

Ondas gravitacionais: Efeito de atração gravitacional entre peças de chumbo



Renan Daniel Domingos
renandd@ifi.unicamp.br

16 de Dezembro de 2019
Versão: Desenvolvimento

Universidade Estadual de Campinas



Instituto de Física "Gleb Wataghin" - IFGW

Relatório da Disciplina F709
Tópicos do Ensino de Física II

Ondas gravitacionais: Efeito de atração gravitacional entre peças de chumbo

Renan Daniel Domingos

Supervisor: Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi

Universidade Estadual de Campinas

16 de Dezembro de 2019

Renan Daniel Domingos

Ondas gravitacionais: Efeito de atração gravitacional entre peças de chumbo

Relatório da Disciplina F709

Tópicos do Ensino de Física II, 16 de Dezembro de 2019

Revisores: Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi

Supervisores Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi

Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física "Gleb Wataghin" - IFGW

Departamento Física da Matéria Condensada

Campinas - SP

Conteúdo

1	Experimento	3
1.1	Descrição	3
1.2	Gravitação	4
1.3	Ondas Gravitacionais	5
2	Gravitação universal	7
3	Interferômetro de Michelson	8
3.1	Experimento de Michelson-Morley	8
3.2	Interferência	8
3.3	Montagem do interferômetro	9
3.4	Interferômetro compacto	10
3.4.1	Montagem	10
3.4.2	Funcionamento	11
3.4.3	Resultados preliminares	12
4	Balança com interferômetro	14
4.1	Montagem da balança	14
4.2	Funcionamento	16
4.3	Calibração da balança	16
5	Conclusão	17
	Bibliografia	18

Lista de Figuras

1.1	Gráfico da relação entre a distância entre os discos e a força de atração entre eles.	5
1.2	Gráfico da relação entre a variação temporal e a força de atração entre os dois discos.	6
3.1	Exemplo de interferência em ondas, a esquerda a formação de mínimos e a direita a formação de máximos. Referência da imagem	9
3.2	Montagem experimental de interferômetro de Michelson.	9
3.3	Esquema de montagem realizado, cada elemento esta indicado na figura.	10
3.4	Montagem realiza pelo professor Lunazzi.	11
3.5	Franjas de interferência observadas durante a realização do experimento.	12
3.6	Franjas de interferência observadas durante a realização do experimento, comparação em dois momentos diferentes, onde se observa o deslocamento das franjas.	13
4.1	Desenho 3d do módulo de balança desenvolvido para utilização com o interferômetro.	14
4.2	Peça feita na oficina do instituto. Foi utilizado um cilindro de impressora a laser.	15
4.3	Interferômetro com módulo de balança inserido como elemento de interferência.	15
4.4	Descritivo do posicionamento e funcionamento do módulo de balança.	16

Introdução

Nesse projeto se pretende desenvolver uma instrumentação simples para facilitar a demonstração da atração gravitacional entre dois corpos e em seguida com essa mesma montagem promover oscilações em uma das massas, afim de demonstrar de forma simples e clara as ondas gravitacionais. Para isso pretende-se utilizar uma balança de precisão composta por um interferômetro para determinar o deslocamento provocado pela interação entre as duas peças de chumbo.

Outro experimento similar ao que se pretende desenvolver nesse trabalho é a balança de Cavendish, onde foi possível determinar a constante de gravitação. Porém neste caso não é possível através da oscilação de uma das massas ter uma medida visual e quantitativa das ondas gravitacionais.

Como a força de atração gravitacional entre dois corpos é muito pequena uma balança comum não conseguiria medir essa pequena força de atração, diferença no valor do peso medido sem a presença da outra peça de chumbo e com a peça de chumbo próxima. Estima-se que a força de atração entre os dois corpos seja $10^{-8}N$. De maneira semelhante a qual se pretende utilizar uma balança por interferômetro para medir a força peso e em seguida para medir a força de atração entre os dois corpos. A montagem da balança de precisão utilizando um interferômetro permite a obtenção do deslocamento do suporte de massa para diferentes valores de massa e assim determinar a massa da amostra em questão.

As ondas gravitacionais que se pretende demonstrar nesse trabalho partem de dois princípios da mecânica clássica:

- Os corpos com massa se atraem, com uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância, entre as massas. (Gravitação universal)
- A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos. (3ª Lei de Newton)

Dessa forma podemos utiliza uma massa para atrair uma outra massa (em repouso na balança de interferômetro). Utilizando duas massas de diferentes valores, onde a massa na balança seja 2 ordens de grandezas menor que a massa que vai atrair. Por

exemplo a massa em repouso com 10g a outra massa deve ter um valor de 1kg. A força sobre a massa de menor valor vai atrair esta para próximo da outra massa, que por ter maior massa pode se considerar que não se move, existe um deslocamento muito menor. Esse deslocamento promove no interferômetro um deslocamento das franjas de interferência, mostrando visualmente a atração entre as massa.

Se a massa de maior valor é oscilada próximo a massa fixa, a intensidade da atração varia com a mesma frequência de oscilação da massa, logo temos um movimento das franjas de interferência simulando as ondas gravitacionais. Onde o deslocamento das franjas é igual a amplitude de oscilação, maior valor da oscilação.

Palavras Chaves:

Ensino de física, Instrumentação, Força gravitacional

A ideia para a construção do experimento partiu do Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi do Laboratório de Óptica (LO) do Instituto de Física "Gleb Wataghin- IFGW - Unicamp.

Este capítulo dedico para uma descrição menos teórica e mais conceitual e que pode ser utilizada para alcançar alunos e professores que futuramente desejem reproduzir ou demonstrar os conceitos de atração gravitacional e ondas gravitacionais em feira de ciência na escola. A instrumentação que se pretende utilizar na montagem é simples, considerando as limitações do efeito que se deseja demonstrar, com a finalidade que outras pessoas consigam reproduzir e aprimorar as ideias desenvolvidas nesse trabalho.

1.1 Descrição

Nesse trabalho desejamos demonstrar de forma visual e lúdica o efeito e atração gravitacional, atração entre duas massa da mesma forma que a Terra atrai a lua, com o adicional de promover uma interação, influencia mutua, de uma variação temporal da atração gravitacional fazendo oscilações, variação da distancia entre as duas massas durante o tempo, simulando o efeito das ondas gravitacionais.

O experimento vai ser composto por discos de chumbo como massas em repouso, foi escolhido discos de chumbo devido sua alta densidade (ρ), quantidade de massa por volume, dessa forma é possível obter uma grande massa em um pequeno disco. Para a construção dos disco foi utilizado chumbadas, pesos, para pesca. Outra vantagem de utilizar o chumbo e que este material possui baixo ponto de fusão, mudança do estado sólido para liquido. Depois de derretido foi despejado em formas de metal no formato desejado e esperado esfriar. Por se tratar de um processo caseiro também precisou fazer um acabamento, lixamento e polimento, nessas peças produzidas.

O professor Dr. José Joaquín Lunazzi que deu a sugestão de utilizar discos, pois estes devido a sua geometria, forma, permitem uma maior área de interação entre as duas massas quando colocados em paralelo e alinhados pelo centro.

Adicionar fotos do processo e dos discos.

Com os discos prontos partimos para a montagem da primeira etapa do experimento a demonstração da atração gravitacional entre os discos.

1.2 Gravitação

É conhecido e muito mais visível e presente no cotidiano que existe uma força de atração entre os polos opostos de dois ímãs, é fácil de se perceber que ao se aproximar dois ímãs pode se notar uma força atrativa, que tende a aproximar os ímãs, ou uma força repulsiva, que tende a afastar os ímãs, onde a direção da força está relacionada com o polo do ímã. De maneira semelhante aos ímãs as cargas elétricas, transportadores de corrente elétrica, também se atraem e repelem dependendo do valor de sua carga, positiva ou negativa.

Para o caso de massas elas somente se atraem, não existe o caso de repulsão, e essa força de atração entre elas é muito pequena para a maioria dos corpos macroscópicos, que podem ser vistos a olho nu, e microscópicos, que podem ser observados com ajuda de um microscópio. Porém para o caso de corpos celestes, como planetas luas e estrelas, essa força atrativa é responsável pela determinação da órbita, é a trajetória que um corpo percorre ao redor de outro o de menor massa ao redor do de maior massa. Dessa forma toda a dinâmica celeste, movimento dos planetas, é regido pelos conceitos de atração gravitacional.

Outra característica da atração gravitacional é que ela depende do inverso da distância ao quadrado, $\frac{1}{(\text{distância})^2}$, entre as duas massas. Logo quanto maior a distância entre duas massas menor será a atração entre elas. Da mesma forma que a força de atração aumenta quanto maior for as massas dos corpos. Devido a essa característica da força ser aumentada com massas muito grandes, como de planetas, ela não é perceptível entre corpos de pouca massa, massas macroscópicas.

Por exemplo a força que mantém a lua orbitando a terra tem origem na atração gravitacional entre esses dois corpos. Assim como a terra orbitando ao redor do sol. Por exemplo a terra exerce uma força de atração na lua que pode ser obtida com a aplicação da lei de gravitação, utilizando os dados massa da lua ($m_{lua} = 1 \times 10^{23} kg$) e a massa da Terra ($m_{Terra} = 6 \times 10^{24} kg$) a distância do centro da terra até o centro da lua é $r = 4 \times 10^8$ metros. A força de atração pode ser calculada e chegamos a um valor de $F_{sol-lua} = 2,5 \times 10^{22} N$. Para duas bolas de boliche, que pesam $m_{bola} = 7,5 kg$ separadas por uma distância de $1 m$ a força de atração dessas duas bolas é de $F_{bola} = 3,6 \times 10^{-9} N$. Uma força muitas ordens de grandeza menor que a força que a terra atrai a lua.

O cálculo da força de atração entre duas massas, m e M , separadas por uma distância r é dada pela equação:

$$F = G \frac{m * M}{r^2} \quad (1.1)$$

onde G é a constante da gravitação universal e seu valor é de $G = 6,7 \times 10^{-11} \frac{[N \cdot m^2]}{[kg^2]}$.

1.3 Ondas Gravitacionais

Quando as duas massas estão na condição onde sua atração é máxima mantendo uma distância entre elas, vai existir um deslocamento da massa de menor valor em direção da massa de maior valor, devido ao caráter atrativo da força gravitacional. Quando a massa maior se aproximar da massa em repouso a intensidade da força entre elas aumenta, variando a distância relativa entre elas, Figura 1.1. Quando observado nas franjas de interferência formadas pelo interferômetro um deslocamento das franjas devem ser observados em uma direção, e quando realizar o afastamento das massas esse deslocamento deve ser observado na direção oposta.

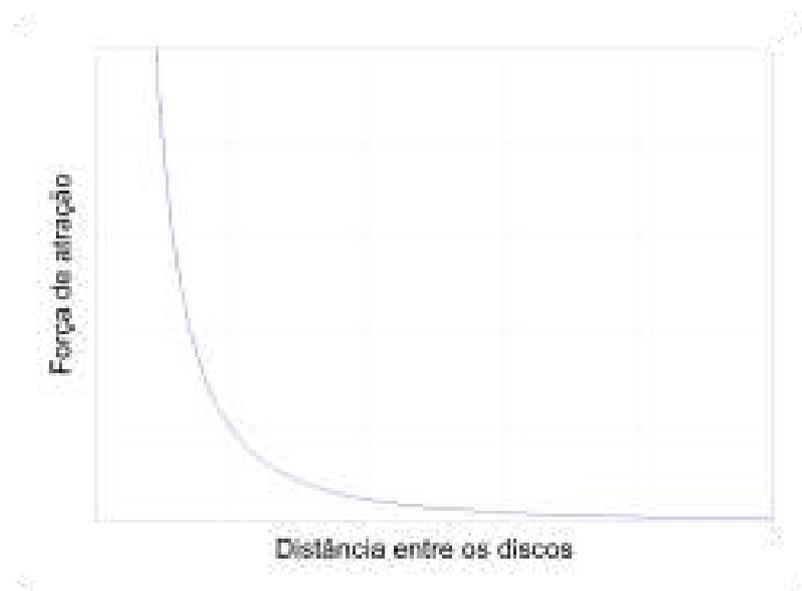


Figura 1.1: Gráfico da relação entre a distância entre os discos e a força de atração entre eles.

Esse deslocamento para uma direção quando temos aproximação e o deslocamento para a outra direção quando temos o afastamento entre as massas pode ser realizado de maneira repetitiva durante um intervalo de tempo. Dessa forma vamos ter oscilações entre máximos e mínimos da força de atração dependendo da amplitude do movimento realizado simulando o efeito de ondas gravitacionais. Na observamos a variação da força de atração entre as massas em função do tempo do sistema em oscilação.

Assim sera observado no anteparo as franjas de interferências se deslocando para a direita e para esquerda de maneira a possuir a mesma frequência de oscilação que a massa maior possui.

Dessa forma se pretende tornar mais clara a explicação para os alunos do efeito da atração gravitacional entre massas realizando a transposição de um conceito

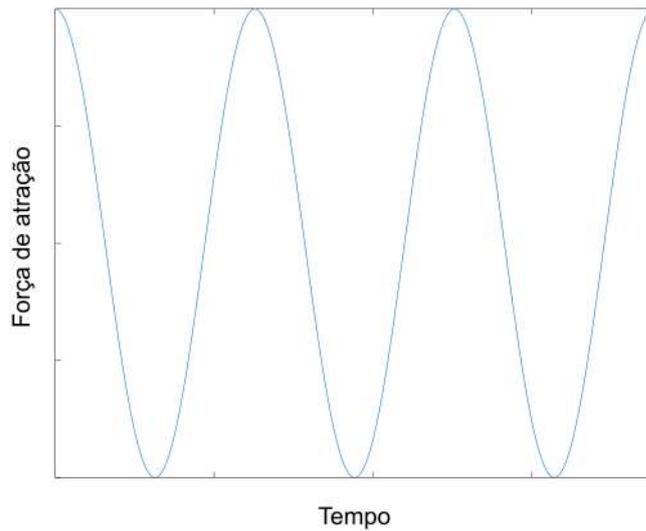


Figura 1.2: Gráfico da relação entre a variação temporal e a força de atração entre os dois discos.

que está presente na fronteira do conhecimento científico para alunos de escolas. E possibilitando que estes realizem a mesma montagem experimental em suas escolas ou casas.

A determinação da intensidade e direção da força gravitacional entre dois corpos pode ser calculada e medida de forma mais simples quando se trata de corpos com grande massa, como o caso de planetas e satélites naturais. Onde é possível obter a intensidade da força e com isso descrever o movimento relativo a esses dois corpos.

Cálculos teóricos vão ser realizados para a determinação da ordem de grandeza dessa força em nosso sistema que vai ser utilizado para a experimentação. Se pretende inicialmente utilizar um arranjo com discos de chumbo, devido sua densidade elevada, de forma a aumentar a atração gravitacional entre eles.

A Equação para calculo da força de atração gravitacional entre dois pontos de massa m e M separados a uma distância R é dada por:

$$\mathbf{F} = \frac{GmM}{R^2}\hat{r}$$

onde G é a constante de gravitação com valor de $G = 6,67 \times 10^{-11}$. Como o valor da constante é pequeno temos que é necessário duas massas muito grandes a uma distância muito pequena para que essa força seja possível de ser medida com equipamentos simples, como uma balança. Com relação as massas vamos utilizar discos de chumbo assim é possível variar a massa dos dois corpos empilhando mais discos e com relação a distância será utilizada um parafuso milimetrado para movimentar um desses discos, de forma aumentar ou diminuir a distância entre os dois conjunto de discos.

O Interferômetro de Michelson vem sendo utilizado em diversas aplicações, para medida de baixos valores como medidas de energia em moléculas de gás, medida de massa, deslocamentos e vazão de líquidos entre outros. Dois grandes experimentos para a comprovação de teorias são utilizando esta montagem experimental. Que também garantiram dois prêmios Nobel em Física. O experimento de Michelson-Morley em 1885, que deixou clara a inexistência de um meio especial para a propagação da luz (éter) e serviu de inspiração para a teoria da relatividade especial. E o experimento que detectou as ondas gravitacionais no laboratório LIGO e VIRGO em 2016.

3.1 Experimento de Michelson-Morley

O interferômetro foi utilizado para tentar medir o movimento da terra em relação ao éter, Esse experimento ficou conhecido com experiência de Michelson-Morley. Neste experimento se pretendia detectar o movimento relativo da matéria (neste caso a Terra) pelo éter estacionário. Os resultados negativos obtidos pela dupla foi essencial para a eliminação da teoria do éter.

3.2 Interferência

Interferência é fenômeno ao qual duas ondas, sonora ou luminosa, interagem de forma construtiva, formando um máximo de interferência, ou destrutivamente, formando um mínimo de interferência. Dessa forma temos máximos e mínimos devido a interação dessas ondas. como pode ser observado

Nota-se nessas imagens que duas ondas em fase, quando os seus valores de pico estão alinhados, essas ondas vão interferir de forma construtiva formando um máximo de interferência, em nosso caso uma franja de iluminada (clara). Para o caso de as ondas estarem fora de fase, o mínimo de uma onda coincide com um máximo de de outra onda (defasagem de 90°) temos um mínimo de interferência, em nosso caso temos uma franja escura (ausência de luz).

Esse padrão de franjas claras e escuras formão o que chamamos de padrão de interferência, esse padrão de interferência é devido ao caminho percorrido pela luz. Uma diferença de caminho que dois feixe percorrem podem causar uma interferência construtiva e destrutiva.

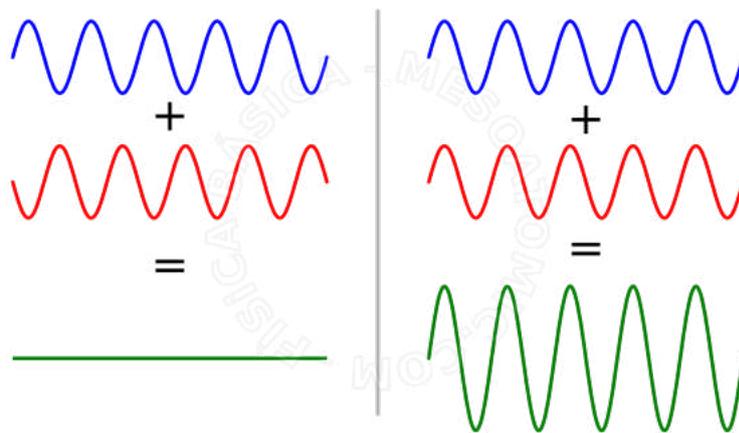


Figura 3.1: Exemplo de interferência em ondas, a esquerda a formação de mínimos e a direita a formação de máximos. [Referência da imagem.](#)

3.3 Montagem do interferômetro

Para este experimento se pretende utilizar uma abordagem de baixo custo, dessa forma a parte mais complicada na redução de custo está na construção de um interferômetro. Em um trabalho publicado por Catelli, Francisco e Vicenzi, Scheila, [Catelli e Vicenzi 2004], demonstram e explicam a construção de um interferômetro simples e com bons resultados. Sendo possível observar as franjas de interferência, com bom constaste.

Melhoras realizadas nessa montagem proposta são responsáveis por um aumento na resolução das medidas realizadas. Que no caso as variações no experimento são muito pequenas.

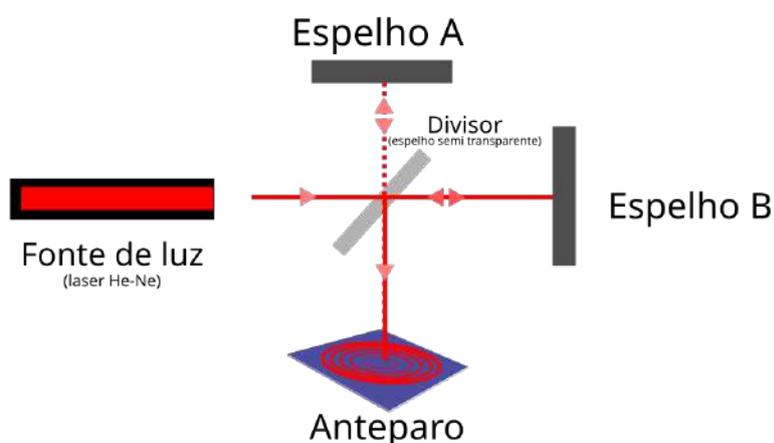


Figura 3.2: Montagem experimental de interferômetro de Michelson.

Uma descrição bem detalhada do funcionamento de um interferômetro pode ser obtida em [Fragnito e Costa 2010], onde ele explica os princípios de operação assim como detalhes da montagem. Neste mesmo artigo é realizada uma descrição fenomenológica do fenômeno de interferência em um interferômetro.

3.4 Interferômetro compacto

Durante as discussões com o professor Lunazzi surgiu a possibilidade de realizar uma montagem alternativa e diferenciada de um interferômetro, pois esta montagem poderia resolver o problemas de alinhamento com a balança e simplificando a montagem. A montagem do interferômetro realizada pelo professor Lunazzi não encontramos referências na literatura. E pode ser uma alternativa muito mais simples para uma montagem para ser realizada em uma escola ou utilizado para demonstração.

3.4.1 Montagem

Para a realização da montagem, diferente do interferômetro de Michelson, só temos um braço (caminho óptico) onde deve ocorrer a mudança de fase no feixe luminoso e ocorrendo interferência entre dois feixes. A montagem veio com inspiração ao experimento realizado por Pooja Munjal [Munjal e Singh 2019].

Na Figura 3.4 observamos o esquema da montagem realizada. Para a montagem realizamos utilizamos massa de modelar para realizar a fixação dos elementos ópticos. A montagem final ficou como apresentada na Figura 3.4

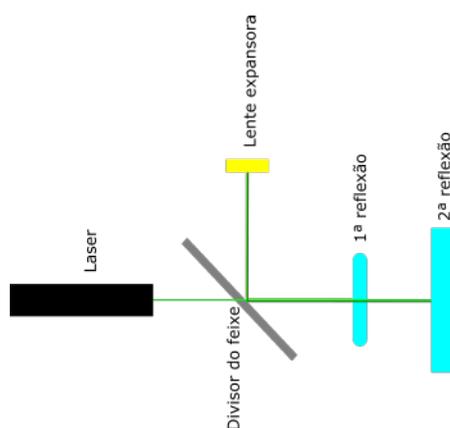


Figura 3.3: Esquema de montagem realizado, cada elemento esta indicado na figura.

Foi utilizado como divisor de feixe um conjunto de dois vidros espessos que entre eles possuem um insulfilme, com cerca de 50% de transmissão, não foi realizado medidas para determinação. Depois do divisor de feixe utilizamos um pedaço vidro com cerca de $3mm$ de espessura. E para segunda reflexão utilizamos um pedaço de vidro com cerca de $1mm$ de espessura. E para visualizar a interferência tivemos que



Figura 3.4: Montagem realiza pelo professor Lunazzi.

utilizar uma pequena lente expansora, no final do curso óptico sobre a bancada, como observado na Figura 3.4.

3.4.2 Funcionamento

No interferômetro de Michelson temos dois braços, caminhos ópticos diferentes um para cada feixe após o divisor de feixe, essa diferença de caminho óptico causa a interferência num anteparo, observamos o padrão de franjas. Em nosso experimento o funcionamento é diferente de forma que os dois braços do interferômetro estão localizados em uma mesma direção. A montagem de Michelson-Morley tem por objetivo pegar variações com relação a dois caminhos perpendiculares e assim observar se algumas das componentes sofrem variação, no caso do experimento deles para demonstrar a não existência do éter.

Para o nosso caso o alinhamento com essa montagem exigiria muitos elementos ópticos a fim de realizar o alinhamento, o que dificulta a montagem. Então optamos por uma montagem em linha e que podemos realizar o alinhamento somente variando a posição do primeiro vidro de $3mm$.

O feixe é dividido em duas componentes, uma que não utilizamos em nosso experimento e o segundo vai para o sistema óptico montado. Até a lente existe um único feixe de laser, como a lente possui um índice de refletividade de cerca de 4% temos que parte do feixe incidente retorna em direção ao divisor de feixe e o restante do feixe segue em direção a pedaço de vidro. Neste pedaço de vidro a luz é refletida novamente na direção da lente, a mesma fração de 4%, o restante sai do sistema.

Quando o feixe de luz muda de um meio de menor índice de refração para um meio de maior índice de refração, temos que esse feixe refletido tem sua fase alterada em um valor igual a π . Logo nosso feixe quando encontra um elemento óptico, lente ou bloco de vidro, ele retorna na direção do divisor de feixe com a sua fase alterada em π .

O mesmo ocorre para quando o feixe de luz atravessa um material de espessura d . Quando o feixe atravessa a lente de espessura d temos que a mudança de fase é igual a:

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda}$$

Dessa forma temos duas mudanças de fases causada pelos elementos ópticos do nosso interferômetro, essa mudança de fase é a responsável pelo fenômeno de interferência observado, causando os padrões de interferência.

Quando os dois feixes retornam para o divisor de feixe de modo que cada feixe (refletido pelo vidro de $3mm$ e o de $1mm$) cheguem com uma diferença de fase que quando combinadas observa-se os padrões de franjas de interferência observados em experimentos similares. Como forma de alinhamento dos elementos ópticos direcionar ambos os feixes refletidos retornarem para o laser.

3.4.3 Resultados preliminares

Segue alguns resultados obtidos com a montagem do experimento do interferômetro compacto. Realizamos o realimento similar ao realizado em interferômetro. As imagens foram obtidas pelo professor Lunazzi.

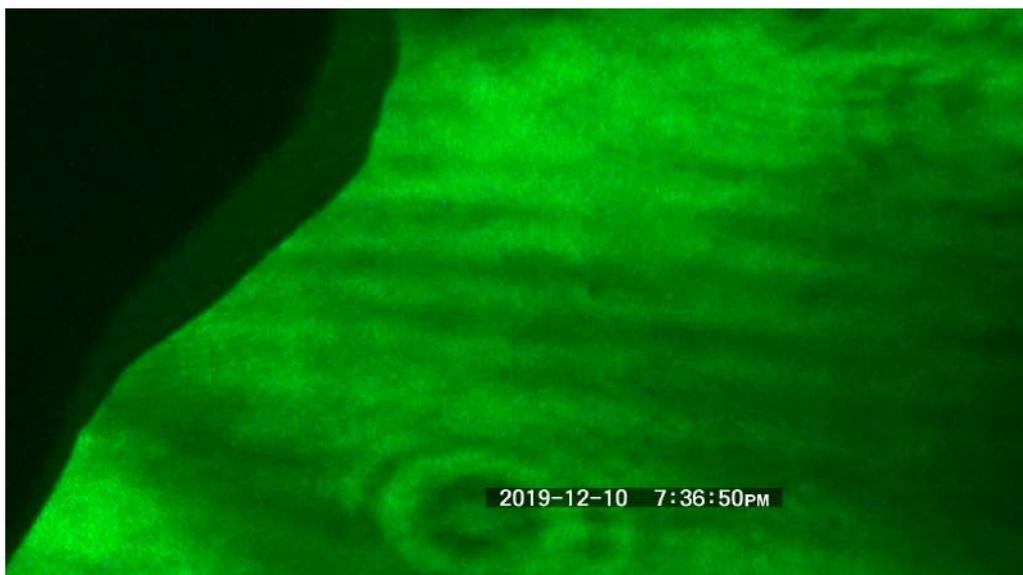


Figura 3.5: Franjas de interferência observadas durante a realização do experimento.

Como pode ser observado na Figura 3.5 são formadas franjas com boa nitidez, e por ser um fenômeno que ocorre com a reflexão do feixe incidente e esse valor ser de 4% é difícil obter franjas bem nítidas. Vamos tentar estudar mais detalhadamente cada elemento e sua função óptica para que se possível retirar ou troca-lo por um que permita melhor nitidez.

A montagem foi realizada utilizando massinha o que primeiro momento é muito bom e pratico para realizar o posicionamento dos elementos, porém do decorrer do experimento estes ficam se movimentando e acaba atrapalhando a visualização das franjas. Foi possível inclusive durante essa movimentação do espelho observar o deslocamento das franjas, Figura 3.6.

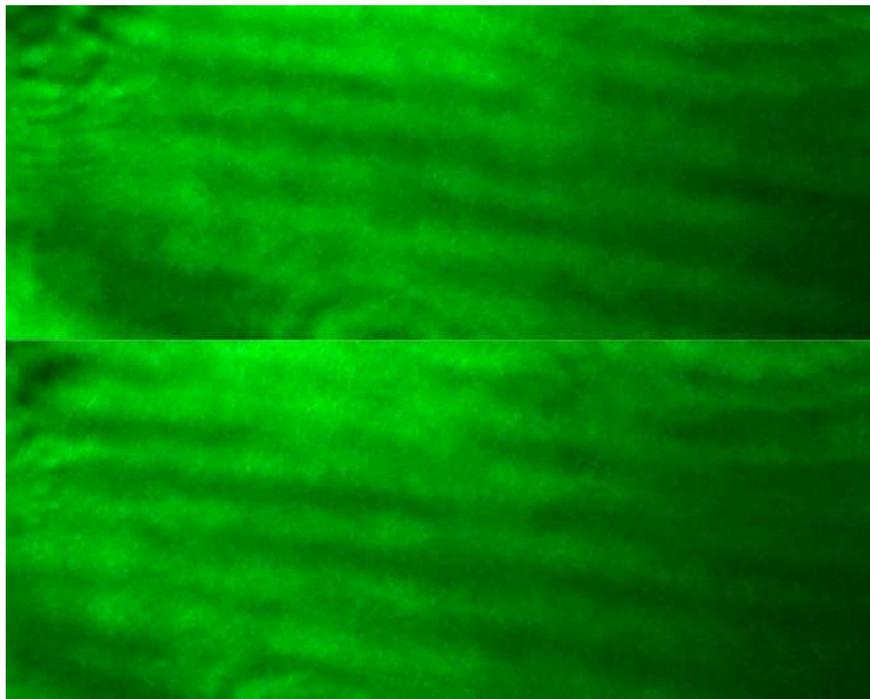


Figura 3.6: Franjas de interferência observadas durante a realização do experimento, comparação em dois momentos diferentes, onde se observa o deslocamento das franjas.

Com esta montagem foi possível ajustar para a visualização de franjas de interferência somente ajustando a lente convergente, o que permite que seja realizado um suporte fixo para a balança e a calibração seja realizada variando a posição da lente. Dessa forma essa montagem também permite a continuidade do trabalho.

Conversando com o professor Lunazzi, chegamos a conclusão que a melhor forma de se conseguir observar os fenômenos de interesse neste projeto seria utilizando uma balança por interferômetro. Uma descrição mais detalhada do experimento de interferômetro é dada em Seção 3. Neste capítulo dedico a apresentar as ideias para a montagem da balança.

Outras técnicas para medidas de massa podem ser encontradas como por exemplo cristal de quartzo, onde um cristal de quartzo é ligado em um circuito eletrônico que faz esse cristal oscilar, com uma frequência muito bem definida. Essa Frequência de vibração depende da geometria do corte do cristal assim como da massa deste. Sistemas parecidos são encontrados em sistemas de evaporação de material (Sputtering) para determinar a taxa de deposição de material (espessura do filme). A determinação da taxa de deposição é feita pela variação da frequência de oscilação deste cristal que durante a deposição também recebe material e varia sua massa durante o processo, assim variando a frequência de oscilação do cristal. Para o nosso caso como as dimensões do disco são maiores que os cristais encontrados não seria possível utilizar dessa técnica para determinar a atração gravitacional. E para o caso das ondas gravitacionais teríamos o problema de tentar acoplar duas oscilações afim de observar o fenômeno.

4.1 Montagem da balança

Utilizando a montagem experimental realizada em [Catelli e Vicenzi 2004], porém com alterações para acoplar o módulo de balança. A montagem do módulo de balança foi construindo utilizando um tubo de alumínio como apresentado na Figura 4.2. A peça foi fabricada na oficina mecânica do DFMC-IFGW.

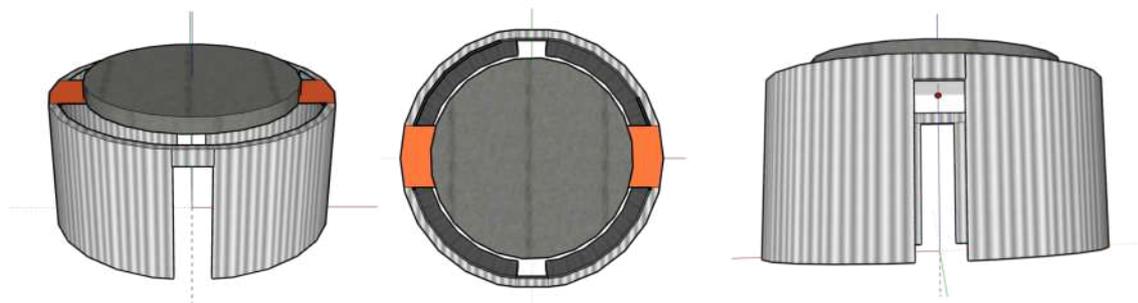


Figura 4.1: Desenho 3d do módulo de balança desenvolvido para utilização com o interferômetro.



Figura 4.2: Peça feita na oficina do instituto. Foi utilizado um cilindro de impressora a laser.

Com esse módulo de balança pode ser utilizado em conjunto com a montagem experimental do interferômetro de forma simplificada. Substituindo o espelho B, na Figura 3.2, pelo módulo de balança. Um esquemático é apresentado ?? e Figura 4.4.

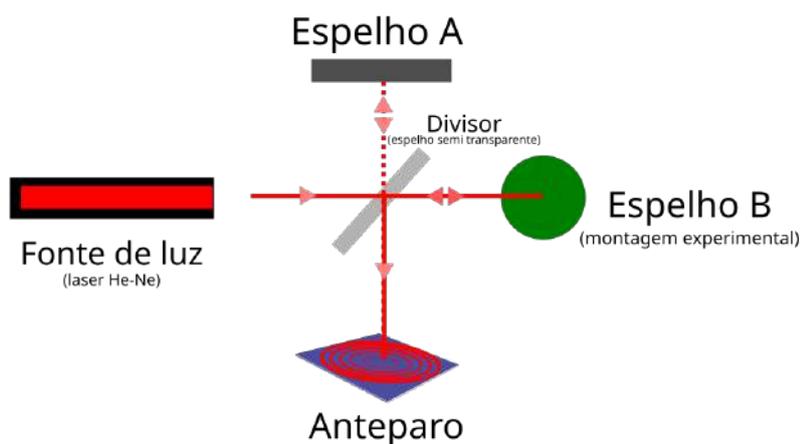


Figura 4.3: Interferômetro com módulo de balança inserido como elemento de interferência.

Os discos de chumbo, massa estática, vão ser posicionadas sobre uma fita kapton, que em sua parte inferior possui um conjunto de espelho posicionado de forma perpendicular ao espelho localizado na parte de baixo do módulo, responsável por direcionar o laser para a balança. Foi escolhido utilizar uma fita kapton, pois esta possui muito pouca elasticidade como uma mola o que comprometeria pequenos deslocamentos como o que estamos procurando neste trabalho.

Um pequeno ajuste com relação ao conjunto de espelho tem que ser realizado antes de um segundo alinhamento do interferômetro. Esse alinhamento consiste em deixar o direcionar o feixe de laser para o segundo conjunto de espelho esse deve ser

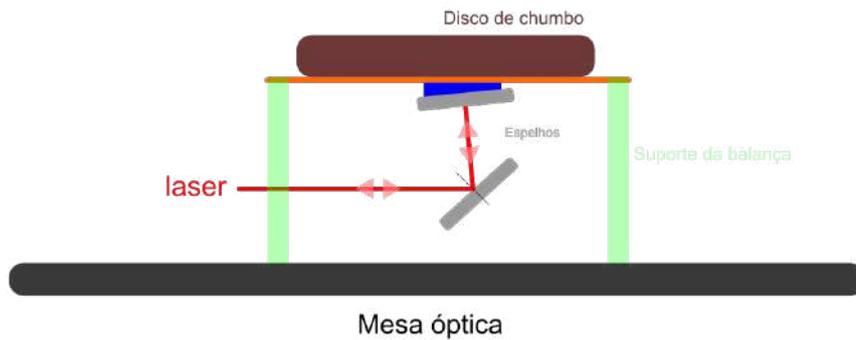


Figura 4.4: Descritivo do posicionamento e funcionamento do módulo de balança.

posicionado de forma a reflexão seja realizada perpendicular, de modo que o feixe incidente volte para o espelho de origem retornando para o divisor de feixe.

4.2 Funcionamento

O funcionamento da balança por interferômetro consiste no mesmo princípio explicado em Seção 3.2. Porém neste caso o deslocamento responsável pelo deslocamento das franjas de interferência no anteparo. Esse deslocamento no módulo de balança é realizado devido a massa colocada sobre a fita kapton.

Para auxiliar e garantir melhor performance do sistema pode-se acoplar ao interferômetro um contador de franjas tipo o desenvolvido por Vladimir Gaal construído para a disciplina F-530, [Disponível aqui](#). Com essa montagem é possível no caso de detecções das ondas gravitacionais de maneira mais fácil, pois seria feito de forma automática a aquisição de dados semelhante ao da Figura 1.2.

4.3 Calibração da balança

Após colocar uma massa de referência sobre a balança deve ser ajustado o interferômetro de modo a obter as franjas de interferências no anteparo. Em seguida uma nova massa pode ser adicionada sobre a massa de referência dessa forma um deslocamento nas franjas de interferência é observado, indicando um acréscimo de masa ao sistema. Da mesma forma que uma redução da massa promove um deslocamento das franjas de interferência.

Não foi possível realizar as medidas pretendidas no experimento, porém o aprendizado com o tema e no desenvolvimento de soluções foi muito grande afim de se aproximar do objetivo deste trabalho. Sendo possível agora ser continuado por outro aluno sobre a orientação do professor Lunazzi.

As maiores dificuldades encontradas foi encontrar uma forma de alinhar o sistema desenvolvido para a balança como o interferômetro, para isso a ideia do professor Lunazzi de construir uma outra montagem compacta de do interferômetro torna mais possível a realização do experimento, levando em conta que estamos interessados em reutilizar materiais e construir nós mesmo as partes do sistema.

Em relação ao aprendizado durante esse semestre foi muito bom e intenso, o professor Lunazzi sempre que solicitado esteve disponível para me ajudar e dar ideias para a continuidade das atividade.

Para a finalização do projeto sera necessário juntar as duas partes desenvolvidas, a balança com o interferômetro compacto e seguir com a medidas de atração gravitacional. Alguns ajustes será necessário para uma melhor nitidez das franjas de interferência, mas o conceito e funcionamento das partes estão bem desenvolvidos. Para um projeto desenvolvido em 1 semestre o quanto caminhou e se desenvolveu foi muito satisfatório.

Bibliografia

CATELLI, F.; VICENZI, S. Interferômetro de michelson. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 21, p. 350–358, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 14.

FRAGNITO, H. L.; COSTA, A. C. Interferômetro de michelson. 2010. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/laboptica/files/2013/01/michelson1.pdf>>. Citado na página 10.

MUNJAL, P.; SINGH, K. P. A single-lens universal interferometer: Towards a class of frugal optical devices. *Applied Physics Letters*, AIP Publishing, v. 115, n. 11, p. 111102, 2019. Citado na página 10.