**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO**

**CAMPUS DIADEMA**

PAMELLA ALINE DE ALMEIDA

# Um estudo sobre a detecção de ondas gravitacionais: Interferometria

DIADEMA

2022

PAMELLA ALINE DE ALMEIDA

# Um estudo sobre a detecção de ondas gravitacionais: Interferometria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Teoria da Relatividade, ao Programa de Pós-Graduação *Lato Sensu* do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema

Orientadora: Profª. Drª. Nadja Simão Magalhães

DIADEMA

2022

**Dados Internacionais da Catalogação na Publicação (CIP)**

Almeida, Pamella Aline
Um estudo sobre a detecção de ondas gravitacionais : Interferometria / Pamella Aline Almeida. – – Diadema, 2022.
75 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Teoria da Relatividade) - Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema, 2022.

Orientador: Nadja Simão Magalhães

1. Ondas gravitacionais. 2. Interferômetros. 3. Detecção. 4. LIGO. 5. Teoria da relatividade. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Campus Diadema da Universidade Federal de São Paulo, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Eu dedico esse trabalho para a Pamella de 10 anos de idade que estudou em escola pública e não teve tantas oportunidades e que não imaginava que seria possível chegar nesse lugar um dia.

Nós conseguimos.

## AGRADECIMENTOS

O meu muito obrigada a todos os meus amigos, professores, alunos e família pelo apoio e suporte durante todo o meu curso de pós-graduação.

O processo de fechamento de um ciclo de estudos é sempre difícil e árduo; ao longo do caminho muitos foram os momentos em que pensei em desistir ou não me achei suficientemente capaz, mas com o suporte da minha mãe Fatima, do meu pai Juarez e da minha irmã Palloma, eu consegui me manter firme e continuar até chegar nesse momento. O suporte e encorajamento deles foi extremamente reconfortante para mim e agradeço imensamente ter contado sempre com eles.

Além disso, não posso deixar de agradecer imensamente à minha orientadora, a professora Nadja. Sem ela nada disso seria possível, ela me deu suporte e me incentivou a dar o meu máximo durante todo o processo. Além de acreditar em mim, buscou me ajudar e me abriu grandes portas e oportunidades, por isso serei sempre grata a ela.

Aos meus amigos que sempre se orgulharam de mim e continuaram me apoiando durante todo o processo.

Aos meus alunos que me ouviram reclamar do cansaço, da alegria, da tristeza, do orgulho, da mistura de sentimentos que tive ao longo do caminho, mas que sempre estiveram me dando apoio e me incentivando a continuar.

Um agradecimento extremamente especial para a minha pessoa, Marcela, que me ajudou imensamente revisando o meu texto e me ajudando com correções importantes.

“A Inteligência é a criatividade se divertindo!”

Albert Einstein

PAMELLA ALINE DE ALMEIDA

# Um estudo sobre a detecção de ondas gravitacionais: Interferometria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Teoria da Relatividade, ao Programa de Pós-Graduação *Lato Sensu* do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema

Orientadora: Profª. Drª. Nadja Simão Magalhães.

BANCA EXAMINADORA

---

Discente: Pamella Aline de Almeida
Universidade Federal de São Paulo- UNIFESP

---

Profª. Drª. Nadja Simão Magalhães
Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP

---

Professor Drº. Carlos Roberto Senise Junior
Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP

---

Professor Drº. Rodolfo Valentim da Costa Lima
Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP

# RESUMO

A possibilidade do uso de interferômetros para detecção de ondas gravitacionais (OGs) começou a ser considerada na década de 1960 e se desenvolveu a partir daí.

As ondas gravitacionais foram previstas pela teoria da relatividade geral descrita por Albert Einstein e desde então buscava-se uma maneira de se comprovar a sua existência. Com os interferômetros, sua detecção direta se tornou possível e foi com essa técnica que a colaboração Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) conseguiu finalmente comprovar experimentalmente as OGs, isso quase 100 anos após a teoria desenvolvida pelo Einstein.

Apesar da técnica da interferometria ser a mais conhecida e atualmente a mais eficiente na detecção de OGs, ela não é a única e existem outros métodos sendo estudados pelos cientistas, assim como tem-se vários laboratórios e colaborações no mundo todo estudando sobre ondas gravitacionais, além da colaboração LIGO.

As ondas gravitacionais e sua detecção são extremamente importantes, pois contribuem para a prova experimental da Teoria da Relatividade e coloca em contraponto outro grande gênio da ciência, Isaac Newton, uma vez que a Lei da Gravitação Universal e a Teoria da Relatividade Geral representam perspectivas e referências de estudos distintos sobre o nosso universo. Como decorrência desse empenho mundial através das décadas para detectar as OGs, hoje podemos vislumbrar o nascimento de um novo tipo de astronomia, que deverá dar à humanidade um olhar inédito sobre o cosmos: a astronomia gravitacional.

Neste trabalho será feita uma breve revisão do que são as OGs, da sua importância e de alguns dos principais desafios experimentais enfrentados para sua detecção direta em detectores interferométricos.



**Palavras-chave**: Ondas gravitacionais; interferômetros; detecção; LIGO; teoria da relatividade.

## ABSTRACT

The possibility of using interferometers to detect gravitational waves (GWs) began to be considered in the 1960s and developed from there.

Gravitational waves were predicted by the theory of general relativity described by Albert Einstein and since then, people were looking for a way to prove their existence. With interferometers, their direct detection became possible and it was with this technique that the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) collaboration was finally able to experimentally prove GWs, almost 100 years after the theory developed by Einstein.

Although the interferometry technique is the best known and currently the most efficient in the detection of GWs, it is not the only one and there are other methods being studied by scientists, as well as several laboratories and collaborations around the world studying gravitational waves, in addition to the LIGO collaboration.

Gravitational waves and their detection are extremely important, as they contribute to the experimental proof of the Theory of Relativity and put in counterpoint another great genius of science, Isaac Newton, since the Law of Universal Gravitation and the General Theory of Relativity represent perspectives and references from different studies about our universe. As a result of this worldwide effort over the decades to detect GWs, today we can see the birth of a new type of astronomy, which should give humanity an unprecedented look at the cosmos: gravitational astronomy.

In this work, a brief review of what GWs are, their importance and some of the main experimental challenges faced for their direct detection in interferometric detectors will be made.



**Keywords:** Gravitational Waves; detection; interferometer; LIGO; theory of relativity.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| Al | Elemento periódico alumínio |
| AMIGO | Adelaide's Mini Interferometer for Gravitational-Wave Outreach |
| CERN | Centro europeu de pesquisas nucleares |
| CE | Cosmic Explorer |
| CIDEPE | Centro industrial de equipamentos de ensino e pesquisa |
| Cu | Elemento periódico cobre |
| EGO | Observatório gravitacional europeu |
| ET | Einstein Telescope |
| INPE | Instituto nacional de pesquisas espaciais |
| KAGRA | Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope |
| LHC | Grande colisor de hádrons |
| LIGO | Laser interferometer gravitational- Wave observatory |
| LISA | Laser interferometer space Antenna |
| MHS | Movimento Harmônico simples |
| NSF | National Science Foundation |
| NEMO | Observatório de Matéria Extrema de Estrelas de Nêutrons |

| | |
|---|---|
| OGs | Ondas gravitacionais |
| PTAc | Pulsar Timing Array |
| TRG | Teoria da relatividade geral |
| TR | Teoria da relatividade |
| SAGO | South American Gravitational-wave Observatory |
| UNIFESP | Universidade Federal de São Paulo |

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 OBJETIVOS 18
1.2 METODOLOGIA 19
2. ENTENDENDO SOBRE ONDULATÓRIA E AS DIFICULDADES DE DETECÇÃO DAS ONDAS GRAVITACIONAIS 21
2.1 ONDAS GRAVITACIONAIS E UMA ANALOGIA COM O SISTEMA MASSA-MOLA 22
2.2 COMO DETECTAR ONDAS GRAVITACIONAIS – INTERFEROMETRIA 24
2.2.1 Alguns experimentos para detectar ondas gravitacionais 24
2.2.2 Interferometria: princípio físico e usos 25
2.3 HISTÓRICO DO PROJETO LIGO E SUAS PRIMEIRAS DETECÇÕES 29
2.4 TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL E AS EQUAÇÕES DE EINSTEIN 31
3. DIFICULDADES NA DETECÇÃO DAS OGs E UMA REPRODUÇÃO DA EXPERIÊNCIA DE INTERFERÔMETROS 35
3.1 VIVENCIANDO A INTERFEROMETRIA COM UM EXPERIMENTO DIDÁTICO 35
3.2 SENSIBILIDADE DO LIGO 40
4. UMA REFLEXÃO SOBRE TECNOLOGIAS EM DETECÇÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS 45
4.1 ANTENAS RESSONANTES MASSIVAS 45
4.2 PONTOS A FAVOR E CONTRA A INTERFEROMETRIA COMO TECNOLOGIA DE DETECÇÃO DE ONDAS 48
5. CONCLUSÕES 50
5.1 FUTURO 51
REFERÊNCIAS 52
BIBLIOGRAFIA 57
APÊNDICE 1 57
APÊNDICE 2: Visitação ao INPE 65

# 1. INTRODUÇÃO

As ondas gravitacionais (OGs) podem ser consideradas perturbações transmitidas pelo espaço-tempo; contudo, o que isso realmente quer dizer?

Bom, tomemos que o conceito de espaço-tempo poderá ser entendido mais adiante e consideremos que a deformação causada nesse "tecido" (espaço-tempo) é o que associamos a ondas gravitacionais.

> Na teoria da relatividade (tanto na teoria especial quanto na geral), os conceitos de espaço e de tempo são de grande importância. O conceito do éter também teve significativa relevância, não apenas na gênese da relatividade, mas, também nas discussões conceituais que se seguiram à criação dessa teoria (MARTINS, 2010).

As OGs foram previstas por Albert Einstein em 1916, um ano depois da formulação da Teoria da Relatividade Geral (TRG), ou seja, vemos então que as ondas gravitacionais estão associadas à tão famosa teoria da relatividade geral. "O conceito de ondas gravitacionais só pode ser entendido à luz da teoria da relatividade geral de Albert Einstein. Sem ela não podemos entender o que são ondas gravitacionais" (AGUIAR, 2021). Então, podemos dizer, de uma maneira simplificada, que as OGs transportam energia na forma de radiação gravitacional.

Faz-se necessário que, antes de entendermos melhor a ideia do Albert Einstein e as ondas gravitacionais, pensemos na ideia da gravidade, visto que, como já mencionamos, existe uma associação entre as OGs e a radiação gravitacional. Sabemos que Newton e Einstein possuem explicações diferentes para a gravidade; vamos começar pela ideia de Isaac Newton, que definiu a gravidade como uma forma de força de atração atuando sobre dois corpos e descreveu como sendo:

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{d^2}$$

Onde temos que:

- ✓ F seria a força gravitacional.
- ✓ M seria a massa de um dos objetos.
- ✓ m seria a massa do outro objeto.
- ✓ d seria a distância entre os objetos M e m.

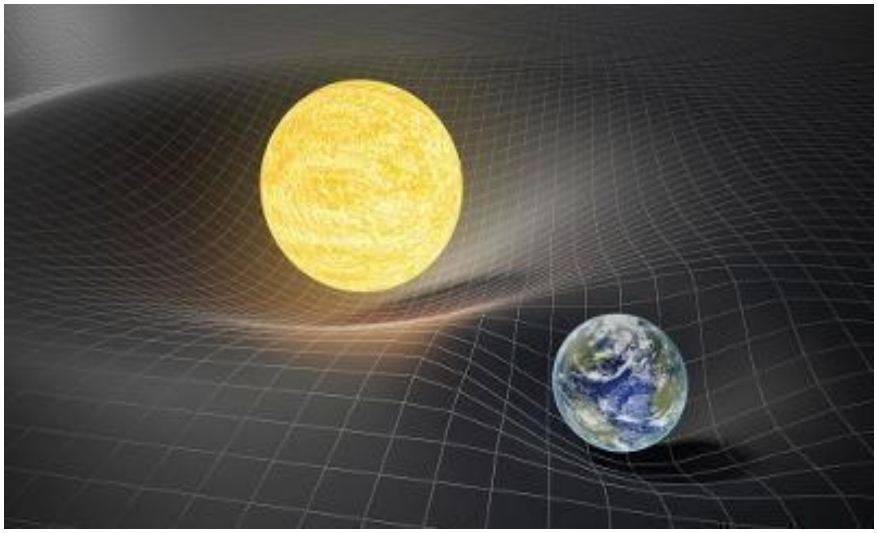
- ✓ G seria a constante da gravitação universal, que possui o valor aproximado de $6,67.10^{-11}\ N.m^2/kg^2$

Pela equação acima podemos observar que a força estaria relacionada às massas dos corpos multiplicadas pela constante da gravitação universal e, tudo isso, dividido pela distância entre os corpos elevada ao quadrado. Isso mostra então que, para Newton, os corpos se atraiam, estando sujeitos à equação da força (lei da gravitação universal) e isso, por consequência, deixava eles em órbita. Esta lei da gravitação, como ficou conhecida, não dizia nada sobre a velocidade de propagação da interação gravitacional.

Agora, quando Albert Einstein estava estudando sobre a gravitação, ele percebeu que, na verdade, os corpos deformavam o que chamamos espaço-tempo e que essa deformação é o que leva esses corpos a se aproximarem e ficarem em órbita. Essa ideia não parece tão intuitiva e difere da visão de Isaac Newton. Para ficar mais claro, vamos tentar ilustrar o que Albert Einstein falou de uma maneira mais lúdica e simplificada.

Primeiro, imagine um pula-pula infantil, no qual você coloque uma bola de chumbo, automaticamente o pula-pula sofrerá uma deformação; imagine agora que você acrescente a esse pula-pula uma bola de futebol ou de tênis, automaticamente a bola irá em sentido de encontro à bola de chumbo, que deformou o local primeiro e possui mais massa, causando um efeito parecido com o da Figura 1.

Figura 1: Representação livre de dois corpos de grande massa (o Sol, amarelo, e a Terra) “deformando” o espaço-tempo, ilustrado pelo tecido reticulado preto com quadriculado branco sob os corpos. Representação artística da curvatura do espaço-tempo.



Fonte: Brasil Escola. Portal do UOL.

Isso era o que o Albert Einstein imaginou que aconteceria com todos os corpos no universo, e que assim se explicaria como os corpos estavam deformando o espaço-tempo e explicaria também como os corpos estavam em órbita.

Além disso, Albert Einstein foi talvez o primeiro cientista a perceber que nenhuma informação poderia viajar a velocidade maior que a da luz no vácuo. Isto foi percebido já na sua teoria da relatividade especial publicada em 1905. Como consequência deste limite de velocidade para todas as coisas, Albert Einstein percebeu também que o espaço não era independente do tempo, mas formava com ele uma entidade que Einstein nomeou de espaço-tempo; com isso, podemos então obter uma visão mais clara da conexão com a TRG e, é dessa ideia, que conseguimos verificar o surgimento das ondas gravitacionais. Como já mencionado anteriormente, essa ideia de que o tempo e o espaço estão conectados também ficou conhecida como a ideia da quarta dimensão. Diferente do senso comum, que relaciona uma quarta dimensão espacial, espaço ocupado, aqui fica claro que, na verdade, essa "nova" dimensão está conectada com o tempo.

Em 1924, Albert Einstein foi além e descobriu que, quando o espaço-tempo se curvava (entortava), produzia-se o efeito gravitacional, ou seja, ele descobriu a origem da gravitação, que passava a ter uma explicação diferente da que Isaac Newton havia proposto na mecânica clássica.

Dessa forma, para Einstein, os corpos com massa não se atrairiam por causa de uma força "invisível", mas sim porque eles interagiam com espaço-tempo em volta deles, curvo, e, portanto, "escorregavam" em sentido (direção) de se encontrarem, como no

exemplo simplificado e imaginativo do pula-pula, citado acima. “Assim, o campo gravitacional de um corpo consiste no modo como ele curva o espaço-tempo” (SAULSON *apud* FERREIRA, 2018).

Tentando simplificar nosso entendimento, podemos dizer que a TRG prevê que a presença de massa seria a responsável/causa de uma curvatura no espaço-tempo, e que, quando diferentes massas se fundem/colidem, essa curvatura pode ser alterada, enviando ondulações para locais distantes, e isso então seria o que chamamos de ondas gravitacionais: “As ondas gravitacionais podem ser definidas como oscilações ou perturbações no espaço-tempo que viajam através dele próprio” (FERREIRA, 2018).

Como essas ondulações podem alcançar locais distantes, então seria possível que resquícios delas chegassem até a Terra, mas de maneira imperceptível, sem um instrumento de precisão, como por exemplo os interferômetros, assim, não seria possível perceber essas ondulações.

Os interferômetros sensíveis a essa detecção de ondulações, em especial o Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO), foram desenvolvidos anos depois da teoria de Einstein e, foi com eles que estamos confirmando as previsões feitas pela TRG. De maneira geral, iremos falar brevemente de alguns aspectos que possivelmente estão associados a existência das OGs, mais adiante no trabalho trataremos com maiores detalhes e explicações.

Podemos imaginar que as ondas gravitacionais sejam uma possível consequência da covariância de Lorentz da TRG, visto que essa relação tem consigo o conceito de velocidade finita de propagação de interações. Em contraste, quando consideramos a teoria de Newton sobre a gravitação, ela não tem consigo a existência das ondas gravitacionais, já que ela postula que as interações físicas se propagam com velocidade infinita.

É importante destacarmos que, mesmo antes do LIGO e da detecção das OGs, já existiam, de maneira indireta, evidências sobre existência delas; por exemplo, as medições do sistema binário por Hulse e Taylor sugeriram que as ondas gravitacionais iam além do conceito de hipótese da TRG.

> Uma verificação indireta da existência das ondas gravitacionais foi obtida a partir da observação da taxa de decaimento do período orbital do pulsar binário PSR1913+16, o que rendeu, em 1993, o prêmio Nobel de física para Russell A. Hulse e Joseph A. Taylor Jr., da Universidade de Princeton (MAGALHÃES; FRAJUCA, 2016).

Diversas fontes são potenciais geradoras de OGs detectáveis; por exemplo: estrelas de nêutron, buracos negros, anãs brancas, sistema binário composto. Então, vale ressaltar que não temos uma única possibilidade de detecção, contudo, ressaltamos que se sabe que nossas melhores chances de detecção estão em corpos de grandes massas, através da colisão entre eles, por exemplo.

Destaquemos que, para compreender um pouco melhor como Albert Einstein conseguiu prever que existiriam as ondas gravitacionais, faz-se necessário entender que as OGs faziam sentido. Como assim faziam sentido?

Consideremos a seguinte situação: a Terra continua sua órbita elíptica em torno do Sol por causa da interação gravitacional, lembre-se que essa órbita depende da massa do Sol, entretanto, imagine que o Sol comece a perder massa (algo como uma super explosão interna que tenha disparado grandes pedaços dele em sentido oposto à Terra), a maior parte do Sol continuaria existindo no mesmo lugar, contudo a órbita do planeta seria afetada, visto que agora o Sol teria um valor menor de massa. A Terra então teria uma força de atração com menor intensidade e consequentemente sua órbita ficaria um pouco maior (Lei da Gravitação Universal e Lei de Kepler).

Entretanto, atentemos que, de imediato, a Terra não saberia sobre o menor valor de massa para o Sol, visto que não tem nada com velocidade superior à da luz no vácuo (pensando na ideia do Albert Einstein) e que, devido a distância entre Terra e Sol, a Terra demora cerca de oito minutos para receber as informações vindas do Sol. Logo só percebemos a mudança de massa do Sol depois de oito minutos, porém, se essa informação chegou até a Terra, alguém precisou levar, correto? Então quem leva essa informação sobre a mudança da massa do Sol para a Terra?

No nosso entendimento, de acordo com a TRG, seriam as deformações propagadas através do espaço-tempo que levariam essa mensagem de que o espaço-tempo estaria sendo alterado; a grandes distâncias da fonte, essas deformações chegam como ondas gravitacionais. Logo, de uma forma simplificada e resumida, podemos entender que a radiação gravitacional seria o mensageiro que transporta informações sobre mudanças nos campos gravitacionais que atraem os corpos mutuamente.

No decorrer do trabalho vamos entender com mais profundidades as ideias dos campos gravitacionais e das equações que demonstram as relações propostas pela TRG, nos atentaremos apenas a entender quais são essas equações e o que significam, mas não iremos elaborar um trabalho matemático de deduções, visto que nosso objetivo será entender o processo de detecção das ondas gravitacionais e não necessariamente todos os

conceitos e definições atrelados a TRG, contudo para aqueles que desejam aprofundar-se no assunto, indicamos o livro de Thorne, Misner e Wheeler (1973) presente nas referências.

Torna-se importante lembrar que, apesar de mencionarmos o LIGO como destaque inicial para a detecção de OGs, temos atualmente outros laboratórios/detectores de ondas gravitacionais, em especial o VIRGO (Localizado na Itália), inclusive sendo responsável por um marco importante nas detecções. O VIRGO foi responsável por ajudar os astrônomos a medir, pela primeira vez, a forma como as OGs distorcem o espaço-tempo. Isso reforça que as previsões do Albert Einstein sobre como o espaço-tempo se comporta estão corretas e, portanto, corrobora o que apresentamos acima.

Então, agora vamos explorar os detalhes sobre as ondas gravitacionais e como realizar a sua detecção, com destaque para a detecção por interferômetro. A interferometria tem grande destaque como um método eficaz para detectar as ondas gravitacionais; o experimento de grande notoriedade que serve de base para os atuais modelos de interferômetros é o experimento de Michelson e Morley, marco importante na ciência e que deu base para avanços tecnológicos e científicos: "Costuma-se citar o experimento de Michelson e Morley como o fundamento experimental do postulado da relatividade" (MARTINS, 2012, p.54).

Os postulados da relatividade são os seguintes:

> 1. Postulado da Relatividade As leis da física são as mesmas para todos os observadores situados em referenciais inerciais. Não existe um referencial absoluto.
> 2. Postulado da Velocidade da Luz A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais. (HALLIDAY;RESNICK, 2016).

Atualmente temos alguns laboratórios no mundo que trabalham com a técnica de interferômetros, mas o nosso destaque nesse trabalho permanecerá no LIGO e iremos discorrer sobre ele ao longo das seções.

## 1.1 OBJETIVOS

*Objetivo geral:*

O objetivo geral é investigar e revelar as possíveis relações sobre o processo de detecção de ondas gravitacionais, compreendendo seus princípios básicos, alguns dos

diferentes métodos existentes, técnicas utilizadas e dando ênfase ao método de interferometria.

*Objetivos específicos:*

Inicialmente faremos um levantamento bibliográfico para dar base ao trabalho, levantaremos dados já existentes sobre os processos de detecção de ondas gravitacionais, assim como as referências teóricas sobre o que são ondas gravitacionais e seu pertencimento à Teoria da Relatividade.

Depois identificaremos as expectativas sobre o processo de detecção das OGs e quais os laboratórios que trabalham com o processo de interferometria. Buscaremos manter-nos focados na complexidade e eficiência do método da interferometria, mas comentaremos sobre a existência de outros métodos para a detecção das OGs.

Também buscaremos compreender os mecanismos envolvidos tanto na parte teórica sobre o processo de detecção, sobre o que são as ondas gravitacionais e os aspectos físicos que as cercam, quanto a relação de dificuldade de execução para detecção de ondas gravitacionais. Nesse sentido, iremos fazer um experimento didático de interferometria no laboratório didático.

## 1.2 METODOLOGIA

No presente trabalho, para a construção e desenvolvimento dos conceitos sobre detecção de ondas gravitacionais, tomaremos como base a análise do método de interferômetros e, de maneira sintética, a metodologia utilizada para atingir os objetivos acima elencados será: para os objetivos específicos, usaremos como referência a dissertação de mestrado da Tabata Aira Ferreira, na qual a autora faz uma análise sobre os detectores LIGO, que fazem uso de interferometria. E, com uma pesquisa de referências, iremos compreender aspectos importantes como a distinção entre a Teoria da Relatividade e sua explicação para a gravitação *versus* a explicação da gravitação dada por Isaac Newton na mecânica clássica, que é a nossa referência base inicial para entender o que são ondas gravitacionais.

Além disso, usaremos como referência o trabalho de Michelson e Morley, publicado em novembro de 1887 pelo *American Journal,* e intitulado "*On the relative Motion of Earth and the luminiferous Ether*", sendo essa a experiência que serve de base para o processo da interferometria e grande referência para o que usamos atualmente.

Para o objetivo geral do experimento didático, iremos fazer uma reprodução no laboratório didático da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) no campus de Diadema, no prédio localizado no bairro Eldorado, usando o material do Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa (CIDEPE) e tendo como base o funcionamento do experimento de Michelson e Morley.

O desenvolvimento do projeto iniciou-se em dezembro de 2021, com os primeiros encontros para definição do tema, leitura, revisão de texto e mapeamento de dados; já a pesquisa propriamente foi iniciada em janeiro de 2022.

O foco de nosso trabalho consiste na investigação científica de aspectos práticos, com a reprodução didática do método de interferometria a laser, e aspectos teóricos, com pesquisas de referências e artigos, levantamento bibliográfico sobre o processo e avanço das detecções de ondas gravitacionais e sua associação ao método da interferometria.

As referências bibliográficas de destaque que foram estudadas e que deram base para a escrita do trabalho foram: para compreender e para realizar os estudos mais conceituais sobre a relatividade geral, ondas gravitacionais e mecânica clássica Halliday; Resnick (2014); Nussenzveig (2014); Rindler (2006); Schutz (2009); Martins (2015); Serway; Jewett (2014), bem como os artigos: "*On the relative Motion of Earth and the luminiferous Ether*" de Michelson e Morley (1887), e "Espaço e Tempo" de H. Minkowski no livro (LORENTZ *et al*., 1958), para uma análise sobre interferometria e o processo de detecção e como base de informação, análise usamos a dissertação de mestrado da Tabata Aira Ferreira (2018).

## 2. ENTENDENDO SOBRE ONDULATÓRIA E AS DIFICULDADES DE DETECÇÃO DAS ONDAS GRAVITACIONAIS

Albert Einstein, em 1918, conseguiu verificar que as OGs eram produzidas quando temos uma variação do momento de quadripolo 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" (AGUIAR, 2018).

Na seção 2.2 apresentaremos mais detalhes sobre essa descoberta teórica. No capítulo 3 iremos usar esta informação para abordar questões de ordem experimental, que é o foco principal deste trabalho.

Em 1974 foi descoberto um pulsar binário que perdia energia orbital segundo uma curva bem definida. De acordo com Bassalo e Cattani (2016, p. 885), "(...) entre dezembro de 1973 e janeiro de 1975, Hulse descobriu 40 novos pulsares mas o que foi observado em 02 de julho de 1974 não se enquadrava na crença geral sobre estrelas de nêutrons solitárias e esse pulsar foi denominado PSR 1913+16", e verificou-se que esta perda de energia possui uma contribuição devida às ondas gravitacionais geradas pelo sistema.

Um pulsar é um tipo de estrela, uma estrela de nêutrons, e emite grande quantidade de radiação eletromagnética; já um pulsar binário é um sistema de dois pulsares que orbitam um ao redor do outro.

A explicação dessa curva de decaimento de período orbital rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1993 para Russel Hulse e Joseph Taylor, e forneceu a primeira evidência indireta da existência das OGs. Para haver uma evidência direta, detectores especializados são necessários, como os que apresentaremos neste capítulo na seção 2.2.

> Basicamente existem duas formas de detectar diretamente a passagem de ondas (o decaimento da órbita do PSR 1913+16 é uma forma indireta, através dos efeitos na própria fonte binária): a primeira é conseguir a deposição de energia transportada pelas ondas em uma massa cujo movimento seja pertubado pela passagem das ondas, mas sem absorver energia alguma. (HORVATH, 2020).

## 2.1 ONDAS GRAVITACIONAIS E UMA ANALOGIA COM O SISTEMA MASSA-MOLA

Buscando aplicar e compreender melhor os aspectos que envolvem as ondas gravitacionais, veremos/faremos uma breve analogia entre o sistema massa-mola e as ondas gravitacionais buscando, assim, maior clareza e entendimento sobre as OGs.

Se faz importante que, na nossa analogia, possamos recordar brevemente o que seria um sistema massa-mola. Um sistema clássico de massa-mola refere-se a um dos tipos mais simples de osciladores harmônicos.

O Movimento Harmônico Simples trata-se de um movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio, mas o fator que faz esse movimento acontecer, que provoca o movimento, é uma força proporcional ao deslocamento do corpo. O movimento descrito pelo oscilador massa-mola é chamado de harmônico simples, então podemos dizer que, quando a mola tem o seu comprimento original alterado, mudado, acabada tendo uma força restauradora de origem elástica atuando sobre ela, e isso faz com que que ela volte à sua posição de equilíbrio. Entendido esse breve resumo, agora podemos dar sequência à nossa analogia entre o sistema massa-mola e as OGs e como isso pode facilitar a nossa visualização.

As ondas gravitacionais são movimentos de oscilações, então logo percebemos que o sistema massa-mola e as OGs estão ligadas ao movimento ondulatório da física; as características desses movimentos diferem-se em alguns aspectos, por exemplo, as OGs são de origens gravitacionais relacionados ao espaço-tempo e ocorrem, por exemplo, após o choque/colisão de corpos que possuem grandes massas. Já quando falamos das oscilações do sistema massa-mola, estas são classificadas como ondas mecânicas e longitudinais, e precisam de um meio material para ocorrerem.

As relações matemáticas que envolvem um sistema massa-mola, pode-se dizer que estão na consideração de quando a massa presa a uma mola se desloca de sua posição de equilíbrio; a mola exerce uma força proporcional à distância até a posição de equilíbrio. Essa relação é chamada de Lei de Hooke, que pode ser expressa da seguinte forma:

$$F = -k \cdot x. \quad (1)$$

Aqui temos o *x*, que seria a distância até a posição de equilíbrio, e o *k*, que seria a constante elástica da mola. Essa força também é conhecida como força restauradora, pois tende a fazer com que a massa retorne até a posição de equilíbrio.

Em um sistema massa-mola, podemos ter diferentes condições iniciais e essas condições determinam as especificidades do movimento. Podemos ter uma situação na qual a mola está distendida e em repouso, poderíamos ter uma situação na qual a mola tem uma condição inicial em que a distensão seja nula, ou seja, encontra-se no ponto de equilíbrio, mas com velocidade não nula ou, ainda, podemos ter uma combinação dessas condições.

Podemos verificar as condições de um sistema massa-mola tomando as seguintes equações para o MHS:

*A*: Amplitude de oscilação; $\varphi_0$:constante de fase

(Posição e velocidade)

$$x(t) = A\ cos\ cos\ (wt + \varphi_0) \qquad (2)$$

$$v(t) = -wA\ sin\ sin\ (wt + \varphi_0)\ . \qquad (3)$$

Considerando os parâmetros necessários para solução das equações acima:

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad (4)$$

$$T = \frac{2\pi}{w}. \qquad (5)$$

m seria a massa, A seria amplitude, w frequência angular, k constante elástica da mola, T seria o período e $\varphi 0$ seria a constante de fase.

A relação de destaque entre as duas situações (OGs e o sistema massa-mola) está nas relações ondulatórias e, com o sistema massa-mola descrito acima, é possível compreender as relações na formação ondulatória e como as funções de onda do MHS são e como isso se relacionada com a construção, de forma simplificada, das ondas

gravitacionais, podendo nos ajudar na visualização das oscilações espaço-tempo que dão origem às OGs.

## 2.2 COMO DETECTAR ONDAS GRAVITACIONAIS – INTERFEROMETRIA

### 2.2.1 Alguns experimentos para detectar ondas gravitacionais

Existem diferentes laboratórios, observatórios e grupos de estudos associados à detecção das ondas gravitacionais. Podemos citar alguns exemplos:

O detector PTAc (*Pulsar Timing Array*) que, conforme comentam PTA-APCL (2022), em tradução livre nossa: "O experimento PTA monitora e mensura com precisão o tempo de chegada dos pulsos de pulsares de milissegundos. A partir dessas medições, é possível buscar por ondas gravitacionais (...)" (PTA-APCL, 2022).

Dentro da relação desse experimento temos outros projetos importantes como o EPTA (*European Pulsar Timing Array*) e o NANOGRav (*North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves*). No qual "o EPTA é uma colaboração multinacional da europa que tem como foco aumentar a precisão e qualidade do resultado de pulsares combinado com o esforço e recurso de vários membros de instituições e telescópios" (FORTH INSTITUTE OF ASTROPHYSICS, 2022, tradução nossa).

Em livre tradução podemos dizer que o "NANOGrav foi fundado em outubro 2007 e tem crescido desde então para mais de 100 membros de 40 instituições" (NANOGRAV, 2022). Ainda de acordo com o NANOGrav, eles têm usado os melhores telescópios e tecnologia avançada em seus estudos, buscando acertar no objetivo de detectar ondas gravitacionais.

Outro projeto interessante é o PPTA (*Parkes Pulsar Timing Array*), cujo site informa que "O PPTA e um projeto que combina esforços de astrônomos e estudantes em diferentes partes do mundo de instituições que dedicação para a detecção de ondas gravitacionais na banda de medida de tempos de pulsares." (PPTA, 2017, tradução nossa).

Apesar da existência dos projetos citados acima, para nosso estudo vamos focar na maneira de detecção de ondas gravitacionais associada à medição por interferômetros, com destaque especial para o LIGO.

Outro grande projeto que faz uso da interferometria está na Europa, o laboratório VIRGO, que usa como base o interferômetro de Michelson em uma escala bem maior do que o experimento de Michelson e Morley, porém, se comparado ao LIGO, o VIRGO

apresenta escala menor. O VIRGO está localizado na Itália e atualmente tem uma parceria de destaque com dois grandes laboratórios: o LIGO e o japonês KAGRA (*Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope*). Vários países estão nessa parceria, entre eles Alemanha, Dinamarca, República Checa, China, Bélgica, França, Países Baixos, Polônia, Portugal, Polónia, Mônaco, Japão, Irlanda, Grécia, Hungria, Espanha e, claro, a Itália (VIRGO,2022).

Em 2007, o LIGO e o VIRGO assinaram um acordo de colaboração e, portanto, podem compartilhar e analisar conjuntamente os dados registrados por seus detectores e, claro, publicar em conjunto seus resultados. Isso ajuda e se faz necessário no processo de detecção por interferometria, pois, como esse método não é direcional, ele faz uma análise do céu como um todo e procura pelos sinais fracos e infrequentes; a detecção simultânea em diferentes aparelhos se faz importante para confirmar o sinal e determinar a sua origem.

Existe também o projeto LISA, que fará a detecção das ondas gravitacionais no espaço, e tem previsão de lançamento para 2034 pela Agência Espacial Europeia, sendo composto por três satélites que formarão um triângulo orbitando o Sol. Por livre tradução podemos dizer que o projeto "LISA consiste em três satélites/espaçonaves separados por milhões de milhas e percorrem dezenas de milhões de milhas, mais de cem vezes a distância da Lua, atrás da Terra enquanto orbitamos o Sol" (NASA,2022, tradução nossa).

> O LISA pretende estudar a mais fraca de todas as forças da natureza, a gravitação, e que, no entanto, é vital para todos. Sem ela, nada teria peso e voaria para o espaço. Apesar de séculos de estudo por gênios científicos como Galileu Galilei, Isaac Newton e Albert Einstein, muitas questões permanecem sem resposta sobre a origem e a natureza da gravidade (PHYSIC OGR, 2022, tradução nossa).

Não nos ateremos a todos os esses projetos, mas tentaremos entender de maneira geral o processo e a complexidade que envolve a detecção das OGs usando a técnica de interferometria.

### 2.2.2 Interferometria: princípio físico e usos

Inicialmente se faz necessário entender o que seria uma medição por interferômetros, que são aparelhos que usam a interferência de ondas para algumas determinações sensíveis, precisas, e usamos esses aparelhos como ferramentas para uma

investigação científica. Essa ferramenta utiliza uma mescla de duas ou mais fontes de luz para criar um padrão de interferência que pode ser medido e analisado.

Essas medições contêm informações sobre o corpo ou o fenômeno que está sendo estudado e, por causa da sua sensibilidade, fazemos uso dele para medições extremamente pequenas que não seriam detectadas de outra forma, e, por isso, usamos essa ferramenta como opção importante na detecção das ondas gravitacionais.

Para termos uma noção, o LIGO foi projetado para medir algo em torno de 1/10.000 da largura de um próton, sendo que o raio de um próton vale algo próximo de $0{,}8768\times10^{-15}$ metros, ou seja, é extremamente pequeno. “O tempo de retorno dos lasers informa aos cientistas precisamente quanto cada espelho se moveu, com precisão de 1/10.000 da largura de um próton" (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2021).

Existem diferentes maneiras de se obter o valor do raio do próton e consequente divergência de valores, um estudo feito em 2020 aponta para o seguinte:

> Um deles utiliza a seção de choque elétron- próton e o outro método e realizado através da espectroscopia do átomo de hidrogênio. Para os dois procedimentos, o valor obtido é próximo de 0,87fm. No entanto, em 2020 uma nova medida com espectroscopia do hidrogênio muônico, no qual o elétron do lugar ao seu análogo mais pesado denominando múon, apontou para um valor diferente, da ordem de 0,84fm. (RUPCZAK;DARTORA,2021).

Uma curiosidade é que o local mais conhecido, um dos maiores laboratórios construídos pelo ser humano e que faz estudos sobre prótons, é o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN) e lá eles utilizam colisões em um grande acelerador de partículas, o grande colisor de hádron (LHC); para analisar o resultado dessas colisões e entender o modelo padrão e as diversas partículas existentes ou que possam ser descobertas, ou seja, para que possamos entender “coisas” tão pequenas se faz necessário o uso de maquinários gigantescos.

Isso torna-se interessante, pois eles desenvolvem muita tecnologia associada a medições, aos detectores e que pode ser aproveitada para a colaboração LIGO-Virgo-KAGRA, visto que o CERN possui uma parceria com o Virgo, e, assim, o uso de recursos como parceiros de pesquisa pode ser algo benéfico às detecções e aos interferômetros, como já vem ocorrendo.

Apesar do LIGO ter se tornado famoso por causa das OGs, faz-se extremamente importante lembrar que a criação do experimento envolvendo interferômetros se deu no século XIX, por Albert Michelson, e foi extremamente importante, pois foi usado em 1887 no experimento de Michelson-Morley, que tinha como foco provar, ou contestar, a existência do Éter Luminífero (substância que os cientistas imaginavam que permeava o

universo): “o conceito do éter também teve significativa relevância, não apenas na gênese da relatividade, mas, também nas discussões conceituais que se seguiram à criação dessa teoria” (MARTINS, 2010).

Esse experimento foi essencial para o avanço que temos hoje na medição via interferômetro, visto que ele demonstrou como era viável usar as propriedades da luz para fazer medições menores e oriundas de coisas que estão cada vez mais distantes do planeta Terra, como é o caso das fontes geradoras das OGs.

A invenção dos lasers abriu uma porta para que essa ferramenta pudesse fazer medições menores e abriu as possibilidades das exigências de funcionamento do LIGO, por exemplo. Claro que o experimento inicial de Michelson em 1887 difere do atual sistema do LIGO em sua estrutura, contudo, é notória a importância dessa descoberta e experimentação feita por Michelson para que pudéssemos ter o avanço do maquinário que temos atualmente e que se tornou capaz de detectar as OGs.

Os interferômetros podem ser usados para diferentes finalidades e medir tipos diferentes de corpos, objetos, dando uma vasta possibilidade de aplicações, por exemplo: estrutura de gás e poeira, variações de superfícies e, claro, incluem as ondas gravitacionais. Essa ferramenta pode assumir diferentes formatos, estruturas, mas tem sempre algo em comum entre eles: sobrepõem feixes de luz para gerar um padrão de interferência. Para termos noção de como funciona o interferômetro, vamos pensar na configuração de Michelson: ela consiste em um laser, um divisor de feixe, uma série de espelhos e um fotodetector que registra o padrão de interferência, como exemplificado na Figura 2.

Faz-se necessário, inicialmente, relembrarmos o que seria um padrão de interferência. Pensamos a seguinte situação: Uma corda sofre duas oscilações distintas, uma em sentido à outra, as oscilações provocadas irão se encontrar em uma posição Y; nessa posição de encontro haveria uma conexão, superposição das duas oscilações, criando o que chamamos de interferência.

Então, o ponto de encontro entre duas oscilações, perturbações, são interferências que podem assumir dois tipos: se ambas as oscilações estiverem no mesmo quadrante, ou seja, quando temos dois vales ou duas cristas se encontrando e se conectando de maneira perfeita, elas serão chamadas de “construtivas”; mas, se cada uma estiver em um quadrante, ou seja um pico/crista encontrar com um vale, teremos uma interferência chamada de “destrutiva”.

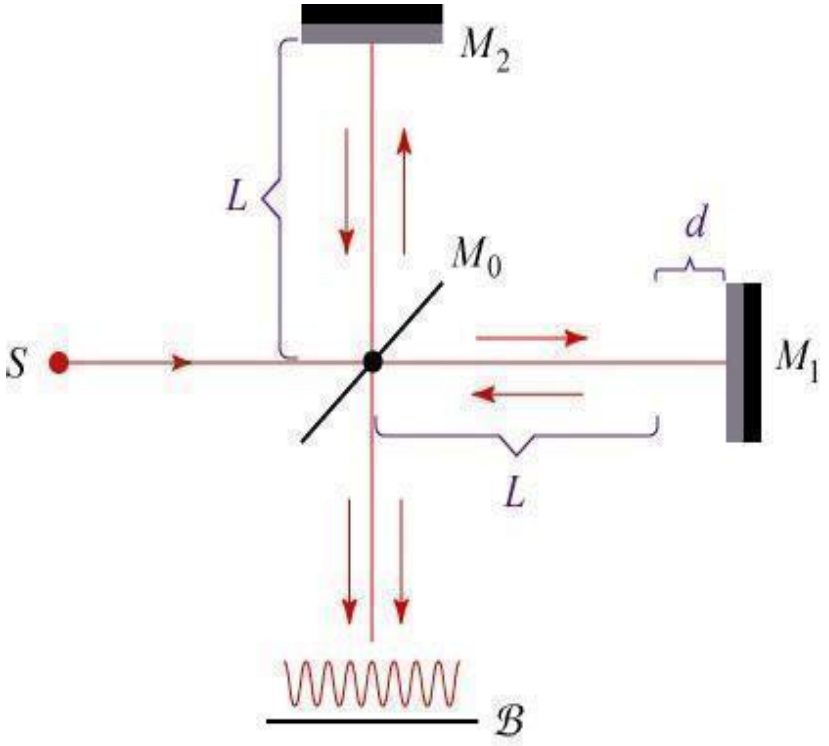
A interferência ocorre no interferômetro, como dito anteriormente, de forma que o feixe de luz laser emitido acaba sofrendo uma superposição construtiva após ter sido refletido pelos espelhos planos e retornado ao espelho semirrefletor, localizado no centro da estrutura. Assim direciona-se ao anteparo, onde temos a detecção do aparato. Será possível visualizar essa relação na Figura 2.

Na Figura 2 podemos ver um esboço simplificado do processo de interferometria, os braços do interferômetro, assim como a trajetória da luz até o anteparo; além disso, será possível ver o processo no qual a luz passa pelo espelho semirrefletor e pelos espelhos acoplados para reflexão.

Em S está localizada a fonte de emissão do laser, que percorre uma distância até a parte central, onde temos o espelho semirrefletor M0; após a passagem por esse trecho, o feixe laser divide-se em direção aos espelhos planos M1 e M2 percorrendo uma distância L, que chamamos de braços do interferômetro.

Depois do laser sofrer reflexão nos espelhos M1 e M2, os feixes de laser voltam ao espelho semirrefletor M0 e, então, os feixes são direcionados ao anteparo B, onde ocorre a detecção.

Figura 2: Representação do funcionamento simplificado de um interferômetro baseado no experimento de Michelson e Morley. É também uma simplificação e ilustração do real processo que ocorre no LIGO, em uma escala menor e não levando em consideração as variáveis de estabilidade necessárias ao detector.




Fonte: Imagem retirada do blog da UNICAMP em 2022, podendo ser acessada em blogs.unicamp.br.

Na Figura 2 conseguimos ver um esboço do experimento de Michelson que serve de base para a detecção por interferômetros. A fim de buscar compreender mais adequadamente o processo feito por eles, fizemos uma reprodução didática do experimento e nos capítulos mais à frente iremos discorrer sobre essa experiência.

## 2.3 HISTÓRICO DO PROJETO LIGO E SUAS PRIMEIRAS DETECÇÕES

Agora que já relembramos aspectos físicos básicos do processo, podemos então focar no LIGO e em seu processo de detecção usando a interferometria. O LIGO faz-se extremamente importante devido a sua sensibilidade; ele faz uso do método mais conhecido pelo grande público e que tem obtido grandes investimentos e muito explorado atualmente, sendo, portanto, o mais comum método de medição e que é muito preciso. Até o momento, para a detecção das OGs, sua técnica de interferometria se faz eficaz devido ao histórico de avanço e desenvolvimento ao longo do século.

O Laboratório LIGO, localizado nos Estados Unidos, trata-se de um projeto que tem contado com várias colaborações e tem o apoio financeiro da NSF (*National Science Foundation*, EUA). Esse projeto teve início em 1992 e tem como missão a observação das ondas gravitacionais de origem cósmica que foram previstas pela Teoria da

Relatividade Geral. O LIGO entrou em operação em 2002, mas somente em 2010 teve seu funcionamento completo, devido a dificuldades de financiamento ao longo dos anos, isso porque trata-se de um projeto gigantesco e necessitou de milhões de dólares para entrar em operação.

O LIGO é um duplo detector, ou seja, ele é composto por dois detectores idênticos. Ele opera com esses dois observatórios em sincronia, um no estado da Luisiana e outro no estado de Washington, distantes 3.002 Km entre si, cerca de 10 milissegundos tempo para a viagem da onda entre eles. Essas distâncias espaciais e temporais são necessárias porque, com elas, seria possível descobrir a origem de uma onda/perturbação no espaço.

O grande destaque do LIGO se deve ao anúncio feito pela colaboração em 2016, no qual se afirmou a detecção de ondas gravitacionais a partir da colisão de dois buracos negros. Logo em seguida anunciaram outra detecção, no fim do mesmo ano, e outro anúncio ocorreu em 2017, com buracos negros de grandes massas solares. Segundo Cardial:

> Essas colisões entre buracos negros ocorreram cerca de 5 bilhões de anos-luz de distância, sendo as mais distantes ja detectadas. A massa de dois buracos negros que colidiram foi estimada em 50,6 e 34,3 massas solares, o que produziu um buraco negro final de cerca de 80 masas solares-outro recorde para a equipe (CARDIAL, 2018).

No ano de 2017, o prêmio Nobel foi atribuído a três cientistas por suas contribuições no projeto LIGO e no processo de detecção e observação das ondas gravitacionais. Os cientistas premiados foram os americanos Barry Barish e Kip Thorne, ambos do *California Institute of Technology*, e o alemão Rainer Weiss, do *Massachusetts Institute of Technology*.

O LIGO continua anunciando boas detecções e, até 2019, já contava com cerca de 11 captações ao todo; em sua parceira colaboração atual o LIGO-Virgo-KAGRA apresenta um número de 15 detecções, que podem ser consultados pelo site Ligo.org, no qual se tem a descrição dos eventos, mostrando, portanto, a sua eficiência em captar OGs e observar fontes astrofísicas. Pensando em expandir ainda mais as possibilidades, a colaboração começou a construir um observatório na Índia, que deve entrar em operação no ano de 2024/2025, conhecido como “Advanced LIGO plus”, que se espera que entre em operações em 2024 (CALTECH, 2019).

O projeto tem como um dos recursos inovadores a ideia de lidar com o princípio da incerteza de Heisenberg para melhorar a capacidade da máquina de detectar

ondulações no espaço-tempo, lançando mão de duas das grandes áreas atuais da física, a relatividade e a mecânica quântica, para o processo de interação dos lasers com os espelhos dentro do projeto.

O LIGO possui uma alta sensibilidade incrível e que podemos observar através dos diversos artigos publicados pela colaboração que faz o LIGO funcionar. Essa colaboração se dá com diversas universidades no mundo todo e conta com diversos cientistas dando suporte e analisando os dados do LIGO, corroborando para um trabalho de excelência.

O avanço nas técnicas de detecção já busca outros meios de tentar encontrar/detectar as OGs, como, por exemplo, pelo pulsar, através do detector PTAc (*Pulsar Timing Array*). Entretanto, por enquanto, o método de interferometria se apresenta como o mais eficaz e potente, já tendo conduzido ao anúncio de muitas detecções de OGs, mostrando que as previsões do Albert Einstein estão corretas.

## 2.4 TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL E AS EQUAÇÕES DE EINSTEIN

Nesta seção, para que possamos compreender as ondas gravitacionais de uma maneira mais profunda, se faz necessário uma breve exposição sobre as equações desenvolvidas pelo Albert Einstein quanto ao comportamento dos campos e que foram descritas dentro da TRG.

Tomemos de início a equação de campo de Einstein, que é uma equação diferencial de segunda ordem em termos do tensor métrico:

$$G_{\mu v} + \Lambda g_{\mu v} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu v} \quad , \qquad (6)$$

na qual temos:

- ✓ $G_{\mu v}$ - o tensor de curvatura de Einstein;
- ✓ $g_{\mu v}$- o tensor métrico;
- ✓ $T_{\mu v}$- o tensor energia-momento;
- ✓ $\pi$ pi está ligado a constante de acoplamento

- ✓ $c$ - a velocidade da luz no vácuo;
- ✓ $G$ - a constante gravitacional;
- ✓ $\Lambda$ - a constante cosmológica.

Tomemos então essa equação para nos alicerçar matematicamente no entendimento das ondas gravitacionais e na ideia geral da relatividade.

Primeiro vamos apresentar a definição do tensor de Einstein:

$$G_{\mu v} = R_{\mu v} - \frac{g_{\mu v}}{2}\mathrm{R}, \qquad (7)$$

Em que temos o tensor de curvatura de Ricci $R_{\mu v}$ e $R$ sendo o escalar de Ricci. Então, com isso, podemos observar que existe uma outra maneira de escrever a equação de campo, podendo ser representada como:

$$R_{\mu v} - \frac{g_{\mu v}}{2}R + \Lambda g_{\mu v} = 8\pi \frac{G}{C^4} T_{\mu v}. \qquad (8)$$

O $g_{\mu v}$ é um tensor simétrico 4 x 4 e, portanto, possui 10 componentes independentes. Dada a liberdade de escolha das quatro coordenadas do espaço-tempo, teremos uma redução das equações independentes, tornando-se 6**.** Ao decorrer do texto comentaremos mais sobre esse aspecto e as relações embutidas nesse tensor.

Além das formas acima, também poderíamos escrever as equações de Einstein no sistema de unidades naturais, considerando as constantes com valor 1, ou seja, c=G=1. Assim, desconsiderando a constante cosmológica, (8) se torna

$$R_{\mu v} - \frac{g_{\mu v}}{2}R = 8\pi T_{\mu v}\ . \qquad (9)$$

Na Teoria da Relatividade Geral, o foco está ligado justamente ao uso da métrica. De maneira simplificada poderíamos dizer que ela é a grandeza física que consegue

quantificar as distâncias, ou seja, se obtivermos a métrica conseguimos saber como as distâncias iriam se comportar ao longo do espaço-tempo. Isso então nos leva à grande questão da curvatura, visto que então a métrica pode apontar essa curvatura, mostrando como aquela região de estudo se comporta dado um corpo massivo que pode estar fazendo a curvatura da região em questão.

Com a métrica também podemos determinar as trajetórias naturais dos corpos livres, que são geodésicas no espaço-tempo. E, assim, seria possível resolver o que for necessário, for pedido dentro da relatividade. Então, o grande ponto para a equação de campo de Einstein está em determinar a métrica $g_{\mu v}$ .

A equação de Einstein trata-se de uma equação tensorial e os índices acoplados ao R, T e g estão relacionados a um espaço quadrimensional - as três coordenadas espaciais e a coordenada temporal.

Todo objeto que possui dois índices pode ser representado por uma matriz, por exemplo, uma 4 X 4 para o $g_{\mu v}$. Lembrando que esses índices podem variar de 0 a 3, no qual o 0 seria a coordenada temporal e o 1,2,3 seriam para coordenadas espaciais. Com isso, fica evidente que a escrita feita na equação de Einstein (9) mostra uma contração de várias equações por conta das combinações possíveis dos índices: teríamos quatro possibilidades para cada um desses índices, totalizando 16 equações embutidas na equação de campo. Contudo, existem apenas 10 equações independentes, não homogêneas, não lineares, acopladas e de 2°ordem, pois *g*, *T* e *R* são simétricos, ou seja, temos uma relação de índices como esse exemplo: $g_{\mu v} = g_{v\mu}$.

Tomemos agora o $R_{\mu v}$ (tensor de Ricci). Esse tensor fornece informações sobre a curvatura do espaço-tempo. O tensor de Ricci, pode-se dizer de maneira simplificada, seria o resultado de uma operação matemática sobre o tensor de curvatura de Riemann, denotado por:

$$R^{\sigma}_{\mu\rho v}. \qquad (10)$$

O *R* (sem índice) representa o escalar de curvatura, e não é um objeto independente; ele vem de uma operação matemática sobre o tensor de Ricci $R_{\mu v}$.

Agora, o tensor de energia-momento $T_{\mu\nu}$ seria o objeto matemático que nos informa sobre a distribuição de energia, momento e matéria no espaço-tempo. Ou seja, se quisermos saber a curvatura gerada por uma certa distribuição de massa, a maneira que temos de informar para a equação de Einstein sobre o comportamento, a distribuição ou como a energia está espalhada seria montando esse $T_{\mu\nu}$.

Resumindo, no lado esquerdo da equação temos as grandezas relacionadas a distribuição de matéria e energia, e no lado direito temos grandezas relacionadas a curvatura e as distâncias, $G_{\mu\nu}$.

Com isso podemos perceber o enunciado básico sobre o espaço-tempo sendo curvado, o que nos leva até as OGs.

Para quando buscamos as soluções das equações de Einstein temos que uma das possíveis soluções, supondo que haja ausência de fontes e a presença de um campo gravitacional fraco, coisas do tipo onda que descrevem os movimentos desse campo fraco.

Assim, "considere uma partícula não relativística se movendo em um campo gravitacional fraco e estacionário, isso implica que podemos considerar uma pequena perturbação em torno da métrica de Minkowski" (AGUIAR, 2018).

Essas soluções seriam para ondas do tipo gravitacional, visto que essas perturbações seriam no espaço-tempo, "ao investigar a equação de Einstein linearizada no vácuo podemos perceber que ela permite que ondas se propaguem pela a estrutura do espaço tempo, estas ondas serão chamadas de ondas gravitacionais" (AGUIAR, 2018).

Com base nessa relação matemática podemos então perceber a relação de energia, momento e parte geométrica que foi discorrida pelo Einstein na TRG, mostrando, assim, a possibilidade intrínseca da existência das OGs dentro da relatividade. A partir dessas previsões a ciência foi em busca de métodos que pudessem corroborar a TRG, mostrando/provando com as detecções a existência de ondas gravitacionais.

# 3. DIFICULDADES NA DETECÇÃO DAS OGs E UMA REPRODUÇÃO DA EXPERIÊNCIA DE INTERFERÔMETROS

Quais as dificuldades que os detectores/aparatos têm para detectar as ondas gravitacionais? Como podemos reproduzir em menor escala uma representação da detecção por interferômetros?

Neste capítulo, nosso foco será, em suma, a detecção das ondas gravitacionais; falaremos dos aspectos que dificultam a detecção das OGs, em especial vamos continuar falando sobre o método feito por interferômetro, com um destaque especial para o LIGO. Buscaremos responder ao longo deste texto as duas questões que deixamos no início para que nosso entendimento sobre as detecções de ondas gravitacionais fique mais explícito.

## 3.1 VIVENCIANDO A INTERFEROMETRIA COM UM EXPERIMENTO DIDÁTICO

Partindo-se do entendimento sobre o que seria a técnica de detecção por interferometria, de uma maneira simplificada podemos dizer que a interferometria é uma técnica de medida e análise que se pauta nos fenômenos ópticos de interferência, aqueles fenômenos que são ensinados em conceitos básicos de óptica para o ensino médio.

O fenômeno da interferência pode ser percebido quando temos duas ondas em dado instante em que haja interceptação, colisão, choque de maneira destrutiva ou construtiva. A interferência, então, é o fenômeno que representa a superposição de duas ou mais ondas em um mesmo ponto.

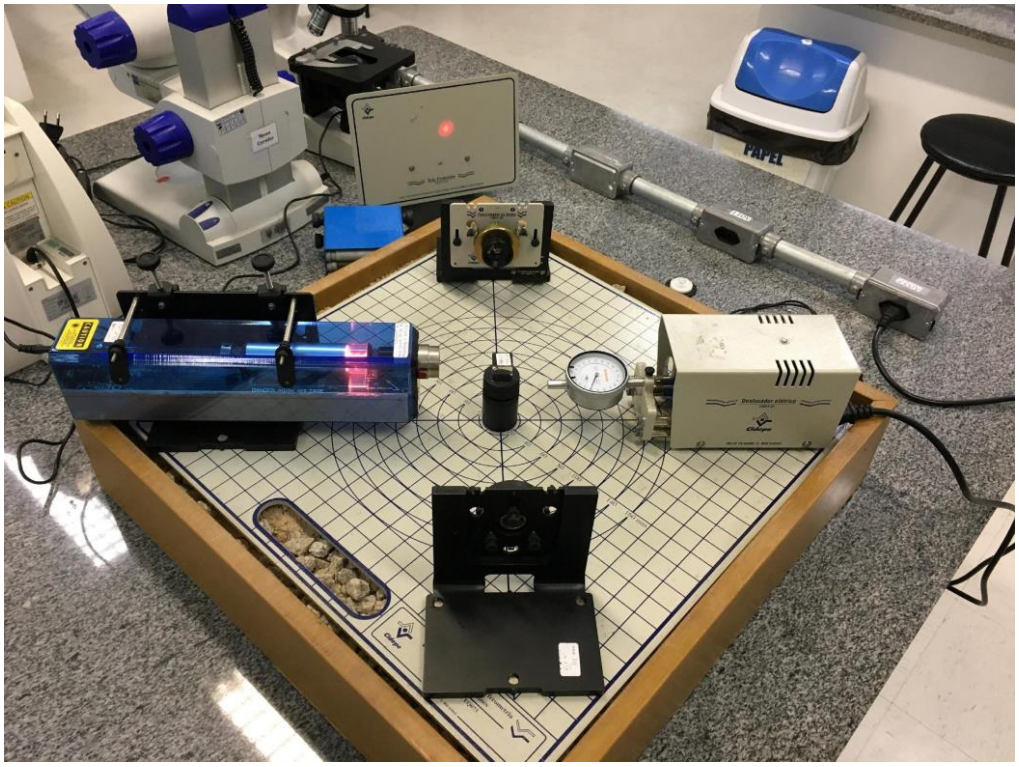
Por exemplo: Imagine que duas pedras batam sobre a superfície de um líquido, como um rio ou um lago, e que produzam ondas circulares que irão se propagar sobre essa superfície; o encontro dessas ondas irá gerar uma interferência, uma superposição.

A experiência feita por Michelson e Morley consistia em um sistema de espelhos refletores e espelhos semitransparentes (divisores de feixe) para combinar os feixes de luz que são provenientes da mesma fonte, com foco na medição de distâncias com uma boa precisão.

Para ter uma vivência concreta sobre a relação dos interferômetros e seu funcionamento, nós realizamos um experimento didático para reproduzir o interferômetro

a laser, e, assim, observar o esquema de funcionamento de um detetor interferométrico de OGs, numa escala menor e com menos precisão, mas que nos permitiu ter um panorama de como, na prática, seria o funcionamento dessa ferramenta.

Figura 3: Experimento didático montado em laboratório. Reprodução do experimento de interferometria de forma simplificada. Temos um laser apoiado na mesa e alinhado na perpendicular com o espelho plano e a lente convergente antes de chegar ao anteparo.



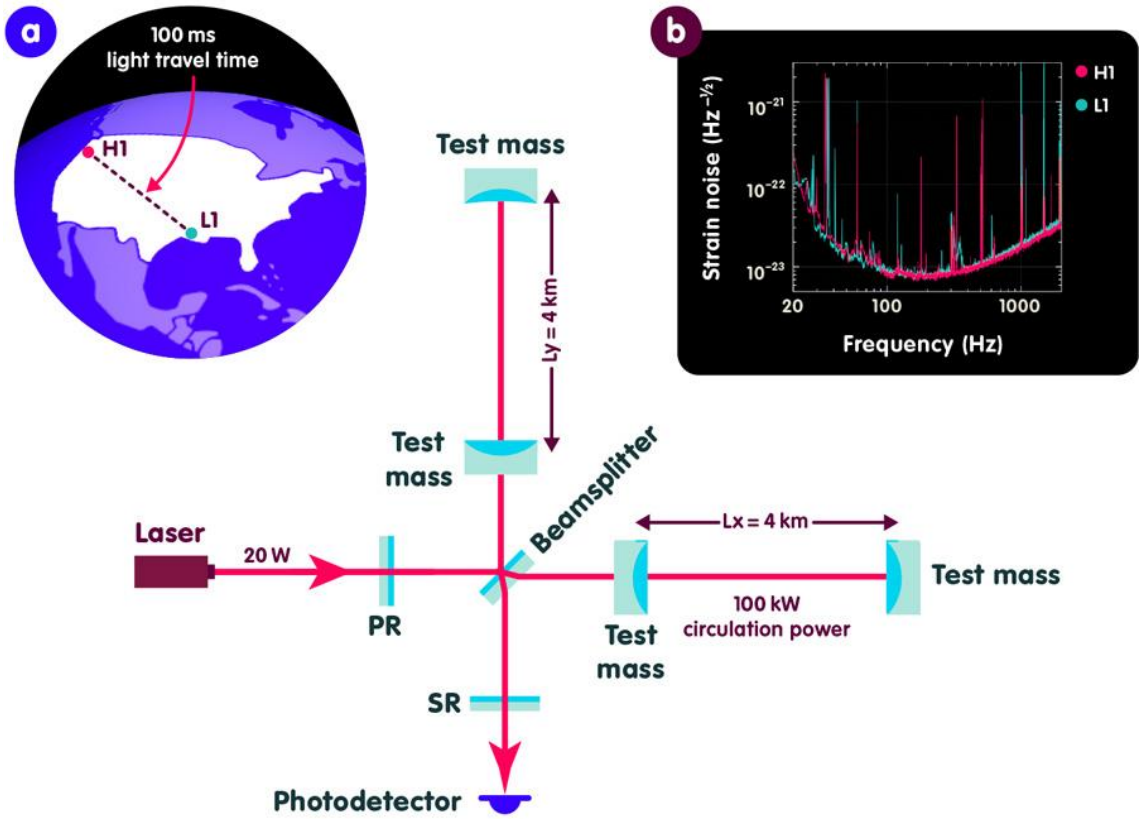

Fonte: Foto tirada no primeiro dia de teste no laboratório pela própria autora. (Arquivo pessoal).

Realizamos no laboratório a montagem do equipamento didático, conforme detalhado no Apêndice 1, no qual encontram-se as imagens e a descrição dos itens usados nesse experimento, além dos procedimentos e análises em forma de relatório.

Inicialmente, na montagem geral, colocamos o equipamento todo no padrão da figura 3, entretanto, na hora em que iniciamos o processo de emissão do feixe de luz, notamos que havia alguns problemas com o feixe que chegava ao anteparo e a quantidade de pontos que apareciam depois da passagem do feixe pelo difusor de luz.

O feixe era inconsistente com o esperado, então realizamos ajuste angulares no difusor e na altura no cavalete, que segura o laser, obtendo um resultado melhor, mas ainda insatisfatório para o que esperávamos observar, evidenciando assim um pouco da dificuldade de se montar um interferômetro, mesmo quando se trate de uma menor escala. O projeto LIGO utiliza-se da medição por interferômetros numa escala grande.

Figura 4: Nesta figura podemos ter uma dimensão da montagem do LIGO. Na parte "a" temos uma referência entre o tempo que o sinal demora entre os dois detectores do projeto; na parte "b" temos um gráfico de "Strain noise vs Frequency", que nos apresenta a curva de ruído nos detectores, indicando maior sensibilidade por volta de 200 Hz. Na parte central temos a montagem do aparato (interferômetro), na qual podemos ver o laser que envia o sinal em direção ao divisor de feixes (Beam Splitter); depois o laser segue para os braços Ly= 4km e Lx=4 km, onde vão em direção aos espelhos refletores (Test mass) e, após a reflexão, voltam ao Beamsplitter e então seguem para o detector (photodetector).




Fonte: LIGO Redesign

Figura 5: Fotos com vista superior dos detectores da colaboração LIGO-Virgo-KAGRA, onde podemos ver os braços de 4 Km dispostos em perpendicular entre si, nas figuras do lado esquerdo. Na primeira foto à esquerda está o LIGO Hanford, no estado de Washington, nos EUA, e no topo, à direita está o KAGRA, localizado no Japão. Nas fotos inferiores temos, à esquerda o VIRGO, localizado perto de Pisa, na Itália, e à direita temos o LIGO de Livingston, no estado de Louisiana, nos EUA.

Fonte: LIGO Caltech

Um detector do LIGO consegue mensurar se houve interferência no feixe de luz que percorre os seus grandes braços. Em caso positivo, seria possível verificar o padrão dessa interferência e assim determinar se são OGs, o que na nossa reprodução não seria viável de perceber, visto que se tratava de uma reprodução em curta escala, e didática.

As reproduções em menores escalas têm tido um papel de destaque em algumas instituições de pesquisa, como por exemplo a Universidade de Adelaide, na Austrália, onde foi realizado, recentemente, um experimento chamado AMIGO, *Adelaide's Mini Interferometer for Gravitational-Wave Outreach*, no qual é feita uma demonstração de funcionamento do LIGO.

Chamaram intimamente esse experimento de mini-LIGO e demonstraram, de uma maneira interessante, o quão complexo seria o processo de detecção de uma onda gravitacional e o quanto de recurso financeiro e tecnológico se faz necessário para essa operação, evidenciando o quanto o investimento científico e monetário faz diferença para obter-se êxito nas pesquisas científicas.

O AMIGO foi uma demonstração dos princípios de funcionamento de um interferômetro a laser e detector de ondas gravitacionais para expor, na prática, a interferência da luz e a sensibilidade do interferômetro de Michelson. Ele foi uma estratégia para conectar o público e mostrar o tema de ondas gravitacionais de uma forma lúdica, simplificada e em menor escala, mas de forma excitante.

Todo o desenvolvimento do projeto contou com o suporte do departamento de Ciências Físicas da Universidade de Adelaide, da Faculdade de Ciências e da Fundação Nacional da Austrália, e parte de seu material pode ser consultado gratuitamente online no site do OzGrav (OZGRAV, 2019).

Figura 6: Experimento AMIGO da Universidade Adelaide. Na foto temos um maquinário que possui laser, espelhos e espaço para propagação do laser e próximo a ele temos uma pessoa realizando ajustes.

Fonte: site OzGRAV.

Esse experimento é muito interessante e faz conexão com a nossa reprodução didática, claro que respeitando as devidas proporções e em uma escala diferente. Contudo, podemos observar que uma reprodução em menor escala do processo de interferômetros pode auxiliar na visualização da complexidade que envolve a detecção de ondas gravitacionais e o quão sensível esse processo é.

Em nosso experimento, realizamos a montagem de um aparato didático do laboratório do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da UNIFESP, campus Diadema, unidade Eldorado, como foi descrito anteriormente. Nele não contamos com os recursos financeiros e tecnológicos obtidos pelo projeto AMIGO, mas, mesmo assim, foi possível ter uma ideia geral extremamente interessante sobre a interferometria.

## 3.2 SENSIBILIDADE DO LIGO

O projeto LIGO contou com diferentes etapas de funcionamento e implementação. Em seu primeiro período de funcionamento, ele tinha dois interferômetros de 4 km de extensão e um de 2 km de extensão nos estados de Louisiana

(em Livingston) e Washington (em Hanford), sendo que essa primeira geração esteve em operação até 2010. Nessa primeira etapa não foi possível detectar nenhum evento de OGs, mas foi essencial para o início do projeto e seu avanço e desenvolvimento.

Na segunda etapa, chamada de Advanced LIGO, houve o aprimoramento tecnológico e se tornou dez vezes mais sensível que o projeto da primeira etapa. Além disso, também cresceu o número de eventos que podiam ser observados por semana e, foi com essa nova etapa que, em 2015, tivemos então a detecção de ondas gravitacionais, anunciada ao mundo no ano seguinte e levou à conquista do prêmio Nobel.

Agora vamos então entender um pouco de um dos eventos que resultou na detecção das OGs dentro do LIGO. Esse evento de grande destaque, e um dos gigantescos avanços da física moderna, foi o GW150914. Ele aconteceu muito longe do nosso planeta, mas, graças à tecnologia do LIGO, ele pode ser detectado. O evento em questão foi observado em setembro de 2015 e nele houve a fusão de dois buracos negros; com isso tivemos uma quantidade gigantesca de energia envolvida no processo.

Figura 7: Podemos observar o evento GW150914 observado pelos detectores do LIGO em Hanford, do lado esquerdo do painel, e em Livingston, do lado direito. Nela é possível observar a evolução da amplitude das OGs produzidas pelo evento em cada um dos detectores e como foi sua variação no tempo em relação a frequência (ambos no sistema internacional de unidades).

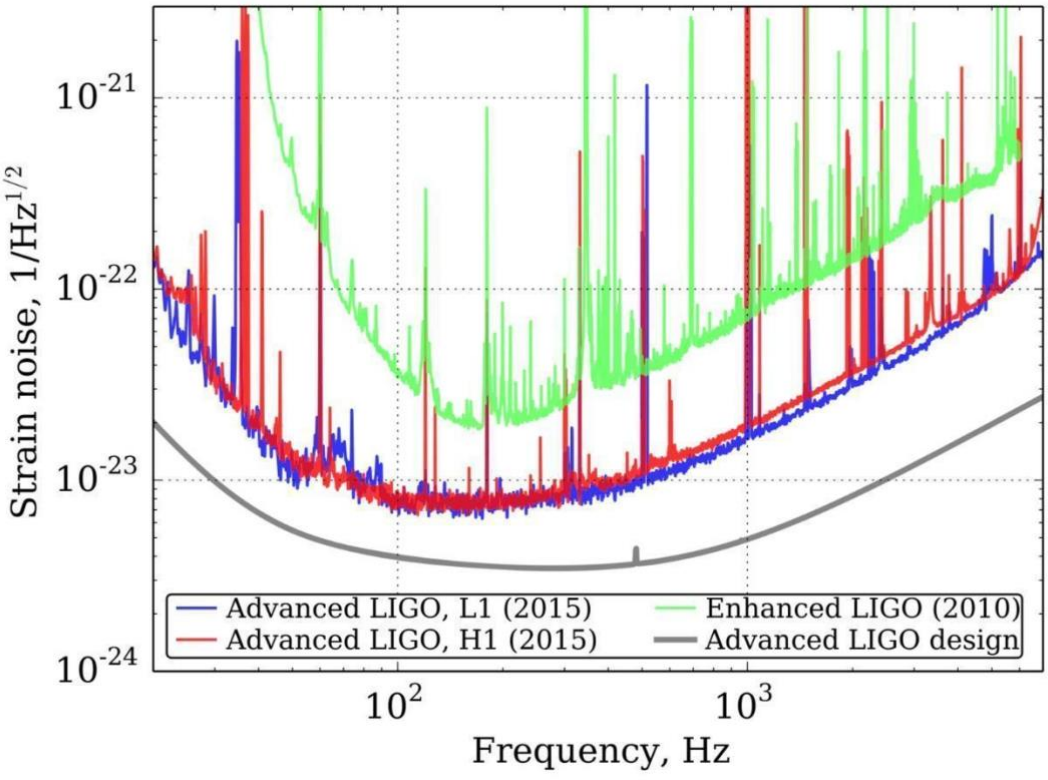
Fonte: Retirada do site "*Gravitacional wave open Science center*".

O sistema de interferômetro do LIGO possui aspectos complexos, apesar da sua estrutura geral ser o desenho da figura 4. Dentro do processo de funcionamento, muitos aspectos precisam ser considerados para que ele possa ser um detector de ondas gravitacionais. Muitos ruídos podem interferir na análise de dados e nas detecções das

ondas desejadas, como por exemplo, os ruídos estacionários, os ruídos de frequência, de amplitude do laser, ruído de fase, ruído de gás, ruído sísmico, térmico, entre outros, e com isso o experimento fica extremamente delicado e complexo para ser analisado.

Iremos nos ater a alguns gráficos sobre a sensibilidade do aparato e seu funcionamento, assim como algumas medições feitas pelo LIGO e, dessa forma, poderemos ver um pouco sobre os ruídos que estão presentes no aparato e que tornam tão complexo o processo de detecção das ondas gravitacionais.

Figura 8: Gráfico de (*Strain noise vs Frequency*) ruído de tensão por frequência que mostra a sensibilidade do Advanced LIGO durante a execução da primeira observação (as grandezas estão sendo medidas no sistema internacional de unidades). Nele é possível observar uma comparação de desempenho dos detectores L1 (Livingston) e H1(Hanford) com a sensibilidade inicial do projeto.




Fonte: MARTYNOV, et al, 2016.

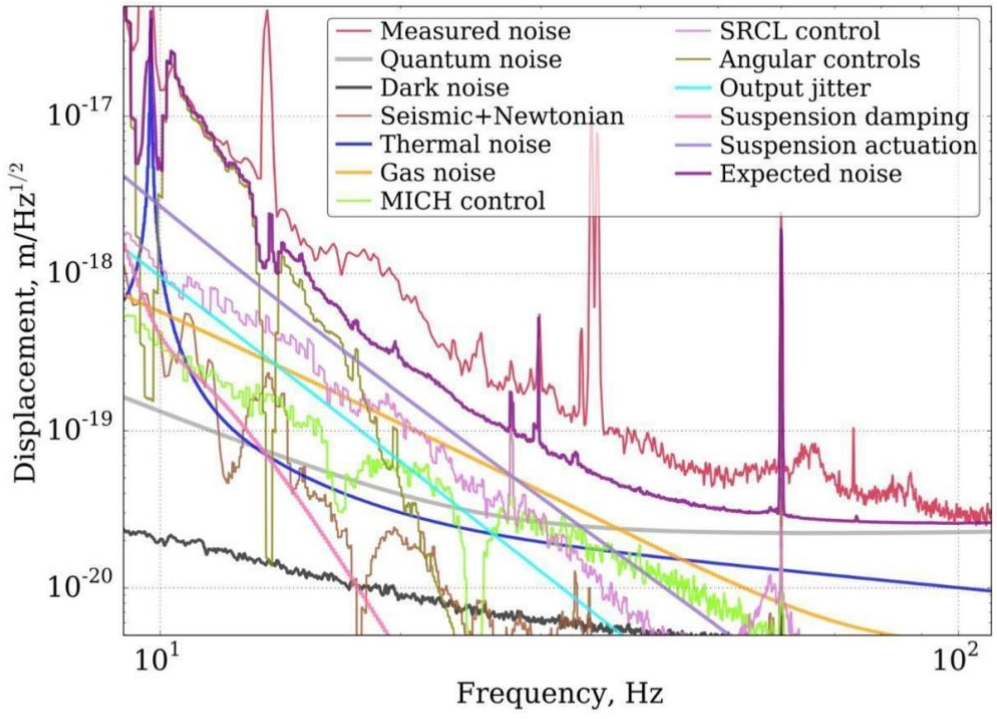
A Figura 8 pertence ao Advanced LIGO, que recebeu esta denominação porque trata-se de uma melhoria no projeto. Nessa figura podemos notar um pouco sobre a sensibilidade dos detectores.

O ruído de tensão do LIGO, apresentado na Figura 8, pertence aos detectores de Livingston e de Hanford durante a corrida 1 (O1) e mostra o nível de ruído previsto para o Advanced LIGO, curva cinza.

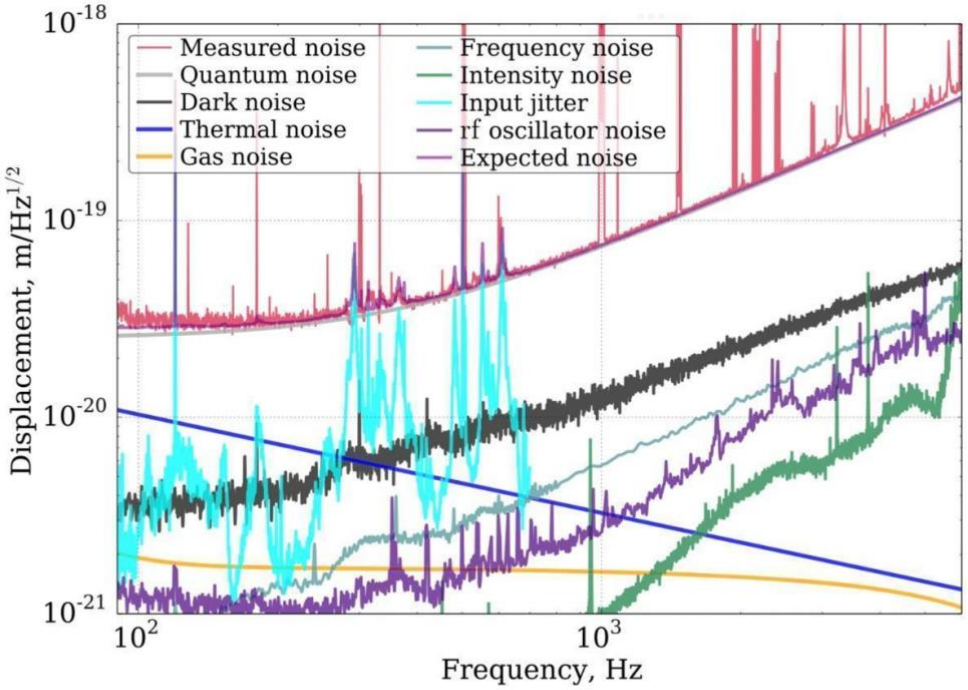
Outros dois gráficos interessantes sobre a sensibilidade dos detectores estão na figura 9, que mostra os ruídos que mascaram as ondas gravitacionais em dois detectores, o de Livingston e o de Hanford, sendo curvas de baixa frequência no L1 (Livingston) e de alta frequência no H1 (Hanford). Além disso, mostra também outros ruídos. De fato, segundo o artigo "S*ensitivity of Advanced LIGO detector at the beginning of gravitational wave astronomy"*, de 2016, os seguintes tipos de ruídos podem ser listados com base nestas figuras:

- ✓ Ruído de origem quântica (*quantum noise*);
- ✓ Ruído do controle do Comprimento de Michelson ("MICH control" - Michelson Length *control*);
- ✓ Ruído de origem escura *(Dark noise)*;
- ✓ Ruído sísmico + Newtoniano (*Seismic+Newtonian);*
- ✓ Ruído térmico *(Thermal noise);*
- ✓ Ruído de gás *(gas noise);*
- ✓ Ruído medido *(Measured noise);*
- ✓ Controle cavidade de reciclagem de sinal *(SRCL, signal recycling cavity);*
- ✓ Controle angulares *(Angular controls);*
- ✓ Saída de tremor/tremulação *(Output jitter);*
- ✓ Amortecimento da suspensão *(Suspension damping);*
- ✓ Acionamento da suspensão *(Suspension actuation);*
- ✓ Ruído esperado *(Expected noise);*
- ✓ Frequência de ruído *(frequency noise);*
- ✓ Ruído de intensidade *(Intensity noise);*
- ✓ Entrada de tremulação (*Inout jitter);*
- ✓ Ruído rf do oscilador *(rf oscillator noise);*

Figura 9: Gráficos de deslocamento do sinal devido a ruído por frequência. O gráfico (a) está descrevendo resultados de L1 (Livingston) e o (b), resultados do detector de Handford (H1).




(a) LIGO Livingston Observatory




(b) LIGO Hanford Observatory

Fonte: MARTYNOV et al, 2016.

Podemos observar pelo gráfico que a frequências próximas de 100 Hz, o ruído de Hanford apresenta melhores resultados em uma comparação entre o ruído medido e o ruído esperado.

Com esses gráficos podemos ter uma ideia de como o complexo sistema de detecção do LIGO está à mercê de ruídos e o quanto na análise de dados se faz necessário ter atenção e cuidado.

Assim como na montagem do aparato didático, o LIGO se baseia, no interferômetro de Michelson, mas o detector de OGs acaba envolvendo muito mais complexidade devido à alta sensibilidade, e, com isso, toda atenção aos possíveis ruídos é necessária, visto que existem muitos fenômenos acontecendo no detector que dificultam obter um sinal real de OGs.

# 4. UMA REFLEXÃO SOBRE TECNOLOGIAS EM DETECÇÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

## 4.1 ANTENAS RESSONANTES MASSIVAS

Existem outros métodos possíveis para detecção de ondas gravitacionais, e, apesar de não ser o foco de nossos estudos, é interessante discutirmos um pouco sobre outro método.

Podemos dar uma pequena atenção ao método que foi usado antes de termos os grandes interferômetros atuais. Durante um longo período a ciência fez uso do método de ressonância para buscar a detecção de ondas gravitacionais, contudo, não se obteve grandes resultados e mudou-se a direção das detecções para o método atual de interferômetros.

O uso de ressonância tinha um custo mais baixo e era mais simples de se conseguir montar um laboratório, entretanto, o grande problema está na restrição de faixa de frequências na qual esse recurso funciona, sendo mais limitante do que as faixas detectadas pelos interferômetros. Por isso, grandes laboratórios acabam não investindo mais recursos nessa tecnologia e mudaram o foco de investimento para a interferometria.

Para obtermos um entendimento melhor sobre o método de ressonância, vamos começar a entender mais sobre ressonância e é interessante buscarmos a definição de

ressonância para física. De acordo com definição de Serway e Jewett Jr. (2014), “o aumento dramático de amplitude próximo da frequência natural é chamado de ressonância (...)”.

O detector por ressonância funciona de modo que o aparelho receptor (antena) consiga captar frequências iguais às de seus modos normais de vibração, oriundas de estímulos, que passam por ele e o fazem oscilar nessa mesma frequência. Com essa oscilação, parte da energia do estímulo externo, que passou por esse aparelho receptor, acaba sendo absorvida, e o aparelho fica oscilando nessa frequência por um tempo, podendo, assim, servir para evidenciar um estímulo externo que poderia passar despercebido. Por isso, esse princípio de detecção pode ser aplicado a ondas gravitacionais como estímulo externo.

O Brasil conta com pesquisas nessa área e que, no momento, estão sendo feitas experimentalmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob supervisão do Dr. Odylio Denys de Aguiar, o principal colaborador brasileiro na pesquisa do LIGO e grande referência na área de ondas gravitacionais no Brasil. Eu pude realizar uma breve visita ao laboratório do INPE em São José dos Campos/SP e contei com uma visita guiada pelo Dr. Odylio (nos apêndices encontra-se um relato detalhado dessa visita).

No INPE encontra-se o experimento Mário Schenberg, que teve seu projeto pensado para funcionar como um detector de ondas gravitacionais por massa ressonante. O projeto teve início nas pesquisas desenvolvidas pelo grupo Gráviton (do qual participava minha orientadora), em parceria com o Instituto de Física da Universidade de São Paulo; como ideia inicial, o projeto teve uma massa ressonante esférica de CuAl (uma liga de cobre com alumínio) com cerca de 0,65 metro de diâmetro, tendo como foco ser sensível a ondas cujas frequências ocorressem entre 3000 e 3400 Hz.

O experimento com massa ressonante possui uma antena conectada à grande massa, um sistema de suspensão de baixo ruído. O funcionamento geral se dá quando a antena começa a vibrar, e isso se espera que aconteça quando ocorre a passagem de OGs. Contudo não é isso que de fato faz a onda ser identificada, pois teríamos uma grande dificuldade, já que qualquer sensor de movimento que fosse colocado junto da superfície da esfera se moveria exatamente junto com a superfície da antena, e, assim, não identificaria a passagem da onda gravitacional.

A observação das OGs aconteceria porque elas teriam a mesma frequência de um dos modos de vibração (quadripolar) da antena, ou seja, a frequência seria ressonante;

com isso, pode-se ter uma situação na qual parte da energia da onda gravitacional seria transferida para a antena, e essa continuaria a vibrar mesmo após a passagem da onda.

Inicialmente, o grupo de pesquisas para o desenvolvimento do experimento Mario Schenberg contava com uma parceria internacional, na qual outros países iriam construir outros detectores ressonantes para integrar um grupo internacional denominado Ômega: "Este detector faz parte de uma rede com outros dois detectores, um a ser montado na Holanda, chamado de miniGrail, e outro a ser montado na Itália, chamado Sfera. Essa parceria com outros detectores forma o projeto Ômega" (PUC, 2022).

Isso faria com que a experiência pudesse ser consolidada e tivesse como detectar sinais verdadeiros a serem validados em outros países, pois essas massas iriam atuar na mesma faixa de frequência de detecção.

O experimento com massa ressonante acabou perdendo a evidência por sua limitação na faixa de detecção e os grandes interferômetros tomaram espaço, mas isso não exclui a importância de seu desenvolvimento e a possibilidade de, no futuro, ele ser retomado e acabar sendo um outro método de detecção que possa, inclusive, reforçar sinais já detectados por interferômetros.

Apesar dos detectores por massa ressonante apresentarem, a princípio, uma possibilidade diferente de detecção, eles, até o momento, não têm obtido motivos de convicção e nem grande investimento por parte das instituições científicas. Durante os anos 2000, eles ainda foram foco de estudo e desenvolvimento junto com os interferômetros, porém, por questões de desenvolvimento tecnológico e faixas de detecção, o avanço se deu para a interferometria.

Atualmente o foco científico está no uso de interferômetros e em desenvolver tecnologia para que esses interferômetros fiquem cada vez mais poderosos podendo alcançar milhões de detecções por semanas.

O LIGO conta com um plano de desenvolvimento que já está sendo aplicado no qual, depois da corrida 5 da versão atual em funcionamento, irão trabalhar com o LIGO Voyager que possivelmente vai conseguir fazer milhões de detecções em um curto tempo.

O LIGO e o Schenberg operam com princípios físicos diferentes e possuem propostas de detecção de maneiras distintas; atualmente o grupo do INPE segue com sua colaboração com o LIGO, mas ainda busca descobrir se houve alguma detecção no LIGO na frequência que o experimento Mario Schenberg atua para, assim, verificar se isso justifica a sua montagem completa no laboratório e poder então atrair possíveis

financiamentos, visto que, na atual posição, o experimento encontra-se desmontado e sem recursos financeiros para continuar suas pesquisas e desenvolvimentos.

O grupo do INPE tem mantido seu foco no uso de alguns recursos que possuem para avançar em sua parceria com o LIGO, como o uso da câmara de vácuo para teste de resistência e temperatura de materiais de silício que irão ser usados nos espelhos novos a serem instalados no LIGO Voyager.

O avanço para o LIGO Voyager conta com pesquisa brasileira e desenvolvimento de tecnologia pelo INPE, sob a supervisão do professor Dr. Odylio Aguiar, grandes avanços têm sido feitos por seus alunos e pesquisadores, mostrando a importância da colaboração internacional no desenvolvimento de grandes pesquisas científicas.

Além disso, há grandes avanços para os interferômetros espaciais, como o projeto LISA, que foi comentado anteriormente, e que vem ganhando grande destaque no mundo científico, abrindo um leque de possibilidades para as pesquisas espaciais e a astronomia geral. Continua assim o legado e desenvolvimento da área de detecção.

## 4.2 PONTOS A FAVOR E CONTRA A INTERFEROMETRIA COMO TECNOLOGIA DE DETECÇÃO DE ONDAS

Buscando pensar a longo prazo podemos elencar uma lista de pontos favoráveis e desfavoráveis para o uso da interferometria junto com uma breve reflexão sobre como estamos caminhando no processo de avanço tecnológico para mais e mais detecções de OGs.

A interferometria tem sido muito significativa, “sua importância é tão significativa que o Prêmio Nobel de Física de 2017 foi para os cientistas americanos Rainer Weiss, Kip Thorne e Barry Barish, pela detecção de ondas gravitacionais” (PIRES; PERRONI, 2019).

Até o momento discorremos sobre a interferometria com o foco dentro do LIGO, e isso se faz necessário porque trata-se do maior detector por interferometria em atividade. Não podemos nos esquecer que a grande efetividade de detecções faz com que o LIGO e o processo de interferometria sejam extremamente positivos, pois estamos falando de um laboratório que em sua colaboração com o VIRGO e o KAGRA já realizou 15 detecções e isso não é pouca coisa quando falamos de ondas gravitacionais.

Outro ponto positivo que devemos ressaltar está na capacidade e o quão poderosos são os interferômetros: os interferômetros do LIGO são projetados para medir

uma distância de 1/10.000 da largura de um próton, ou seja, são extremamente eficientes e sensíveis, sendo então muito importantes para detecção de OGs.

Estamos avançando significativamente na tecnologia e no maquinário que pode auxiliar na detecção de ondas gravitacionais de diferentes origens. Como mencionado em capítulos anteriores, existe um projeto da Agência Espacial Europeia para o lançamento de satélites que funcionarão como interferômetros no espaço e que podem detectar oscilações vindas do espaço a partir de fontes diferentes da visadas pelo LIGO, mostrando novas possibilidades para a detecção das OGs.

Existe, também, o desenvolvimento tecnológico advindo de outros laboratórios, que não necessariamente tem o foco na detecção de ondas gravitacionais, mas que poderão servir de auxílio para produção de peças e experimentos e assim produzir avanço no processo de detecção. Um exemplo disso está no desenvolvimento de tecnologia feito por grandes centros de pesquisas como o CERN.

Recentemente, esse centro europeu de pesquisas nucleares desenvolveu um novo laser apelidado de LISA (*Laser Ionisation and Spectroscopy of Actinides*), que está em processo de análise de sua capacidade e desenvolvimento de aplicações e melhorias, mas podemos dizer que ele tem um gigantesco potencial e que, quem sabe não poderia ser usado pelo experimento VIRGO na Itália, levando em conta que a Itália é um dos Estados-membros do CERN, essa tecnologia poderia servir para buscar um avanço em possíveis detecções no VIRGO e termos assim novos eventos na comunidade científica.

Sabemos que as colaborações entre cientistas, grupos, laboratórios e os diferentes países são extremamente importantes para mantermos grandes descobertas na ciência, assim como é extremamente importante que haja investimentos na formação de cientistas de todos os tipos, sejam engenheiros, técnicos, químicos, físicos e outros.

O que sabemos atualmente poderá e deverá ser aprimorado com o passar dos anos e, com os investimentos em ciência e tecnologia, poderia possibilitar um novo horizonte de eventos detectados.

Um ponto negativo que dificulta as detecções de ondas gravitacionais, assim como diversas áreas das ciências, está justamente no investimento necessário para desenvolver tecnologia de ponta. O alto custo desses laboratórios inviabiliza a existência e criação desses grupos em todos os lugares do mundo, restringindo assim a grandes nações como os Estados Unidos, Japão, países do continente europeu e afins.

Além do alto valor de investimento necessário, outro grande ponto de dificuldades está na mão-de-obra qualificada. O número de cientista que é necessário para auxiliar no

projeto tem valor alto e infelizmente não se tem, em muitos países, cientistas com essa formação e que estejam atuando na área ligada a ondas gravitacionais, sejam eles cientistas de Iniciação Científica (IC), graduandos, pós-graduandos ou professores pesquisadores em atuação.

Sabemos que o avanço nas detecções pode auxiliar no desenvolvimento de tecnologia, que favorece não apenas a física e o entendimento dela, comprovação da física moderna, mas também favorece a sociedade, o desenvolvimento de ferramentas que podem contemplar o avanço e descobertas de itens tecnológicos que auxiliam em diferentes aspectos a população, seja com algo inovador para comunicação ou para tecnologia relacionada com a medicina e áreas afins.

De modo geral, podemos então considerar que temos muitos pontos positivos que fortalecem a continuação do trabalho e pesquisa das ondas gravitacionais, e que o desenvolvimento da tecnologia de ponta traz grande benefício, então continuar investindo e crescendo na área de interferometria tem muito a agregar para a comunidade científica e para nossa sociedade de maneira geral.

As dificuldades e pontos negativos dentro desse cenário podem ser complicados, entretanto, colocando esses valores em uma balança, os impactos positivos são muito mais prósperos.

Então continuar na labuta por um avanço cada vez maior e com maiores chances de desenvolvimento tecnológico, aumentando o número de detecções, se faz premente e representa a luta por manter uma ciência em busca de respostas.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo das ondas gravitacionais e como elas podem ser detectadas, com destaque especial para o método da interferometria e sua aplicação no grande observatório de ondas gravitacionais dos Estados Unidos, o LIGO.

Podemos perceber, ao longo da pesquisa, o quão complexo é o processo de detecção das ondas gravitacionais e o quanto de investimento monetário e científico se faz necessário para que possam ocorrer as detecções e análises dos dados obtidos. Isso demonstra a grandeza e a importância da ciência para o advento de grandes fatos e os benefícios e impactos que isso pode ocasionar em nossa sociedade, dando assim, um grande avanço tecnológico com o desenvolvimento dos laboratórios científicos.

## 5.1 FUTURO

Essa tecnologia de detecção ainda está em processo crescente e com o avanço de tecnologia computacional e eletrônica teremos em nosso futuro perspectivas ainda mais positivas para um avanço nos interferômetros e mais detecções poderão ser obtidas.

Existem boas perspectivas de avanços nos dispositivos de medição, como o plano de implementação do LIGO Voyager, que prevê um número muito mais expressivo de detecções em relação ao LIGO atual.

Além disso, temos avanços para que os detectores espaciais comecem a funcionar e com eles teremos chances expressivas de obter diferentes tipos de detecção em sensibilidade diferente. Contudo, precisamos nos atentar que essa tecnologia envolve um maior risco, dificuldade de manutenção e possivelmente terão outras formas de ruídos em suas detecções, o que acarreta um maior cuidado e trabalho de cientistas.

Em qualquer das tecnologias, para conseguir realizar a análise de um grande volume de dados de maneira precisa, possivelmente se fará necessário o uso da inteligência artificial para auxiliar o entendimento e leitura desses dados de maneira ágil e eficiente.

Esperamos que os avanços e investimentos continuem e que possamos, assim, obter cada vez um número maior de descobertas e experiências científicas que intensificam o processo dos estudos das leis físicas e auxiliam a nossa sociedade.

**REFERÊNCIAS**

AGUIAR, Bernardo; **Relatividade Geral**. Monografia de graduação.Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2018.

AGUIAR, Odylio Denys. **Detectores de ondas gravitacionais**. Cadernos de Astronomia, v. 2, n. 2, p. 42-57, 2021.

AGUIAR, Odylio Denys. **Astrofísica de ondas gravitacionais**. Notas de aula da disciplina AST-300 do curso de Pós-Graduação em Astrofísica do INPE, 2018.

BASSALO, José Maria Filardo; CATTANI, Mauro. **Detecção de ondas gravitacionais.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 3, p. 879-895, 2016.

BLOGS UNICAMP. **Imagem do interferômetro**. Disponível em <www.blogs.unicamp.br> Acesso em: 30 de julho de 2022.

BRASIL ESCOLA. **Teoria da Relatividade Geral**. Portal Brasil escola do UOL. Disponível em <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm> Acesso em: 20 de abril de 2022.

CARDIAL, Richard. **4 colisões entre buracos negros foram detectadas.** Disponível em <https://www.galeriadometeorito.com/2018/12/4-colisoes-entre-buracos-negros-detectadas.html> Acesso em: 03 de novembro de 2022.

CATELLI, F.; VICENZI, F. **Interferômetro de Michelson e de Morley**. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6694/6161 > Acesso em 05 de maio de 2022.

DIGITAL REPOSITORY OF GEORGIAN SCIENTIFIC WORKS. **Data release for event GW150914**, Disponível em: <https://www.ge-openscience.org/events/GW150914/> Acesso em: 24 de outubro de 2022.

FERREIRA, Tabata Aira; **Análise multidimensional de transientes nos detectores ligo**. Dissertação de mestrado. Instituto nacional de pesquisas espaciais, São José dos Campos, 2018.

FORTH INSTITUTE OF ASTROPHYSICS. **The European Pulsar Timing Array.** Disponível em: <https://www.ia.forth.gr/project/769> Acesso em: 03 de novembro de 2022.

GRAVITACIONAL WAVE OPEN SCIENCE CENTER. Disponível em <www.gw-openscience.org/events/GW150914/> Acesso em: 24 de outubro de 2022.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert.; **Fundamentos de física**: **óptica e física moderna.** V.4 10. ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2016.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert.; **Fundamentos de Física.** 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

HORVATH, Jorge**. Capítulo 10 Ondas gravitacionais.** Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5599458/mod_folder/content/0/Capitulo10-Horvath.pdf?forcedownload=1 > Acesso em: 04 de Novembro de 2022.

KRUPCZAK,Renata.;DARTORA, César Augusto. **Um modelo teórico para o cálculo do raio do próton**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/MC6MKKrvMJXLb98pLkkbqfq/?lang=pt > . Acessado em 25 de novembro de 2022.

PTA-APCL (Pulsar Timing Array group at the AstroParticle and Cosmology Laboratory). **Pulsar timing array.** Disponível em <https://apc.u-paris.fr/FACe/en/pulsar-timing-array > Acesso em: 03 de novembro de 2022.

LIGO. **DETECTIONS.** Disponível em <https://www.ligo.org/detections.php> Acesso em: 02 de novembro de 2022

LIGO. **Receives New Funding to Search for More Extreme Cosmic Events.** Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20190214> Acesso em: 02 de novembro de 2022.

LIGO CALTECH. Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/system/media_files/binaries/438/original/LIGO-KAGRA-VIRGO-Facilities-NW.jpg?1570131510> Acesso em: 03 de novembro de 2022

LIGO REDESIGN. Disponível em <https://www.einstein-online.info/wp-content/uploads/gravitational_waves_advanced-LIGO-detektor_%C2%A9_Ligo_redesign_Daniela_Leitner_fuer_Einstein-Online.jpg> Acesso em: 03 de novembro de 2022.

LISA. **LISA'S Size and precision are Out of this World**. Disponível em <https://lisa.nasa.gov > Acesso em: 03 de novembro de 2022.

LISA **The Laser Interferometer Space Antenna reaches a crucial milestone.** Disponível em <https://phys.org/news/2022-05-laser-interferometer-space-antenna-crucial.html> Acesso em: 02 de novembro de 2022.

MAGALHÃES, Nadja S.; FRAJUCA, Carlos. **Cem anos de espera, mas não de braços cruzados.** Disponível em <https://www.comciencia.br/comciencia/index.php?section=8&edicao=125&id=1525>. Acesso em: 31 de outubro de 2022.

MARTINS, Roberto Andrade. O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 52-80, 2012.

MARTINS, Roberto de Andrade. **Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade**. Pp. 31- 60, in: KNOBEL, Marcelo; SCHULZ, Peter A. (orgs.). Einstein: muito além da relatividade. São Paulo: Instituto Sangari, 2010.

MARTYNOV, Denis V. et al. **Sensitivity of the Advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy.** Physical Review D, v. 93, n. 11, p. 112004, 2016.

MICHELSON, Albert A.; MORLEY, Edward W. **On the Relative Motion of the Earth and of the Luminiferous** Ether. Sidereal Messenger, vol. 6, pp. 306-310, v. 6, p. 306-310, 1887.

NANOGRAV COLLABORATION**.** Disponível em <https://nanograv.org/collaboration/overview > Acesso em: 03 de novembro de 2022.

NUSSENZVEIG, Moyses. **Ótica, Relatividade, Física quântica**. 2 Ed. São Paulo, 2014.

OzGRAV. Site *Education and public outreach* sobre o experimento AMIGO. Disponível em <https://www.ozgrav.org/uploads/9/8/0/0/98009268/interferometry-3288.jpg> Acesso em: 26 de outubro de 2022.

OzGRAV. **AMIGO,** Disponível em **<**https://www.ozgrav.org/uploads/9/8/0/0/98009268/interferometry-3288.jpg> Acesso em: 26 de outubro de 2022.

OZGRAV **Adelaides's Amigo demonstrates spacetime warping.** Disponível em <https://www.ozgrav.org/news/adelaides-amigo-detects-space-time-warping>. Acesso em: 04 de novembro de 2022

PPTA **Parkes Pulsar Timing Array.** Disponível em <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsarppta/> Acesso em: 03 de novembro de 2022.

PERRONE, Gabriel **Interferômetros de Michelson e Fabry-Perot.** Disponível em <https://www.ufrgs.br/amlef/2019/07/01/interferometros-de-michelson-e-fabry-perot/> Acesso em: 2 de novembro de 2022.

REDAÇÃO. **Físicos conseguiram resfriar o objeto macroscópico até que ele ficasse próximo de seu estado quântico**. Notícias site Scientific American Brasil. Disponível

em <https://sciam.com.br/fisicos-resfriaram-objeto-ate-seu-estado-fundamental-de-movimento/> Acesso em: 02 de novembro de 2022.

RESNICK, Robert. **Introduction to special relativity**. 1971.

RINDLER, Wolfgang.; **Relativity: Special, General and Cosmological**. ed. Oxford, 2006.

RINDLER, Wolfgang. **Essential Relativity - Special, General, and Cosmological**. Nova Iorque: Springer-Verlag. 1977.

RINDLER, Wolfgang **Relativity: special, general, and cosmological**. 2003.

SCHUTZ, Bernard; **A first course in general relativity**. 2.Ed. Cambridge,UK: Cambridge university press, 2009.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT JR, John. **Princípios da Física- óptica e física moderna**. Cengage Learning Edições Ltda., 2011. v.4.

SILVA, Renata PUC- **Detetor Schenberg** Disponível em <https://www.pucsp.br/pos/cesima/schenberg/alunos/renatacsilva/detetor.htm> Acesso em: 29 de outubro de 2022

THORNE, Kip S.; MISNER, Charles W.; WHEELER, John Archibald. **Gravitation**. San Francisco, CA: Freeman, 1973.

VICENZI, Scheila. **Laboratório caseiro: Interferômetro de Michelson.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 18, n. 1, p. 108-116, 2001.

VIRGO SCIENTIFIC COLLABORATION. Disponível em <www.virgo-gw.eu/about/scientific-collaboration/> Acesso em: 02 de novembro de 2022.

## BIBLIOGRAFIA

HELERBROCK, Rafael. **Teoria da Relatividade Geral.** Brasil Escola. Disponível em <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/teoria-relatividade-geral.htm> Acesso em: 01 de novembro de 2022.

LESCHE, Bernhard. **Teoria da relatividade**. Editora Livraria da Física, 2005.

MOORE, Thomas. **A general relativity workbook**. Versão beta, Janeiro, 2010.

RINDLER, Wolfgang. **Relativity: special, general, and cosmological.** 2003.

SERWAY, Raymond.; JEWETT, John.; **Princípios da Física.** 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TIPLER, Paul; LLEWELLYN, Ralph. **Física Moderna**, 5ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro–RJ, 2010.

XIONG, Wu et al. **A small proton charge radius from an electron–proton scattering experiment.** Disponível em: < https://www.nature.com/articles/s41586-019-1721-2 >. Acessado em 25 de novembro de 2022.

## APÊNDICE 1

### A1.1 Relatório 1- Relatório Interferômetro- Dia 1

### Introdução

A ferramenta mais comum em interferometria, é o interferômetro de Michelson e Morley e será nossa base de referência. A ideia do experimento consiste

em um sistema de espelhos refletores e espelhos semitransparentes/semi refletor (divisores de feixe) para combinar feixes de luz separados que provêm da mesma fonte. A interferometria laser é um método bem estabelecido para a medição de distâncias com grande exatidão.

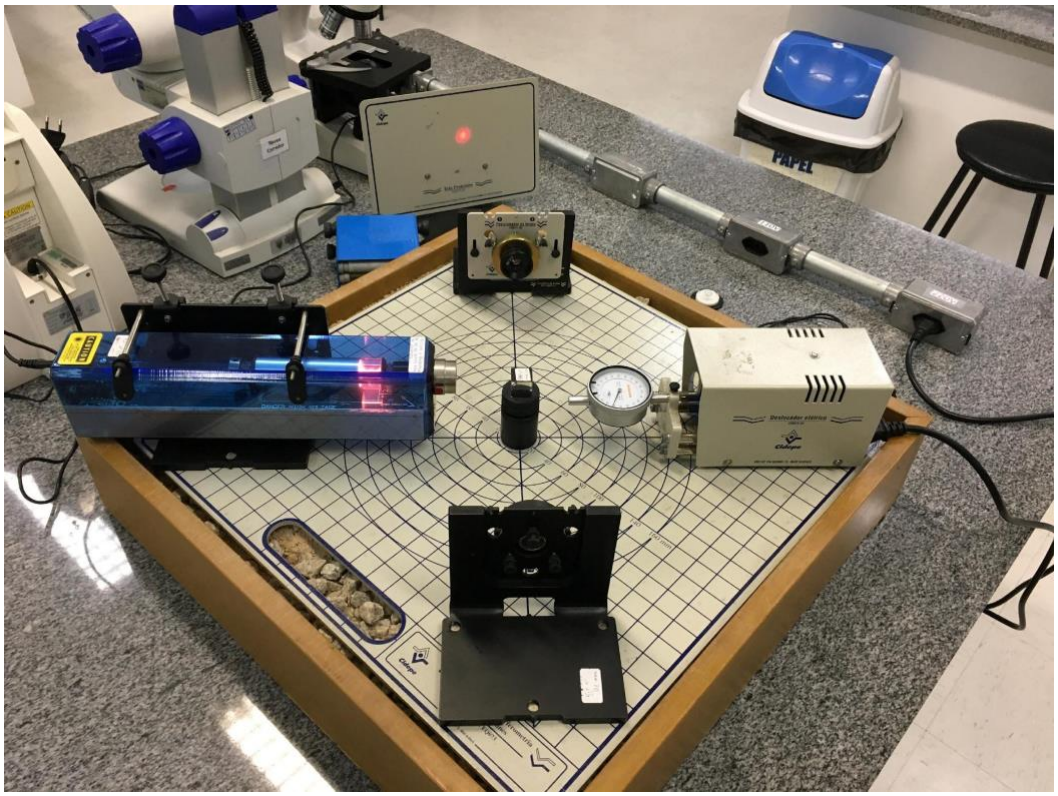
Princípios básicos, esquema do interferômetro de Michelson e Morley:

Normalmente, um único feixe de entrada proveniente de uma fonte de luz coerente será dividido em dois feixes idênticos pelo interferômetro de Michelson e Morley. “O ‘truque’ consiste em dividir um feixe de luz em dois e, em seguida, recombiná-lo, resultando daí a interferência “(CATELLI; VICENZI,2001).

Cada um desses feixes percorre uma rota diferente, chamado caminho, sendo em seguida recombinados antes de alcançar um detector/anteparo. A diferença entre as distâncias percorridas por cada feixe cria uma diferença de fase entre eles. É esta diferença de fase introduzida que cria o padrão de interferência entre as ondas inicialmente idênticas, que é identificada no detector.

Se um único feixe foi dividido ao longo de dois caminhos, então a diferença de fase será o diagnóstico de qualquer coisa que altere (interferência) a fase ao longo desse caminho.

Figura A1.1: Referência sobre o experimento



Fonte: Foto tirada pela autora no dia da reprodução do experimento no laboratório

**Objetivos**

O experimento tem o objetivo de reproduzir didaticamente o que ocorre no processo de detecção das ondas gravitacionais através da interferometria, mesmo procedimento usado pelo experimento de Michelson e Morley. Buscaremos através dos testes mostrar como funcionaria o processo de emissão do feixe e reflexão dele para assim fazer uma analogia ao que é usado no LIGO (centro de pesquisa responsável pela detecção mais famosa das ondas gravitacionais).

**Procedimento Experimental**

Experimento didático de interferometria (primeiro dia). Fora identificado as peças que fariam parte da montagem do experimento, depois realizou-se a separação das peças e adequação das posições de instalação.

A Montagem das peças nos respectivos locais, teste de ligação para verificar o funcionamento das peças, adotou-se uma posição inicial e começou o teste para tentar fazer com que o laser fosse reproduzido de modo a chegar até o anteparo.

Definiu-se uma rotação de 180 graus ao prisma de difração para tentar alcançar o objetivo de o laser chegar ao anteparo e ajustou-se a altura do laser e sua inclinação laser de maneira arbitrária, a princípio para buscar o ângulo correto para o feixe laser.

Até o momento conseguimos que o laser chegasse ao anteparo, mas não da forma correta e com alguns desvios inadequados. A discussão de execução do experimento e dos problemas observados no experimento estão descritos na seção Análise e resultado.

Experimento: Realizamos um Segundo dia da experiência e em anexo tem um relatório com detalhes dessa segunda tentativa.

Materiais e descrição de itens:

- ✓ Caixa de areia (absorção de impacto)
- ✓ Mesa de aço com escalas
- ✓ Posicionando de feixe com espelho plano
- ✓ Deslocador elétrico
- ✓ Anteparo
- ✓ Elevador para o anteparo
- ✓ Cabo de força do deslocador

- ✓ Mostrador analógico do deslocador
- ✓ Mesa reguláveis para o difusor de feixe
- ✓ Difusor de feixe Laser He-Ne
- ✓ Cavalete de suporte do laser
- ✓ Fonte do laser Posicionado de feixe com lente convergente

**Análises e resultados**

Utilizando-se os dados obtidos experimentalmente do primeiro dia de laboratório podemos observar alguns pontos importantes.

A primeira observação importante foi que o laser chegou até o anteparado, contudo, ficou demonstrado que há a necessidade de ajuste para que não haja um desvio não programado desse feixeemitido pelo laser e que ao longo do seu caminho até o anteparado ele não sofra um desvio que acarrete a existência de um ponto extra de luz laser no deslocador elétrico do experimento.

A segunda observação, é que se realizaram algumas tentativas de ajustes no primeiro dia fazendo o seguinte movimento: Rotacionando o difusor em 90 graus na horizontal inicialmente para a direita e tentando ajustar o feixe do laser, nessa primeira tentativa o ajuste ainda não chegava ao resultado esperado, pois continuava existindo um ponto extra de luz do laser de forma que não era esperada.

Posteriormente, foi realizado uma rotação de 180 graus na vertical no difusor para tentar melhorar o ajuste e verificar se assim o ponto extra do laser era eliminado, nessa tentativa foi observado uma melhora no feixe que chegava ao anteparo contudo observamos que ainda existia no deslocador elétrico um ponto dofeixe de laser que era indesejado e não compatível com o resultado esperado.

Terceira observação relevante, foi que realizamos a troca do aparelho de emissão do feixe de laser He-Ne para buscar um equipamento que aparentava estar em melhores condições de trabalho e que assim pudesse emitir um feixe mais bem encaixado e com boa intensidade para buscarmos o resultado da melhor maneira.

Após a troca do aparelho de emissão do laser, verificamos que havia outra peça que não estava em

boas condições de uso, o difusor encontrava-se com pequenos pedaços faltantes e por

tanto era necessário realizar uma troca para uma peça em melhores condições, foram feitas duas trocas até encontrarmos o melhor difusor disponível no laboratório.

Um ajuste importante que foi observado ao longo do dia de execução do experimento foi onivelamento da mesa dentro da caixa de areia, com o uso de um nível observou-se que a mesa apresentava um mini desnível que a princípio não pareceu ser um problema ao nosso experimento mais que foi considerado para ser mais bem ajustado em um segundo dia de laboratório.

Um outro ajuste feito no primeiro dia de laboratório foi a altura do laser no qual tentamos colocar o feixe em um sentido mais adequado ao difusor (um alinhamento ao centro do difusor) para que melhoraras se os desvios, entretanto continuasse tendo um ponto extra de luz emitida do laser no deslocador de forma inadequada, encerramos o primeiro dia nessa posição e fomos realizar uma busca, uma pesquisa teórica sobre o funcionamento do experimento com foco em melhorar a situação e o problema observado no primeiro dia de laboratório.

**Conclusão**

Através dos experimentos feitos pudemos observar que os resultados obtidos no laboratório até o momento podemos observar que a precisão na montagem e execução do experimento tornam-se imprescindíveis para alcançarmos os resultados esperados, estamos trabalhando na melhoria e ajuste do experimento para que não haja desvios inadequados do feixe e assim possamos chegar ao padrão de emissão e reflexão do laser que é esperado.

### A1.2 Relatório dia 2 -Relatório experimental 2

No segundo dia que fomos realizar e testar a experiência já tínhamos uma melhor ideia da montagem e posição das peças do interferômetro.

Inicialmente realizamos a calibragem de nosso equipamento com as seguintes especificações:

- ✓ Relógio calibrado em 36 (nosso marco zero) e nossa escala estava em 0.001 mm.
- ✓ Consideramos o erro instrumental de 0.0005 mm.

Essas medidas foram feitas antes de encaixarmos o segundo espelho do experimento e por isso foi necessário uma recalibragem após a colocação do cavalete com o espelho.

Medidas da nova calibragem:

- ✓ 86.9 (marco zero).

Após a realização dos ajustes no equipamento, iniciamos os testes e execução do experimento. Foram diversas tentativas, mas consta aqui o exemplo de uma:

Primeira tentativa:

Medidas de 86.9 até 90.9 obtendo 7 franjas claras e 6 escuras.

A Medida 99.9 apontou 7 franjas escuras.

A Medida 86.9 apontou 6 escuras.

A Medida 97 apresentou 7 escuras.

A medida de retorno 86.9 apresentou 6 escuras.

A Medida 97 voltou a ter 7 escuras.

Essas medidas que apareceram, nesse primeiro momento, não eram esperadas.

Após essas medições foi necessário realizar ajustes, então mexemos nos espelhos e em suas distâncias, buscando obter melhores resultados.

Percebemos que com esses ajustes apareceram dados que apontavam para um crescimento de franjas, entre 85 μm e 95 μm tínhamos de 14 a 17 franjas.

Depois desses procedimentos percebemos que havia um problema, apenas o espelho 1 está sofrendo reflexão e chegando na lente convergente.

Segundo problema que foi notado, o espelho 2 não apresentava feixe na lente e com isso leva a não termos interferência dos feixes, visto que apenas um chegava no destino. Logo isso invalida os dados que conseguimos anteriormente.

Foi realizada a troca do laser, do difusor, em busca de solucionar o problema.

Era esperado encontrar 30 franjas como indica o manual do experimento, contudo não conseguimos chegar a esse resultado.

É possível que tenha ocorrido interferência de vibrações externas que tenham atrapalhado o experimento, assim como, o difusor não apresentava condições ideais.

Realizamos diversas medidas e ajustamos de maneiras diferentes o equipamento, contudo ao final do experimento percebemos que possivelmente realizamos um erro de mediação que pode ter sido por ajuste do equipamento, falha em uma de suas peças ou erros e ruídos externos no qual estamos investigando.

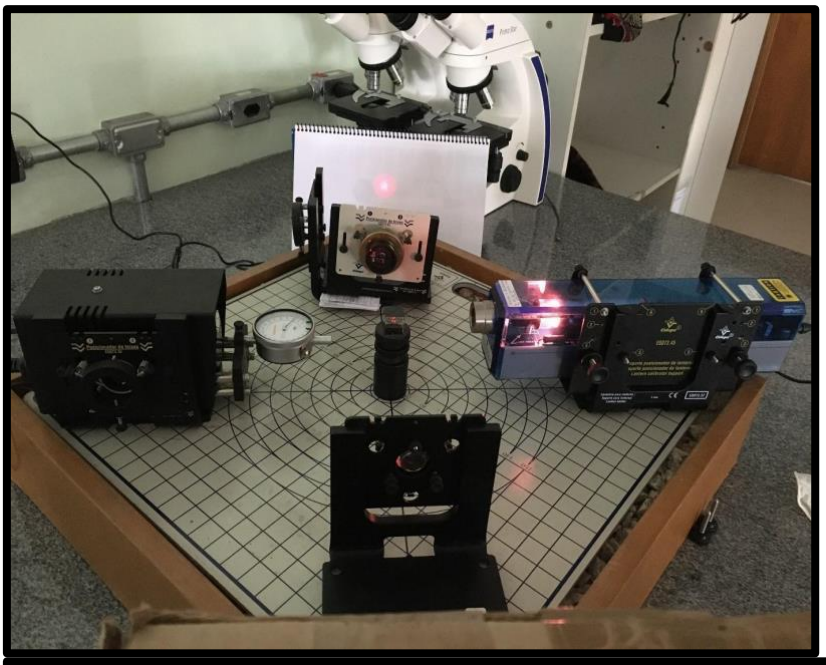
E ao longo do dia realizamos diferentes tentativas e obtivemos alguns resultados como pode ser observado na figura A1.2.1, A1.2.2 e A1.2.3:

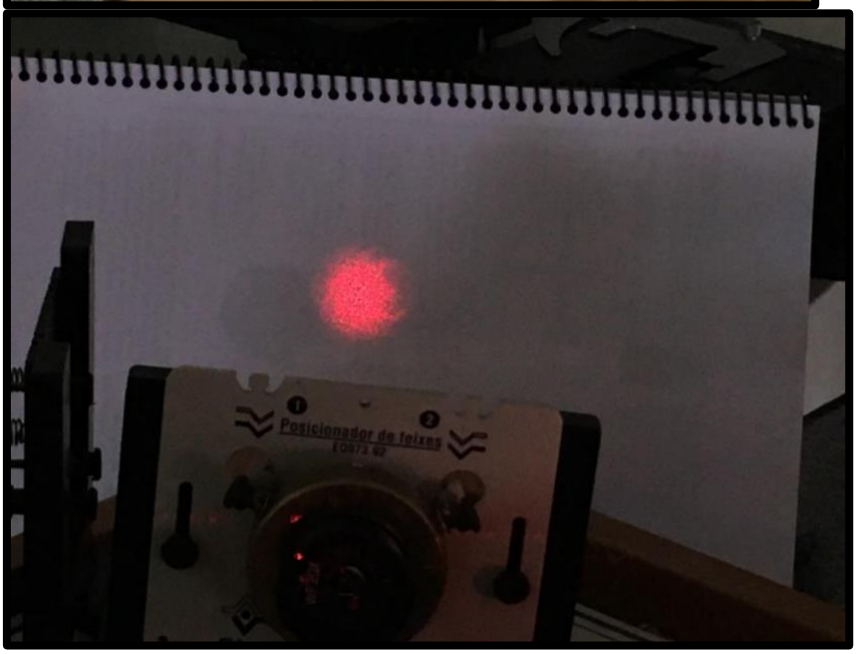
Figura A1.2.1, A1.2.2 e A1.2.3: São os resultados obtidos pelo experimento executado de diferentes ângulos.

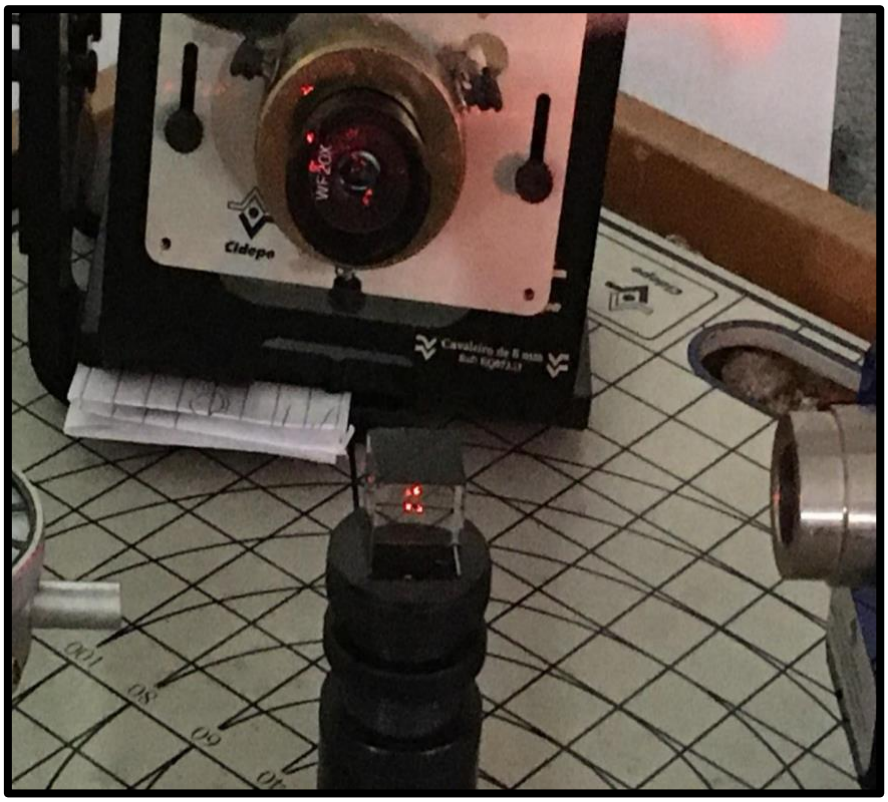
Na figura A1.2.1temos uma vista superior da montagem do experimento e ele em funcionamento mostrando como ocorre a propagação do feixe até o anteparo.

Na figura A1.2.2 é possível ver o feixe batendo no anteparo e seu comportamento de franjas, o papel branco foi usado para buscar uma melhor visualização do feixe.

Na figura A1.2.3 temos o cubo responsável pela dispersão do feixe que sai do laser e seu caminho até a lente convergente.








Fonte: Arquivo pessoal, fotos tiradas pela autora no laboratório da UNIFESP.

Ao finalizar o dia de tentativas percebemos que não obtivemos êxito na execução da experiência, investigando um pouco as causas do insucesso podemos obter algumas possíveis causas:

I. O equipamento não possuía um prisma/difusor que estivesse 100% em condições para a passagem dos lasers.
II. A vibração externa e a dificuldade de isolamento do experimento podem ter afetado os resultados.
III. A dificuldade de calibração do experimento.

Todas as causas acima podem ter resultado em nossa dificuldade de execução, mas isso só deixa claro o quanto o processo de detecção de OGs trata-se de algo sensível e complexo, corroborando para exemplificar na prática o que foi investigado no estudo teórico.

## APÊNDICE 2: Visitação ao INPE

Ocorreu no dia 10 de outubro de 2022.

A visita ao INPE contou com uma breve introdução do Dr. Odylio Aguiar sobre os projetos que ele conduz e seus alunos de doutorado.

Entendemos um pouco mais sobre o processo do LIGO e o trabalho da parceria que o Dr. Odylio conduz com eles. O foco do estudo atual promovido pelo INPE tem foco em analisar dados para manter-se dentro da colaboração do LIGO, contudo, existem pesquisas experimentais também sendo desenvolvidas como por exemplo o uso do silício para o resfriamento dos espelhos que estão sendo feitos e testados para o no projeto do LIGO. Esse projeto visa um produto, uma mola que funciona bem a temperaturas de 123K para o projeto LIGO Voyager.

O atual projeto do LIGO conta com cinco corridas programas, ele encontra-se na fase e atualmente possui espelhos feitos de sílica e visando justamente uma melhora nesse funcionamento para a versão LIGO Voyager e que os projetos estão sendo desenvolvidos.

Com o avanço da tecnologia visa-se aumentar a sensibilidade do interferômetro e por consequência aumentar o número de eventos que podem ser detectados a cada semana. A atual fase 3 conta com metade da capacidade de amplitude do que está previsto para as cinco etapas(corridas).

A fase três pode chegar a detectar dez eventos por semana, já a previsão para o Voyager está em centenas de eventos por semana, ele vai contar valores próximos de 200 mil canais de sensores, ampliando e muito em comparação com a capacidade atual.

Existem outros projetos sendo vistos e desenvolvidos pelo mundo, entre eles estão o "*Cosmic explorer*" (CE) que se trata de um interferômetro de 40 Km de braço e que tem previsão de funcionamento para o final da década nos Estados Unidos e segue o formato tradicional dos dois braços perpendiculares. Outro projeto em desenvolvimento é o Einstein Telescope (ET), que está sendo planejado para ser construído na Europa (Dois locais possíveis: Sardenha na Itália e na Holanda, perto da fronteira com a Bélgica), e tem previsão para o final da década.

Na américa latina existe um desejo de se estabelecer o South American Gravitational-wave Observatory (SAGO) um projeto que abrangeria os estudiosos latinos da área, contudo esse projeto esbarra na dificuldade de mão de obra qualificada (contando com pesquisadores, graduandos e pós-graduandos não se tem nem 50 pessoas) e investimento.

Podemos contar com outros projetos que estão sendo feitos pelo mundo e já estão em funcionamento como o LIGO da Índia, o KAGRA no Japão e o Observatório de Matéria Extrema de Estrelas de Nêutrons (NEMO) na Austrália. Inclusive se faz interessante e necessário que nossos estudiosos possam ir a esses projetos ou outros para adquirir conhecimento e assim ter maior chance de nascer o SAGO.

Nessa visita também foi possível obter informações sobre o avanço das pesquisas em interferômetros e inclusive discutir um pouco sobre os interferômetros espaciais que estão sendo projetados e que podem ser mais "poderosos" que os internos, que estão dentro do solo do da Terra. Contudo, eles são mais complexos de serem construídos e podem ter muitos problemas no seu lançamento e manutenção, o que eleva o custo, além de terem uma previsão de vida útil menor, a previsão é de que esses interferômetros tenham baixas frequências com amplitudes maiores, o que torna mais fáceis e amplas as possibilidades de detecção.

Nos interferômetros um aspecto que sempre se faz necessário ter atenção são os ruídos, a razão sinal/ruído do LIGO gira em torno de 24 e já chegou a 32 e no espaço essa razão sinal/ruído iria girar em torno de 10 mil. Um detalhe muito importante para o bom funcionamento dos interferômetros espaciais: se faz necessário que eles estejam a grandes altitudes para conseguirem um bom vácuo, sendo assim não podem estar na atmosfera terrestre. O projeto de interferômetro espacial atual super conhecido é o LISA, sua órbita solar seria com a mesma distância que a Terra está do sol, cerca de 150 milhões de km, mas a inclinação do LISA não será a mesma do planeta Terra, o LISA encontra-se a 20ºgraus de inclinação atrás da Terra e a cerca de 50-52 milhões de Km da Terra (150 vezes a distância Lua-Terra) e entre si eles (os três satélites que compõe o LISA) estão com 2,5 milhões de km.

O LISA poderia detectar orbitas de estrelas compactas/binarias que estão lá o tempo todo, coalescência de buracos negros supermassivos que estão morrendo. Então esses interferômetros seriam poderosíssimos, mas apresentam alta complexidade.

Depois desse momento de entendimento sobre os detectores fomos ao laboratório de ondas gravitacionais (LOG) do INPE para visitar os experimentos que estão em andamento, projetos e outros.

Para a colaboração LIGO Voyager foi desenvolvido um experimento que já foi finalizado no qual buscava-se um sistema de isolamento gravitacional, ele conta com pêndulos alinhados feitos em camadas (tipo cebola, as "shells") e eles são pendurados, colocados em suspensão. Uma das "shells" fica presa em cabos de 3 em 3 pontos e são

ligadas na anterior, uma na outra, e assim por sequência. Nesses experimentos foi feito pensando em um ponto chamado de repercussão (o ponto ideal de batida igual tem-se na raquete de tênis), além disso o centro de percussão das "shells" serve para que haja a transmissão/ transferência de vibração sem causar movimento "tilt" (de um lado para outro) e isso iria servir para deixar os espelhos do experimento Voyager mais estáveis e menos sensíveis a essas interferências de vibração.

O experimento também tem um molejo vertical, com molas que estão comprimidas com ponto de equilíbrio variável, a mola vertical não-deixa/age-contra as molas horizontais e com isso obtém-se como resultado um baixo período de oscilação. Um ponto interessante sobre esse experimento é que o período de oscilação baixo ocorre quando a constante K da mola é baixa e a mola estaria muito esticada, contudo, eles conseguiram que o K ficasse baixo sem precisar esticar demasiado a mola por conta do uso de molas horizontais. Esse sistema se trata de um sistema passivo para o LIGO Voyager. As frequências que esse experimento consegue amenizar estão entre 1 Hz e 1000 Hz, contudo existem alguns problemas com o experimento por causa das "shells", pois elas têm muita ressonância e com isso atrapalham a transferência e esse projeto atualmente está encerrado, pois já serviu ao seu propósito. Abaixo será possível visualizar uma foto do projeto.

Figura A2-1: Teste para obter um sistema de isolamento/amortecimento gravitacional.

Nesta foto podemos ver o aparelho que dentro possui um sistema que busca amortecer/isolar ruídos gravitacionais. Na parte superior temos o encaixe do molejo no qual ajuda com ajuste da parte interna.

Esse experimento funciona como uma "cebola" em camadas e por isso acaba auxiliando no sistema de amortecimento.

Fonte: Foto tirada pela autora no dia da visita às instalações do INPE.

Em outra parte do laboratório temos equipamentos que fazem parte de outros experimentos, mas que ajudaram no experimento descrito acima. A câmara de vácuo (como da figura A2-2) recebeu o experimento acima para realizar os testes à temperatura de 123 K e simular o que vai ocorrer no LIGO Voyager, assim como colocaram um sismômetro junto ao teste para análises precisas.

Figura A2-2: Câmara de vácuo.

Fonte: Foto tirada pela autora nas instalações laboratoriais do INPE

O controle dos experimentos é feito por controles em válvulas, a câmara de vácuo ainda contou com uma serpentina e uso de nitrogênio líquido para que tivesse um isolamento térmico para o experimento que foi colocado dentro da câmara de vácuo, o vácuo dentro da câmara foi colocado próximo de $10^{-7}$ bar além do resfriamento do experimento com o nitrogênio. Para o teste do resfriamento eles também usaram um protótipo de massa metálica.

Na câmara de vácuo eles mergulharam uma peça de silício em nitrogênio líquido (mesmo material que será usado no Voyager) por cerca de 3 minutos e assim a peça ficava fria perto dos 80 K e depois a peça resfria por radiação, pela equação do equilíbrio de resfriamento por radiação consegue-se achar a emissividade efetiva da peça em função da temperatura (curva de resfriamento) e quando consegue-se atingir o 123K o experimento e parado pois será nessa temperatura que o Voyager irá trabalhar. O foco desse estudo era verificar o tempo que a peça de silício levava para obter o resfriamento nessa emissividade, a 123 K qual seria a velocidade de retirada do calor do espelho, isso

será extremamente importante para o Voyager, pois os espelhos dele serão de silício. O experimento obteve resultados de 6-7 W de calor retirado do material, com isso foi possível determinar que não pode haver vazamentos de calor maior que esse.

Uma informação relevante sobre o silício e que ele pode parar de expandir em duas temperaturas, 20K e 123K ; por isso adotou-se o ponto 123K como referência para o experimento levando em conta o estudo e o material que o Voyager vai usar, além disso ele reduz o ruído térmico nessa temperatura (expansão térmica indo a zero), relação termoelástica.

O laboratório também conta com uma máquina de reliquefação de hélio (figura A2-3).

Figura A2-3: Máquina de reliquefação de hélio.

Fonte: Foto tirada pela autora (arquivo pessoal) dentro do laboratório do INPE.

Essa máquina pinga hélio líquido e o gás contido ali consegue ser usado para voltar e liquefazer o hélio e assim evitar perdas, esse sistema foi montado pensando no experimento Mário Schenberg que irei comentar mais à frente. A máquina possui um certo molejo e ela pode ser mantida a uma certa distância do experimento que deseja usar e não necessariamente acoplar ela por inteiro com a câmara de Schenberg, por exemplo.

O experimento de Schenberg: Inicialmente pensou-se em usar uma câmara de vácuo no chão para esses experimentos, mas depois viu-se que pendurar na parede se fazia mais eficaz, com menos ruído e melhor funcionamento do equipamento. Esse experimento teria quatro plataformas (andares) como mostra a figura A2-4, elas iriam separar os níveis.

Para que esse experimento alcançasse uma ordem de magnitude alta, esse experimento contou com financiamento da Fapesp por alguns anos, mas atualmente encontra-se fragmentado e desmontado e não possui verbas para sua continuidade. Esse experimento e um detector de ondas gravitacionais do tipo massa ressonante (absorção de energia) e teria frequências de detecção/sensibilidade entre 3500-3260 Hz (atingido no limite quântico) e essas faixas já são atingidas pelo interferômetro do LIGO. O LIGO e o Scheinberg operam com princípios diferentes e possuem propostas de detecção de maneiras distintas e atualmente o grupo do INPE busca descobrir se houve alguma detecção no LIGO na frequência que o Schenberg atua para verificar se isso justifica a sua montagem e atrai financiamento.

Figura A2- 4: Massa esférica que atua como antena no experimento Mario Scheinberg.

Fonte: Foto tirada pela autora no laboratório de ondas gravitacionais do INPE

A foto acima mostra massa a ser usada no experimento, ela é maciça e com 1 tonelada e 200kg, mas com um pequeno oco por dentro para que se possa colocar o bastão que vemos na parte superior, esse bastão foi parafusado de dentro para fora e nela vemos alguns furos que são para encaixe dos sensores, o material dessa bola e o alumínio e o cobre e ela tem um resfriamento quando se coloca os sensores.

Essa esfera iria captar informações em caso de oscilações ocorridas em sua faixa de frequência quadripolar (3200 Hz). O sistema esfera+transdutor, contém dois osciladores harmônicos acoplados, e só havia a necessidade de 3 orifícios, mas foi pedida a usinagem de 6 para um encaixe de um transdutor de calibração e outras coisas.

Um dos alunos do grupo realizou a medição da bola com um goniômetro e obteve o diâmetro correto da esfera junto ao uso de um micrômetro, dando a real dimensão desse protótipo.

As cavidades da esfera conseguem aprisionar 10Ghz com sinal de micro-ondas e sinal modulado. O grupo da Austrália conseguiu confirmar a variação de 730Mhz por mícron da movimentação da membrana interna do transdutor e isso mostra que o projeto estava dentro do previsto e 3,2Khz seria o sinal modulado que se encaixa na esfera e então essa seria a faixa de detecção dela e uma vantagem desse tipo de detector estaria na temperatura, pois aqui quanto mais frio menos ruído browniano iria ter.

No caso da troca de material da bola por silício ou safira poderia obter-se melhores resultados pois ultrapassaria o limite quântico. O ganho seria melhor com todo o aparelho no mesmo Q (fator de qualidade) mecânico, ou seja, incluindo o material da esfera nos transdutores.

Estima-se que um investimento de 150 mil reais na esfera de cobre-alumínio levaria a um equipamento que já seria melhor que o atual, mas em silício ou safira seria muito mais caro.

No final de nossa visita nos foi contado um infeliz caso de roubo de algumas peças que faziam parte da composição do Mario Schenberg, chapas de cobre de 120Kg, e para substituir essas peças seria interessante se ter aço inox.

Por fim, visitamos o último pavimento do experimento (figura A2-3) e lá pudemos observar pela parte superior o experimento como na figura A2-5, e obtivemos a informação de que para o início do experimento foram usados os pneus da figura A2-6 para o molejo vertical.

O experimento trabalharia com 1,2 m de diâmetro do objeto da figura A2-4 com cerca de 1600 Hz de frequência (mesma faixa de frequência do telescópio James Webb), a atual massa da figura A2-4 tem 65 cm. No topo da figura A2-5 também é possível observar a barra amarela da grua que serve de braço de movimentação para o experimento.

Encerramos nossa visita com um belo entendimento do empenho e dedicação dos pesquisadores do INPE sob a supervisão do Dr. Odylio Aguiar.

Para fechar nossa visita à cidade de São José dos Campos, também realizamos uma breve visita ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), guiada pelo Dr. Rubens de Melo Marinho Jr., experiente cientista em relatividade e gravitação e professor titular aposentado do ITA, para ver as instalações gerais. Nós não visitamos os laboratórios de pesquisas, mas tivemos o privilégio de uma aula de história da ciência enquanto o professor nos apresentava o campus.

Figura A2-5: Vista superior das instalações do laboratório e do experimento.

Fonte: Foto do arquivo pessoal da autora, tirada nas instalações do INPE

Figura A2-6: Pneus usados na ideia inicial do molejo para o experimento.

Fonte: Foto tirada pela autora nas instalações do pavimento superior do laboratório de ondas gravitacionais do INPE.