

Física Experimental IV - 7ª aula
<http://www.dfn.if.usp.br/~suaide/>

Alexandre Suaide
Ed. Oscar Sala

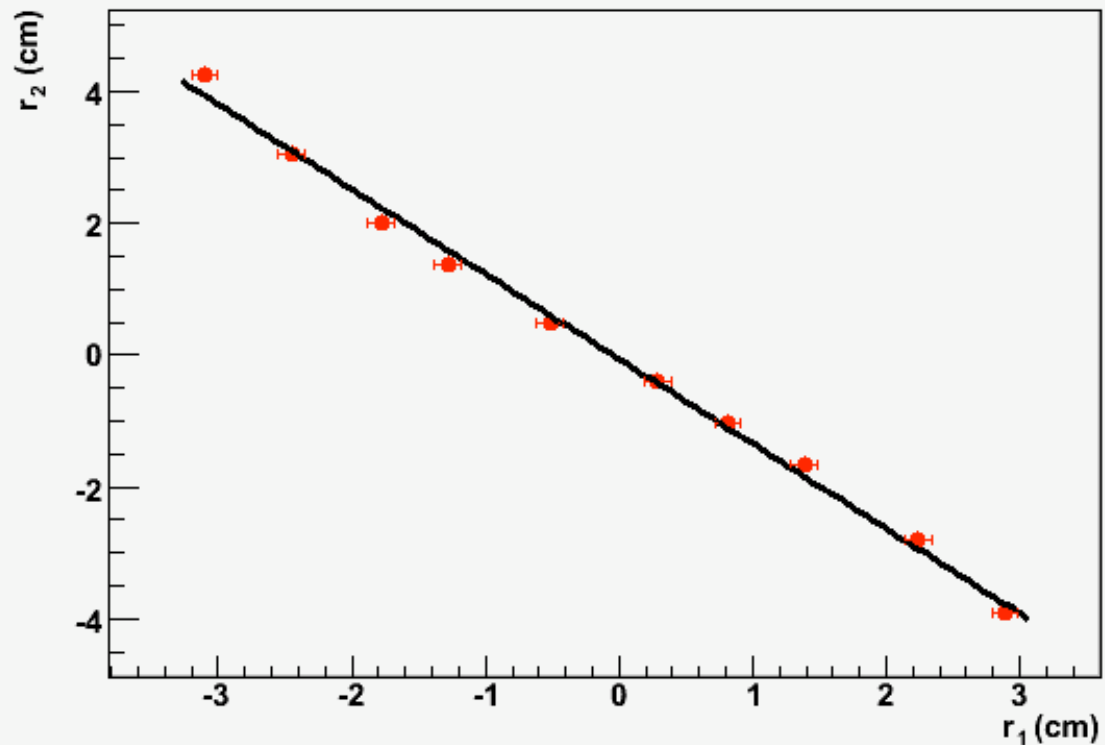
sala 246
ramal 7072

Porque gráficos são importantes?

- Magnificação de um sistema óptico
 - -1.37 ± 0.05 ; -1.24 ± 0.07 ; -1.12 ± 0.09
 - -1.06 ± 0.12 ; -0.92 ± 0.29 ; -1.41 ± 0.64
 - -1.24 ± 0.21 ; -1.20 ± 0.12 ; -1.24 ± 0.07 ; -1.35 ± 0.06
- Média = -1.22 ± 0.04
 - Estes valores são razoáveis? Sabemos tudo que precisamos dos dados? Não existe nada novo ou inesperado?
 - Gráficos ajudam a observar detalhes que, muitas vezes, não são desprezíveis

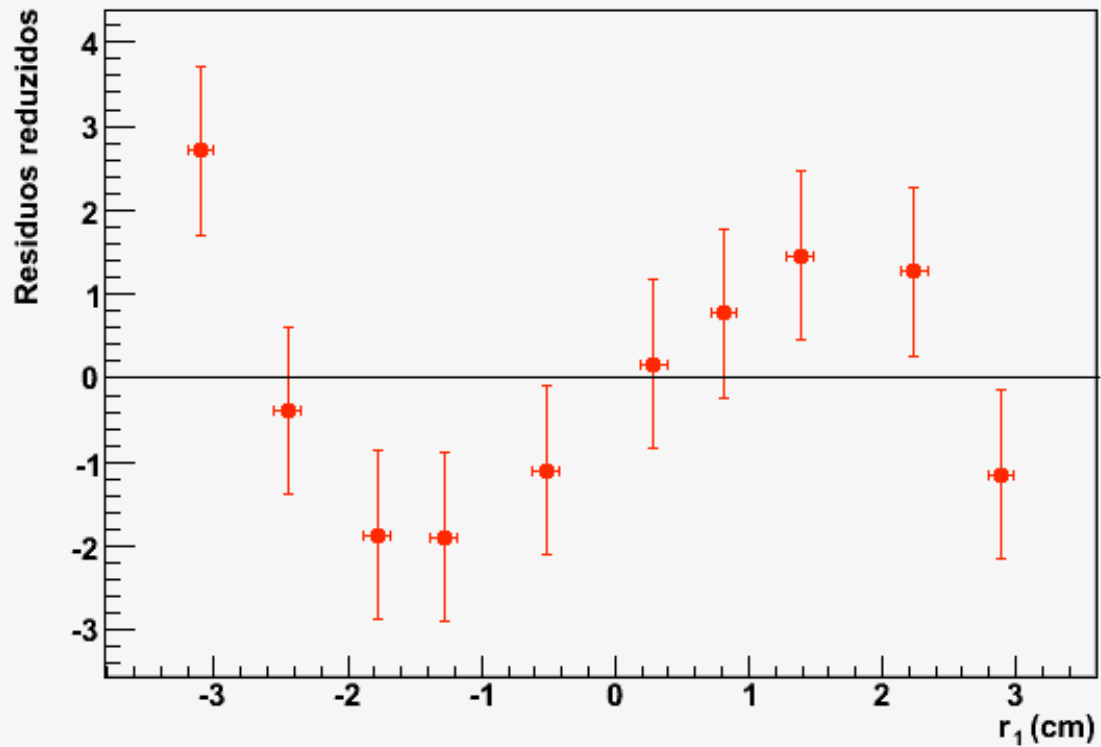
Porque gráficos são importantes?

Magnificacao de um sistema de lentes



Porque gráficos são importantes?

Magnificacao de um sistema de lentes

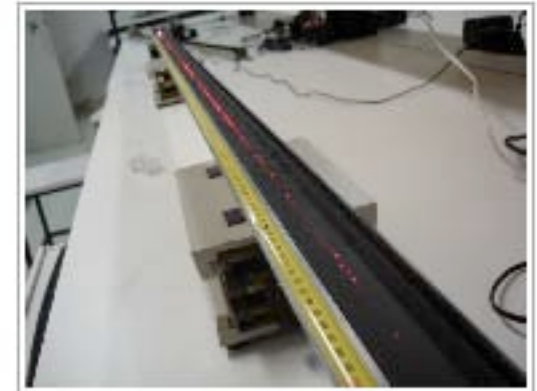


Alinhamento

O alinhamento do laser com relação ao eixo das lentes foi feito com auxílio do lado espelhado do anteparo que, sendo considerado perfeitamente plano, permitia um alinhamento visual. O sistema foi considerado alinhado quando o feixe refletido incidia sobre a saída do laser sem desvio aparente.

O primeiro “desafio” foi alinhar o feixe de laser com o trilho. Primeiro utilizamos um nível de bolha, de forma a deixar tanto o trilho quanto o laser paralelos com referência a mesa em que eles estavam. Entretanto, a precisão do nível era insuficiente para nosso objetivo (não havia nenhuma escala!), e procedemos de outra maneira.

Percebemos que era possível incidir o feixe extremamente próximo a superfície do trilho, de forma que o laser refletisse nas ranhuras e imperfeições do trilho, e assim pudessemos ver o feixe sobre o trilho. Dessa forma, foi possível alinhar com grande precisão o laser com o trilho (sem precisar de um outro referencial para fazê-lo, no caso, a mesa). Uma imagem do procedimento encontra-se a seguir.



divergên

Para a determinação do ângulo de abertura do feixe foi posto o laser (Model 155SL – n°8) no corredor e foram tomados os diâmetros do laser a partir de três distâncias diferentes da parede onde o feixe incidia ao laser. O diâmetro foi medido verticalmente e horizontalmente, assim foi considerado o diâmetro final como a média dos dois, para estimar a incerteza foram medidos os diâmetros da parte onde o feixe era mais "concentrado" e da parte onde ele estava disperso, assim a incerteza é tida como $2r$ (Figura 1).



distância (cm)	Sdistância (cm)	diâmetros do laser					
		D1 (mm)	D2 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	Dmédio (mm)	Sdmédio (mm)
3027.8	1.0	39.20	39.90	31.85	31.35	31.6	8.0
2330.5	1.0	34.75	35.90	28.05	28.45	28.3	7.1
1164.3	1.0	20.10	19.85	17.10	17.20	17.2	2.8

Tabela 2: distância corresponde à distância entre o laser e a parede onde era formada a imagem do feixe, a incerteza foi estimada como 1cm, pois sabe-se que ela é um pouco maior que a incerteza da trena; D1 corresponde ao diâmetro vertical do feixe e D2 ao diâmetro horizontal; d1 corresponde ao diâmetro vertical e d2 ao horizontal, neste caso considerando a parte concentrada do feixe. Dmédio é a média entre d1 e d2 e a incerteza de Dmédio foi estimada como: $2r$ mostrado na figura 1.

Então, foram encontrados os seguintes ângulos de abertura:

phi (rad)	Sphi (rad)
0,00104	0,00052
0,00121	0,00061
0,00147	0,00048

Tabela 3: ângulos de abertura do feixe com suas respectivas incertezas, as incertezas foram obtidas considerando Dmédio +/- Sdmédio e distância +/- Sdistância.

Medindo foco rapidamente

Enquanto brincávamos com o jogo de lentes e o laser tentando arranjar o sistema para a determinação da magnificação, notamos algo interessante: um outro método para a determinação da distância focal. Incidindo o laser paralelamente à lente, porém fora do seu centro, e posicionando o anteparo de forma que o raio incida sobre seu centro, a distância anteparo-lente é precisamente a distância focal da lente! A imagem 9 ilustra esse método.

Este método aparentou ser melhor do que o utilizado anteriormente para determinar a distância focal pois possui uma melhor resolução, uma vez que

**Cuidado!!!! O sistema precisa
Estar muito bem alinhado!!!**



Figura 6: Método para determinação da distância focal

Análises estatísticas

Precisa ter certeza que se aplicam

Análise de Dados

R1	SR1	R2	SR2	M
2,25	0,10	7,80	0,10	3,47
3,15	0,10	7,70	0,10	2,44
3,50	0,10	11,45	0,10	3,27
4,15	0,10	13,25	0,10	3,19
4,70	0,10	12,85	0,10	2,73
4,80	0,10	14,90	0,10	3,10
5,30	0,10	14,65	0,10	2,76
6,00	0,10	16,50	0,10	2,75
6,75	0,10	18,20	0,10	2,70
6,95	0,10	21,95	0,10	3,16
7,25	0,10	20,00	0,10	2,76
7,80	0,10	25,40	0,10	3,26
8,20	0,10	20,15	0,10	2,46

Tabela 1 – Dados medidos utilizando feixe de laser. R1 corresponde à distância do feixe de entrada até o centro da lente 1 (feixe antes de passar pelas lentes) e R2 corresponde à distância do feixe de saída até o centro da lente 2 (depois de passar pelas lentes). SR1 e SR2 correspondem às respectivas incertezas. M corresponde à magnificação que foi obtida através da seguinte equação: $M = R2/R1$.

Ao tirar a média da magnificação obteve-se $2,93 \pm 0,09$. A magnificação teórica é $2,92 \pm 0,12$. Ao realizar o teste de compatibilidade obteve-se 0,05.

Magnificação	Incerteza
3,14	0,13
3,03	0,13
2,91	0,13
3,00	0,13

Fazendo uma média ponderada, obtemos a média da magnificação: $m = 3,04 \pm 0,17$.

r	r'	Magnificação
1.42	2.1	1.48
1.04	1.24	1.19
0.83	0.88	1.05
1.44	2.91	2.02

Observando os dados, notamos que a aproximação feita para um feixe paralelo não é razoável, pois os valores obtidos para a magnificação aparentemente não giram em torno de um valor constante. Então como podemos contornar este problema?

Análises estatísticas

Precisa ter certeza que se aplicam

Análise de Dados

R1	SR1	R2	SR2	M
2,25	0,10	7,80	0,10	3,47

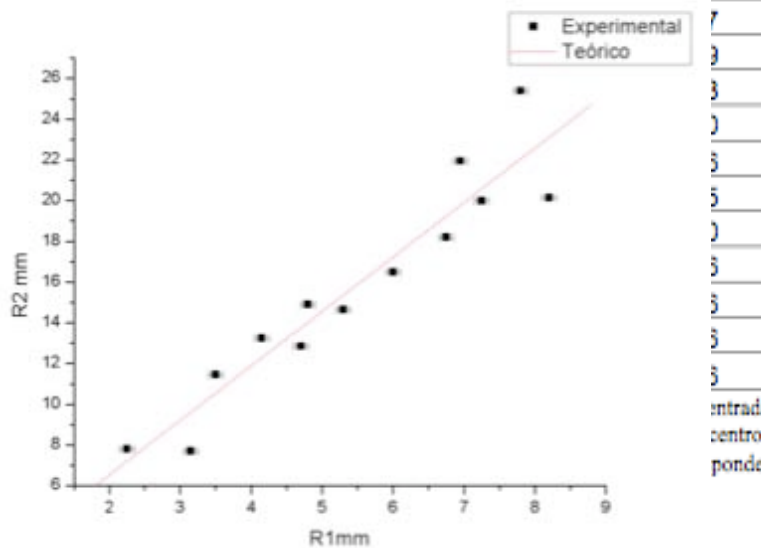


Tabela 1 – D
lente 1 (feixe
depois de pa
que foi obtid

entrada até o cent
centro da lente 2 (
ponde à magneti

Magnificação	Incerteza
3,14	0,13
3,03	0,13
2,91	0,13
3,00	0,13

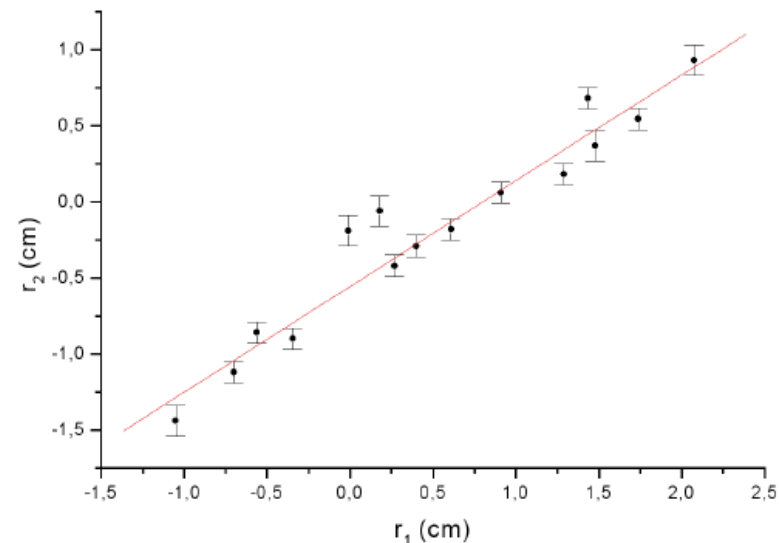
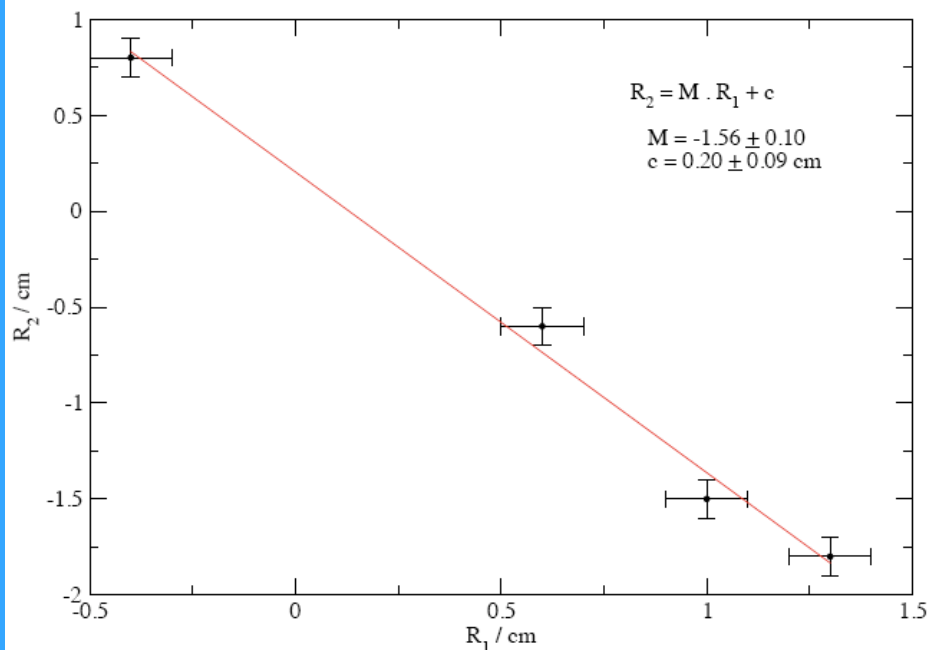
Fazendo uma média ponderada, obtemos a média da magnificação: $m = 3,04 \pm 0,17$.

r	r'	Magnificação
1.42	2.1	1.48
1.04	1.24	1.19
0.83	0.88	1.05
1.44	2.91	2.02

Ao tirar a média da magnificação obteu-se $2,93 \pm 0,09$. A magnetização teórica é $2,92 \pm 0,12$. Ao realizar o teste de compatibilidade obteu-se 0,05.

Observando os dados, notamos que a aproximação feita para um feixe paralelo não é razoável, pois os valores obtidos para a magnificação aparentemente não giram em torno de um valor constante. Então como podemos contornar este problema?

Análises gráficas



Pelo gráfico obtemos uma magnificação de $-0,555(48)$, ainda compatível com o valor simulado, obtido dividindo as alturas de saída e entrada do feixe, de $-0,597$.

Da fig 2 podemos, ainda, notar, por semelhança de triângulos, que a magnificação (em módulo) é aproximadamente² a razão entre os focos, de modo que, $|M_{teor}| = \frac{f_2}{f_1} = (1,48 \pm 0,02)$, também compatível com os dois outros valores obtidos anteriormente. Isto é um dos fatores que mostra que o alinhamento realizado foi satisfatório, dentro das incertezas obtidas; o outro é que, supondo os raios incidentes paralelos ao eixo óptico, temos que a magnificação é expressa como $r_2 = M r_1$, e, de fato, vemos que no gráfico da fig 3 o coeficiente linear ($c = (0,20 \pm 0,09)$ cm) da reta ajustada é compatível com o zero.

Análises gráficas

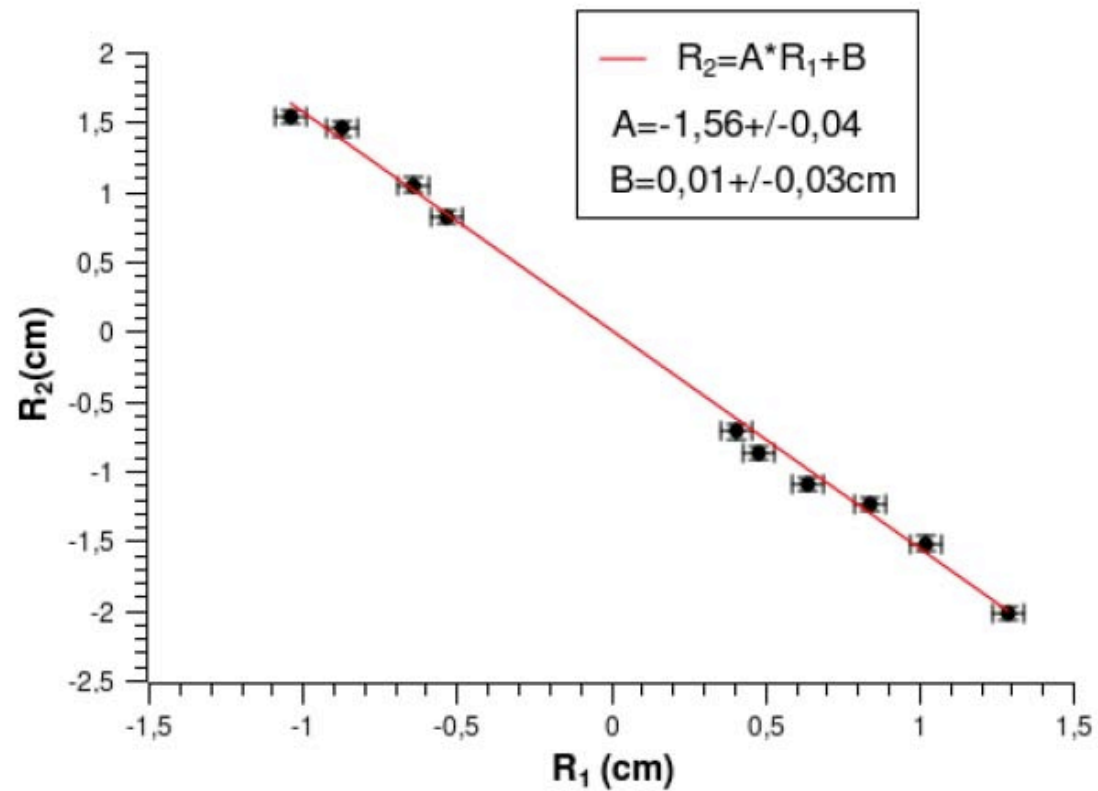


Figura 3: Valores obtidos para as distâncias da projeção do laser.

Análises gráficas

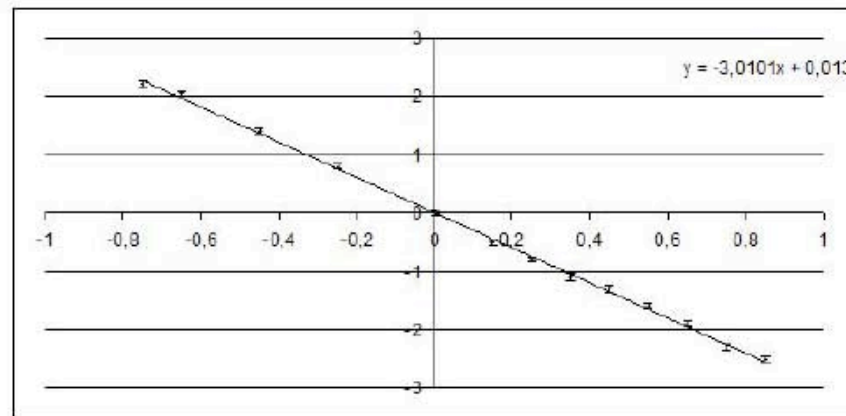
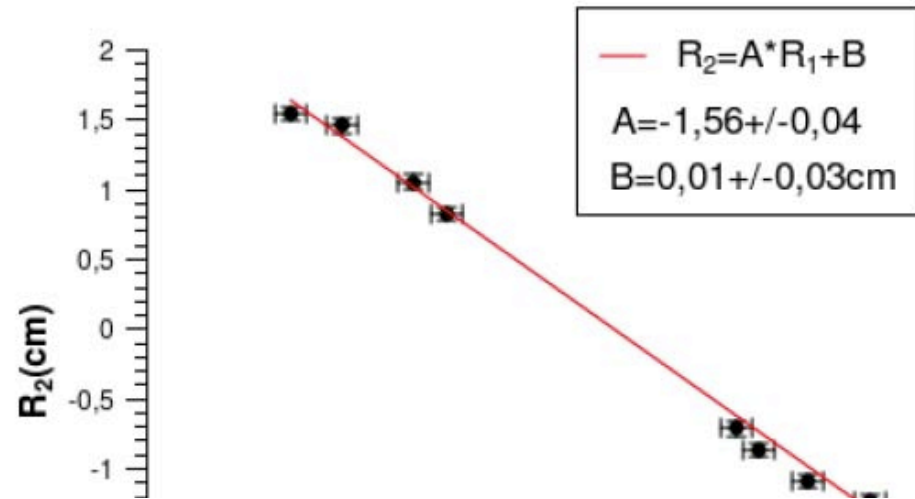


Figura 3: $r_2 \times r_1$.

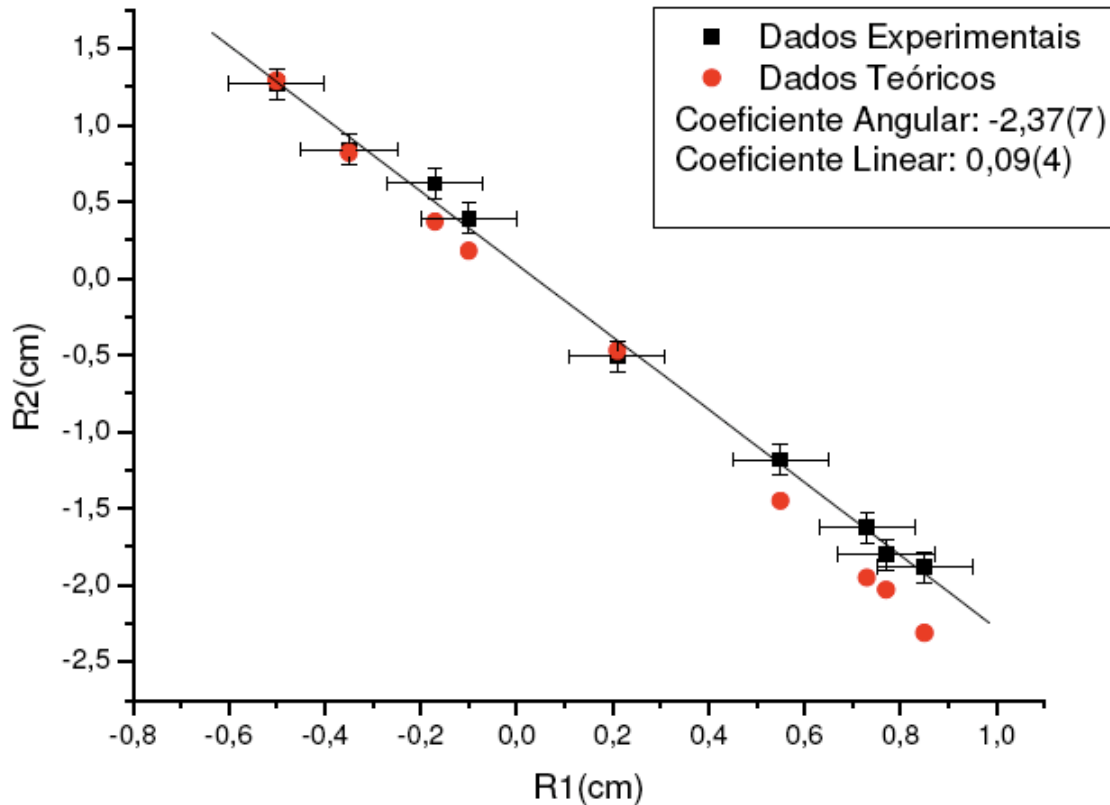
Do gráfico vemos que $M = -3,0101 \mp 0,0069$ e o coeficiente linear $b = 0,013 \pm 0,007$ é muito próximo do esperado, que é o valor zero.

Calculando-se a magnificação pela teoria vemos por simples semelhanças de triângulos que:

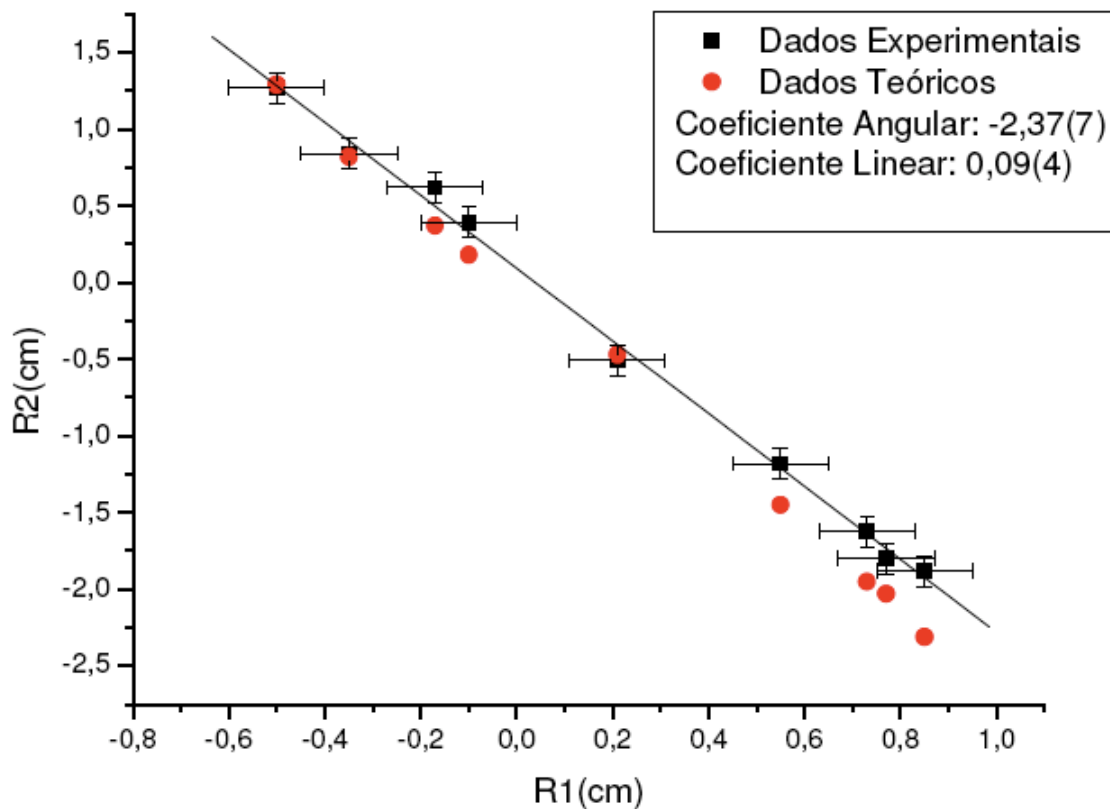
$$M = \frac{L'}{L} = -\frac{f_1}{f_2} = -2,969 \pm 0,396 \quad (3)$$

Um caso interessante

Teoria e experimento (raytrace)

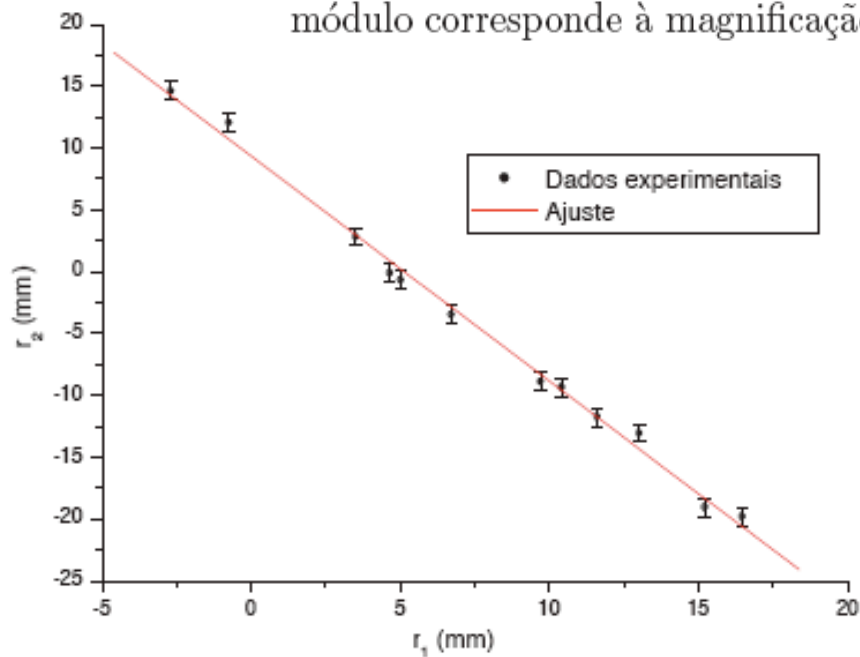


O valor para a magnificação é definido como módulo do coeficiente angular da reta ajustada, sendo, portanto, $m = 2,37(7)$, de modo que o coeficiente linear é compatível com zero, como seria de se esperar. A magnificação calculada através do Raytrace (utilizado para o cálculo dos valores teóricos) foi de $m = 2,66(4)$, valor compatível dentro de 3 incertezas ao valor experimental. É possível notar, contudo, um deslocamento entre os pontos teóricos e experimentais, e embora os valores para a magnificação estejam compatíveis, estão distantes entre si. Acredita-se que a razão disso fora a grande dificuldade em fazer o laser incidir de maneira perfeitamente perpendicular à lente, e também em mantê-lo alinhado com o foco destas. Foram utilizados

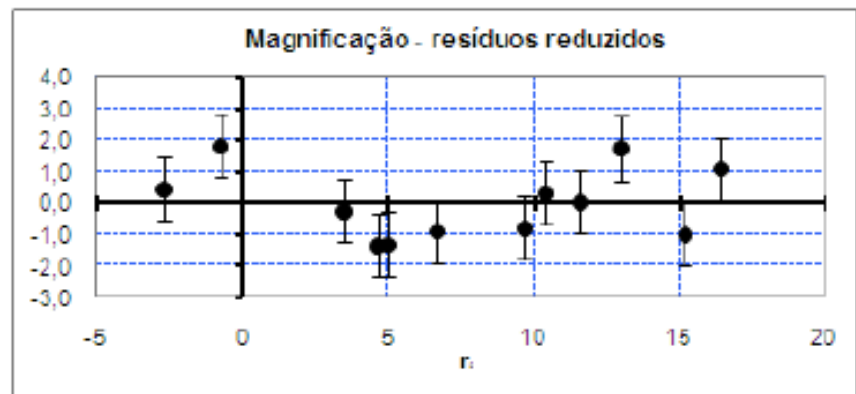


Resíduos É mesmo uma reta!

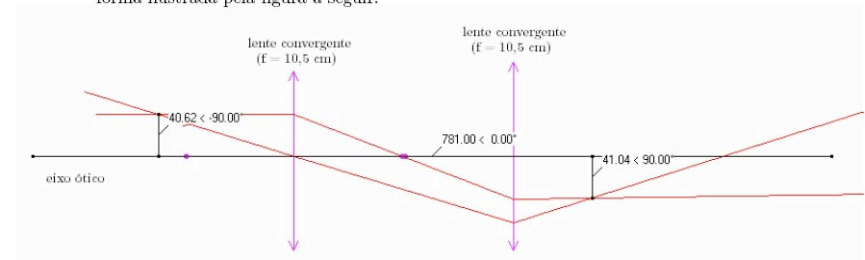
Os resíduos do ajuste dos dados distribuem-se aleatoriamente em torno do zero, indicando boa adequação. O coeficiente angular da reta ajustada foi $(-1,81 \pm 0,04)$ e, pela 2.1, cujo módulo corresponde à magnificação do feixe. Assim a magnificação obtida foi



(a) Gráfico.



(b) Resíduos do ajuste.



Tentando entender as discrepâncias (a verdadeira postura de um pesquisador)

Com base no ajuste podemos determinar a magnificação do sistema como sendo,

$$M_{\text{exp.}} = -0,81 \pm 0,02$$

que está consideravelmente diferente do valor esperado teoricamente,

$$M_{\text{teór.}} = -1,01$$

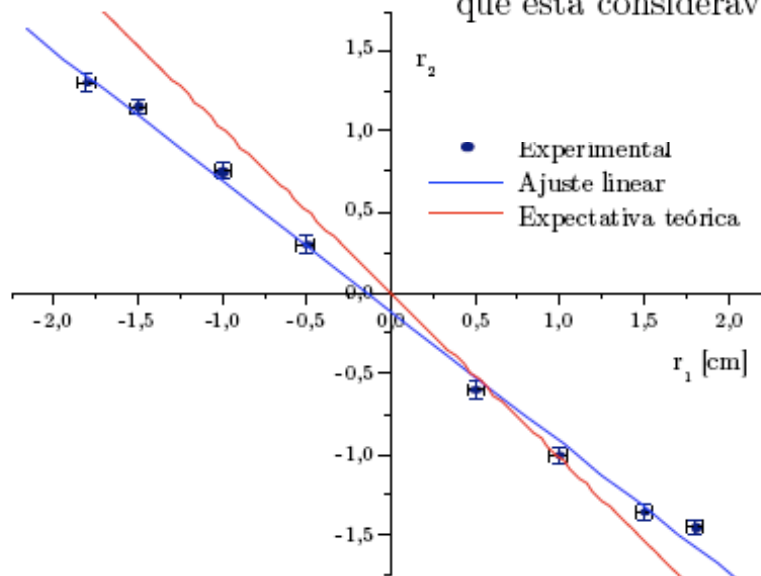
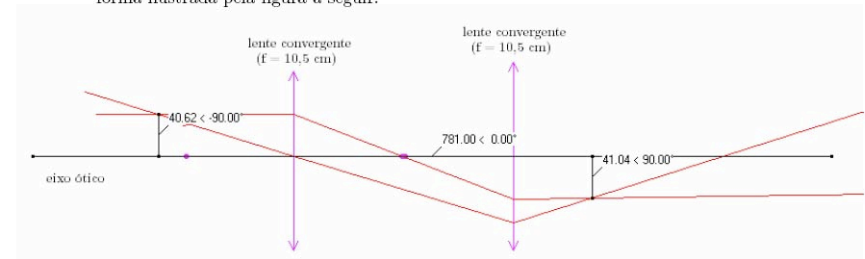


Figura 3.1: Gráfico de r_2 por r_1 . Na figura, o ajuste realizado superposto à expectativa teórica.

Tentando entender as discrepâncias (a verdadeira postura de um pesquisador)



Com base no ajuste podemos determinar a magnificação do sistema como sendo,

Através dos resultados obtidos podemos notar que os efeitos que a divergência não nula do feixe de laser gera no problema, são mensuráveis porém não muito significativos. Isso, comparando-se com a questão do alinhamento do sistema, que ao nosso ver, foi o principal fator que levou a um valor para a magnificação do sistema tão discrepante do esperado teoricamente. No problema do alinhamento, tínhamos

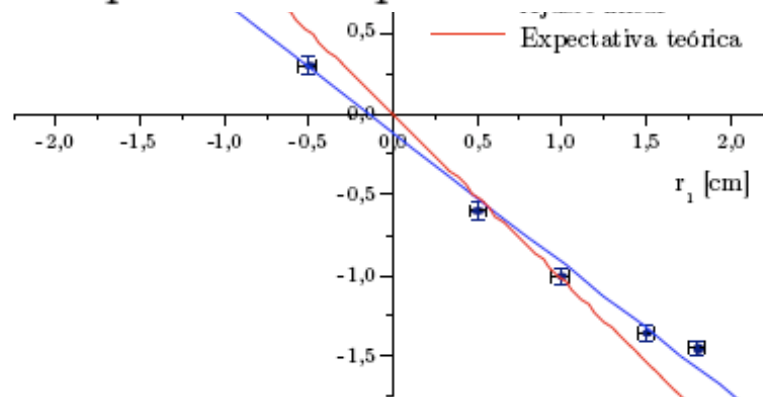
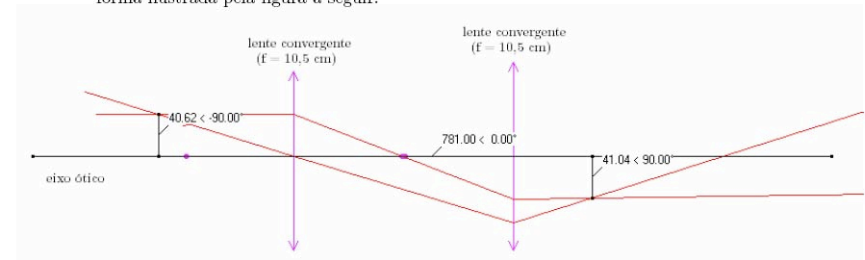
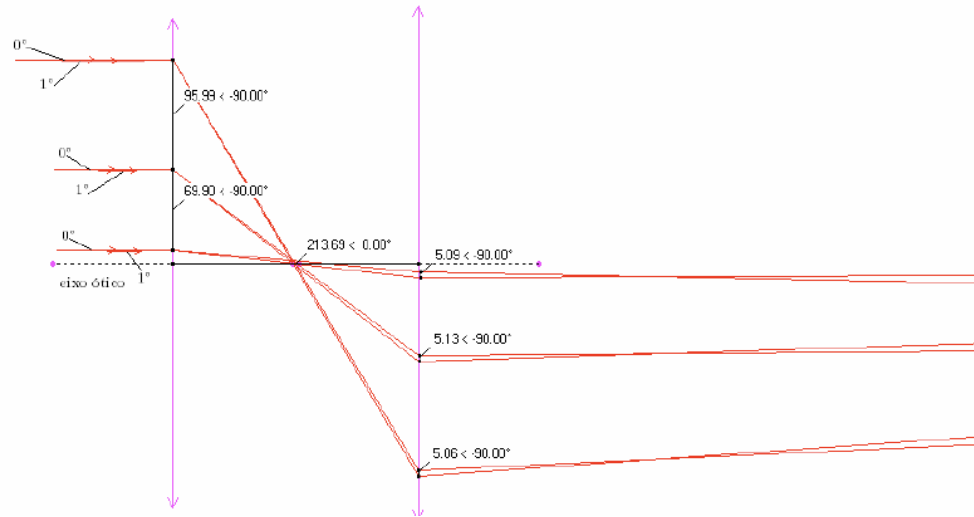


Figura 3.1: Gráfico de r_2 por r_1 . Na figura, o ajuste realizado superposto à expectativa teórica.

Tentando entender as discrepâncias (a verdadeira postura de um pesquisador)



Através dos r não nula do feixe significativos. Isso, nosso ver, foi o pri tão discrepante do



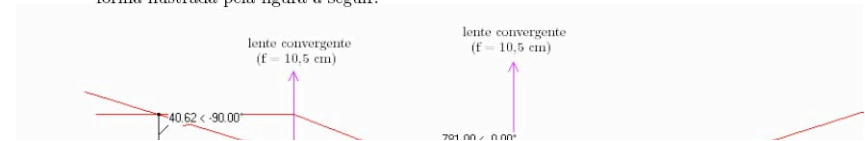
do sistema como sendo,

s que a divergência porém não muito do sistema, que ao ificação do sistema hamento, tínhamos

E dentre essas dificuldades, a que talvez tenha gerado maior influência na discrepância dos resultados experimentais, tenha sido a questão do ângulo de incidência do laser. Pois podemos ver, através de simulação, que uma variação de 1° no ângulo de incidência, pode gerar uma diferença na leitura de r_2 , que dependendo da posição em que se coloca o anteparo, pode chegar até aproximadamente 0,5 cm,

Figura 3.1: Gráfico de r_2 por r_1 . Na figura, o ajuste realizado superposto à expectativa teórica.

A determinação da magnificação teórica foi feita com o auxílio do Raytrace e da forma ilustrada pela figura a seguir.



Tentando entender

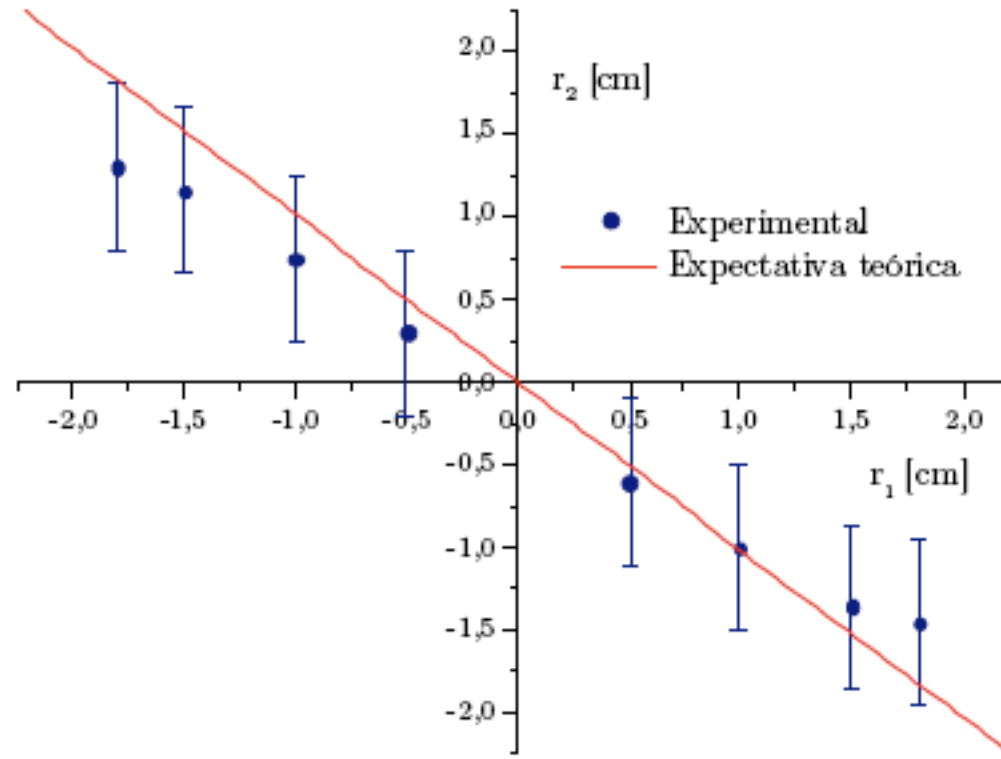


Figura 5.2: Gráfico representando um possível deslocamento dos pontos experimentais ao longo das barras de incerteza, que na figura medem 1 cm de ponta a ponta.

Figura 3.1: Gráfico de r_2 por r_1 . Na figura, o ajuste realizado superposto à expectativa teórica.

Experiência II

Óptica Geométrica e Física

- Objetivos – Estudar alguns fenômenos de óptica física e geométrica
 - Estudo de lentes simples, sistemas de lentes e construção de imagens
 - Interferência e difração
 - Computador óptico
 - Análise de Fourier bi-dimensional
 - Processamento de imagens

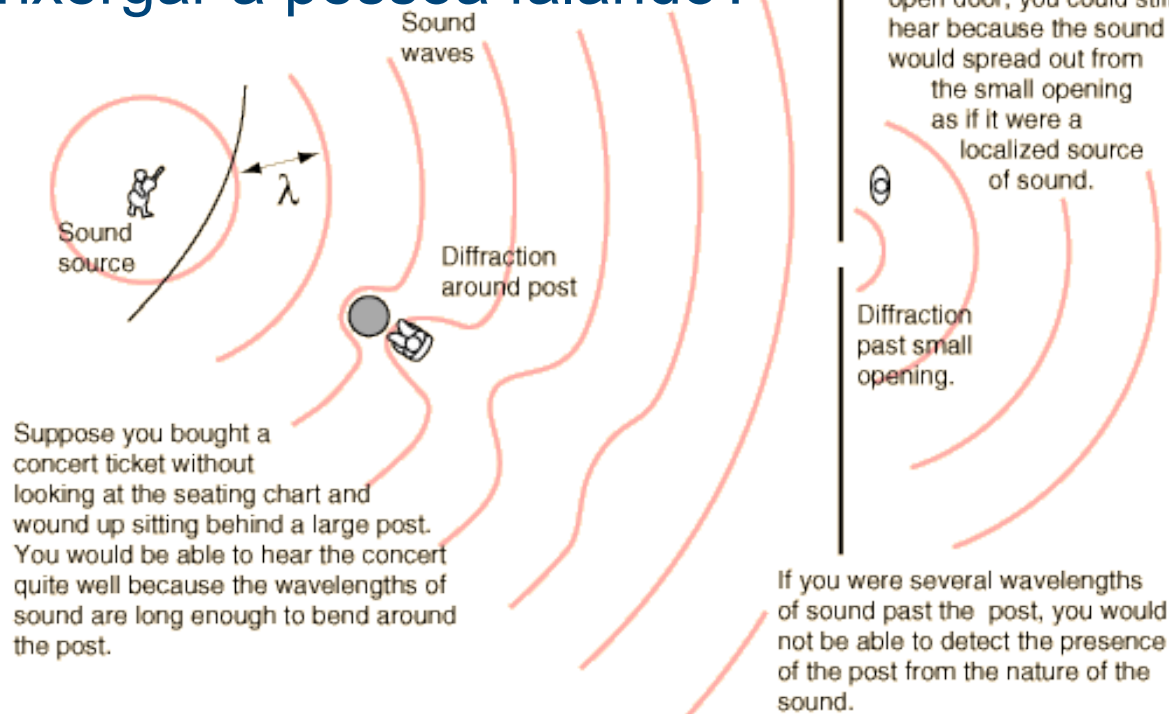
Computador óptico

Óptica de Fourier

- Nas próximas semanas iremos estudar processamento de imagens utilizando óptica de Fourier
- Interferência e difração da luz

Difração: o que é?

- Como um espectador, atrás de uma porta, por exemplo, é capaz de ouvir um som mas não é capaz de enxergar a pessoa falando?



If you were outside an open door, you could still hear because the sound would spread out from the small opening as if it were a localized source of sound.

Diffraction past small opening.

If you were several wavelengths of sound past the post, you would not be able to detect the presence of the post from the nature of the sound.

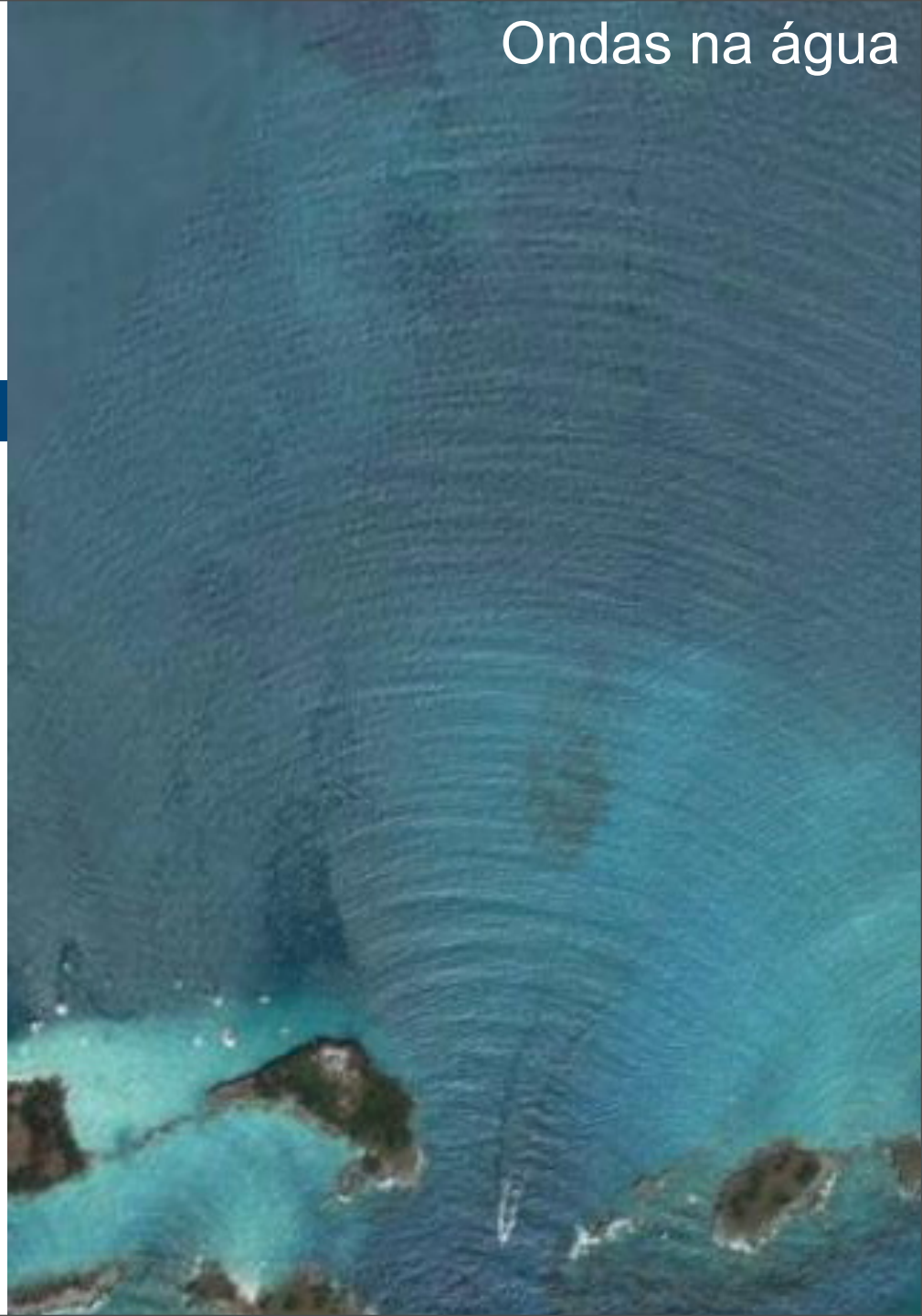
Difração: o que é?

- Como um espectador, atrás de uma porta, por exemplo, é capaz de ouvir um som mas não é capaz de enxergar a pessoa falando?
- Difração
 - Fenômeno comum com todos os tipos de ondas
 - Desvio sofrido por uma onda ao se deparar com um obstáculo de dimensões similares ao comprimento de onda.
 - A onda se espalha em torno desse objeto como se o mesmo fosse uma nova fonte de emissão da onda
 - Se a dimensão do objeto for muito maior (ou menor) que o comprimento de onda, não ocorre difração.

Difração na Natureza

Difração na Natureza

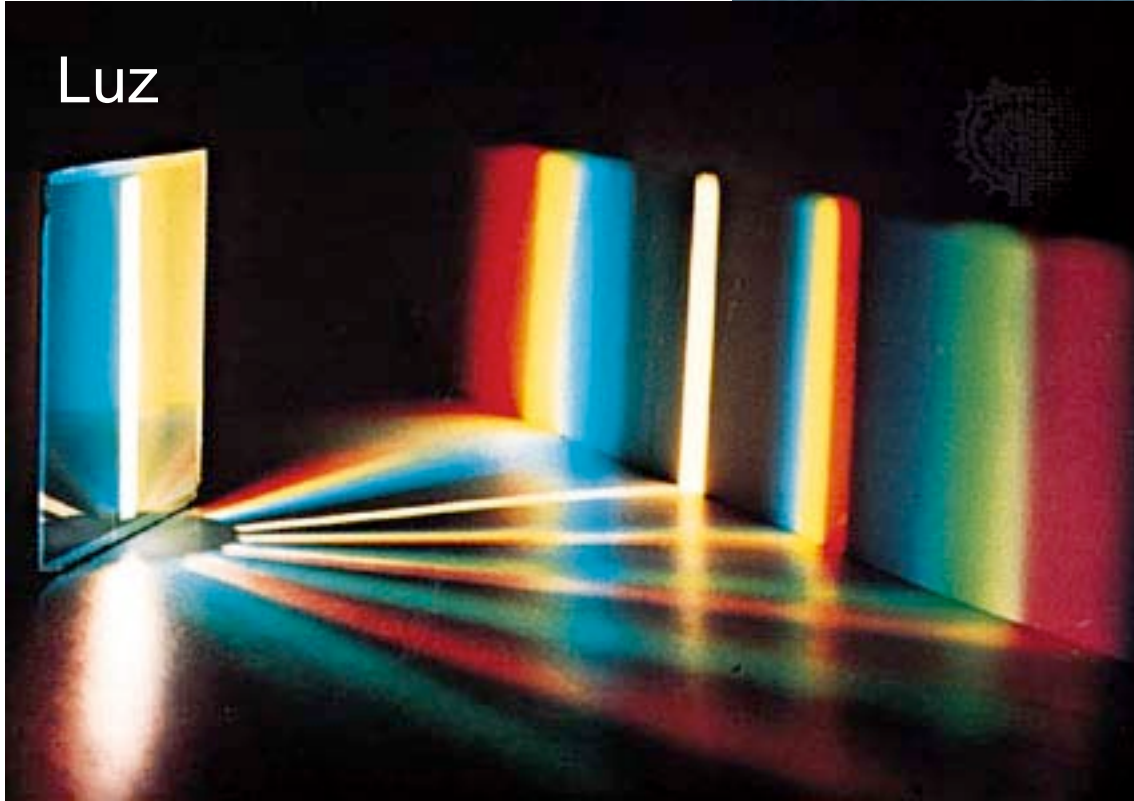
Alexandre Suaide, LabFlex (2008)



Difração na Natureza

Alexandre Suaide, LabFlex (2008)

Luz



Difração na Natureza

Alexandre Suaide, LabFlex (2008)

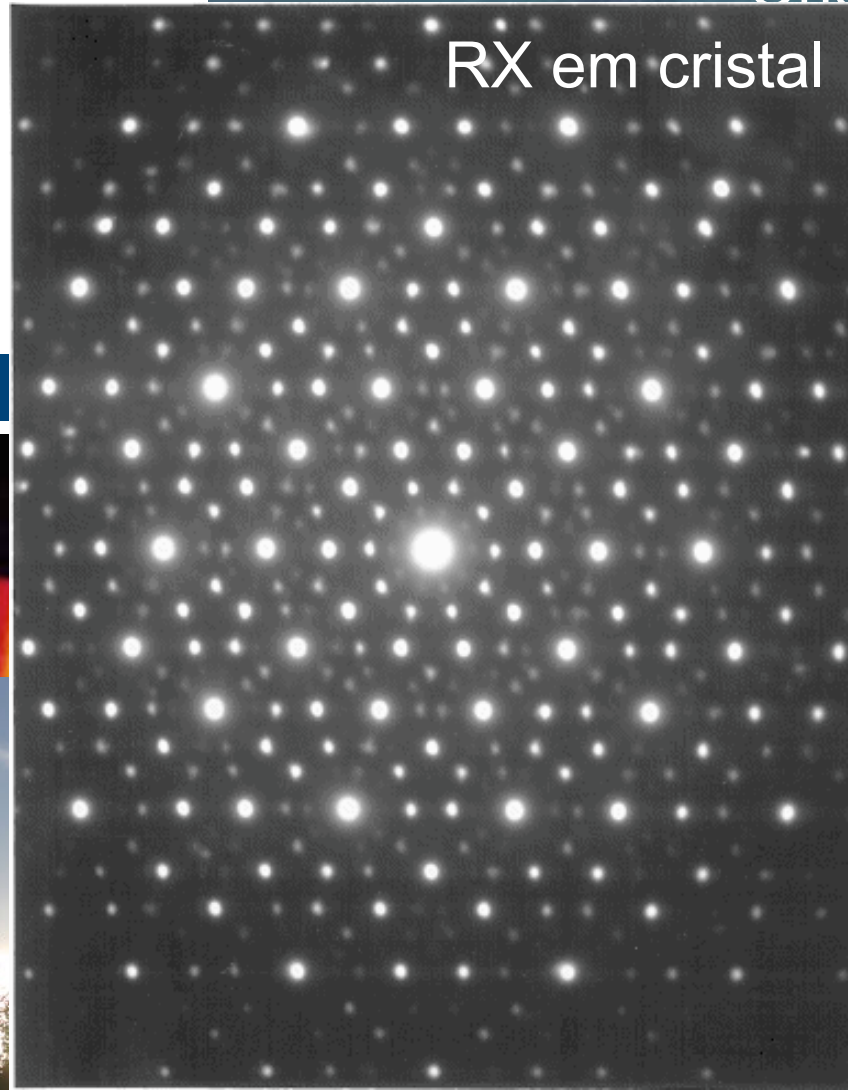
Luz



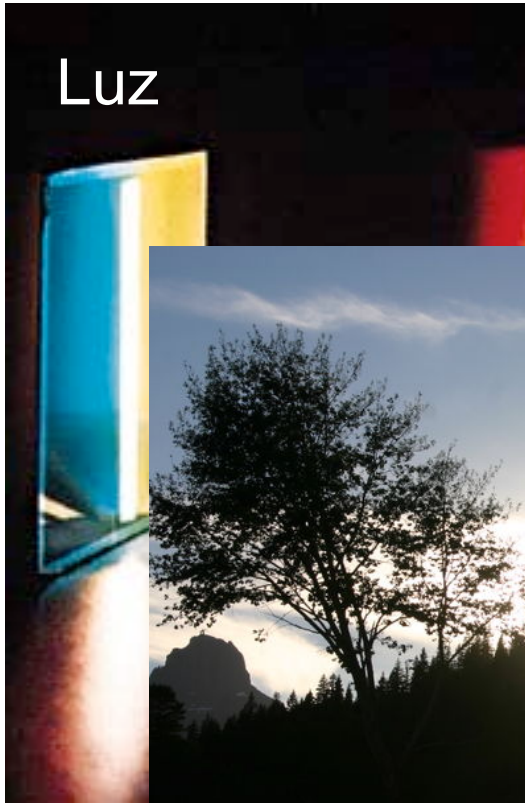
Luz do Sol

Difração na Natureza

RX em cristal



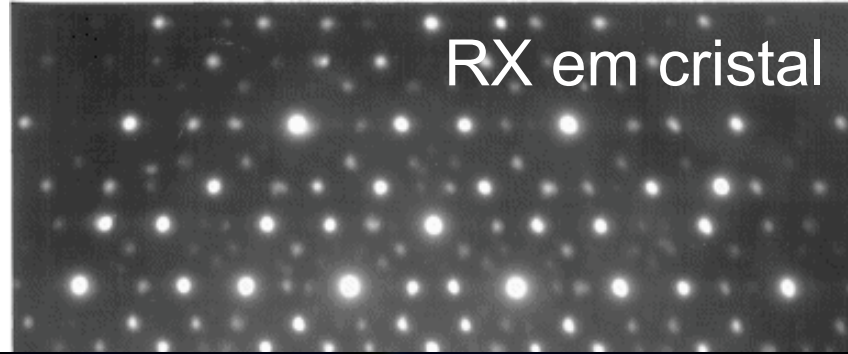
Luz



Luz do Sol

Difração na Natureza

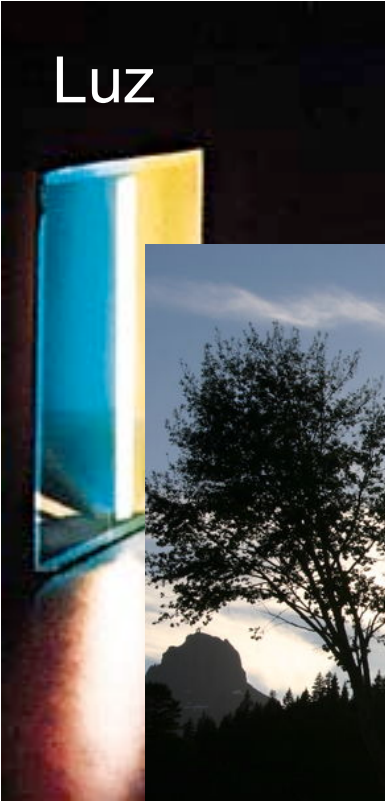
RX em cristal



Difração de elétrons em Estruturas microscópicas

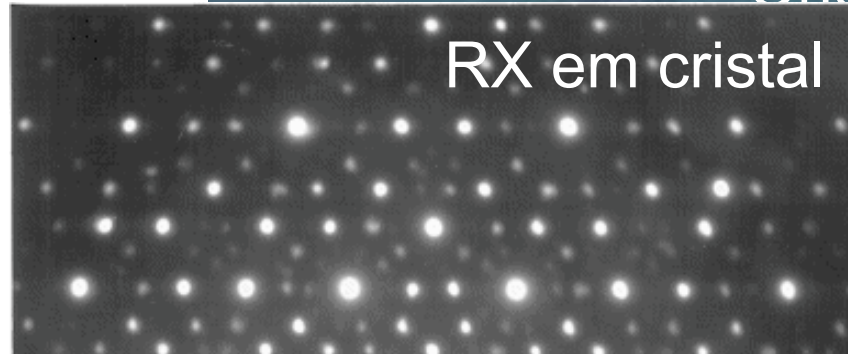


Luz



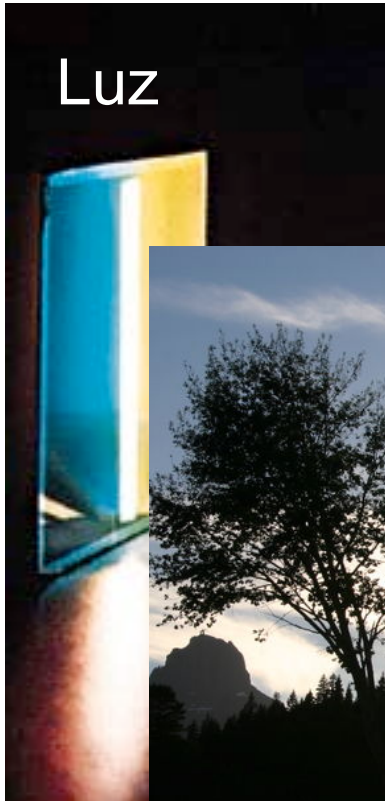
Difração na Natureza

RX em cristal

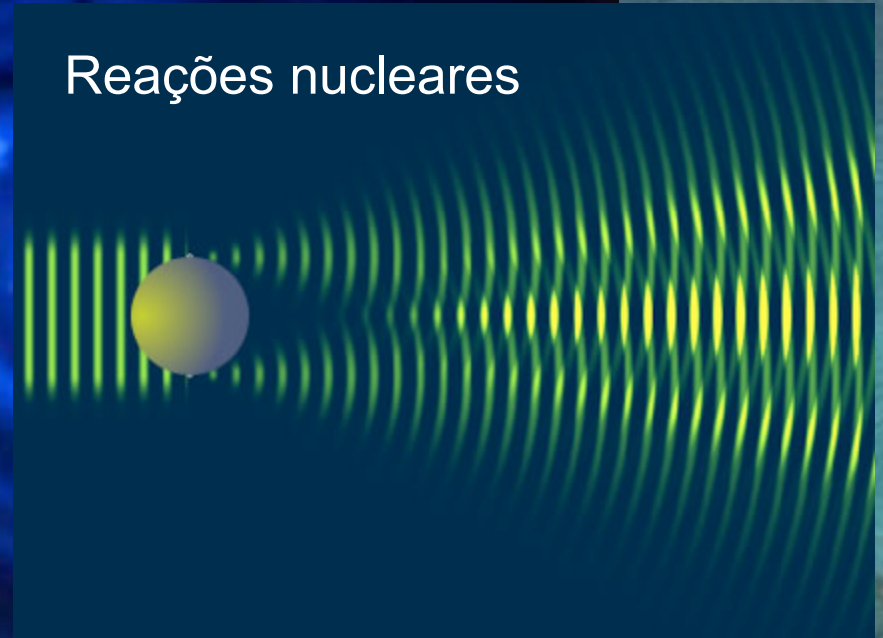


Difração de elétrons em Estruturas microscópicas

Luz

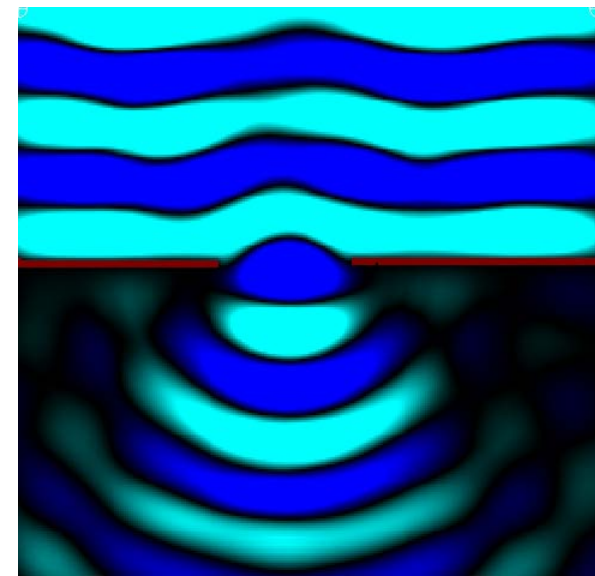
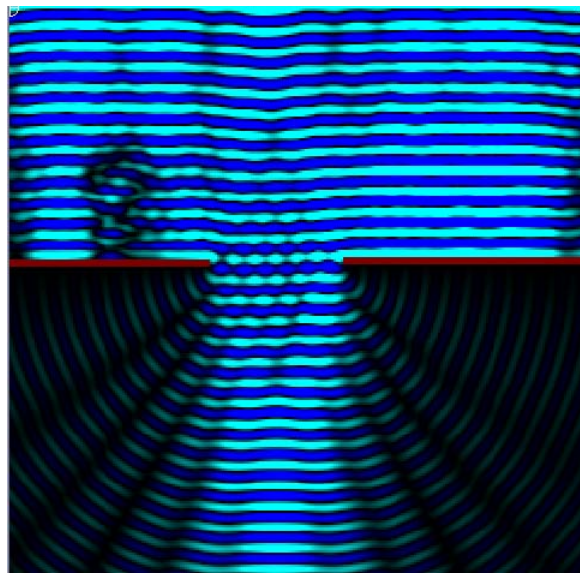
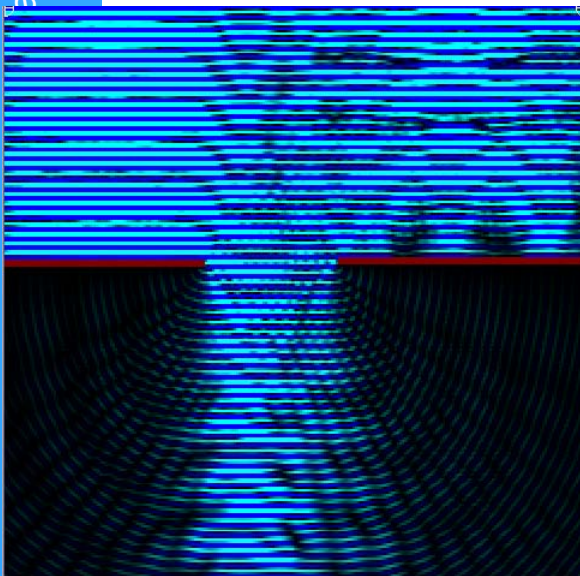


Reações nucleares



Dependência das dimensões dos obstáculos

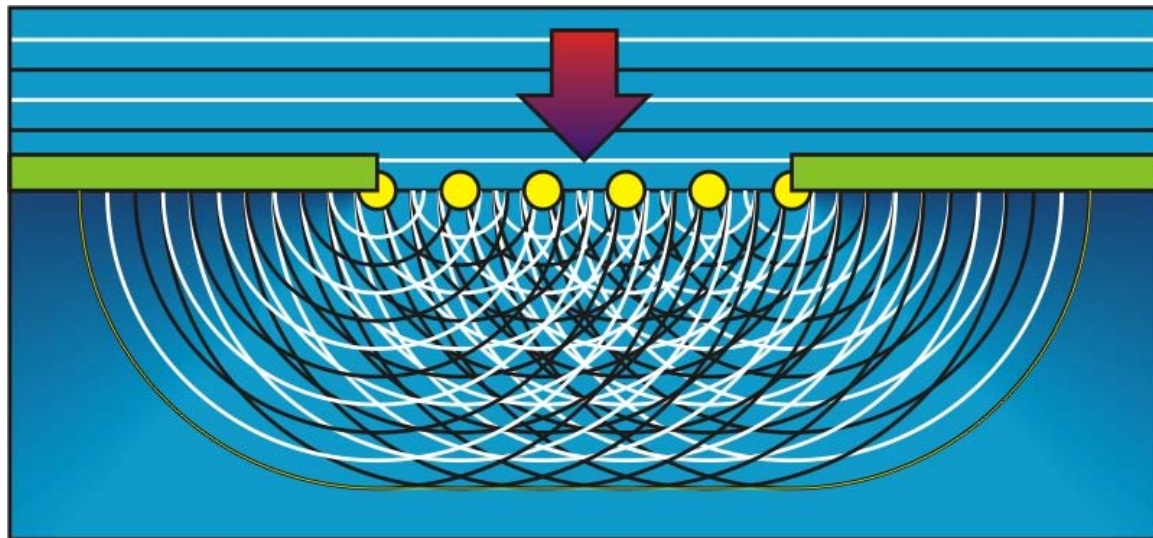
- Ondas de comprimento muito menor que as dimensões do obstáculo sofrem pouca difração
 - <http://sampa.if.usp.br/~suaide/applets/falstad/mirror1/ripple/>



Explicando o fenômeno de difração

- Princípio de Huygens-Fresnel

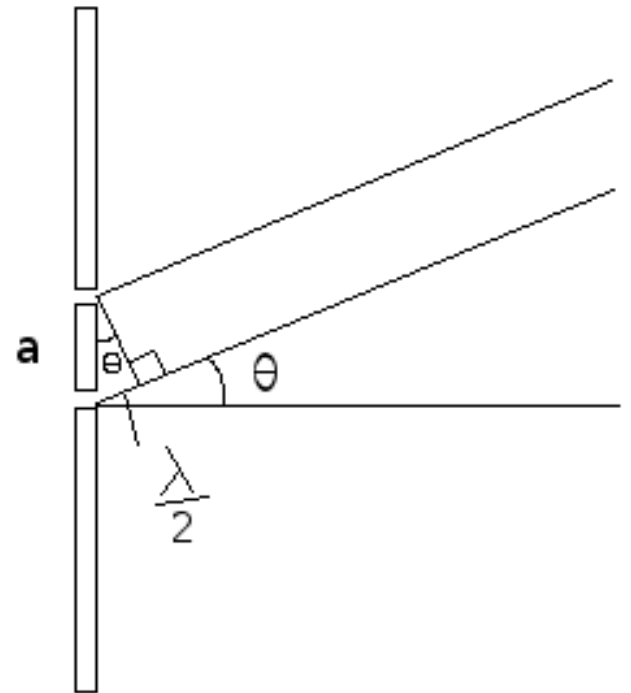
- Cada ponto de uma frente de onda (não obstruído) funciona como uma fonte emissora puntiforme esférica
- A onda resultante consiste da superposição de todas as ondas esféricas, levando em consideração a fase entre elas



Interferência entre duas fendas ideais.

- Seja duas fendas ideais, separadas de uma distância a .
- Como cada fenda funciona como uma fonte puntiforme radial, o campo elétrico gerado por ela vale:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{R} \cos(kR - \omega t + \delta)$$



Interferência entre duas fendas ideais.

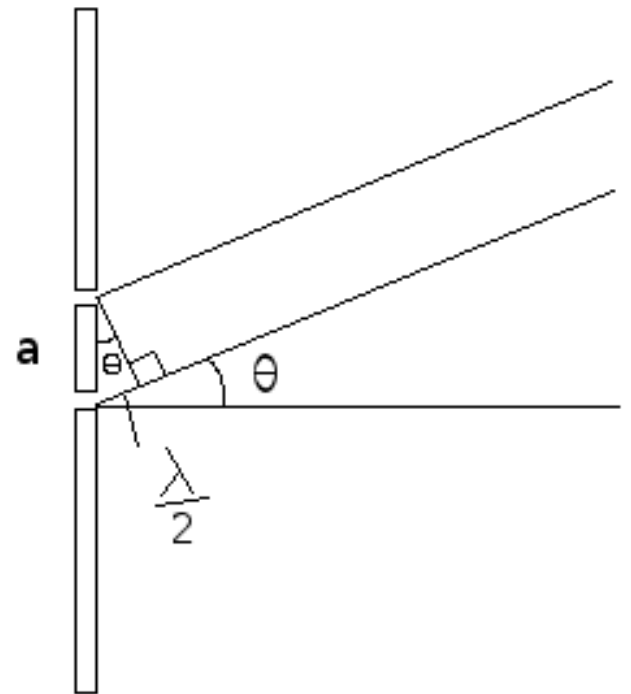
- Assim, o campo total em um ponto qualquer vale

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{R} \left[\cos(kR - \omega t) + \cos(kR - \omega t + \delta) \right]$$

- Sendo δ a diferença de fase entre as duas ondas, que vale

$$\delta = ka \sin \theta$$



Interferência entre duas fendas ideais.

- O campo elétrico será nulo se

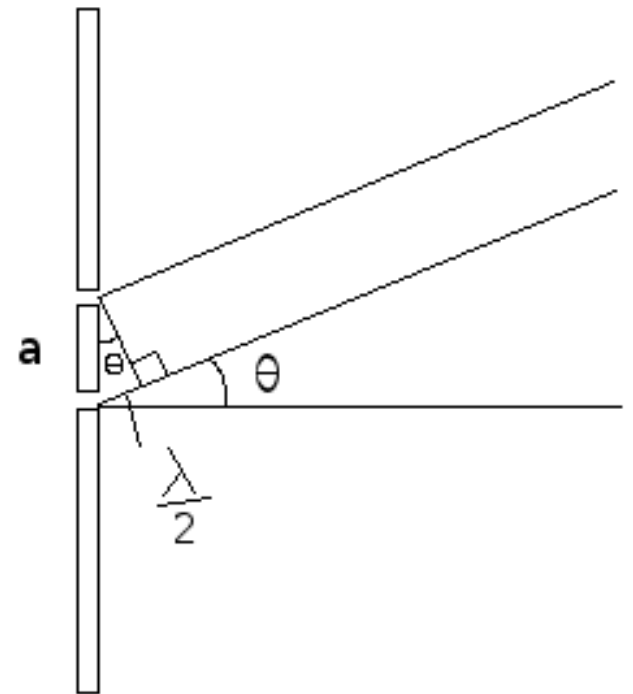
$$\delta = ka \sin \theta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$$

$$ka \sin \theta = (2m + 1)\pi$$

- Ou seja

$$\frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta = (2m + 1)\pi$$

$$a \sin \theta = (m + 1/2)\lambda$$



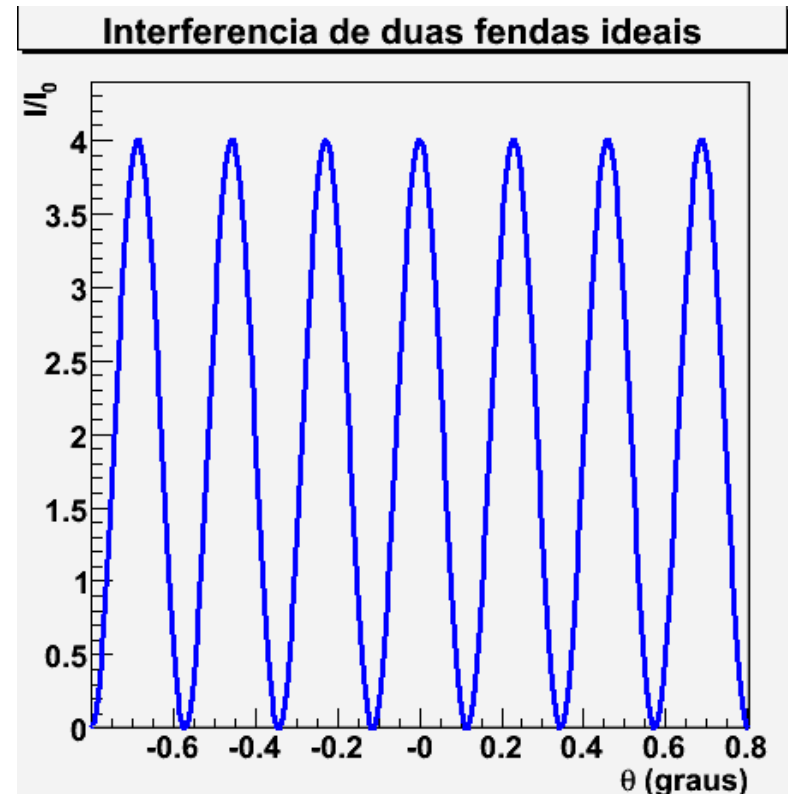
Interferência entre duas fendas ideais.

- No caso de duas fendas, podemos calcular a intensidade da onda em um anteparo

$$I \propto E^2$$

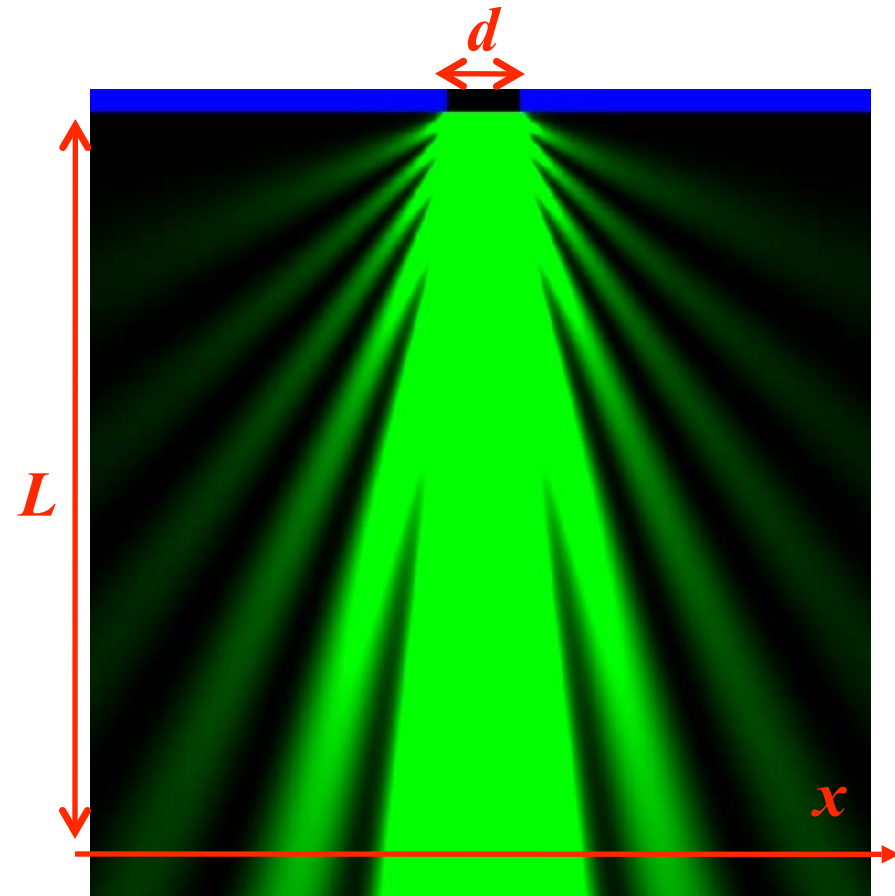
- No caso de ângulos pequenos, a intensidade pode ser dada por:

$$I = 4I_0 \cos^2 \alpha, \quad \alpha = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$$



O estudo de uma fenda simples

- Seja uma fenda de largura d .
- Se a largura d for comparável com o comprimento de onda λ , ocorre difração.
- Se colocarmos um anteparo a uma distância L , muito maior que d , qual é a intensidade luminosa ao longo do eixo x ?

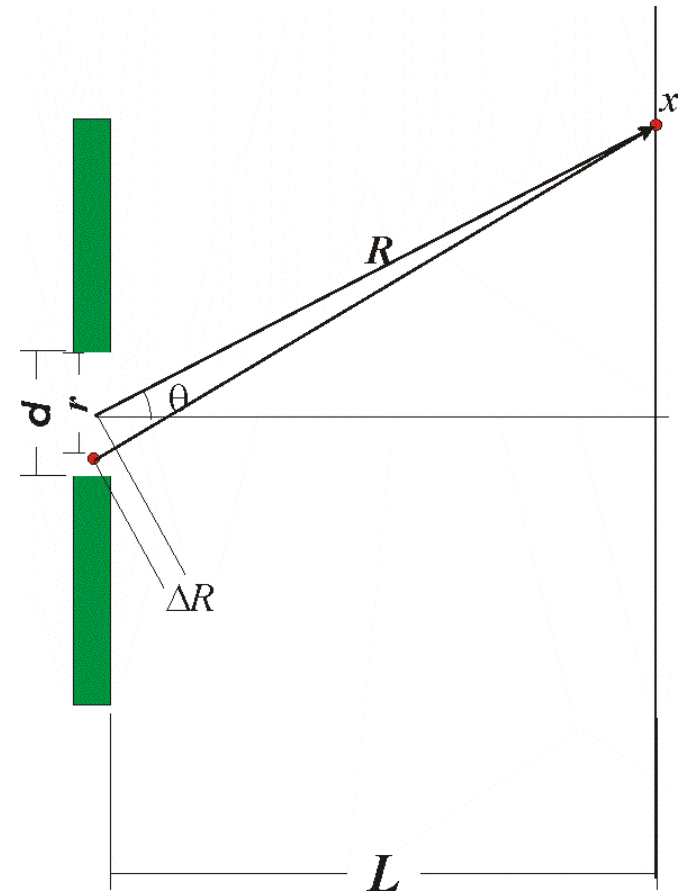


O estudo de uma fenda simples

- Seja um ponto qualquer na fenda, distante de r de uma das extremidades
- Seja uma onda de frequência f e comprimento de onda λ .
- Em um instante t qualquer a intensidade da onda no ponto x vale:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{R} \cos(kR - \omega t + \delta)$$

$$\text{com } \delta = k\Delta R$$



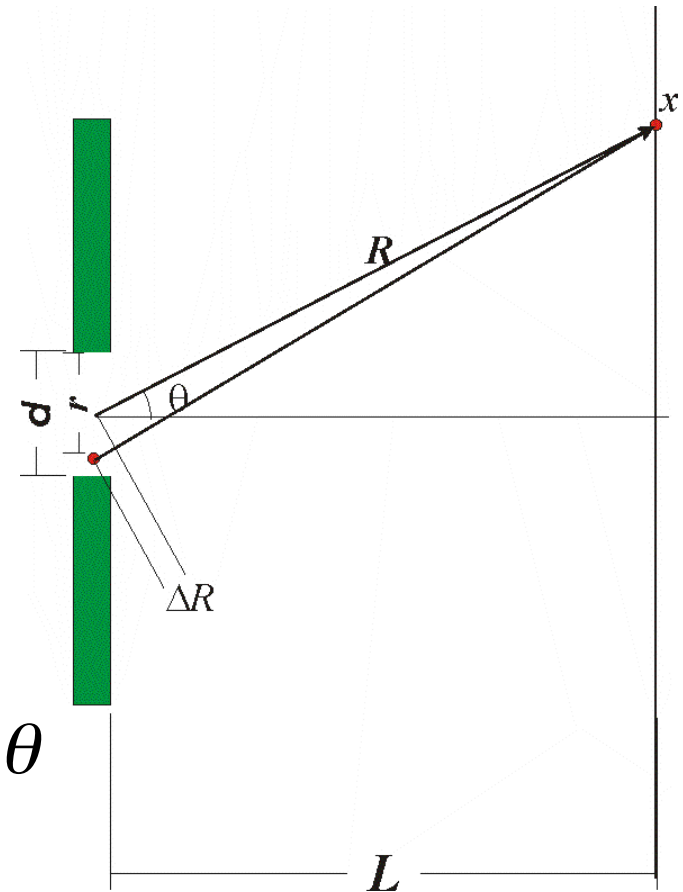
O estudo de uma fenda simples

- O campo elétrico total é, neste caso

$$\vec{E}(x) = \int_{-d/2}^{d/2} \vec{E}(r) dr$$

- A intensidade luminosa é proporcional ao campo elétrico ao quadrado. Assim, podemos escrever que, para grandes distâncias ($L \gg d$)

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad \text{com} \quad \beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta$$



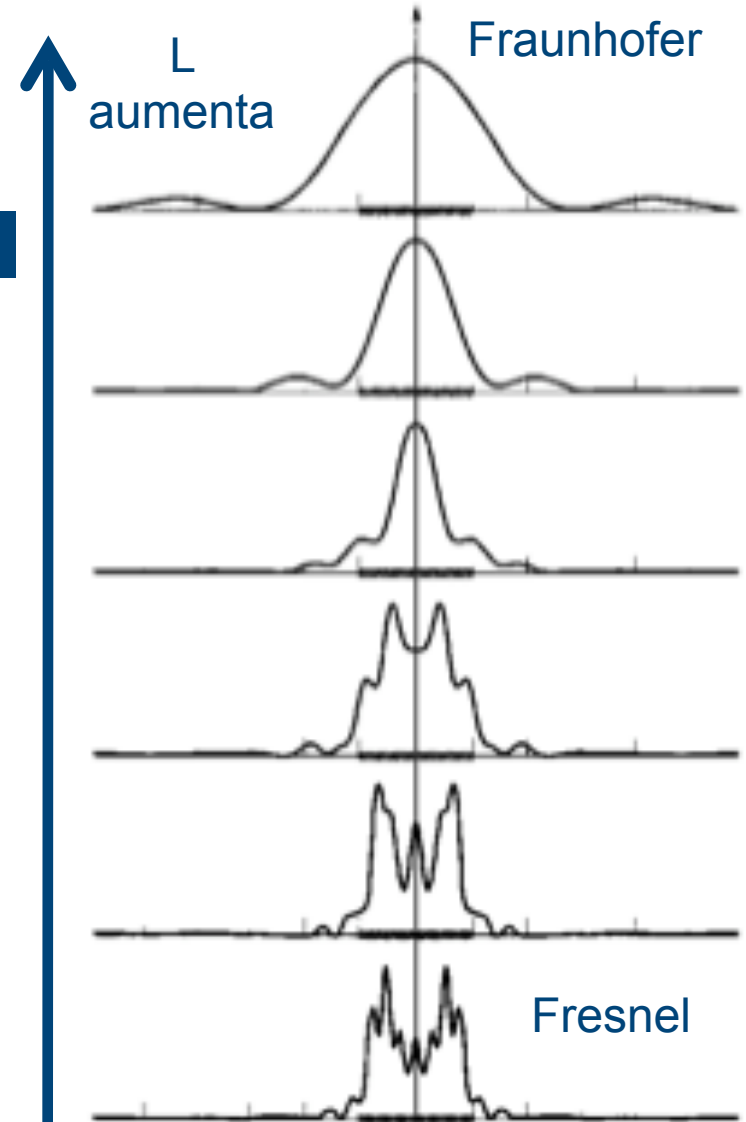
$$\vec{E}(x) = \int_{-d/2}^{d/2} \vec{E}(r) dr$$

http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_diffraction
http://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_diffraction

Porque $L \gg d$?

- Dois limites
 - Difração de Fresnel
 - Próximo ao obstáculo
 - Cálculos complexos
 - Efeitos de borda importantes
 - Difração de Fraunhofer
 - Longe do obstáculo
 - Muito mais simples de calcular
- Número de Fresnel
 - $F \ll 1$ (Fraunhofer)
 - $F \sim 1$ (Fresnel)

$$F = \frac{d^2}{\lambda L}$$



O estudo de uma fenda simples

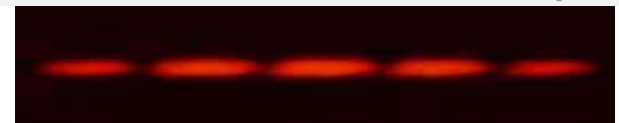
- A intensidade apresenta valores mínimos

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$$

$$\beta = \pm m\lambda$$

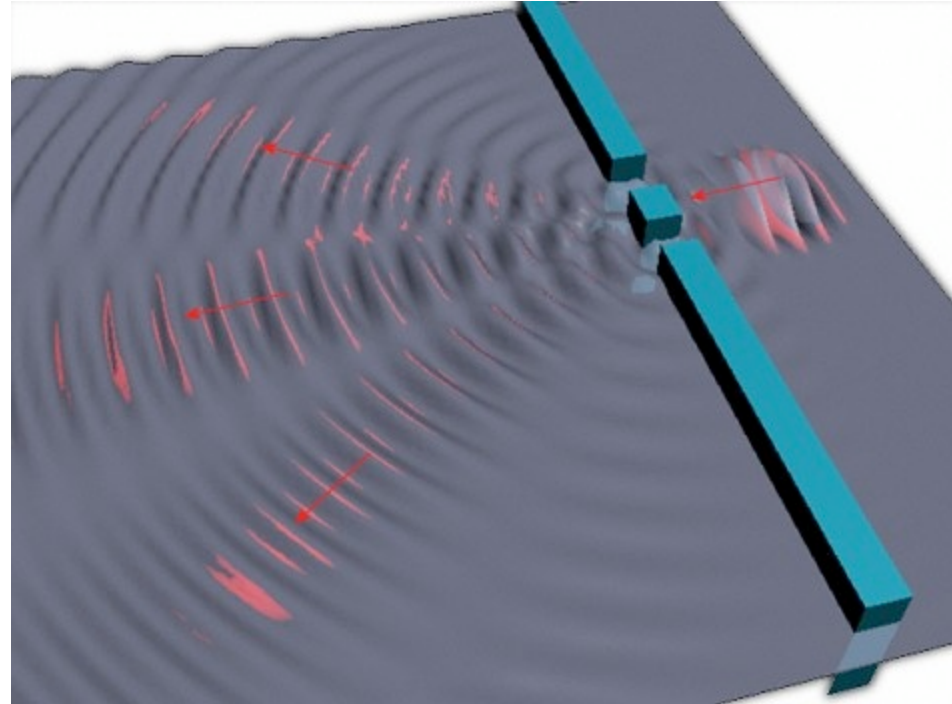
- Ou seja:

$$d \sin \theta = \pm m\lambda$$



Difração e interferência por uma fenda dupla

- Seja uma fenda dupla de separação, centro a centro, a , e largura de fenda b .
- Além da difração em cada fenda separadamente, temos a interferência entre as duas fendas.



$$I = I_{Difr} I_{Inter}$$

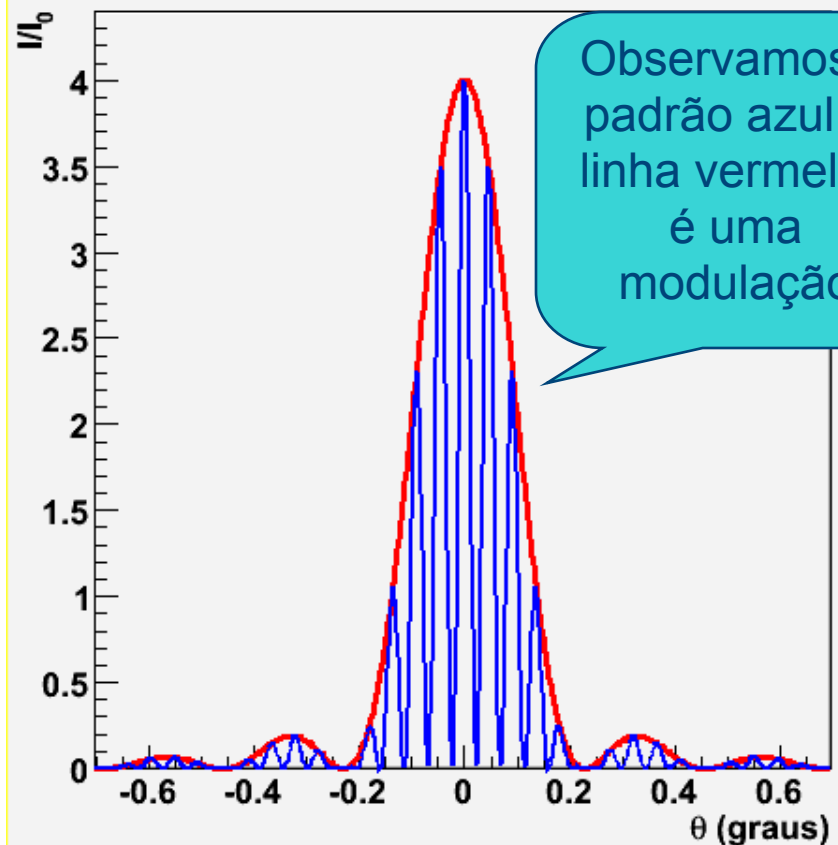
Difração e interferência por uma fenda dupla

- Assim, sendo b a distância entre as fendas e a , a largura de cada fenda, podemos escrever que:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha$$

$$\beta = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \quad \alpha = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

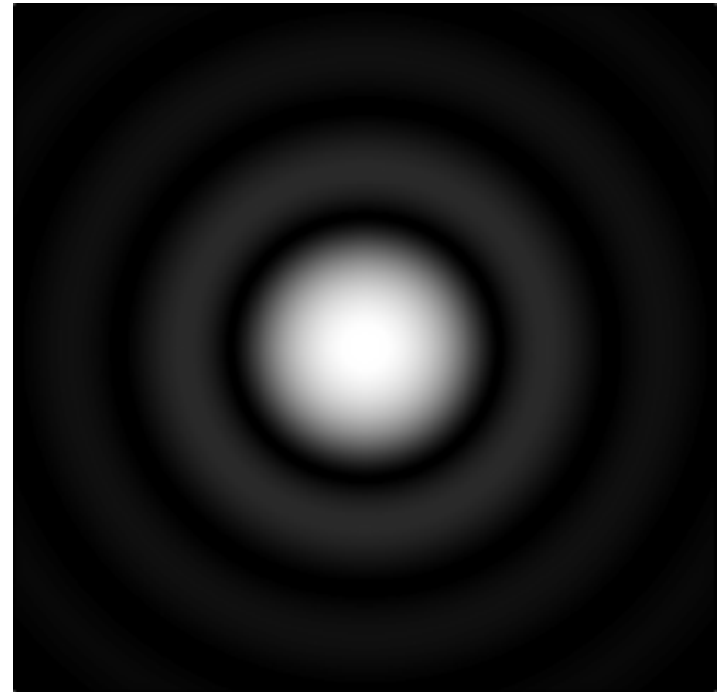
Interferencia e difracao de duas fendas



O estudo de um orifício circular

- Da mesma forma que para a fenda simples, podemos observar figuras de difração para um orifício circular de diâmetro a . Neste caso, os mínimos de intensidade correspondem à:

$$\frac{\sin \theta}{\lambda / a} = 1,22; 2,23; 3,24; \dots$$

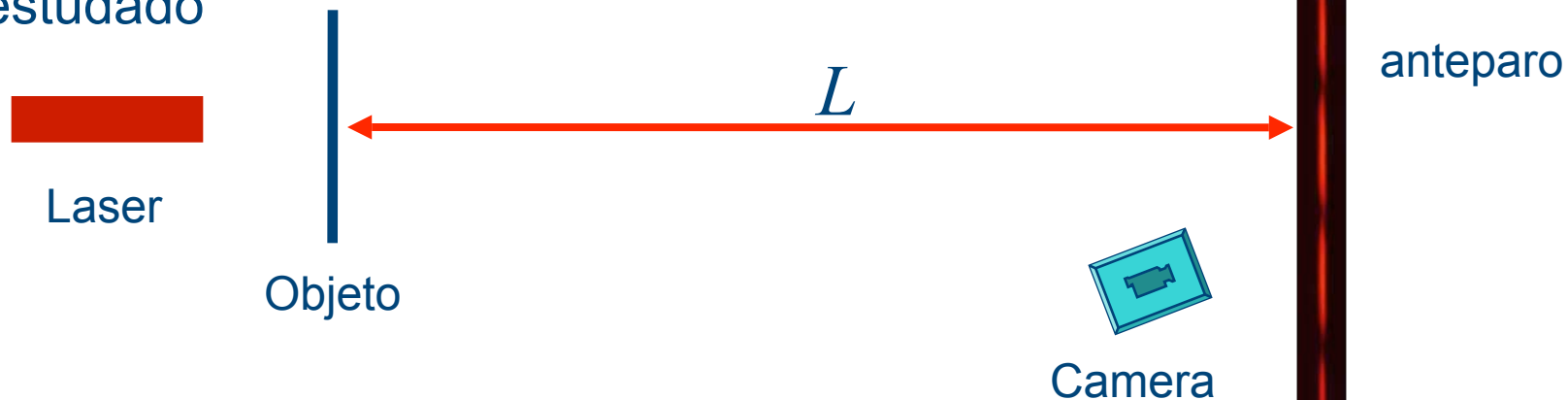


Objetivos da aula de hoje

- Estudar a difração/interferência dos seguintes objetos:
 - Fenda simples
 - Fenda dupla
 - Orifício simples
 - Fio de cabelo
- A partir da medida dos mínimos de difração e interferência, determinar as dimensões do objeto

Atividades da semana

- Montar: laser + objeto + anteparo
- Colocar o anteparo a uma distância razoavelmente grande para observar as figuras de interferência e difração (**calcule o número de Fresnel aproximado e compare com a sua situação**)
- Fotografar a figura de difração para cada objeto estudado



Atividades da semana

- Estudar figuras de difração de vários objetos
 - Entregar fotos das figuras obtidas na síntese e os gráficos necessários para a análise de dados. Buscar o método que propicie a melhor precisão para os resultados obtidos
- **Fenda simples:** Determinar a largura da fenda utilizada
- **Fenda dupla:** Determinar a largura das fendas e a separação entre elas
- **Fio de cabelo:** Determinar a espessura do fio. Comparar com medida mecânica.
 - Como a figura de difração, neste caso, se compara a da fenda simples?
- **Orifício circular:** Qual o diâmetro do orifício?

Próxima aula

- Óptica de Fourier e computador óptico
 - Tentem pesquisar sobre o assunto para a próxima aula
 - Colocarei alguns links no site do LabFlex