

# Ondas gravitacionais: Efeito de atração gravitacional entre peças de chumbo

---



Renan Daniel Domingos  
*renandd@ifi.unicamp.br*

*11 de Outubro 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

11 de Outubro 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, 11 de Outubro 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

<b>1</b>	<b>Experimento</b>	<b>3</b>
1.1	Descrição . . . . .	3
1.2	Gravitação . . . . .	3
1.3	Ondas Gravitacionais . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Gravitação universal</b>	<b>5</b>
2.1	Força de atração gravitacional . . . . .	5
2.1.1	Cálculo por integrais . . . . .	5
2.1.2	Cálculo por elementos finitos . . . . .	5
2.2	Ondas gravitacionais . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Interferômetro de Michelson</b>	<b>6</b>
3.1	Experimento de Michelson-Morley . . . . .	6
3.2	Interferência . . . . .	6
3.3	Montagem do interferômetro . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Balança com interferômetro</b>	<b>7</b>
4.1	Montagem da balança . . . . .	7
4.2	Funcionamento . . . . .	7
4.3	Calibração da balança . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Medidas e Resultados</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>9</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>10</b>

# Lista de Figuras

# Introdução

Nesse projeto se pretende desenvolver uma instrumentação simples para facilitar a demonstração da atração gravitacional entre dois corpos e em seguida 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 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. A

força sobre a massa de menor valor vai atrair esta para próximo da outra massa, que por ter maior massa não move. Esse deslocamento promove no interferômetro um deslocamento das franjas de interferência, mostrando visualmente a atração entre as massas.

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.

## 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. A instrumentação que se pretende utilizar uma montagem 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, com o adicional de promover uma interação, influencia mutua, de uma variação temporal da atração gravitacional simulando o efeito das ondas gravitacionais.

O experimento vai ser composto por discos de chumbo como massas, foi escolhido discos de chumbo devido sua alta densidade ( $\rho$ ), 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 líquido. 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.

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 visto a olho nu, e microscópios, 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 força de atração aumenta quanto maior for as massas dos corpos. Devido 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  $m_{bola} = 7,5kg$  separadas por uma distância de  $1m$  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 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  $G = 6,7 \times 10^{-11} \frac{[N*m^2]}{[kg^2]}$ .

## 1.3 Ondas Gravitacionais

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.

## 2.1 Força de atração gravitacional

Para obter uma melhor aproximação nos valores vamos realizar duas abordagens para cálculo da força de atração entre as duas massas. A primeira utilizando o cálculo por integrais e a segunda utilizando cálculo por elementos finitos.

### 2.1.1 Cálculo por integrais

### 2.1.2 Cálculo por elementos finitos

## 2.2 Ondas gravitacionais

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

## 3.2 Interferência

## 3.3 Montagem do interferômetro

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

## 4.2 Funcionamento

## 4.3 Calibração da balança





# Bibliografia