo, pavimentando um caminho inédito de descobertas.

#### 6 Agradecimentos

Agradecemos a CNPq pela bolsa concedida a primeira autora e a todas e todos que apoiam e incentivam as ações de IC Jr.

---

#### Sobre os autores

Ana Júlia De Paula Poloni ([anajulia.poloni@gmail.com](mailto:anajulia.poloni@gmail.com)) está cursando a 2<sup>o</sup> série do ensino médio regular na escola EEEM Emir de Macedo Gomes. É bolsista de ICJr pela CNPq trabalhou com a linha de pesquisa sobre divulgação científica de conceitos ligados a ondas gravitacionais.

Leandro da Silva Barcellos ([leandrobarcellos5@gmail.com](mailto:leandrobarcellos5@gmail.com)) licenciado em física pela UFES, possui Mestrado Profissional em Ensino de Física,



atualmente é aluno do programa de pós graduação em educação da UFES, na modalidade doutorado.

Wanessa Santos Santana ([wanessasantana@gmail.com](mailto:wanessasantana@gmail.com)) professora e orientadora do presente trabalho, é licenciada em física pela UFES na modalidade EAD (2018), possui Mestrado Profissional em Ensino de Física (2021). Professora na rede básica de ensino médio. Possui vínculo de designação temporária pela Secretaria de educação do Espírito Santo (SEDU) como professora das disciplinas: Física, Projeto de vida e idealizadora das disciplinas eletivas “Quem quer ser um cientista?” e “Astronomia indígena”. Possui vinculo na rede privada de ensino médio ministrando aulas de física e itinerário “Energia e sustentabilidade”. Tutora presencial do curso de Licenciatura em física na modalidade semipresencial pela SEAD/UFES. Orienta trabalhos nas respectivas linhas de pesquisa de divulgação científica em Física e Astronomia em feiras de ciências e congressos estaduais, nacionais e internacionais.

### Referências

- [1] E. Costa Jr. et al., *Ondas de Alfvén no meio interplanetário*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**(2) (2011).
- [2] J. D. Toniato, *O que são ondas gravitacionais?*, *Cadernos de Astronomia* **2**(2), 6 (2021).
- [3] O. D. Aguiar, *Detectores de ondas gravitacionais*, *Cadernos de Astronomia* **2**(2), 42 (2021).
- [4] A. A. P. Videira, *Einstein e o Eclipse de 1919*, *Física na Escola* **6**(1), 83 (2005). Disponível em <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol106-Num1/eclipse1.pdf>, acesso em fev. 2023.
- [5] H. L. César, P. J. Pompeia e N. Studart, *A deflexão gravitacional da luz: De Newton a Einstein*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**(suppl 1) (2019).
- [6] A. Einstein, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* 688–696 (1916).
- [7] R. L. Ponczek, *Deus, ou seja, a natureza: Spinoza e os novos paradigmas da física* (EDUFBA, 2009). Disponível em <https://edufba.ufba.br/livros-publicados/deus-ou-seja-natureza-spinoza-e-os-novos-paradigmas-da-fisica>, acesso em fev. 2023.
- [8] E. A. Sato, *Ondas gravitacionais (parte 2): Detecção*, *Torta de maçã primordial*. Disponível em <https://www.blogs.unicamp.br/tortaprimordial/2017/05/16/ondas-gravitacionais-parte-2-deteccao/>, acesso em fev. 2023.