

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

JESSICA ANDRIELLI FIRMINO

**SPACE TIME QUEST:  
UMA FERRAMENTA PARA O ENSINO DE ONDAS GRAVITACIONAIS NO  
ENSINO MÉDIO**

VOTUPORANGA  
2020

Jessica Andrielli Firmino

**SPACE TIME QUEST:  
uma ferramenta para o ensino de ondas gravitacionais no ensino médio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Câmpus Votuporanga.

Professor Orientador: Prof. Dr. Márcio Constâncio Junior.

Votuporanga  
2020

### FICHA CATALOGRÁFICA

F525S Firmino, Jéssica Andrielli, 1998-  
Space Time Quest: uma ferramenta para o ensino de ondas gravitacionais no ensino médio– câmpus Votuporanga / Jéssica Andrielli Firmino – Votuporanga, 2020.  
58 p.; 29,8 cm.  
Bibliografia: p. 38-40

Orientador: Márcio Constâncio Junior  
Trabalho de Conclusão de Curso (Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2020.

1. Ondas Gravitacionais. 2. Space Time Quest. 3. Detector Interferométrico. 4. Ensino de Física. I. Título.

CDD – 530.07

Jessica Andrielli Firmino

**SPACE TIME QUEST:  
uma ferramenta para o ensino de ondas gravitacionais no ensino médio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Votuporanga.

Professor Orientador: Prof. Dr. Márcio Constâncio Junior.

Aprovado pela banca examinadora em 13 de novembro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Márcio Constâncio Junior.

---

Prof. Me. Eduardo Rogerio Gonçalves

---

Prof. Dr. Ivair Fernandes de Amorim

## DEDICATÓRIA

*Dedico este projeto a todos os professores que me motivaram na minha trajetória. Em especial ao professor Márcio Constâncio Junior, meu orientador, pelas valiosas e incontáveis horas dedicadas ao projeto, sempre com uma presença cheia de otimismo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo dos Campus Votuporanga e Caraguatatuba, que apoiaram e auxiliaram nessa jornada de ensino.

E aos meus colegas do curso de Licenciatura em Física que cresceram junto em cada etapa do curso.

*“Em algum lugar, alguma coisa incrível  
está esperando para ser conhecida.”*

*Carl Sagan*

## RESUMO

O ensino de física tem se beneficiado da evolução tecnológica, em especial no que se refere ao ensino de fenômenos outrora mal compreendidos devido à dificuldade de visualização, tais como aqueles relacionados ao estudo da física moderna, e também a física relativística e cosmologia. Atualmente, os recursos didáticos utilizados por professores vêm empregando ferramentas como *softwares*, jogos, programas de simulação, entre outros. No ano de 2015, ocorreu uma constatação da existência de ondas gravitacionais, um fenômeno já previsto por Albert Einstein em 1915, mediante formulação de uma nova teoria de gravitação: a Relatividade Geral. Tal detecção foi realizada pelo *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO), identificando um sinal de onda gravitacional coincidente em seus dois detectores. O sinal de onda gravitacional recebido foi gerado pela fusão entre dois buracos negros. Por conseguinte, com a finalidade de divulgar tais feitos pela comunidade científica, com tema central de ondas gravitacionais, foi planejada uma oficina para professores de ensino médio com o propósito de apresentar um jogo chamado *Space Time Quest* que proporciona um desafio aos jogadores: construir um detector de ondas gravitacionais. Desenvolvendo uma experiência de aprendizado conceituando a história, características e aspectos das ondas gravitacionais, espera-se que seja possível, por meio dessa oficina, que os alunos possam se interessar pelo conhecimento científico e verificar a magnitude do universo e sua grande contribuição a essa era tecnológica.

**Palavras-chave:** Ondas gravitacionais. Space Time Quest. Física relativística. Ensino de física. LIGO.

## **ABSTRACT**

Physics teaching has benefited from technological evolution, especially with regard to the teaching of phenomena once poorly understood due to the difficulty of visualization, such as those related to the study of modern physics, as well as relativistic physics and cosmology. Currently, the teaching resources used by teachers include tools such as software, games, simulation programs, among others. In 2015, there was a finding of the existence of gravitational waves, a phenomenon already predicted by Albert Einstein in 1915, provided by a new theory of gravitation: General Relativity. Such detection was made by the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO), identifying a coincident gravitational wave signal in its two detectors. The gravitational wave signal produced was generated by the merger of two black holes. Therefore, in order to publicize such achievements by the scientific community, with a central theme of gravitational waves, a workshop for high school teachers will be planned with the purpose of presenting a game called Space Time Quest that offers a challenge to players: build a gravitational wave detector. By developing a learning experience conceptualizing the history, characteristics and aspects of gravitational waves, it is expected that it will be possible, through this workshop, that students become interested for scientific knowledge and verify the magnitude of the universe and its great contribution to this technological era.

**Keywords:** Gravitational waves. Space Time Quest. Relativistic physics. Physics teaching. LIGO

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Deformação do espaço-tempo.....	14
Figura 2 – A formação de ondas gravitacionais.....	14
Figura 3 – A configuração da onda prevista pela relatividade numérica dado pelo evento GW150914, apresentando a velocidade e separação referente dos BNs.....	16
Figura 4 – Observatório LIGO em Hanford e Livingston.....	17
Figura 5 – Esquema de um interferômetro de Michelson.....	20
Figura 6 – Esquema de um interferômetro de Michelson adaptado.....	21
Figura 7 – Principais ruídos envolvido no LIGO.....	22
Figura 8 – Representação do ruído quântico.....	23
Figura 9 – Sistema de isolamento vibracional presente atualmente no LIGO.....	24
Figura 10 – Jogo Space Time Quest.....	26
Figura 11 – Página para a escolha do local.....	27
Figura 12 – Escritório do Investigador Principal.....	28
Figura 13 – Subsistema de Ambiente.....	28
Figura 14 – Subsistema de isolamento de vibração.....	29
Figura 15 – Subsistema óptico.....	30
Figura 16 – Curva de sensibilidade do jogo.....	30
Figura 17 – Representação da reflexão da luz em superfície plana e irregular.....	34

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Faixa de frequência de cada tipo de detector e suas respectivas fontes esperadas.....	21
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMC	Física Moderna e Contemporânea
EM	Ensino Médio
LIGO	<i>Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory</i>
ICTP-SAIFR	<i>International Centre for Theoretical Physics South American Institute for Fundamental Research</i>
RG	Relatividade Geral
BN	Buraco Negro
EN	Estrela de Nêutron
OG	Onda Gravitacional

## LISTA DE SÍMBOLOS

Hz	Hertz
nHz	Nanohertz
mHz	Megahertz
kHz	Kilohertz
km	Quilômetros
cm	Centímetros

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ONDAS GRAVITACIONAIS.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>TEORIA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>FONTE DE ONDAS GRAVITACIONAIS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Sinais de espiralação.....</i>	<i>15</i>
<b>2.2.2</b>	<i>Sinais contínuos.....</i>	<i>17</i>
<b>2.2.3</b>	<i>Sinais explosivos.....</i>	<i>17</i>
<b>2.2.4</b>	<i>Fundo estocástico.....</i>	<i>18</i>
<b>2.3</b>	<b>DETECTORES.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.1</b>	<i>Pulsar Timing Arrays.....</i>	<i>19</i>
<b>2.3.2</b>	<i>Detectores de massa ressonante.....</i>	<i>19</i>
<b>2.3.3</b>	<i>Detectores interferométricos.....</i>	<i>19</i>
<b>2.3.4</b>	<i>Faixa de frequência de cada tipo de detector.....</i>	<i>21</i>
<b>2.4</b>	<b>CURVA DE SENSIBILIDADE.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.1</b>	<i>Ruído quântico.....</i>	<i>23</i>
<b>2.4.2</b>	<i>Ruído sísmico.....</i>	<i>23</i>
<b>2.4.3</b>	<i>Ruído térmico.....</i>	<i>24</i>
<b>3</b>	<b>SPACE TIME QUEST.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>COMO JOGAR.....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E METODOS.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>ATIVIDADE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.1</b>	<i>Braço interferométrico.....</i>	<i>32</i>
<b>4.2.2</b>	<i>Pêndulo I.....</i>	<i>32</i>
<b>4.2.3</b>	<i>Pêndulo II.....</i>	<i>33</i>
<b>4.2.4</b>	<i>Espalhamento.....</i>	<i>33</i>
<b>4.2.5</b>	<i>Dispersão da luz.....</i>	<i>34</i>
<b>4.3</b>	<b>APLICAÇÃO DO JOGO.....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre a reformulação no currículo das aulas de física no que concerne à apresentação de aulas com temas atuais vem crescendo a cada dia na comunidade educacional de ciências. A mídia vem expondo descobertas e comprovações científicas as quais, ainda que despertem o interesse dos alunos, não têm sido objeto de discussão em sala de aula.

De acordo com Oliveira (2006, p.13):

(...) a lacuna provocada por um currículo de física desatualizado resulta numa prática pedagógica desvinculada e descontextualizada da realidade do aluno. Isso não permite que ele compreenda qual a necessidade de se estudar essa disciplina, que, na maioria dos casos, se resume em aulas baseadas em fórmulas e equações matemáticas, excluindo o papel histórico, cultural e social que a física desempenha em sua vida.

A aplicabilidade da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio (EM) é objeto de muito debate pois está cada vez mais interligada, desde o final século XIX e começo do século XX, ao incessante desenvolvimento tecnológico. Dessa forma, é necessário que os alunos sejam colocados em contato com essas transformações do mundo tecnológico, tarefa que cabe, sobretudo, à educação formal.

Diante desse cenário, faz-se necessária a inserção desse conteúdo no currículo escolar, em razão do crescimento tecnológico no mundo atual.

Conforme Guerra, Braga e Reis (2007, p. 576):

Os resultados de várias pesquisas educacionais, o trabalho pontual de alguns professores, a pequena mudança nos livros didáticos e a validade dos PCNs mostram que a introdução de temas de física moderna deve ser objeto de discussão entre aqueles que se dedicam ao ensino médio.

As aulas de ciências naturais, particularmente de física, costumam ser consideradas de difícil entendimento para os alunos quando se trata de fenômenos que não se visualizam facilmente. Mesmo que algumas salas de aulas contem com o apoio do recurso de lousas digitais, projetores ou até mesmo de computadores, é necessário que os professores estejam devidamente preparados para utilizá-los.

Para a aproximação da prática da física moderna e contemporânea às salas de aula, é indispensável a preparação dos professores, de acordo com Oliveira (2006, p.15):

É importante ressaltar que a atualização do currículo não pode ser desvinculada da preocupação com a formação inicial e continuada de professores. Não basta introduzir novos assuntos que proporcionem análise e estudos de problemas mais atuais se não houver uma preparação adequada dos alunos das licenciaturas para esta mudança e se o profissional em exercício não tiver a oportunidade de se atualizar. Os professores precisam ser os atores principais no processo de mudança curricular, pois serão eles que as implementarão na sua prática pedagógica.

Compreendendo a necessidade da inserção da FMC no ensino médio, Terrazam (1992, p.209) aponta como a questão curricular da física está, de certa forma, parada no tempo, destacando o fato de o currículo manter-se igual durante muitos anos, sem nem ao menos apresentar um pouco da física avançada deste século, mantendo os tópicos tradicionais de Mecânica, Física Térmica, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo. A mesma sequência é ditada pelos manuais de física destinados a esse nível de ensino: “Na verdade, ocorre que até o momento continuamos a seguir a mesma sequência ditada pelos manuais estrangeiros de ensino de física utilizados no século passado” (TERRAZAM, 1992, p.209).

Uma das grandes defensoras da aplicação da FMC no EM é a Ostermann, onde em um de seus trabalhos (1999, p. 267) aponta a necessidade de se aplicar a FMC nos currículos de física, por meio da necessidade de aproximar os jovens para a profissão científica, sendo essencial despertar nos alunos a curiosidade auxiliando a uma boa formação científica.

Comumente, o ensino de física resume-se a teorias e equações, de maneira fatigante para alunos que possuem curiosidades sobre diferentes interesses despertados pela mídia, como episódios científicos de controlar o tempo e diligências sobre o universo, tal como o *Big Bang*. Na mesma linha dessas observações, Rodrigues (2001, p. 10) realça a influência da tecnologia no interesse dos alunos, evidenciando suas curiosidades para excentricidades do mundo:

Portanto, o que ocorre na atualidade é uma forte penetração da Física Moderna e Contemporânea na comunidade em geral através de dois caminhos: as tecnologias e a mídia.

É este quadro que se têm refletido no campo educacional, na medida em que os alunos também participam dessa realidade, seja usufruindo as comodidades tecnológicas, seja se deparando com nomes e figuras veiculadas como “geniais” da ciência. A ficção científica estimula a imaginação do adolescente – e não só do adolescente – instigando ainda mais a sua busca pelo novo, pelo virtual ou pelo genial.

Portanto, havendo preparação dos docentes e ferramentas de ensino adequadas é possível abordar conceitos atuais que chamem a atenção e o interesse dos alunos.

Dessa forma, muitos docentes da área de ciências, principalmente da física, vêm desenvolvendo trabalhos com alunos nos quais aproveitam muito da tecnologia disposta atualmente para que seja possível uma visualização melhor de um sistema um tanto quanto abstrato.

Assim, encontram-se diversas formas de os docentes adaptarem suas aulas a diferentes metodologias. Desse modo, deparamo-nos com oficinas de física, como por exemplo oficinas de FMC, com diversos experimentos para alunos de EM (SILVA, ASSIS. 2012), ou oficinas com métodos diferentes de se ensinar física para deficientes visuais (GOMES, 2015).

Será discutida, neste trabalho, a possibilidade de se realizar uma oficina para professores de ensino médio que queiram contemplar, em suas aulas, o tema de ondas gravitacionais, considerado um conteúdo que abarca uma evidência científica comprovada recentemente, apesar de prevista teoricamente há mais de um século, levando diversos cientistas para laboratórios com o intuito de se descobrirem novas averiguações sobre o universo.

Para professores há, atualmente, diversas oficinas, nas quais se entende por necessidade uma formação continuada de forma a atualizar seus conhecimentos. Como por exemplo, há um minicurso coordenado pela parceria do ICTP-SAIFR sobre física de fronteira para a sala de aula desenvolvido para professores. Esse minicurso apresenta novos materiais e abordagens para o ensino de física com a intenção de ser aplicado a FMC dentro das salas de aulas do ensino médio, abordando assuntos como expansão do universo, matéria escura e análise espectroscópica de estrelas.

Trabalhos vêm sendo desenvolvidos como forma de pesquisa sobre a gamificação no ensino de física (SILVA, SALES, CASTRO. 2019; DANTAS, PEREZ. 2018) e como essa metodologia leva aos alunos conteúdos de forma a se obter suas atenções, despertando interesses e realizando o ensino de forma dinâmica. Pesquisas realizadas através da aplicação de games voltados ao ensino de física, (SILVA, SALES. 2017) revelou um estímulo no aprendizado, uma empolgação dos alunos com a ideia de se resolver um problema por meio de um jogo, onde se encontra desafios relacionados aos conteúdos estudados, contribuindo desta forma para a aprendizagem.

Além de jogos, muitos professores utilizam *softwares* de simulações de fenômenos físicos, os quais são difíceis de serem visualizados, como por exemplo o *Phet Interactive Simulations*, um programa com a finalidade de demonstrar simulações de diversas áreas da física e de outras áreas do conhecimento, proporcionando, dessa forma, aos alunos a oportunidade de se observar um fenômeno de maneira detalhada.

A proposta deste trabalho não é diferente; de maneira similar, dedica-se ao estudo de ondas gravitacionais e como detectá-las com um interferômetro, detalhando princípios básicos de funcionamento desse tipo de detector por meio do aplicativo *Space Time Quest*, desenvolvido por um grupo de pesquisadores da Universidade de Birmingham e membros da colaboração científica LIGO. Pretende-se levar a professores de ensino médio essa ferramenta como um recurso de ensino, na forma de uma oficina preparatória com explicações sobre a história, teoria e as características das ondas gravitacionais, voltada, especificamente, para a descrição de um detector interferométrico.

Sendo um assunto pouco discutido em sala de aula, espera-se que, com essa divulgação aos docentes, os alunos do ensino médio tendam a se interessar pela ciência e sejam motivados a integrarem o universo de pesquisa científica, de modo que possam contribuir, futuramente, como uma massa científica para uma possível construção de um detector na América do sul.

Assim, este trabalho foi desenvolvido a partir de três etapas, primeiramente apresentado no capítulo dois, uma revisão teórica sobre as ondas gravitacionais, onde será apresentado tópicos como, fontes de ondas gravitacionais, os detectores capazes de identificarem essas ondas e a curva de sensibilidade de um detector interferométrico. No terceiro capítulo, o jogo *Space Time Quest* será apresentado, assim como a explicação de como atua cada etapa do jogo. Por fim, no capítulo quatro, será descrito a forma como será realizada a oficina a partir da apresentação, atividades experimentais e a aplicação do jogo. Finalizando com os capítulos quatro e cinco, onde serão discutidos os resultados e as conclusões obtidas neste trabalho.

## 2 ONDAS GRAVITACIONAIS

A detecção de ondas gravitacionais deu início a uma nova era na Astronomia. Com ela, passou a ser possível obter informações de fenômenos astrofísicos que não seriam possíveis de serem detectados por meio do espectro eletromagnético, tais como as diversas fusões de buracos negros detectadas até o momento. Apesar de terem sido previstas no início do século XX, as ondas gravitacionais só foram oficialmente detectadas um século depois, inaugurando a astronomia de ondas gravitacionais em 2016. O evento de inauguração foi o anúncio da detecção do sinal gravitacional proveniente da fase de espiralação e posterior ao colapso de um sistema binário de buracos negros (ABBOTT; et al, 2016). Tal sinal foi detectado em 14 de setembro de 2015 pelos detectores gêmeos LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*) (ABBOTT; et al, 2009; AASI; et al, 2015) e anunciado em 11 de fevereiro de 2016. Desde então, outras detecções foram realizadas, as quais encontram-se resumidas em um catálogo (ABBOTT; et al, 2019)

Além disso, a combinação de observações de sinais de ondas gravitacionais associada a observações no espectro eletromagnético – ou até mesmo observação de neutrinos, também chamada de astronomia multimensageira – possibilita uma vasta gama de informações, como ocorreu na detecção da primeira fusão de estrelas de nêutrons, confirmando que esse fenômeno é responsável pela emissão de radiação gama, seguida de uma *kilonova*<sup>2</sup> (GW170817).

<sup>2</sup> *Kilonova* representa um elemento celeste, formado pela fusão de um sistema binário.

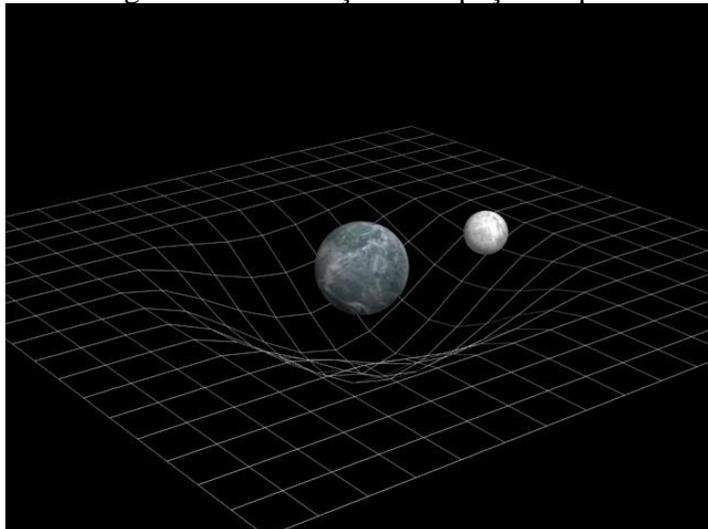
Neste capítulo, será revisado o que são ondas gravitacionais, as fontes que geram essas ondas e quais os principais tipos de detectores existentes dedicados a detectá-las.

## 2.1. Teoria

As ondas gravitacionais são perturbações no espaço-tempo que se propagam por entre o próprio espaço-tempo, à velocidade da luz (CONSTÂNCIO, 2017). Elas foram previstas em um discurso proposto pela teoria elaborada por Einstein, publicada no ano de 1918, dada como consequência de uma outra publicação, efetuada em 1916 relacionado a teoria da Relatividade Geral (RG).

Entendendo que é improvável qualquer informação viajar a uma velocidade maior que a da luz, Einstein compreendeu que o espaço não era algo autônomo do tempo; contudo, formava uma individualidade, chamada por ele de espaço-tempo, o qual, de certa forma, seria possível se curvar devido à existência de massa, causando o efeito gravitacional. (Aguiar, 2019, p.370)

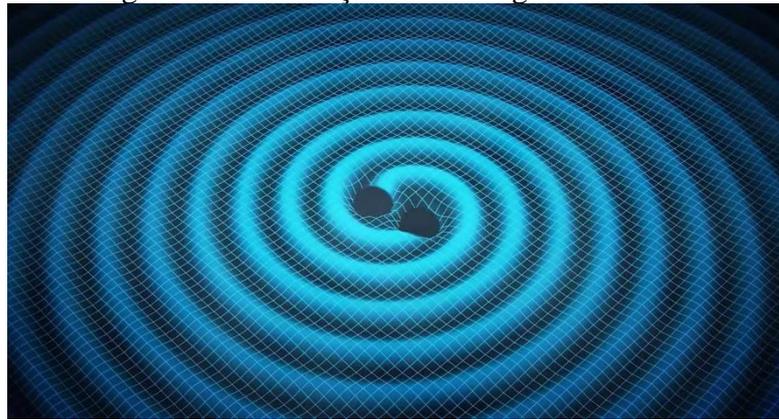
Figura 1- Deformação do espaço-tempo.



Fonte: Disponível em: <http://www.comciencia.br/relatividade-no-cotidiano/> Acesso em: 29 jul. 2020.

Na existência de duas estrelas orbitando ao redor uma da outra, sabendo que cada estrela deforma o espaço-tempo ao seu redor, ao estarem em movimento, elas produzem ondas de deformação no tecido do espaço-tempo que se propagam em sua volta, sendo estas as ondas gravitacionais. (Aguiar, 2019, p.370)

Figura 2 - A formação de ondas gravitacionais.



Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2015/09/dois-buracos-negros-vao-colidir-na-constelacao-de-virgem.html> / Acesso em: 29 jul. 2020.

De acordo com Aguiar (2019, p.371), as ondas gravitacionais são constituídas por uma determinada polarização:

Em 1918, Einstein descobriu, a partir da sua teoria da relatividade geral, que as ondas gravitacionais são produzidas quando existe uma variação do momento de quadrupolo de massa de um objeto ou sistema e que, por causa disto, devem apresentar duas polarizações fundamentais lineares, chamadas de polarizações mais (+) e cruzada (×), a partir das quais todas as outras polarizações podem ser obtidas. Polarização em uma onda gravitacional é mais ou menos a forma como ela oscila no espaço.

Dessa forma, a partir de sua polarização, quando uma onda gravitacional passa pela Terra que possui um determinado diâmetro  $L$ , pode-se concluir que a Terra irá se contrair e alongar muito minimamente de forma que, sua deformação causada pela onda seja  $\Delta L$ . A relação dada por esta deformação é determinada como  $\Delta L = L \times h$ , sendo  $h$  a amplitude adimensional da onda gravitacional (CONSTÂNCIO, 2017).

De acordo com Aguiar (2019, p.374) atualmente é possível dizer que uma onda gravitacional pode chegar à uma amplitude de aproximadamente  $10^{-18}$ . Ou seja:

$$\frac{\Delta L}{L} = 10^{-18} \quad (1)$$

Isso considerando uma onda gravitacional raríssima e extremamente grande. Assim, elas se tornam muito difíceis de serem detectadas. Para se ter uma ideia, uma onda dessa passando por um detector como LIGO, cujos braços possuem 4 km de extensão, causaria uma deformação de aproximadamente  $10^{-15}$  metros, o que é possível detectar somente com equipamentos muito sensíveis e de alta tecnologia (Aguiar, 2019, p.374).

## 2.2 Fontes de ondas gravitacionais

No universo, encontram-se diversos tipos de fontes astrofísicas das quais se esperam ondas gravitacionais detectáveis, uma vez que cada uma delas demonstra determinado tipo de

espectro de frequência característico. Ao nos locomovermos e nos movimentarmos de modo acelerado, são emitidas ondas gravitacionais de extrema irrelevância em relação à deformação do espaço-tempo. Ou seja, para a detecção de ondas gravitacionais são necessários sistemas envolvendo massas compactas de valores consideráveis que estejam se movendo à uma velocidade de rotação próxima à da luz. Tendo em vista tais fatores para a pesquisa de ondas, os pesquisadores compreendem que os principais alvos de estudo para a detecção das ondas gravitacionais são objetos como buracos negros (BNs) e estrelas de nêutrons (ENs). Assim, podemos categorizar as fontes de ondas gravitacionais em quatro tipos, sendo elas: sinais de espiralação (sistemas binários compactos), sinais contínuos (pulsares), sinais explosivos (supernovas) e fundo estocástico (FERREIRA, 2018).

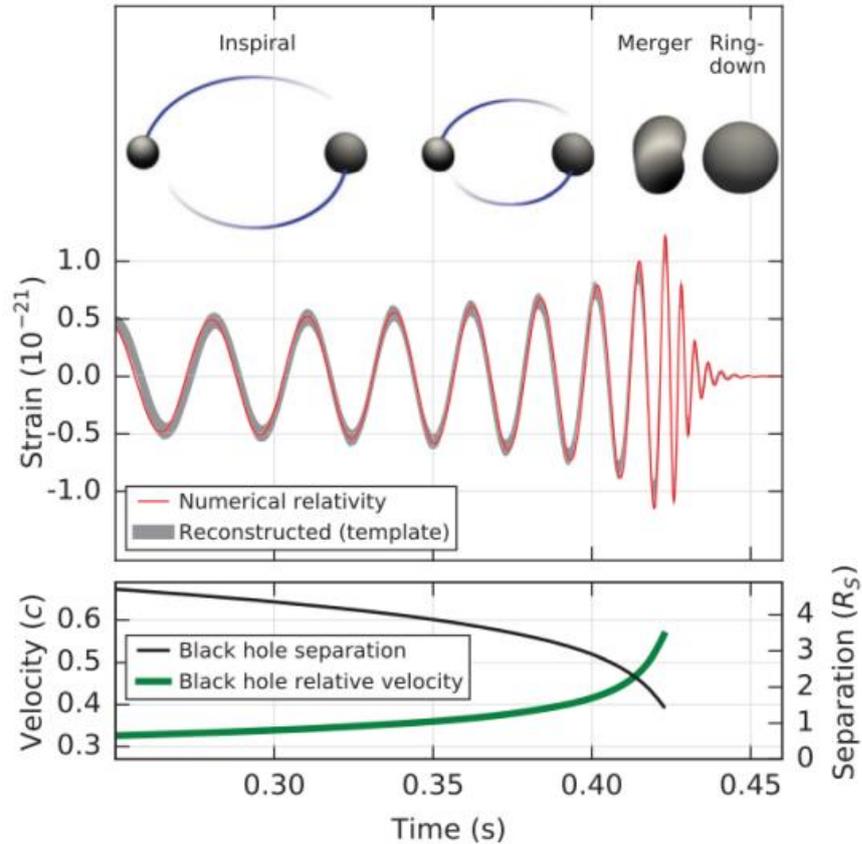
### **2.2.1 Sinais de espiralação**

Um sistema binário compacto pode ser composto por diferentes tipos de junções, como por exemplo: dois buracos negros (BN-BN), duas estrelas de nêutrons (EN-EN) ou um buraco negro e uma estrela de nêutrons (BN-EN). No momento em que uma binária inicia seu estágio de coalescência<sup>3</sup>, ou seja, diminuindo sua distância relativa sobre os dois corpos, estabelece um aumento na frequência e velocidade de sua órbita até que ocorra a fusão, emitindo, pois, uma radiação gravitacional mediante ao extravio de energia e momento angular. Essa emissão de radiação é capitada como um sinal, chamado de *senal de espiralação*.

A primeira detecção de ondas gravitacionais foi resultante da fusão de dois BNs, sendo a GW150914 pertencendo a esse tipo de fonte. O episódio foi identificado pelos observatórios LIGO, um em Hanford (Washington) e o outro em Livingston (Louisiana).

<sup>3</sup> Momento em que dois corpos se unem em um único corpo.

Figura 3 - A configuração da onda prevista pela relatividade numérica dado pelo evento GW150914, apresentando a velocidade e separação referente dos BNs.



Fonte: ABBOTT *et al.*, 2016 apud CONSTANCIO, 2017, p.11.

A Figura 3 ilustra de que forma ocorre a coalescência do sistema, o qual apresenta, no início, os objetos em órbita: finalmente ocorre uma diminuição entre sua distância relativa, ocasionando o processo de espiralação (*inspiral*). Logo após, os BNs passam pelo processo de fusão (*merger*) e, por último, ocorre a adaptação do objeto subsistente (*ring-down*). Na Figura 3, ainda é possível perceber que, conforme a distância entre os objetos diminui, sua velocidade relativa encontra-se maior, e a amplitude e a frequência das ondas aumentam (FERREIRA, 2018).

Figura 4 – Observatório LIGO em Hanford e Livingston.



Fonte: <https://www.ligo.org/multimedia.php> / Acesso em: 07 set. 2020.

### 2.2.2 Sinais contínuos

De acordo com Ferreira (2018), um exemplo de fonte dessa condição são as estrelas de nêutrons em rotação, sistema que emite a radiação gravitacional constantemente de forma contínua. Os sinais captados apresentam uma frequência padronizada, ou seja, sem variações e sem picos. A detecção de ondas gravitacionais somente será possível se existir alguma desigualdade na superfície da EN, visto que, se ela for simétrica, a curvatura do espaço-tempo a sua volta também será e, assim, não existirão alterações temporais com relação à deformidade do espaço-tempo local.

Ferreira (2018) destaca que essas assimetrias podem ser relacionadas às tensões formadas em sua crosta, adição de matéria ou em consequência de altos campos magnéticos. Assim, uma vez que a EN está rotacionando regularmente, essas assimetrias (podendo ser montanhas por exemplo) serão capazes de deformar o espaço-tempo local de forma periódica, emitindo informações em forma de oscilações, que irão se estender pelo universo continuamente.

Além da EN, pode se ter como fonte de sinais contínuos, binárias de buracos negros (BN-BN), binárias de estrelas de nêutrons (EN-EN), ou uma estrela de nêutrons e um buraco negro (EN-BN), sendo que em todas estas situações os sistemas estejam distantes da coalescência (FERREIRA, 2018).

### 2.2.3 Sinais explosivos

Ainda conforme Ferreira (2018), os sinais explosivos são derivados de ondas gravitacionais com uma duração muito curta, referente a um episódio abrupto, não dispendo de uma forma de onda esperada, como apresentado nos casos anteriores.

Como uma das fontes de sinais explosivos, é possível citar as supernovas. Caracterizada como um período final das estrelas de grande massa, a supernova é um evento astronômico extraordinário, devido a sua grande explosão. Nesse processo de explosão, são gerados neutrinos e ondas gravitacionais, capazes de alcançar a Terra sem decair qualquer forma de espalhamento (FERREIRA, 2018).

### 2.2.4 Fundo estocástico

Segundo Ferreira (2018), fundo estocástico são fontes aleatórias que geram ondas gravitacionais por meio de um número exageradamente grande de eventos separados e não associados. Estas OGs percorrem pela Terra a cada momento, chegando com sinais extremamente fracos.

Exemplos desses eventos são a coligação de buracos negros supermassivos, ou estrelas de nêutrons relativamente afastados, ou até mesmo as ondas primordiais originárias de fontes cosmológicas. As ondas primordiais são ondas gravitacionais formadas em instantes subsecutivos ao Big Bang e sua detecção seria uma porta de entrada para o entendimento do universo primário (FERREIRA, 2018).

### **2.3 Detectores**

De acordo com Aguiar (2019) apesar da detecção de ondas gravitacionais ser um evento tão recente (2015), os cientistas já tinham evidências indiretas de sua existência. Em 1974, os físicos Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram um sistema binário formado por duas estrelas de nêutrons, no qual uma das estrelas identificadas era um pulsar, conhecido pelo seu arranjo de campo magnético e rotação excessivamente elevado, capaz de emanar feixes de rádio e que se pode detectar na Terra.

Esses feixes foram detectados pelo radiotelescópio localizado em Porto Rico, permitindo aos físicos observar o período de rotação do sistema. Com o passar do tempo, verificaram que o período estava diminuindo, ou seja, o sistema estava perdendo energia. Assim, chegaram à conclusão de que essa perda era resultado da emissão das ondas gravitacionais, descoberta que conferiu o Prêmio Nobel da Física aos cientistas Hulse e Taylor, em 1993 (Aguiar, 2019, p.376).

A partir dessa descoberta, cientistas de todo o mundo estão atuando no desenvolvimento científico e tecnológico para aprimorar ferramentas de detecção de ondas gravitacionais, detectores mais precisos e sensíveis.

Serão apresentadas, nesta seção, as técnicas de detecção atualmente utilizadas.

#### **2.3.1 Pulsar Timing Arrays**

O método de *Pulsar Timing Arrays* se faz na forma de monitoramento, através de radiotelescópios, por meio dos quais se controla o tempo de aproximação dos pulsos de milissegundos originários dos pulsares, encontrados em torno de todo o céu. Trata-se de um sistema de detecção muito sensível.

Atualmente, são observados cerca de 40-50 pulsares regulares, os quais se mantêm isolados e com um período de rotação bem regulados. Assim, é possível prever a chegada de pulsos na terra.

Grupos de pesquisadores utilizam essa técnica de detecção para ondas gravitacionais polarizadas de uma determinada forma na qual seja possível detectá-las a uma frequência de  $10^{-18}$  até  $10^{-15}$  Hz, sendo ondas originadas pelo *Big Bang* (Aguiar, 2019, p.380)

### **2.3.2 Detectores de massa ressonante**

No começo da década de 60, foi proposta a construção do primeiro detector de ondas gravitacionais pelo físico Joseph Weber, fundamentado no conceito de detectores de massa ressonante. Seu propósito era verificar os sinais acústicos estimulados por uma grande massa em virtude da passagem de uma onda gravitacional.

Em teoria, a passagem da onda gravitacional iria efetuar um trabalho sobre a massa ressonante, que estimularia o comportamento acústico fundamental. Essa variação de energia mínima em prováveis valores de medição converte a energia mecânica de oscilação em sinais elétricos, através do uso de transdutores.

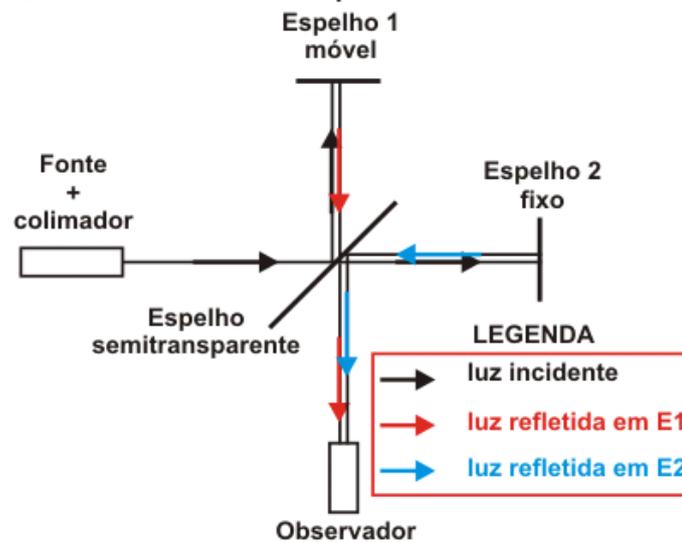
O detector proposto por Weber era composto por uma barra cilíndrica feita de alumínio com cerca de 2000 kg, a qual era suspensa no interior de uma câmara de vácuo, deparando-se com um sistema isolado sem nenhuma vibração.

Atualmente, encontram-se diversos detectores derivados do experimento de Weber, como: NAUTILUS e EXPLORER, AURIGA, MiniGRAIL e MARIO SCHENBERG. (CONSTÂNCIO, 2017).

### **2.3.3 Detectores interferométricos**

Baseado no interferômetro de Michelson, o detector interferométrico foi proposto por diferentes cientistas nas décadas de 60 e 70.

Figura 5 - Esquema de um interferômetro de Michelson.



Fonte: Disponível em: <https://www.alfaconnection.pro.br/fisica/ondas/interferencia-difracao-e-polarizacao/interferencia/> Acesso em: 12 ago. 2020.

Sua performance depende de um *laser*, o qual irá emitir um feixe em um divisor de feixes. Esse divisor irá reparti-lo em dois novos feixes, que percorrerá de forma perpendicular um ao outro até refletirem em um sistema de espelhos pendentes de forma pendular até se rearranjarem de volta ao divisor e se encontrarem no detector. Para que o detector identifique a menor intensidade da luz, a distância entre os espelhos é determinada para que os feixes se recombinem com uma diferença de fase de  $180^\circ$  entre si. Assim, será possível que o detector identifique a menor quantidade de luz admissível.

No momento em que uma onda gravitacional percorrer esse sistema, o detector se encontrará com sua sensibilidade máxima. Desse modo, a menor diferença entre fótons reconhecidos pelo detector será relacionado às características da onda gravitacional que cruzaram pelo interferômetro.

Conforme a Relatividade Geral, isso ocorre por conta da variação do comprimento do braço do detector, ou seja, alongando-o de um lado e encurtando-o do outro.

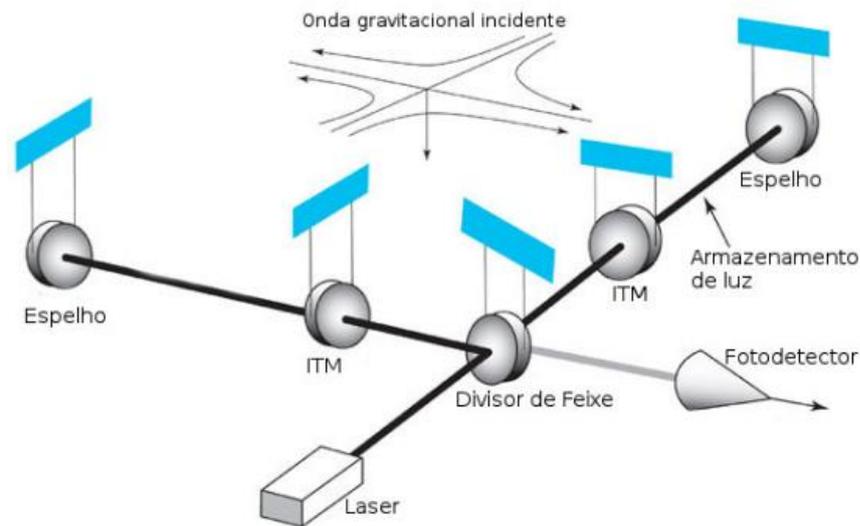
Os detectores interferométricos vêm sofrendo diversas modificações com o intuito de aumentar a capacidade de identificar ondas gravitacionais, pois, devido ao sinal muito fraco produzido pelas ondas gravitacionais, os braços de um interferômetro de Michelson, embora longos, formam um caminho óptico curto para o tempo de interação do fóton, ocasionando uma variação de fase muito baixa e produzindo um sinal no detector indetectável com a tecnologia disponível.

Uma dessas mudanças foi a inserção de um espelho semi-reflexivo (ITM) em cada braço do detector, adição a qual foi relacionada à intensidade do sinal no fotodetector, pois quanto

maior o tempo de interação do feixe de luz no braço do detector, maior também é o sinal no fotodetector.

Outra modificação realizada foi a implantação de um espelho entre o laser e o divisor de feixes (não demonstrado na Figura 6), mudança que faz com que o feixe interaja mais no sistema, refletindo a luz que volta ao laser e, em seguida, regresse ao detector.

Figura 6 - Esquema de um interferômetro de Michelson adaptado.



Fonte: <http://web.mit.edu/klmitch/classes/8.224/project/ligoinddepth.html>. apud CONSTANCIO, 2017, p.13.

Um dos problemas encontrados na construção desse detector reduzindo seu tamanho é a limitação terrestre devido à curvatura da Terra e ao obstáculo da implementação dos envelopes de vácuo alongado. Dessa forma, os detectores produzidos estão em uma ordem de quilômetros de comprimento de braço. Em breve, será disponibilizada a execução de detectores interferométricos no espaço, o que possibilitará ampliação de extensão sem a interferência de ruídos terrestre como encontramos atualmente (CONSTÂNCIO, 2013).

### 2.3.4 Faixa de frequência de cada tipo de detector

A tabela 1 demonstra os tipos de fontes gravitacionais e suas respectivas frequências, bem como, o detector mais conveniente a ser usado para cada nível de frequência.

Tabela 1 - Faixa de frequência de cada tipo de detector e suas respectivas fontes esperadas.

Banda	Fontes Típicas	Detectores
Frequência extremamente baixas	Fundo estocástico de ondas primordiais	Assinatura de ondas gravitacionais na radiação cósmica de fundo

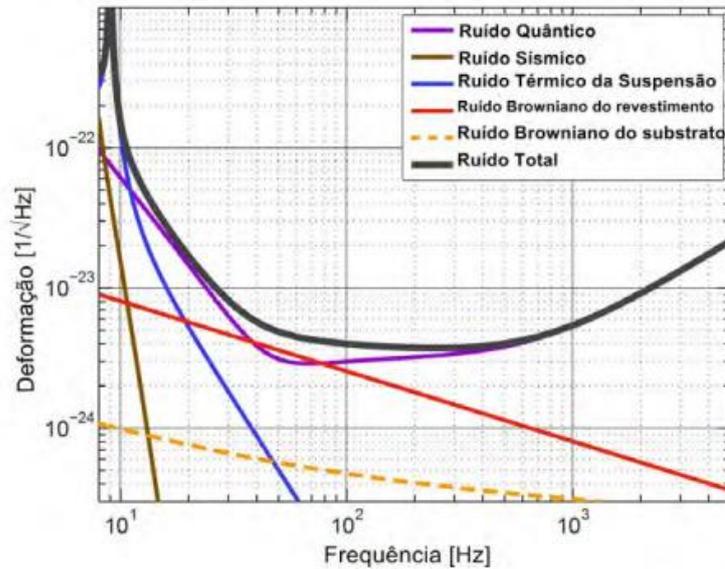
( $10^{-18}$ - $10^{-15}$ Hz)		
Frequência bem baixas (1 nHz-1 mHz)	Binárias de buracos negros supermassivos Massa $10^9 M_{sol}$	<i>Pulsar Timing arrays</i>
Baixas frequências (1 mHz-1 Hz)	Binárias de buracos negros supermassivos Massa $10^3 M_{sol}$ - $10^9 M_{sol}$	Interferômetros espaciais
Altas frequências (1 Hz-1 kHz)	Binárias de buracos negros/ estrelas de nêutrons; Massa $1 M_{sol}$ - $10^3 M_{sol}$ Supernovas; Pulsares; Fundo estocástico.	Interferômetros terrestre; Detectores de massa ressonante.

Fonte: CONSTÂNCIO, 2017 (adaptado).

#### 2.4 Curva de sensibilidade

A geração de detectores interferométricos utilizados atualmente abrange alguns ruídos inerentes ao seu aparelhamento; dessa forma, cada ruído apresenta uma curva de sensibilidade, a soma dessas curvas, resulta em uma curva de sensibilidade final ao detector. Na Figura 7 apresenta-se a curva de sensibilidade do aLIGO (Advanced LIGO), uma versão avançada do LIGO, o detector responsável pela detecção de ondas gravitacionais no ano de 2015 (CONSTÂNCIO, 2017). Nas próximas subseções, será discutido um pouco sobre cada um dos ruídos da figura.

Figura 7 - Principais ruídos implicado no LIGO.

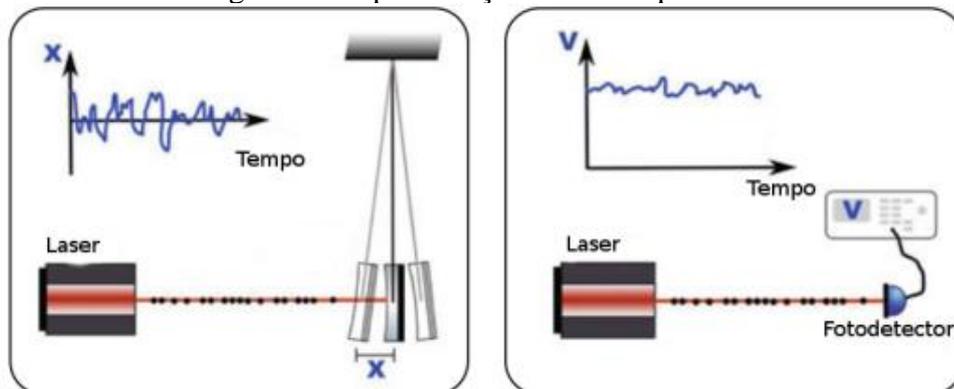


Fonte: CONSTÂNCIO, 2017.

#### 2.4.1 Ruído Quântico

Considerado como o que mais implica no detector, ou seja, afetando sua sensibilidade, o ruído quântico é compreendido como um ruído de natureza quântica, sendo da própria fonte de luz e do processamento de fotodetecção do detector. Manifestando-se de duas formas, o ruído quântico pode se apresentar “i) por meio de flutuações estatísticas na taxa de chegada de fótons ao fotodetector (denominado *shot noise*, ou ruído de Poisson) e ii) por meio da pressão de radiação devido à flutuação do número de fótons que tocam a massa e transferem momento” (CONSTÂNCIO, 2017).

Figura 8 - Representação do ruído quântico.



Fonte: CONSTÂNCIO, 2017.

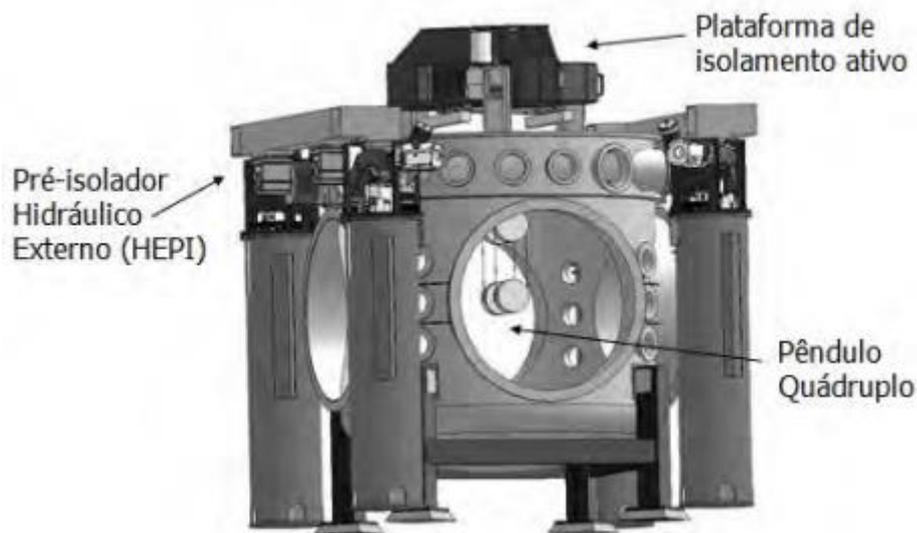
Na Figura 7, representa-se o efeito do ruído quântico no espelho: à esquerda demonstra-se a pressão da radiação; à direita, o ruído de Poisson (*shot noise*) (CONSTÂNCIO, 2017).

### 2.4.2 Ruído sísmico

O ruído sísmico advém da perturbação de ondas sísmicas e ventos. Consideram-se também atividades humanas e terremotos, razão pela qual faz-se necessária a construção do detector em locais extremamente isolados.

Para reduzir os ruídos sísmicos, o detector LIGO emprega um sistema de isolamento e suspensão constituído por três estágios: um equipamento pré-isolador hidráulico externo, que alinha e controla as baixas frequências; uma plataforma ativa de isolamento, composta por dois estágios preparada para alcançar um fator de 1000 de atenuação em 10 Hz; e um sistema pendular suspenso, formado por 4 partes pendulares, contribuindo para um isolamento inerte em baixas frequências. A última parte da suspensão contém um espelho de sílica de 40 kg pendente por fibras de sílica fundida para suprimir o ruído térmico da suspensão (CONSTÂNCIO, 2013).

Figura 9 - Sistema de isolamento vibracional presente atualmente no LIGO.



Fonte: CONSTÂNCIO, 2013.

### 2.4.3 Ruído Térmico

Presentes em experimentos mecânicos, o ruído térmico pode prejudicar na precisão do experimento. Ele está relacionado, basicamente, à temperatura do corpo e a perdas mecânicas do sistema. Em detectores interferométricos ocorrem muito nas suspensões, nos materiais que revestem os espelhos e no próprio espelho. Considerando a baixa amplitude do sinal obtido por ondas gravitacionais, este ruído acarreta uma anomalia dos dados obtidos. Como ele está relacionado à temperatura e às perdas mecânicas do sistema, é possível minimizá-lo trabalhando em baixas temperaturas, como proposto para os detectores LIGO Voyager (ADHIKARI, 2016)(

ADHIKARI, 2020), Einstein Telescope (PUNTURO et al., 2010), KAGRA (ASO et al., 2013; SOMIYA, 2012) e LIGO Cosmic Explorer e substituindo os materiais utilizados na suspensão, nos espelhos e nos revestimentos por materiais com baixas perdas mecânicas, como já foi feito no próprio LIGO entre as versões inicial e avançada. (CONSTÂNCIO, 2017)

No caso do LIGO atual (denominado aLIGO), o ruído térmico da suspensão é minimizado usando uma estrutura monolítica de sílica fundida, um material de perdas mecânicas relativamente baixas em temperatura ambiente. Contudo, na versão inicial do detector que operou entre 2006 e 2010, foram usados espelhos de sílica suspensos por fios de aço inox.

No revestimento dos espelhos, o ruído Browniano é gerado por atritos internos fazendo com que ocorram perdas mecânicas. Para lidar com essa complicação, vem sendo estudados diferentes tipos de materiais que tenham uma boa especificidade mecânica. No LIGO, usam-se camadas de sílica alternadas a camadas de tântalo dopada com Titânio.

Outro obstáculo encontrado com relação ao ruído Browniano se refere ao nível do ruído gerado pelo laser, uma vez que ele deposita calor sobre o revestimento, aumentando o nível de ruído térmico e gerando deformações nos espelhos. Uma proposta para contornar esse problema seria aumentar a largura do feixe para minimizar o gradiente de temperatura ao longo da superfície do espelho. No entanto, existe uma largura máxima restringida pelo tubo de vácuo; assim, essa alternativa está sendo testada para futuros detectores.

Mais um impasse que reflete no ruído Browniano é a perda mecânica do substrato da massa de teste. Uma vez que pesquisas apontam que a sílica apresenta uma baixa perda de energia mecânica em temperatura ambiente, torna-se o melhor material a ser utilizado, ainda que não seja a melhor escolha para um detector criogênico. Nessas condições, experimentos indicam que Silício e Safira são materiais mais promissores (CONSTÂNCIO, 2017).

### **3 SPACE TIME QUEST**

*Space Time Quest* é um jogo elaborado por pesquisadores do Grupo *Gravitational Wave*, da Universidade de Birmingham e membros da colaboração científica LIGO (LSC, do inglês *LIGO Scientific Collaboration*). Com o intuito de levar ao público o processo de detecção de ondas gravitacionais, o grupo resolveu produzir esse jogo que leva o usuário a percorrer todas as etapas de desenvolvimento de um detector interferométrico.

Com a responsabilidade de projetar um detector, o usuário deve partir para escolhas sobre como construir um detector com a melhor sensibilidade possível, para que possa detectar o maior número de ondas gravitacionais. Assim, o jogador desenvolve um equipamento

extremamente sensível, no melhor lugar possível e selecionando materiais de alta tecnologia, mas sem deixar de lado o orçamento, devendo mantê-lo dentro do que se possui e competindo com outros jogadores, dentre os quais os cientistas do LIGO.

O jogo pode ser baixado por *smartphones* ou até mesmo em computadores, facilitando o acesso aos usuários. Ele está disponível em 12 línguas, inclusive em português brasileiro.

Figura 10 - Jogo Space Time Quest.



Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

### 3.1 Como jogar

Para dar início ao jogo, o usuário deve inserir o seu nome e o nome de seu detector. Em seguida, é redirecionado a uma página onde é necessário escolher em qual lugar se deseja construir o detector, sendo apresentados quatro tipos diferentes de lugares para a possível construção.

O objetivo do jogo é desenvolver um detector interferométrico capaz de detectar ondas gravitacionais que geram um sinal extremamente fraco, assim, é necessário ampliar a sensibilidade de seu detector. O usuário deve considerar ainda situações que levará o detector a captar ruídos, os quais podem impedir o bom funcionamento dele. Tendo que resolver este obstáculo, minimizando os ruídos o máximo que for capaz.

Ao refletir qual lugar escolher, são levadas em conta características como ruídos vindos do meio ambiente que prejudiquem a detecção de sinais das ondas gravitacionais. Os locais disponíveis para a construção do detector são: cidades, floresta, deserto ou ilha. Ao clicar em

cada local, são apresentados diversos atributos sobre a região, como a quantidade de dinheiro oferecido para o projeto e as características da localidade.

Figura 11 - Página para a escolha do local.



Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

As estrelas representam a quantidade, como a quantidade de ruído no local ou a quantidade do orçamento. Quanto maior o número de estrelas, maior é o valor representativo.

Após a seleção do lugar, o usuário entra no escritório de operações do Investigador Principal, onde preparado o detector. Esse é o estágio no qual o usuário deve configurar seu detector para deixá-lo o mais sensível possível. Nessa página, o usuário conta com a presença de três monitores, sendo que cada um se refere a um sub-sistema do detector.

Figura 12 - Escritório do Investigador Principal.



Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

O primeiro monitor à esquerda abre uma página referente ao subsistema de ambiente, na qual o jogador deve selecionar valores para a profundidade do detector, sistema de vácuo do detector e sua temperatura de operação. Ao escolher a profundidade do detector, faz-se necessária a análise de questões como o ruído sísmico envolto ao sistema e o gradiente gravitacional (forças que se acoplam por ação à distância). O sistema de vácuo é muito importante para a eliminação de gás residual, que espalha o feixe laser e interfere na detecção de sinal de ondas gravitacionais. O resfriamento criogênico é inserido no equipamento para amenizar o ruído térmico proveniente da temperatura do sistema.

Figura 13 - Subsistema de Ambiente.

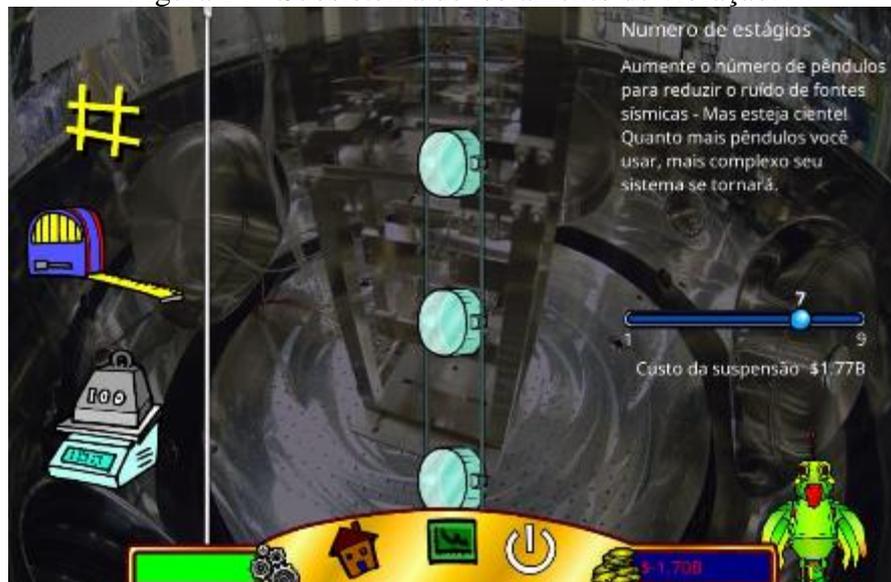


Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

No segundo monitor, é apresentado o subsistema de isolamento de vibração. Nesse estágio, o usuário planeja um sistema que reduza o quanto puder o ruído sísmico, isolando o

equipamento do experimento, trabalhando com o conjunto de pêndulos. Dividido em três etapas, o isolamento de vibração é composto pelo número de pêndulos, tamanho de cada pêndulo e a massa de cada um. Os pêndulos são muito significativos para a diminuição do ruído sísmico, pois quanto maior for o número de estágios (massa + fio), menor é a interferência do ruído, principalmente em baixas frequências. A escolha do número de estágios é importante pois coloca uma frequência mínima de corte a partir da qual a detecção passa a ser possível. Ao aumentar o comprimento dos pêndulos, o ruído sísmico estará diminuindo assim como o ruído térmico. Já a massa do espelho auxilia na diminuição do ruído quântico devido à pressão da radiação, pois quanto maior a massa, menor o efeito da transferência de momento dos fótons para o espelho.

Figura 14 - Subsistema de isolamento de vibração.



Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

No terceiro e último monitor, é aprimorado o subsistema óptico. Para atingir um excelente resultado, o material óptico deve ser de alta qualidade. Dessa forma, é preciso definir qual material do espelho, a rugosidade desse espelho e a potência do *laser* do detector. A escolha do material do espelho influencia no aumento ou diminuição do ruído térmico, pois está relacionada à qualidade mecânica do material. Tanto a potência do laser quanto a rugosidade influenciam no ruído quântico

Figura 15 - Subsistema óptico.



Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

O jogo ainda proporciona um gráfico de curva de sensibilidade para que o jogador observe como está o andamento de seu detector com relação aos ruídos. Idealmente, as curvas de ruído devem estar o mais baixo possível, aumentando a sensibilidade de seu detector e tornando mais provável a detecção de sinais de ondas gravitacionais provenientes de fontes astrofísicas.

Figura 16 - Curva de sensibilidade do jogo.



Fonte: *print* do aplicativo do jogo.

Finalizando todas essas etapas, o jogador poderá, por fim, saber qual é o desempenho de seu detector, ou seja, até qual distância ele pode detectar as ondas gravitacionais. Além disso, seu resultado fica disponível em um ranking internacional, podendo comparar seu resultado com de outros jogadores ao redor do mundo.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

A fim de levar tais conhecimentos para dentro das salas de aula de forma a alcançar um numeroso público, entre ele estudantes de ensino médio, foi elaborada uma oficina para a participação de professores do ensino médio a fim de capacitá-los sobre o tema de ondas gravitacionais para que, conseqüentemente, possam transmitir esse conhecimento para seus alunos.

Essa oficina é organizada em três etapas. A primeira delas é uma apresentação de conceitos históricos e características sobre as ondas gravitacionais, assim como a atuação de cientistas no mundo inteiro operando na área de pesquisa para a detecção das ondas e as formas pelas quais são detectadas. Em seguida, são apresentados para os docentes quatro tipos de experimentos para uma melhor compreensão do funcionamento dos detectores interferométricos. A última etapa está relacionada a apresentação do aplicativo *Space Time Quest* como um jogo para ser jogado em sala de aula pelos estudantes como uma ferramenta didática de ensino sobre as ondas gravitacionais.

### **4.1 Apresentação**

Para dar início à oficina, são apresentados para os participantes os principais conceitos sobre as ondas gravitacionais, assim como as demais informações sobre o tema a partir de *slides* explicativos (anexo I) com imagens e *gifs* didáticos para melhor entendimento do assunto.

Ao todo somam-se dezesseis *slides*, divididos em objetivos, introdução, fontes de ondas gravitacionais, detectores, curva de sensibilidade, ruídos presentes no sistema de detecção e fotos para a explicação do jogo *Space Time Quest*. Essa apresentação segue de forma explicativa, abrindo uma pausa ao final de cada seção para sanar quaisquer dúvidas.

### **4.2. Atividade experimental**

Composta por cinco experimentos a serem realizados (Anexo II), a atividade experimental está incluída na oficina como uma apresentação sobre como funcionam determinadas partes do detector interferométrico, demonstrando a razão pela qual algumas partes dos detectores são montadas da maneira como são.

### 4.2.1. Braço Interferométrico

O primeiro experimento a ser apresentado demonstra a razão pela qual os braços do detector interferométrico precisam ser tão grandes quando construídos.

Com materiais de baixo custo, o experimento é composto por uma régua, uma fita de elástico e uma caneta. Ao colocar o elástico sobre a régua, o participante terá de fazer marcações na fita em 3cm e 5cm. Logo após, são instruídos a esticar o elástico até a marcação de 3 cm chegar aos 6 cm. Dessa forma, é possível notar que, ao dobrar o comprimento do elástico de 3 cm para 6 cm, a outra marcação de 5 cm também dobra para 10 cm.

Com isso, é possível mostrar que o motivo dos braços dos detectores interferométricos serem longos é que esta deformação causada no espaço-tempo durante a passagem de uma onda gravitacional é proporcional ao comprimento inicial do braço, logo, quanto mais longo for o detector, maior será a variação de comprimento detectada.

### 4.2.2 Pêndulo I

O experimento do pêndulo representa o sistema de isolamento e suspensão do detector interferométrico, um sistema muito importante para a redução do ruído sísmico.

Composto por materiais de baixo custo, o experimento consiste em: um palito de churrasco, três tampinhas de garrafas pet, barbante e fita adesiva.

Sua montagem parte da ideia de montar três pêndulos, cada um com comprimento com uma diferença de cinco centímetros um do outro, e pendurados no palito em uma distância de cinco centímetros de distância um do outro também.

Ao realizar o experimento, balançando o palito de um lado para o outro, é observado a diferença de oscilação entre os pêndulos com o de comprimento menor realizando uma oscilação mais rápida e o de maior comprimento uma oscilação mais lenta.

Essa condição pode ser explicada pela equação do pêndulo simples (HALLIDAY, RESNICK, WALKER. 2016, p.100):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2)$$

Onde T é o período das oscilações, L é o comprimento do fio e g a aceleração da gravidade. Assim, é possível notar que o período e a frequência de um determinado valor da gravidade serão estabelecidos de acordo com o comprimento.

Em seguida, o participante que moverá o palito com alta frequência. A partir desse momento, deve-se perceber que os pêndulos de maior período (ou menor frequência) tendem a

transferir menos vibração em altas frequências, por essa razão a importância de se usar pêndulos compridos no detector.

### 4.2.3 Pêndulo II

Semelhante ao experimento anterior, e utilizando os mesmos materiais, esse procedimento é realizado para que seja refletido entre os participantes da oficina, a relação entre a quantidade de estágios pendulares no sistema de isolamento e suspensão.

A montagem do experimento é bem simples: é necessário fazer demarcações com espaçamentos iguais para cada tampinha para serem fixadas no barbante com a fita adesiva. Assim, é só amarrar uma extremidade do barbante no palito e está pronto.

Para a execução do experimento, o participante balançará o palito com uma frequência baixa e, em seguida, com uma frequência alta. Dessa forma, é possível perceber que, ao balançar em baixa frequência (abaixo da ressonância), o sistema todo, ou seja, os três estágios de pêndulos, entra em oscilação como se fosse um corpo rígido e, ao balançar o palito em alta frequência, o nível de movimento da massa pendurada mais longe da base diminui.

A demonstração desse efeito, pode ser explicitado pela equação (SAULSON, 2017, p.135):

$$\frac{x}{x_g} = \left(\frac{f_0^2}{f^2}\right)^N \quad (3)$$

No qual  $x$  representa a coordenada da posição da massa do pêndulo,  $x_g$  a coordenada da posição do ponto de suporte do pêndulo,  $f_0$  a frequência natural do pêndulo,  $f$  a frequência na qual o ponto de suporte oscila e  $N$  o número de estágios de pêndulos. Dessa forma, é possível notar que quanto maior for a frequência que o ponto de suporte oscila ou seja o palito, menor será o deslocamento da massa do pêndulo.

Isso reflete no ruído sísmico, pois, ao balançar o sistema pendular no ponto de suspensão, a oscilação se transmitirá com menor eficiência para os estágios mais distantes.

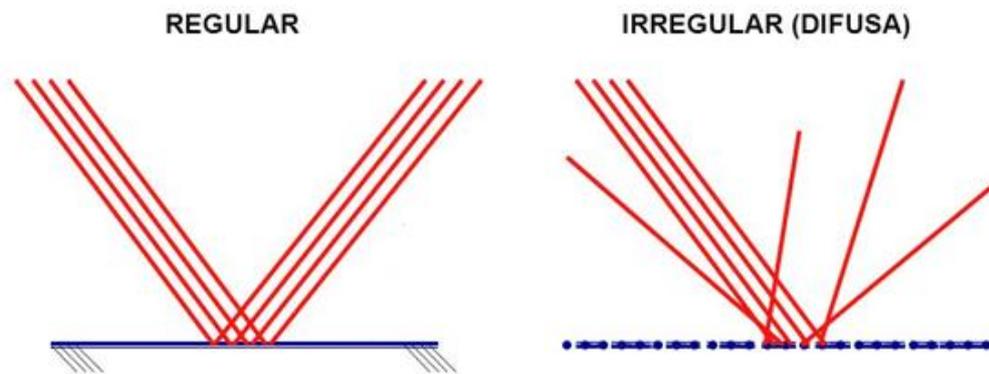
### 4.2.4 Espalhamento

Esse experimento reproduz o sistema de espelhos do detector interferométrico em que o *laser* é refletido.

Composto por materiais de baixo custo, esse experimento é muito simples de ser realizado. Para isso, é necessário um *laser*, um espelho pequeno e um pedaço de papel alumínio amassado, ou seja, com sua superfície irregular.

O procedimento experimental parte da ideia de apontar o *laser* para a superfície do espelho e, em seguida, apontá-lo para a superfície irregular do papel alumínio. Ao observar as duas situações, é perceptível que, no primeiro cenário, tem-se total reflexão bem uniforme para uma direção; e, no outro cenário, é observado um espalhamento da luz por conta da superfície irregular.

Figura 17 - Representação da reflexão da luz em superfície plana e irregular.



Fonte: Disponível em: <https://www.gestaoeducacional.com.br/reflexao-da-luz-o-que-e/> (Adaptado).

Acesso em: 07 ago. 2020.

Na figura 16, apresentam-se duas situações verificadas no experimento. Com isso, o participante averiguará a importância de o espelho refletor do detector ser extremamente regular para uma melhor detecção das ondas gravitacionais.

#### 4.2.5 Dispersão da luz

A dispersão da luz ocorre quando existe algum agente no caminho do feixe do *laser*. Dessa forma, ao esbarrar nesse agente, o feixe é disperso, fazendo com que a luz não chegue totalmente no detector, o que justifica a necessidade do sistema de vácuo nos braços do detector.

Esse experimento demonstra a dispersão da luz através de materiais obtidos em laboratório, como o béquer e a chapa de aquecimento.

Ao montar o experimento, colocando o béquer com água sobre a chapa de aquecimento, o participante irá aguardar a água entrar em ebulição. Com o vapor subindo para a superfície como o agente do experimento, é necessário apontar o *laser* direto para o anteparo sem atravessar o vapor, em seguida apontar o *laser* para o vapor até que atinja um anteparo. Observando o resultado, o participante chega à conclusão de que houve perda de luz no caminho até o anteparo, a qual se deve ao espalhamento causado pelas moléculas de vapor encontrado em seu caminho.

### 4.3. Aplicação do Jogo

Ao término de todas as etapas da oficina, é proposta aos participantes uma partida no jogo *Space Time Quest*. Para isso, cada participante terá baixado o jogo em seu *smartphone* ou serão encaminhados a uma sala de laboratório de informática para utilização dos computadores. Dessa forma, é apresentada a forma como o jogo funciona e como cada etapa é processada, estimulando a prática de cada tópico estudado na oficina. Ao término do jogo, o estudante é levado a refletir quais alterações são possíveis de serem feitas, visando o aumento da sensibilidade do detector.

## 5 RESULTADOS

Em razão de um imprevisto, onde foi necessário o afastamento de todos os alunos de forma a não haver aglomeração, não foi possível a realização da oficina. Uma pandemia se alastrou por todos os países, na qual foi necessário a interrupção de todas as atividades presenciais.

Tendo em vista que não foi permitido a realização da oficina presencial, e como é abordado atividades experimentais, das quais não é possível serem apresentadas de forma online, este trabalho foi construído com a ideia de ser um manual no qual se sustenta como uma atividade a ser apresentada futuramente.

Acompanhando um questionário (anexo III) para se obter um retorno dos participantes, sobre a relevância da realização da oficina, e a viabilidade de sua aplicação em salas de aula.

## 6 CONCLUSÃO

A partir das primeiras detecções de ondas gravitacionais, o campo de pesquisa dessa área vem crescendo de forma elevada, sabendo que tais ondas podem conceder ao ser humano diversas informações sobre o universo.

Existe uma importância muito grande para que esse tema seja discutido em sala de aula, tendo em vista que é um assunto com um alto nível de riqueza em conhecimento e que brevemente será levado à mídia como forma de notícia e entretenimento como filmes, séries entre outros. Ou seja, é necessário formar mentes críticas para informações que vinculam em plataformas de comunicações.

Com o crescimento na pesquisa, existe uma demanda de pesquisadores para a colaboração nos estudos, o que se encontra insuficiente na América do Sul. Assim, com a finalidade de construir um novo detector nesta área, diversos cientistas vêm desenvolvendo estratégias para a formação de mais pesquisadores nessa região.

Nesse sentido, a elaboração deste trabalho tende a propiciar uma forma de divulgação a diferentes alunos as descobertas que pesquisadores estão realizando, e aos que se interessam por ciência, a se identificar por esse ramo e se juntar ao grupo de pesquisa de ondas gravitacionais.

## 7 REFERÊNCIAS

ADHIKARI, R. et al. **LIGO Voyager Upgrade Conceptual Design**. [S.l.: s.n.], 2016. (LIGO-T1400226-v7) technical note.

ADHIKARI, R. et al. A cryogenic silicon interferometer for gravitational-wave detection. **Classical and Quantum Gravity**. v. 37, n. 16, jul. 2020.

AGUIAR, O. D. Astrofísica de ondas gravitacionais. **Introdução à astronomia e a astrofísica**. São José dos Campos. 2019. p,364-395. Disponível em: [http://www.inpe.br/ciaa2019/arquivos/pdfs/apostila\\_ciaa\\_2019\\_completa-compactado.pdf](http://www.inpe.br/ciaa2019/arquivos/pdfs/apostila_ciaa_2019_completa-compactado.pdf). Acesso em: 29 jul. 2020.

ASO, Y. et al. Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector. **physical Review D**, v. 88, n. 4, p. 043007, ago. 2013.

CONSTÂNCIO, M. J. **Contribuições ao desenvolvimento do multi-Nested pendula para isolamento vibracional criogênico do LIGO Voyager**. 2017. 159f. Dissertação (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.17.13.03?metadataarepository=sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.17.13.03.47&ibiurl.backgroundlanguage=pt&ibiurl.requiredsite=mtc-m21b.sid.inpe.br+804&requiredmirror=sid.inpe.br/mtc-m21b/2013/09.26.14.25.22&searchsite=bibdigital.sid.inpe.br:80&searchmirror=sid.inpe.br/bidigital@80/2006/04.07.15.50.13&choice=briefTitleAuthor>. Acesso em: 01 ago. 2020.

CONSTÂNCIO, M. J. **Multi-Nested Pendula: um novo conceito em isolamento vibracional para a terceira e quarta geração do LIGO**. 2013. 113f. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.16.17.32?metadataarepository=sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.16.17.32.04&ibiurl.backgroundlanguage=pt&ibiurl.requiredsite=mtc-m16d.sid.inpe.br+806&requiredmirror=sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/08.21.17.02.53&searchsite=bibdigital.sid.inpe.br:80&searchmirror=sid.inpe.br/bidigital@80/2006/04.07.15.50.13&choice=briefTitleAuthor>. Acesso em: 29 jul. 2020.

FERREIRA, T. A. **Análise multidimensional de transientes nos detectores LIGO. 2018. Dissertação de Mestrado**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Disponível em: [http://www.inpe.br/posgraduacao/ast/arquivos/dissertacoes/dissertacao\\_tabata\\_ferreira\\_2018.pdf](http://www.inpe.br/posgraduacao/ast/arquivos/dissertacoes/dissertacao_tabata_ferreira_2018.pdf). Acesso em: 23 ago. 2020.

GOMES, J. A. **Revisão bibliográfica sobre o ensino de física para deficientes visuais**. 2015. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26355/1/Revis%C3%A3o%20bibliogr%C3%A1fica%20sobre%20o%20Ensino%20de%20F%C3%ADsica%20para%20Deficientes%20Visuais.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020.

GUERRA, A; BRAGA, M; REIS, J. C. Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 29, n. 4, p. 575-583, 2007. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/070304.pdf> . Acesso em: 10 mar. 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. ed. 10. v. 2. Rio de Janeiro, LTC, 2010.

DANTAS, M. ; PEREZ, S. Gamificação e jogos no ensino de mecânica newtoniana: uma proposta didática utilizando os aplicativos bunny shooter e socrative. **Revista do Professor de Física**. Brasília, vol. 2, n. 2. p. 84-103. 2018. Acesso em: 20 nov. 2020.

OLIVEIRA, F. F. ; VIANNA, D. M. ; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Rio de Janeiro. 2007. v. 29, n. 3, p. 447-454.

OLIVEIRA, F. F. **O ensino de física moderna com enfoque CTS: uma proposta metodológica para o ensino médio usando o tópico Raio-X**. 2006. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: <file:///C:/Users/Jessica/Desktop/TCC%20Jessica/TCC/Refer%C3%A4ncias/FMC%20no%20ensino%20m%C3%A9dio/ensino%20de%20f%C3%ADsica%20moderna.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2020.

ORTERMANN, F. Física moderna e contemporânea no ensino médio: elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v.16, n. 3. p.267-286. 1999. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6795/6275>. Acesso em: 20 nov. 2020.

PUNTURO, M. et al. The einstein telescope: a third-generation gravitational wave observatory. **Classical and Quantum Gravity**, v. 27, n. 19, p. 194002, 2010.

RODRIGUES, C. D. O. **A inserção da teoria da relatividade no ensino médio**. 2001. 172f. Dissertação (Mestrado em Educação). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2013. Disponível em: [http://www.hu.usp.br/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/DISSERT\\_daniel.pdf](http://www.hu.usp.br/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/DISSERT_daniel.pdf). Acesso em 10 mar. 2020.

SAULSON, P. R. **Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors**. USA: Syracuse University Press, 2017.

SILVA, L. F. ; ASSIS, A. Física moderna no ensino médio: um experimento para abordar o efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v. 29, n. 2, p. 2012-324, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/134989>. Acesso em: 13 ago. 2020.

SILVA, J.B. ; SALES, G. L. ; CASTRO, J.B. Gamificação como estratégia de aprendizagem ativa no ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. V. 41, n. 4. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v41n4/1806-9126-RBEF-41-4-e20180309.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SILVA, J.B. ; SALES, G. L. Gamificação aplicada no ensino de Física: um estudo de caso no ensino de óptica geométrica. **Acta Scientiae**. Canos. v. 19, n. 5. 2017. Disponível em:

<http://pgecm.fortaleza.ifce.edu.br/wp-content/uploads/2018/03/Gamifica%C3%A7%C3%A3o-aplicada-no-ensino-de-F%C3%ADsica-um-estudo-de-caso-no-ensino-de-%C3%B3ptica-geom%C3%A9trica..pdf>. Acesso em: 30 nov.2020.

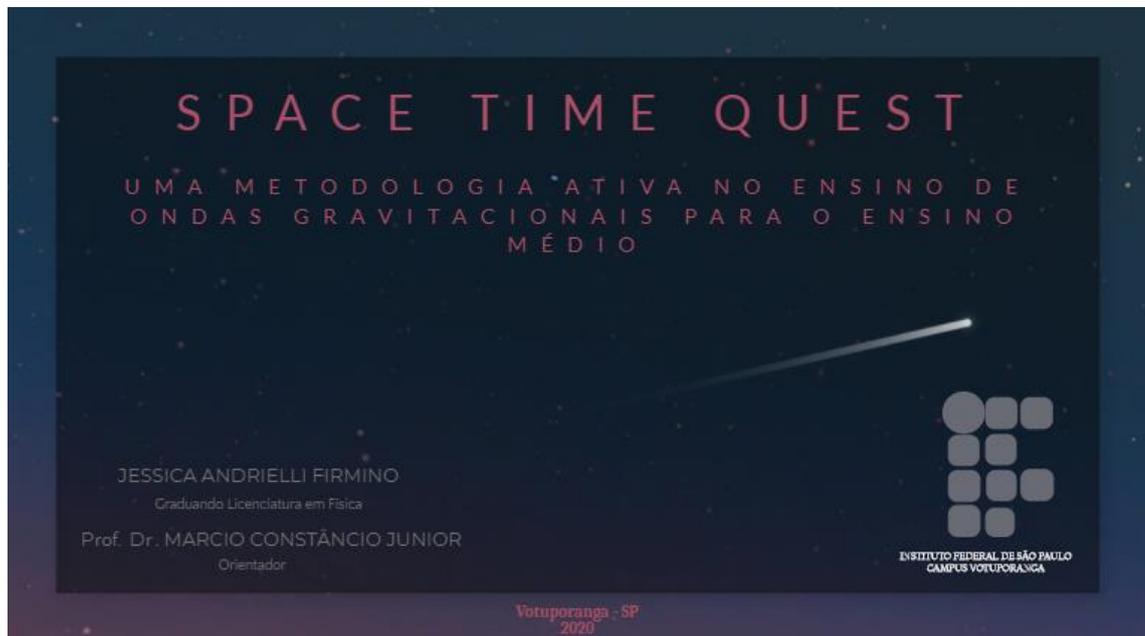
SOMIYA, K. Detector configuration of KAGRA-the Japanese cryogenic gravitational-wave detector. **Classical and Quantum Gravity**, v. 29, n. 12, p. 124007, 2012.

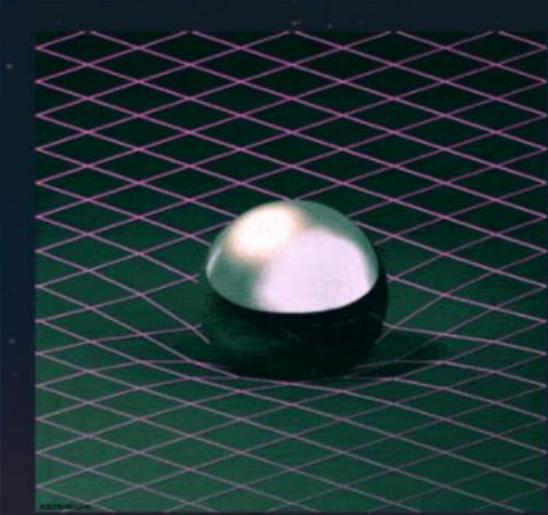
TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v.9, n.3: p.209-214. 1992.

Disponível em:

<file:///C:/Users/Jessica/Desktop/TCC%20Jessica/TCC/Refer%C3%A2ncias%20te%C3%B3ricas/FMC%20no%20ensino%20m%C3%A9dio/Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20FMC%20no%20ensino%20m%C3%A9dio.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.

## ANEXO I





## ONDAS GRAVITACIONAIS

As ondas gravitacionais propagam-se por entre o próprio espaço-tempo, por meio de perturbações no espaço-tempo com uma velocidade da luz (Junior, 2017). Um discurso proposto pela teoria elaborada por Einstein, publicada no ano de 1918.

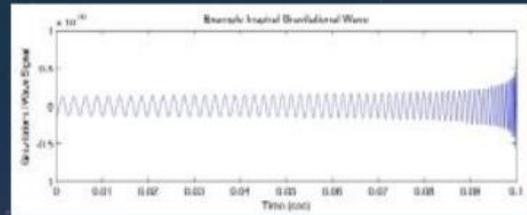
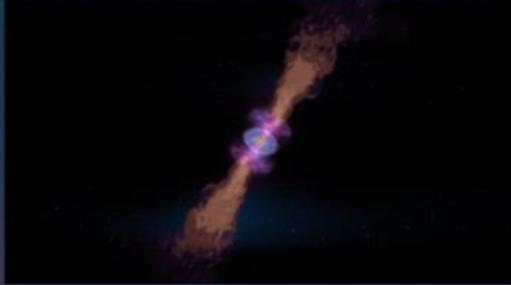
Quando uma onda gravitacional passa pela Terra a partir de sua polarização pode se concluir que a Terra irá se contrair e alongar, porém as ondas gravitacionais possuem uma amplitude muito pequena. Assim elas se tornam algo muito difícil de ser detectada, somente com equipamentos muito sensíveis e de alta tecnologia.



## FONTES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

- *Sinais de espiralação;*
- *Sinais contínuos;*
- *Sinais explosivos;*
- *Fundo estocástico.*

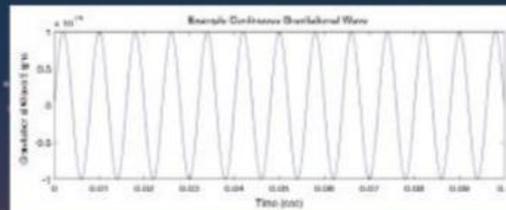
## SINAIS DE ESPIRALAÇÃO



Fonte: <https://www.ligo.org/multimedia/gallery/ast-images/inspiral.jpg>

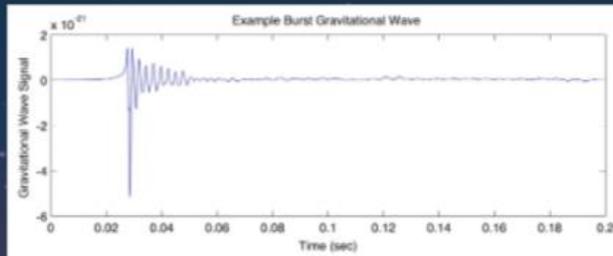
## SINAIS CONTINUOS

DE ACORDO COM FERREIRA (2018), UM EXEMPLO DE FONTE DESSA CONDIÇÃO SÃO AS ESTRELAS DE NÊUTRONS EM ROTAÇÃO, SISTEMA QUE EMITE A RADIAÇÃO GRAVITACIONAL CONSTANTEMENTE DE FORMA CONTÍNUA. OS SINAIS CAPTADOS APRESENTAM UMA FREQUÊNCIA PADRONIZADA, OU SEJA, SEM VARIAÇÕES E SEM PICOS. A DETECÇÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS SOMENTE SERÁ POSSÍVEL SE EXISTIR ALGUMA DESIGUALDADE NA SUPERFÍCIE DA EN, VISTO QUE, SE ELA FOR SIMÉTRICA, A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO A SUA VOLTA TAMBÉM SERÁ E, ASSIM, NÃO EXISTIRÃO ALTERAÇÕES TEMPORAIS COM RELAÇÃO À DEFORMIDADE DO ESPAÇO-TEMPO LOCAL.



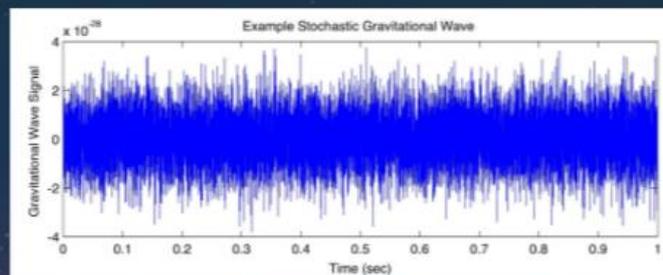
Fonte: <https://www.ligo.org/multimedia/gallery/ast-images/continuous.jpg>

## SINAIS EXPLOSIVOS



Fonte: <https://www.ligo.org/multimedia/gallery/ast-images/burst.jpg>

## FUNDO ESTOCÁSTICO

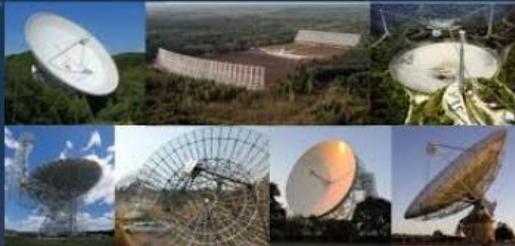


Fonte: <https://www.ligo.org/multimedia/gallery/ast-images/stochastic.jpg>

## DETECTORES

- Pulsar Timing Arrays;
- Detectores de massa ressonante;
- Detectores interferométricos;

### PULSAR TIMING ARRAYS



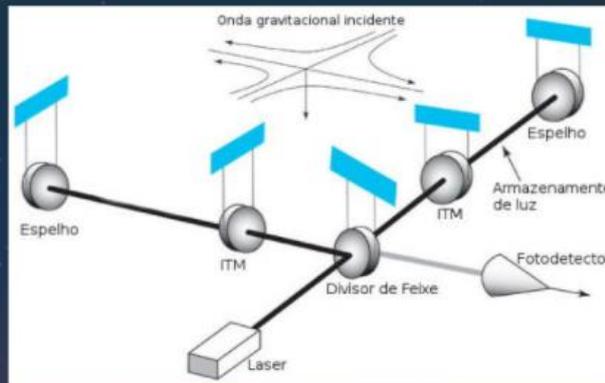
<https://stevetaylor.github.io/research.html#>

### DETECTORES DE MASSA RESSONANTE

SEU PROPÓSITO ERA VERIFICAR OS SINAIS ACÚSTICOS ESTIMULADOS POR UMA GRANDE MASSA EM VIRTUDE À PASSAGEM DE UMA ONDA GRAVITACIONAL.

EM TEORIA, A PASSAGEM DA ONDA GRAVITACIONAL IRIA EFETUAR UM TRABALHO SOBRE A MASSA RESSONANTE, QUE ESTIMULARIA O COMPORTAMENTO ACÚSTICO FUNDAMENTAL. ESSA VARIAÇÃO DE ENERGIA MÍNIMA EM PROVÁVEIS VALORES DE MEDIÇÃO ALTERA A ENERGIA MECÂNICA DE OSCILAÇÃO EM SINAIS ELÉTRICOS, SENDO CAPAZ DE SER REALIZADA RECORRENDO A TRANSDUTORES.

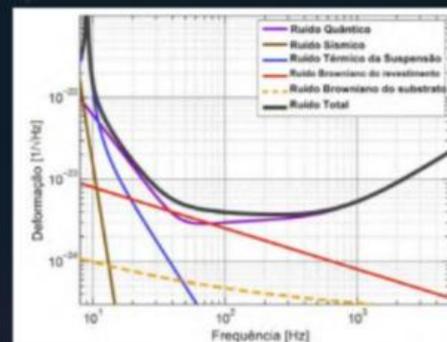
## DETECTOR INTERFEROMÉTRICO



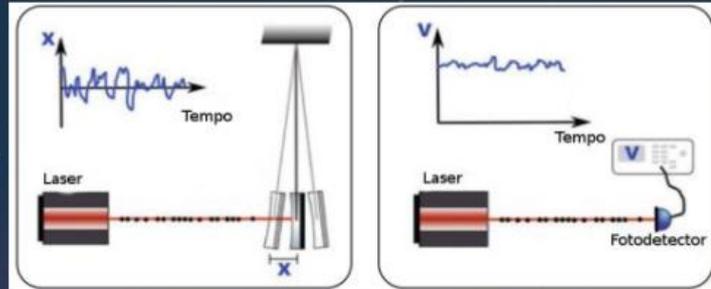
Fonte: : CONSTÂNCIO JUNIOR, 2013, p.13.

## CURVA DE SENSIBILIDADE

- Ruído quântico;
- Ruído sísmico;
- Ruído térmico.

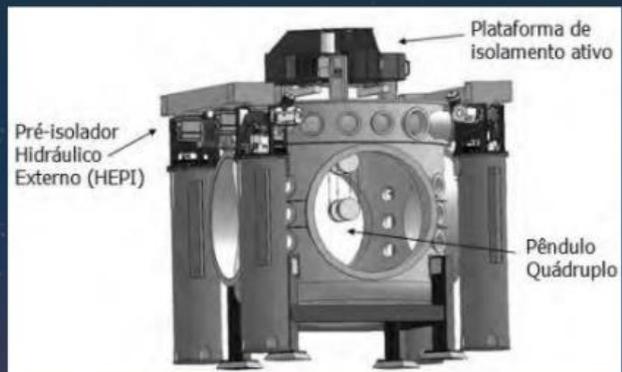


## RUÍDO QUÂNTICO



Fonte: : CONSTÂNCIO JUNIOR, 2017, p.28.

## RUÍDO SÍSMICO

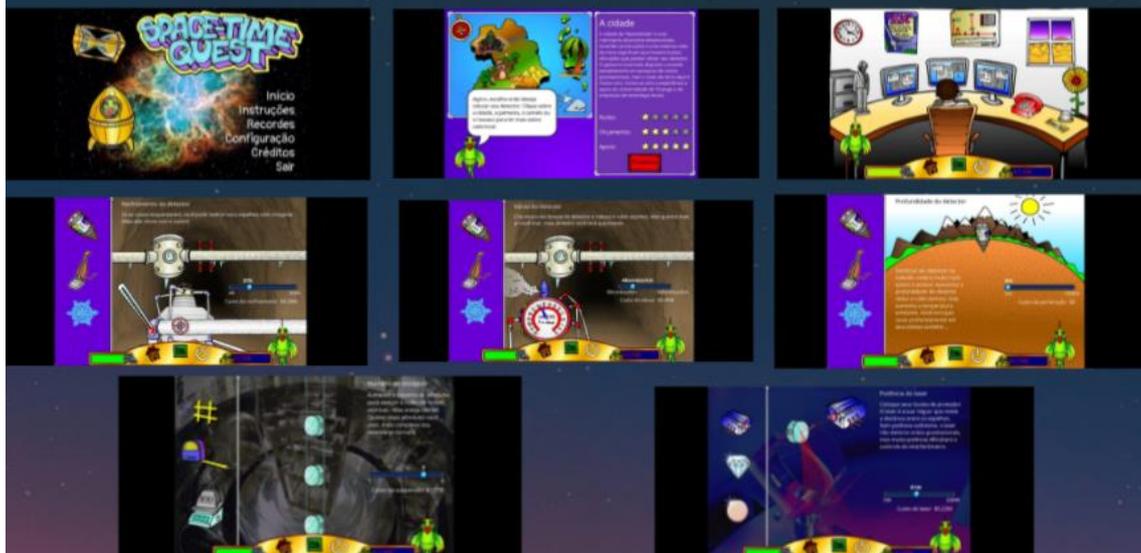


Fonte: : CONSTÂNCIO JUNIOR, 2013, p.28.

## RUÍDO TÉRMICO

PRESENTES EM EXPERIMENTOS MECÂNICOS, O RUÍDO TÉRMICO PODE PREJUDICAR NA PRECISÃO DO EXPERIMENTO. ELE ESTÁ RELACIONADO, BASICAMENTE, À TEMPERATURA DO CORPO E A PERDAS MECÂNICAS DO SISTEMA. DETECTORES INTERFEROMÉTRICOS OCORREM MUITO NAS SUSPENSÕES, OU SEJA, EM MATERIAIS QUE REVESTEM OS ESPELHOS E NO PRÓPRIO ESPELHO, CONSIDERANDO A BAIXA AMPLITUDE DO SINAL OBTIDO POR ONDAS GRAVITACIONAIS, ACARRETANDO UMA ANOMALIA DOS DADOS OBTIDOS. COMO ELE ESTÁ RELACIONADO À TEMPERATURA E ÀS PERDAS MECÂNICAS DO SISTEMA, É POSSÍVEL MINIMIZÁ-LO TRABALHANDO COM BAIXAS TEMPERATURAS (CONSTÂNCIO JUNIOR, 2017).

## JOGO SPACE TIME QUEST



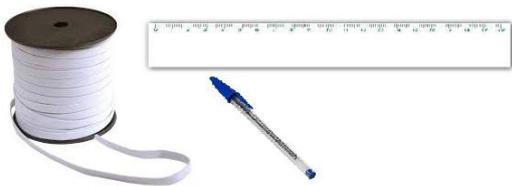
## Space time Quest

Roteiro: *Braço interferômetro*

O detector interferométrico é composto por braços que necessariamente são edificados de forma consideravelmente grande. Com uma extensão de 3 quilômetros, seus braços operam de forma muito importante no sistema de detecção, mas qual será a necessidade para essa grande extensão?

## Materiais:

- ✚ Régua;
- ✚ Elástico de 15 cm;
- ✚ Caneta.



## Procedimento Experimental:

- Alinhe o começo do elástico com a régua em 0 cm, utilize a régua para medir o elástico;
- Marque no elástico seu comprimento de 3 cm e 5 cm. Em seguida;
- Estique-o até que a marcação feita de 5 cm atinja 10 cm;
- Desta forma observe onde ficou a marcação de 3 cm.

## Observações:

---



---



---



---

## Experimentos:

- ✚ Braço interferômetro;
- ✚ Pêndulo I e II;
- ✚ Espalhamento;
- ✚ Dispersão da luz.

---



---



---



---



---



---

## Conclusão:

---



---



---



---



---



---



---



---

## Roteiro: Pêndulo I

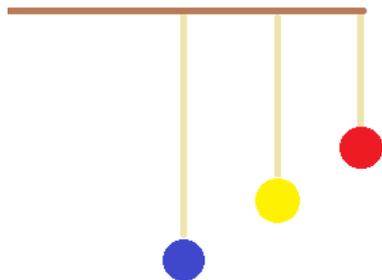
### Materiais:

- ✚ Palito de churrasco;
- ✚ 3 Tampinhas de garrafa;
- ✚ Fita adesiva;
- ✚ Barbante de 45 cm.



### Procedimento Experimental:

- Pegue o palito e faça 3 marcações de 5 cm pelo seu comprimento começando pela extremidade;
- Pegue o barbante e faça três marcações uma de 10 cm, outra de 15 cm e a última de 20cm, e corte nas marcações;
- Coloque as tampinhas nas extremidades de cada fio de barbante cortado e junte-os com a fita adesiva;
- Pegue a outra extremidade dos barbantes e amarre nas marcações do palito (do fio de menor comprimento para o maior);
- Após a montagem do experimento, faça movimentos de um lado para o outro com as mãos segurando o palito;
- Oscile de forma lenta, e em seguida acelere o movimento gradativamente.



O que é observado?

Qual a relação observada entre a frequência e o comprimento do fio?

O que acontece ao aumentar a frequência com que se movimentam os palitos?

Baseado na informação anterior, qual seria melhor: aumentar ou diminuir o comprimento de um pêndulo em um detector interferométrico?

## Roteiro: *Pêndulo II*

Localizado no sistema de isolamento e suspensão, o complexo pendular é formado por massas interligadas uma à outra de forma a prevenir o detector dos ruídos sísmicos. Assim para exemplificar a situação:

### Materiais:

- ✚ Palito de churrasco;
- ✚ 3 Tampinhas de garrafa;
- ✚ Fita adesiva;
- ✚ Barbante de 45 cm.



### Procedimento Experimental:

- Pegue o barbante e faça marcações de 15 cm pelo seu comprimento
- Coloque as tampinhas nas marcações e junte-os com a fita adesiva
- Pegue a ponta do barbante e amarre na extremidade do palito;
- Após a montagem do experimento, faça movimentos de um lado para o outro com as mãos segurando o palito.



Como o sistema auxilia na diminuição dos ruídos sísmicos?





## ANEXO III

### Questionário

1. Na sua opinião, qual a importância de os alunos do ensino médio estarem atualizados nas atividades e pesquisas científicas realizadas atualmente?

---

---

---

---

2. Avalie a relevância desta oficina dando uma nota de 0 a 10. Mencione o que você mais gostou e o que menos gostou.

---

---

---

---

3. Avalie os tópicos a seguir com uma nota entre 0 e 10.

- a) Didática dos formadores:
- b) Conteúdo:
- c) Forma de organização do conteúdo:
- d) Duração da oficina:

4. Na sua opinião, os conteúdos aplicados nesta oficina podem ser levados para salas de aulas do ensino médio? Se sim, como você faria?

---

---

---

---

5. Deixe um comentário final aos formadores para que possam fazer esta oficina cada vez melhor. (Opcional)

---

---

---

---