

Escola de Talentos
Turma Vanguarda Quantum

Lumi Koroku Hissataka

Ecos pulsantes dos confins dos mares cosmóticos

Um breve estudo sobre ondas gravitacionais

São Paulo, SP

2022

Lumi Koroku Hissataka

Ecossistemas pulsantes dos confins dos mares cósmicos

Um breve estudo sobre ondas gravitacionais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para a conclusão da 1ª
Turma da Escola de Talentos, do Instituto Principia.

Orientador: Prof. Samuel Rocha

São Paulo, SP

2022

A onda

*a onda anda
aonde anda
a onda?
a onda ainda
ainda onda
ainda anda
aonde?
aonde?
a onda a onda*

MANUEL BANDEIRA

Sumário

1	Introdução	1
2	A teoria por trás de ondas gravitacionais	1
2.1	A teoria da Relatividade de Einstein	1
2.2	A teoria da Relatividade e ondas gravitacionais	1
2.3	Um postulado importante	2
3	Tentativas de medir ondas gravitacionais	2
3.1	O pioneiro falido: Joseph Weber	2
3.2	A descoberta que rendeu um Prêmio Nobel: o sistema binário de Hulse-Taylor	3
4	Como ondas gravitacionais foram observadas pela primeira vez: o LIGO	4
4.1	Funcionamento	4
4.2	Um choque para Einstein: a primeira detecção de ondas gravitacionais . .	5
5	Comparação com outras ondas	6
5.1	O som e ondas gravitacionais	6
5.2	Eletromagnetismo: as equações de Maxwell e Relatividade	6
6	Conclusão	7

Resumo

Esse trabalho é um breve estudo sobre ondas gravitacionais. Em uma primeira instância, é resumidamente explicada alguns pontos fundamentais da teoria da Relatividade Geral e a previsão teórica de ondas gravitacionais por Einstein. Em seguida, contamos cronologicamente o desdobramento da história até a sua primeira detecção em 2015 pelo LIGO, começando pela teoria popular do éter no século XIX, passando pelas tentativas de Weber e a obtenção das primeiras evidências de ondas gravitacionais por Hulse e Taylor e enfim chegando na explicação do funcionamento do LIGO. No final do trabalho, foi incluída uma seção comparando as ondas gravitacionais e alguns outros fenômenos da Relatividade Geral a outros tipos de onda para fins didáticos e curiosos.

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

Abstract

This work is a brief study on gravitational waves. In the opening section, there is a condensed explanation of some of the fundamentals of General Relativity and the initial theoretical predictions of gravitational waves made by Einstein. Then, we proceed to chronologically unfold the history of gravitational waves until their first detection in 2015 by the LIGO, starting with the popular theory of aether in the 19th century, following through with Weber's attempts and Hulse & Taylor's first concrete evidence of gravitational waves and finally arriving on an explanation on how the LIGO operates and functions. At the end of the paper, a section comparing gravitational waves and other General Relativity phenomena to other types of waves was included for didactic and curiosity purposes.

Keywords: gravitational waves, general relativity, LIGO.

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãs, pelo apoio e incentivo incondicional.

Aos professores Marcelo, Ricardo e Fabrício, por terem conduzido os encontros e aulas tão bem e tão entusiasmamente toda semana, mesmo durante a quarentena, e por nunca medirem esforços pela Escola.

Aos meus colegas Ana, Fernando, Gabriel, João, Marcela e Sofia da turma Vanguarda Quantum, que enfrentaram os anos da Escola comigo, e com quem talvez eu tenha encontrado 2 ou 3 vezes presencialmente, mas com quem passei horas e horas no Discord, Zoom e Kumospace falando sobre Física e Literatura.

Ao meu orientador prof. Samuel Rocha, que começou a dar tutorias para mim e a Ana em um meio de ano turbulento, e que me passou todo o conhecimento necessário - em um pouco mais de 2 horas - para redigir este trabalho.

À minha melhor amiga Malu por ter tolerado todos os meus “surtos” no WhatsApp às 2h da manhã e os meus profundos xingamentos às normas da ABNT, e por ser uma amiga incrível.

Ao meu grande amigo e veterano Alê, que sempre me ofereceu apoio e aconchego durante o ano.

À todos os meus amigos do colégio Etapa e Nippon Country Club, pelo apoio.

Ao Stack Exchange de L^AT_EX, que sanou quase todas as minhas dúvidas quanto ao BibTeX (usado para referências) e à formatação do documento.

E finalmente, agradeço à Yuki Kajiura pela sua discografia, a qual ouvi em *loop* enquanto digitava freneticamente este trabalho.

1 Introdução

O conceito de luz e os meios pelo qual ela viaja sempre foram sujeitos à fascinação e curiosidade. Até o século 19, por exemplo, os físicos achavam que a luz viajava pelo misterioso (e mais tarde comprovado inexistente) meio do éter. (SWENSON, 1972) Com o desenvolvimento do Eletromagnetismo e Relatividade nos séculos 19 e 20, entretanto, uma nova ideia catalisou uma *onda* de conhecimento humano: as ondas gravitacionais.

Assim como a vibração de uma conda de um violão gera ondas mecânicas (conhecidas como som) e a vibração de elétrons gera ondas de rádio, a vibração de massas gera ondas gravitacionais - afinal, quando corpos vibram, eles criam ondas.

E, assim como é necessário beliscar uma corda com mais força para gerar um som mais intenso, um evento massivo no tecido do Universo como a colisão de buracos negros gera ondas gravitacionais mais intensas, que se propagam pelo espaço-tempo com a velocidade da luz carregando consigo informações inéditas sobre o Cosmos e a própria gravidade. (Caltech) Portanto, estudá-las e detectá-las resulta não apenas no desvendamento de mistérios até então desconhecidos, mas também uma maneira completamente diferente de enxergar e perceber o mundo à nossa volta.

2 A teoria por trás de ondas gravitacionais

2.1 A teoria da Relatividade de Einstein

Antes de Einstein, a força gravitacional era entendida como uma força igual às outras (Normal, Elástica, Atrito, etc.). Mas, com a publicação de sua teoria da Relatividade Gerl de 1916, Einstein propôs que a gravidade, na verdade, era uma deformação no que ele batizou de espaço-tempo: a superfície sobre a qual estão posicionados os astros. Uma massa no espaço causa uma depressão no espaço-tempo; corpos mais massivos “afundam” mais do que corpos mais leves, fazendo com que estes girem (ou seja, orbitem) ao redor dos mais massivos. Ou seja, de acordo com a Relatividade, as massas não se atraem por uma força - o tecido do espaço-tempo, isto é, a própria configuração do Universo faz com que elas se aproximem uma da outra de acordo com suas massas. Essa visão inovadora da gravidade desencadeou uma série de descobertas na Física e abriu infinitas portas de pesquisa.

2.2 A teoria da Relatividade e ondas gravitacionais

Seguindo a lógica de Einstein, portanto, podemos deduzir que ao uma massa se movimentar de maneira periódica sobre o espaço-tempo, ela gera ondas que propagam no próprio tecido do espaço-tempo, i.e., são ondas gravitacionais.

Em outras palavras, o espaço-tempo tem uma maneira de reagir a um material perturbado. Porém, esse evento não se prende ao local onde acontece: ele se propaga. A essa propagação, damos o nome de onda gravitacional.

As propriedades dessa propagação e o modelo teórico que a descreve - isto é, sua equação matemática (afinal, se existe a equação da onda de Schrödinger para a Mecânica Quântica, existe aquela para a Relatividade) - se dá pelas *Equações de Einstein*, que envolvem tensores, o formato do universo e constantes universais como G e c .

2.3 Um postulado importante

Um dos postulados (premissas) escritos por Einstein em sua teoria da Relatividade Restrita, publicada em 1905, diz que a *velocidade da luz é constante em qualquer referencial*. Essa afirmação deriva de duas afirmações menores (MORIN, 2008):

- i. A velocidade da luz independe do referencial do movimento do observador.
- ii. A velocidade da luz não varia com o tempo nem espaço.

Este postulado será extremamente útil nas próximas seções, nas quais descreveremos como eventualmente a captação de ondas gravitacionais se fez possível.

O mesmo, porém, não pode ser dito para outros meios e entidades na Física. Ao perturbar o espaço-tempo, suas dimensões se alteram proporcionalmente, assim passando despercebidas por nós, que também fazemos parte do espaço-tempo. Esse fato será mais tarde explorado por Joseph Weber, quem recebeu uma sub-seção própria (ver 3.1).

3 Tentativas de medir ondas gravitacionais

Pelo fato das ondas irem enfraquecendo à medida que se propagam pelo espaço, é extremamente difícil detectá-las da Terra. Afinal, um evento tão significativo como a colisão de buracos negros massivos ocorre a distâncias muito grandes da Terra.

3.1 O pioneiro falido: Joseph Weber

O americano Joseph Weber foi um dos primeiros cientistas a se seriamente dedicarem à detecção de ondas gravitacionais. Sua procura se iniciou com a pergunta: "*Qual a consequência de uma onda gravitacional passar por nós?*" (informação verbal)¹

A resposta dessa pergunta é: nós comprimimos verticalmente e esticamos horizontalmente, e depois nos esticamos verticalmente e comprimimos horizontalmente, repetindo esse movimento de compressão e alongamento nas duas direções até a onda passar completamente por nós. Mas, Weber sobrestimou esse efeito.

¹Trecho falado pelo prof. Samuel Rocha em aula, em 2 de dezembro de 2021.

Weber imaginou uma barra de metal bem pesada. Ele pensou que, ao uma onda gravitacional passar por ela, a barra emitira pequenos sons por causa de seus movimentos de compressão e alongamentos gerados pela onda. Esse pensamento não estava errado - apenas severamente ingênuo.

O resultado dos experimentos de Weber se mostraram falsos/inconclusivos. O que de fato aconteceu foi: os sons causados pelas ondas previstos por ele seriam muito menos intensos do que os sons de ruído térmico gerados pelo *próprio* tubo. Assim, as alegadas “detecções” de ondas gravitacionais de Weber² (em menos de 1 ano do início de seus experimentos) eram baseadas em sons oriundos do próprio equipamento experimental. (FRANKLIN, 2010)

3.2 A descoberta que rendeu um Prêmio Nobel: o sistema binário de Hulse-Taylor

Como foi definida a onda gravitacional na seção [2], uma das fontes mais poderosas delas são *estrelas binárias*, particularmente os sistemas mais massivos. O movimento periódico descrito por elas se encaixa perfeitamente nas condições para a propagação de ondas gravitacionais.

1974 foi o ano em que finalmente esse caso se comprovou válido ao ser o ano em que o primeiro *pulsar* binário com a descoberta do **sistema binário de Hulse-Taylor**.

Esse evento teve um peso muito grande na Ciência: com esse pulsar, foi possível comprovar a existência de ondas gravitacionais. Cientistas analisaram aspectos das órbitas das componentes e perceberam que com o tempo, os raios orbitais diminuía, o que implicava em energias mecânicas cada vez menores para o sistema, aparentemente violando o princípio de conservação de energia. Mas, com a Relatividade Geral de Einstein essa diferença se explicava com a existência de ondas gravitacionais (que não deixam de ser uma forma de energia). (Caltech) (NobelPrize.org, 1993)

O sistema binário de Hulse-Taylor propiciou evidências concretas da existência de ondas gravitacionais, o que rendeu um Prêmio Nobel a ambos Hulse e Taylor no ano de 1993, quase 20 anos depois da descoberta inicial:

The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation."(NobelPrize.org, b)

²Leia o artigo de Weber na íntegra em <<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.22.1320>>

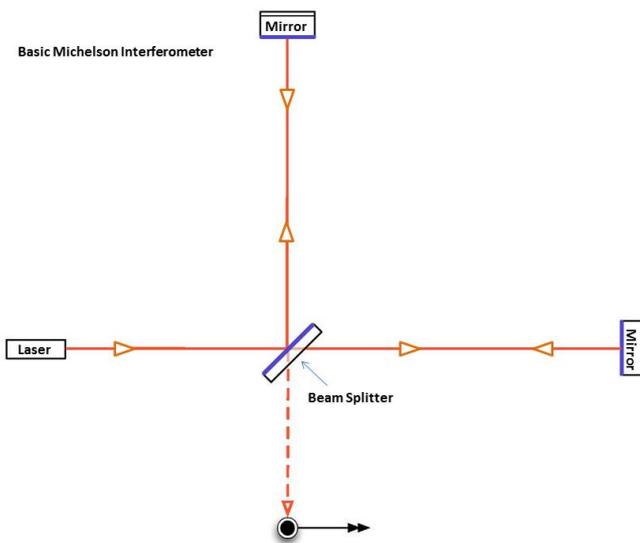
4 Como ondas gravitacionais foram observadas pela primeira vez: o LIGO

A evidência de ondas gravitacionais oferecido pela binária de Hulse-Taylor serviu como pontapé inicial para a construção de equipamentos mais complexos para a detecção delas - algo simplório como os cilindros de Weber não funcionariam para detectar algo tão difícil de ser observado. *Alas*, surgiu o **LIGO**, ou *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*.

4.1 Funcionamento

O LIGO consiste de dois interferômetros posicionados em “L” - cada tubo medindo extensos 4 km -, formados por um raio *laser* de comprimento de onda muito bem conhecido (ou seja, de cor bem definida), dois espelhos e um espelho semitransparente que separa o raio em dois (essa peça é chamada de *beam splitter* em inglês). Abaixo está uma figura ilustrando o posicionamento desses componentes:

Figura 1: Layout do LIGO



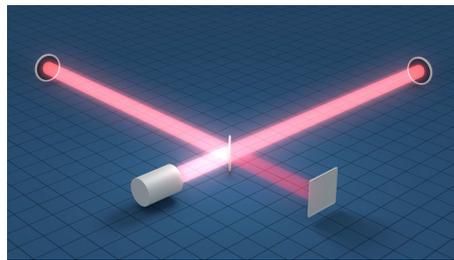
Fonte: site do LIGO

Para entender como exatamente um laser e espelhos são capazes de detectar ondas gravitacionais, precisamos retomar o postulado descrito em 2.3. Sabemos que a luz possui velocidade constante em qualquer referencial. Também sabemos pelo experimento de Weber (em 3.1) que o efeito de uma onda gravitacional passar por nós (ou qualquer objeto) é o de compressão e alongamento alternados.

Em um meio sem ondas gravitacionais, os raios *laser* refletidos se *anulam*, ocorrendo *interferência destrutiva* no fotodetector. Pela teoria de Einstein, o espaço-tempo

deve passar pela distorção de compressão/alongamento nas duas direções ao ser percorrido por uma onda gravitacional - só a luz que não. Assim, em tese, ao uma onda gravitacional atravessar o LIGO, **as distâncias entre os espelhos e os raios *laser* devem se comprimir e alongar levemente, alternadamente.** Mas, como a velocidade da luz permanece a mesma, o tempo que ela leva para percorrer essas distâncias ligeiramente diferentes será *diferente*. Ou seja, **os raios que antes se anulavam passam a se encontrarem em fases diferentes no fotodetector!** (GOLDMAN, 2016) A imagem abaixo ilustra o que acontece com o LIGO ao ser atravessado por uma onda gravitacional:

Figura 2: LIGO ao ser percorrido por uma onda gravitacional



Fonte: site do LIGO

Observe que como os raios refletidos estão em fases diferentes, ocorre interferência destrutiva e construtiva parciais.

4.2 Um choque para Einstein: a primeira detecção de ondas gravitacionais

Então, em 14 de setembro de 2015, o LIGO detectou ondas gravitacionais pela primeira vez na história. A diferença de comprimento de onda detectada pelo LIGO, $\Delta\lambda$, foi da ordem de 10^{-9} m (um comprimento menor do que $\frac{1}{10000}$ de um diâmetro de um próton). A origem dessa diferença minúscula foi a da colisão de dois buracos negros supermassivos, há mais de 1 bilhão de anos atrás. (Press, 2016)

The description of this observation is beautifully described in the Einstein theory of general relativity formulated 100 years ago and comprises the first test of the theory in strong gravitation. It would have been wonderful to watch Einstein's face had we been able to tell him.

- Rainer Weiss, co-fundador do LIGO

O feito rendeu Weiss e seus colaboradores do LIGO o prêmio Nobel de Física de 2017, 24 anos depois de Hulse-Taylor.

3 October 2017

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to Rainer Weiss and the other half

jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne “for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves” ([NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org), a)

5 Comparação com outras ondas

Existem algumas semelhanças notáveis entre diferentes fenômenos em diferentes áreas da Física com ondas gravitacionais, o que pode auxiliar na compreensão delas. Vamos analisar algumas delas, começando pela Acústica.

5.1 O som e ondas gravitacionais

No caso do violão (gerador), o ouvido (detector) capta as ondas sonoras do ar (meio). Mas, o nosso ouvido também tem as suas limitações - o ouvido humano consegue captar uma faixa mais ou menos fixa de som ([ERREDE, 2002](#)). Ou seja, o nosso ouvido se *sensibiliza* apenas ao receber ondas sonoras de certas frequências ([REECE, 2014](#)). Igualmente para ondas gravitacionais, os detectores construídos necessitam se sensibilizar apenas para uma dada faixa de frequências. No entanto, essa construção se mostra extremamente difícil (como foi ilustrado na seção 2).

5.2 Eletromagnetismo: as equações de Maxwell e Relatividade

No caso da *Elétrica*, temos que caso as cargas elétricas não tiverem energia transversal³, elas colapsam. Mas, com Energia Cinética suficiente, ocorre a conversão desta para Energia Centrípeta, efetivamente criando uma órbita. Dessa maneira, é possível que cargas elétricas de sinais opostos orbitem entre si.

Maxwell e Lorentz, no ramo do Eletromagnetismo⁴, provaram que a corrente elétrica é gerada por campos magnéticos; ou seja, uma variação da fonte (nesse caso, \vec{B}) implica no movimento ordenado de elétrons, e vice-versa. ([GRIFFITHS, 1999](#)) Algo muito semelhante ocorre ao aproximadamente descrever o campo gravitacional fraco, cujas equações apresentam formas praticamente análogas às de Maxwell (dois produtos vetoriais e dois produtos escalares, um de cada para a força campo gravitacional e campo de torção gravitacional) ([FEDOSIN, 2007](#))

³Energia envolvida no movimento vertical das partículas. ([LIMA, 2017](#))

⁴As quatro equações de Maxwell são: Lei de Gauss ($\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$), Lei de Faraday ($\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$), Lei de Ampere com adição de Maxwell ($\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$) e Lei de Gauss para o Magnetismo ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$). As leis de Faraday e de Ampere, particularmente, ilustram lindamente como a mudança de um campo elétrico e magnético, respectivamente, geram uma alteração nos campos magnético e elétrico, respectivamente. (O símbolo ∇ (*nabla*) é uma espécie de “operador 3D”), indicando uma operação a ser feita com os vetores \vec{E} e \vec{B} (nas leis de Faraday e Ampere, são realizadas operações denominadas rotacionais, em que se faz o produto vetorial entre as duas grandezas. ([GRIFFITHS, 1999](#)))

Todavia, diferente das cargas elétricas, a soma das massas *não* anula o campo gravitacional. Isso significa na prática que enquanto as próprias cargas elétricas não sentem os seus campos, as massas sentem e sofrem ação de seus próprios campos. O nome técnico para isso seria “linearidade dos campos”. Enquanto o campo eletromagnético é *linear* (i.e., a soma de fontes implica na soma dos campos), o gravitacional é *não-linear*. Ou seja, a superposição de corpos não implica na superposição de campos.

A não-linearidade do campo gravitacional dificulta um número de coisas para a tecnologia utilizada na detecção de ondas gravitacionais. A matemática necessária para modelar o campo é extremamente complicada, e de acordo com o próprio princípio de Heisenberg⁵, é difícil de detectar ondas gravitacionais menores: a luz também é uma onda de elétrons e campos magnéticos, e pelo princípio de Heisenberg deve sempre haver incertezas em ambos momento linear e posição de um elétron - o que implica nas incertezas da amplitude e fase de uma onda de luz. (GOLDMAN, 2016)

6 Conclusão

Na minha visão, o conceito de ondas gravitacionais é extremamente poético. Elas são como um eco pulsante dos confins do mar cósmico, oriundas de um evento tão grandioso como a colisão de buracos negros supermassivos e *pulsares* de altíssimas densidades, mas com sinais tão fracos e imperceptíveis aonde vão.

Até a Ciência evoluir do meio misterioso do éter até interferômetros de 4 km de comprimento detectores de discrepâncias menores do que o diâmetro de um próton, houveram inúmeros erros, e extrema persistência - afinal, nem Einstein acreditava que algum dia veríamos ondas gravitacionais. Mas, na escala de 13 bilhões de anos do Universo, 100 e poucos anos na história de um certo povo em um certo sistema solar, dentro de uma certa galáxia, dentro de um certo aglomerado de galáxias, dentro do vasto, vasto oceano desconhecido do Cosmos, são insignificantes. Há ainda muito a vir, e certamente muito a descobrir sobre ondas gravitacionais no futuro.

⁵Um dos princípios da Mecânica Quântica que diz que a posição e velocidade exatas de um corpo não podem ser medidas simultaneamente. Sua equação é escrita como $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$, onde h é a constante de Planck. (GRIFFITHS, 2005)

Referências

- [Caltech] CALTECH, LIGO: **What are Gravitational Waves**. Disponível em: <<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-are-gw/>>. Acesso em: 10 de junho de 2022.
- [ERREDE 2002] ERREDE, Steven: **The Human Ear: Hearing, Sound Intensity and Loudness Levels**. Notas de aula da University of Illinois at Urbana-Champaign. 34f. 2002
- [FEDOSIN 2007] FEDOSIN, Sergey G.: **Electromagnetic and Gravitational Pictures of the World**. In: *Apeiron* 14 (2007), Oktober, Nr. 4, S. 385–413
- [FRANKLIN 2010] FRANKLIN, Allan: **Gravity Waves and Neutrinos: The Later Work of Joseph Weber**. In: *Perspectives on Science* 18 (2010), Nr. 2, S. 119–151
- [GOLDMAN 2016] GOLDMAN, Michael: **How the Quest for Gravitational Waves Pushes the Boundaries of Quantum Optics. Science in the News - Harvard University**. Disponível em <<https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2016/quest-gravitational-waves-pushes-boundaries-quantum-optics/>>. Acesso em: 16 de junho de 2022. 2016
- [GRIFFITHS 1999] GRIFFITHS, David J.: **Introduction to Electrodynamics**. 3a Edição. Upper Saddle River, New Jersey : Princeton Hall Inc., 1999
- [GRIFFITHS 2005] GRIFFITHS, David J.: **Introduction to Quantum Mechanics**. 2a Edição. Upper Saddle River, New Jersey : Princeton Hall Inc., 2005
- [LIMA 2017] LIMA, Caio Eduardo F.: **Estudo da energia transversal eletromagnética em colisões Pb-Pa a $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV com o experimento ALICE**. Tese (Mestrado em Física) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 97. 2017
- [MORIN 2008] MORIN, David: **Introduction to Classical Mechanics**. The Edinburgh Building, Cambridge : Cambridge University Press, 2008
- [NobelPrize.org a] NOBELPRIZE.ORG: **Press Release: The Nobel Prize in Physics 2017**. Disponível em <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/press-release/>>. Acesso em: 9 de julho de 2022.
- [NobelPrize.org b] NOBELPRIZE.ORG: **The Nobel Prize in Physics 1993**. Disponível em <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/>>. Acesso em: 9 de julho de 2022.

[NobelPrize.org 1993] NOBELPRIZE.ORG: **Gravity investigated with a binary pulsar.** Disponível em <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/press-release/>>. Acesso em: 16 de junho de 2022. 1993

[Press 2016] PRESS, LIGO: **Gravitational Waves Detected 100 Years After Einstein's Prediction.** Washington, 11 de fevereiro de 2016. Disponível em <<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211>>. Acesso em: 7 de julho de 2022. 2016

[REECE 2014] REECE, Jane B.: **Campbell Biology.** 12th Edition. Australia : Pearson Education Australia, 2014

[SWENSON 1972] SWENSON, Loyd S.: **Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930.** University of Texas : University of Texas Press, 1972