

Física Experimental IV

www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

Aula 2 – Computador Óptico

Ótica Geométrica: Associação de Lentes

Profa. Eloisa Szanto
eloisa@dfn.if.usp.br

Ramal: 7111

Pelletron

Prof. Henrique Barbosa
hbarbosa@if.usp.br

Ramal: 6647

Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin
nelson.carlin@dfn.if.usp.br

Ramal: 6820

Pelletron

Prof. Paulo Artaxo
artaxo@if.usp.br

Ramal: 7016

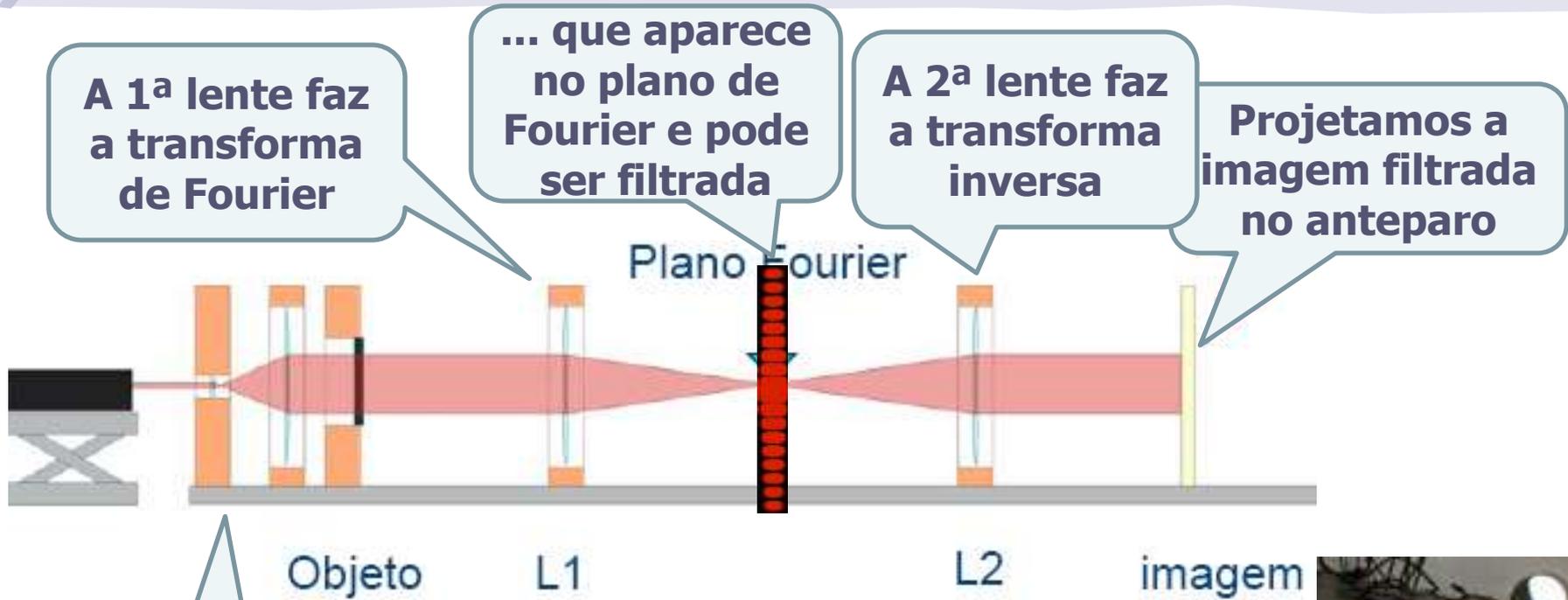
Basílio, sala 101

Computador ótico

- **Computador ótico** é um dispositivo que permite a manipulação de imagem de maneira controlada sem a necessidade de efetuar cálculos complicados.
- Esse dispositivo pode e vai ser construído e estudado no laboratório e vamos, nas próximas aulas, discutir como fazê-lo em detalhe.



Como funciona?



o laser ilumina o objeto

COMPUTADOR ÓTICO



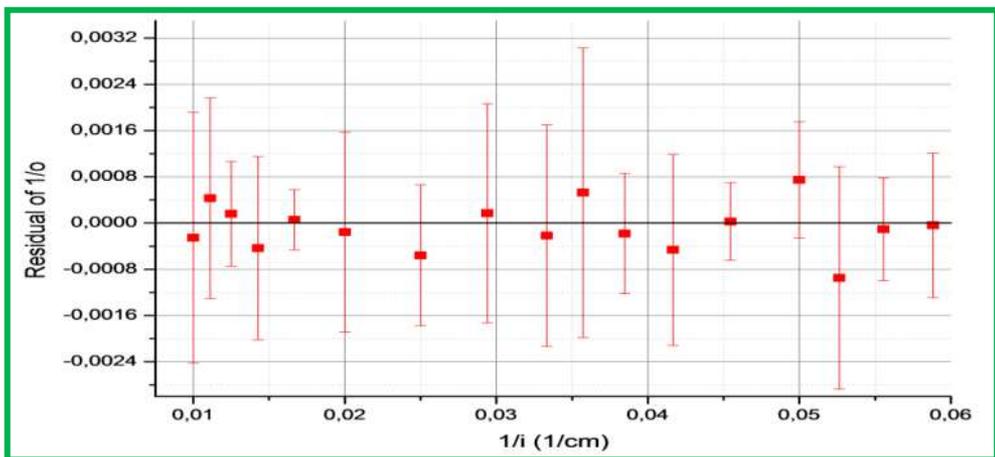
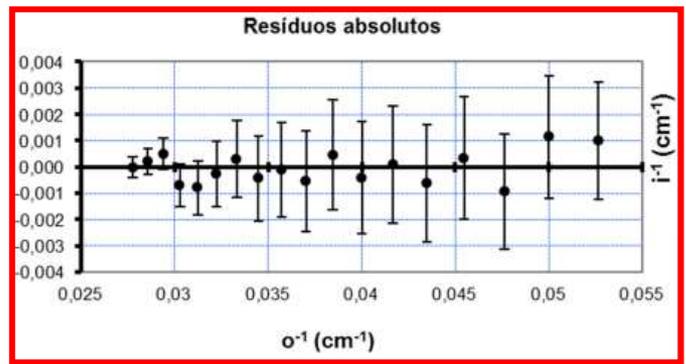
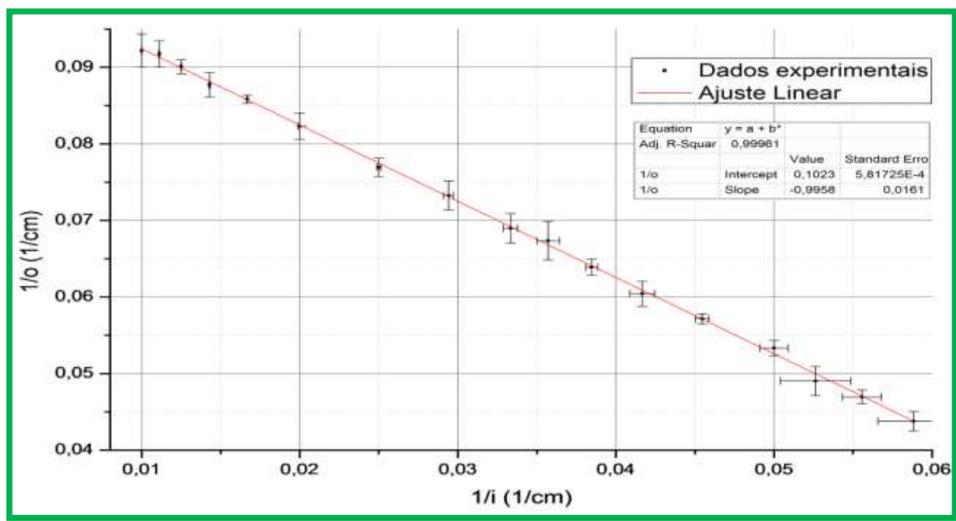
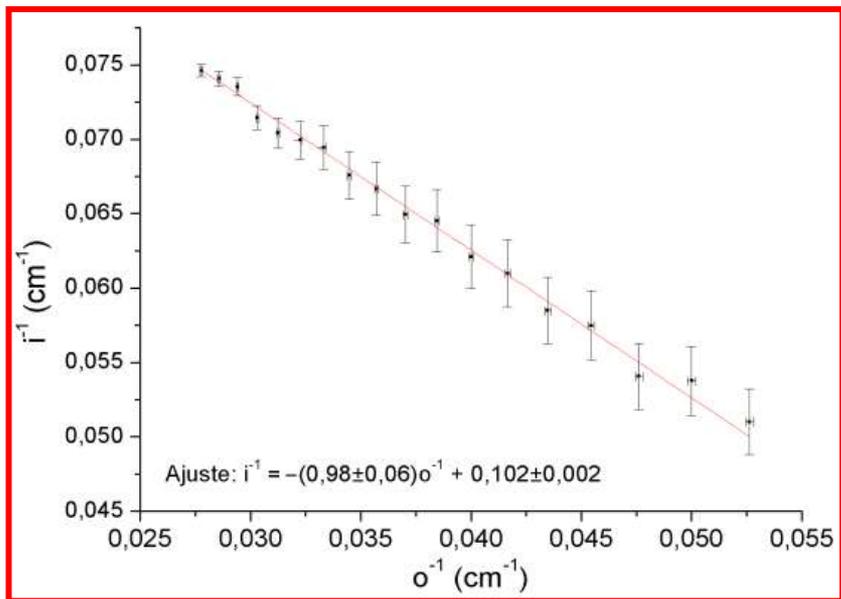
Tarefas 1: para a síntese

- Medir a distância focal de uma lente convergente
 - Estabeleça um procedimento experimental para efetuar as medidas e obter f com incerteza de alguns mm.
 - DICA: é possível fazer com a lei gauss, mas você também poderia usar um laser ou projetar um objeto distante.
 - Tome os dados necessários e obtenha as distâncias focais correspondentes
 - mostre o gráfico, o ajuste, etc...
 - Analise os resíduos (mostre o gráfico) e discuta a qualidade do ajuste
 - Discuta os prós e contras do método proposto

Para pensar...

- Existem várias maneiras de fazer a medida proposta, mas todas envolvem medidas de distância: objeto, imagem, lente, etc...
- Para o método de vocês:
 - Como estimar os erros nas posições?
 - os erros são todos iguais?
 - Os erros são independentes?
 - A distribuição da incerteza é gaussiana?

Resultados



Problemas 1

1. A lei de Gauss é válida também para lente espessa
2. Ao procurar pelo foco mexendo na posição da lente, a distância do objeto e da imagem estão correlacionados!!!
3. O erro na posição não pode ser 1 mm. Qual a precisão no seu julgamento visual para a focalização da imagem??

Considerando a **exopessura** da lente desprezível, a equação que relaciona a posição da distância focal f , a posição do objeto p e da imagem q , em relação à lente é

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (1)$$

Se fixarmos a distância entre o objeto e a imagem, isto é, $p + q = D$ e deslocarmos a posição da lente em L , podemos encontrar uma segunda organização dos componentes com imagem correspondente ao foco. desta forma, a nova posição $p' = p + L$ e $q' = q - L$, onde L é o deslocamento da lente. Aplicando as novas posições em (1), obtemos novamente o valor de f .

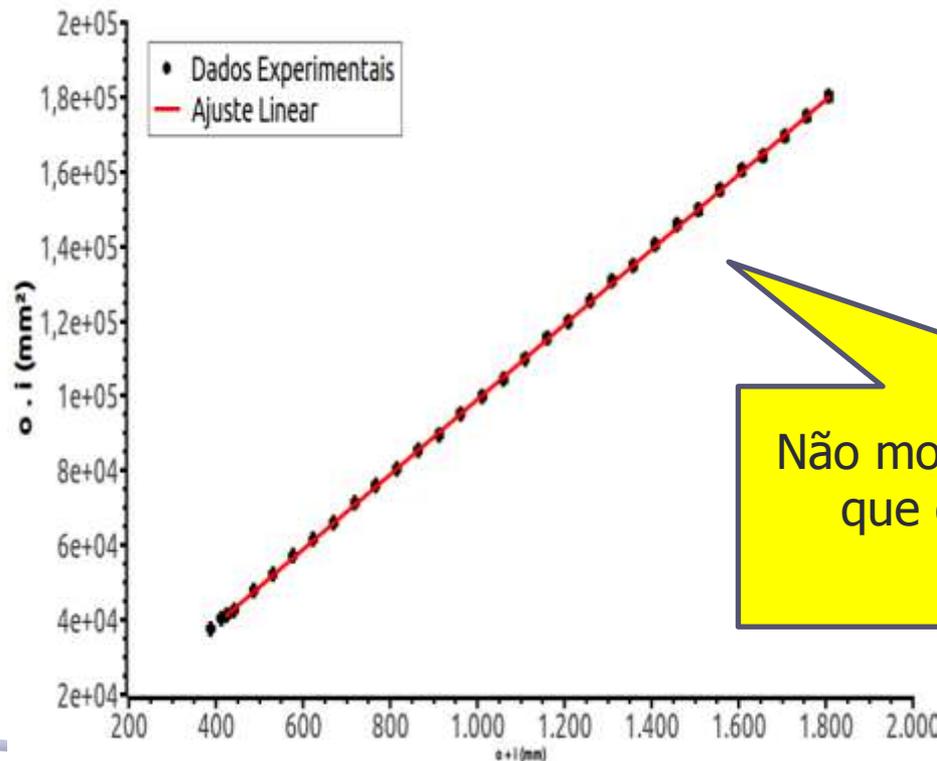
Para se determinar estes valores, medimos a posição da lanterna geradora de imagem, do anteparo e da lente convergente entre ambos. Os componentes estavam em um trilho, com trena paralela para medição da posição. A incerteza em cada posição pode-se considerar em $1mm$. Logo, a incerteza na posição de cada componente é $\sqrt{2}mm$.

Problemas 2

O segundo, que foi utilizado, foi através lei de gauss, medindo as distancias i e o . Como sabemos, a lei de Gauss é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \quad (1)$$

então foram tomados diversos valores de i e o e ajustada uma função linear do tipo $y = Ax + B$ em que $A = f = \frac{i \cdot o}{i + o}$ e $B = 0$.



- Este outro grupo ajustou uma reta no gráfico de $i \cdot o$ X $i + o$

Não mostram as incertezas em X e Y, que obviamente também estão correlacionadas!

Convergente

10.5cm

	R (cm)	D (mm)	F exp (cm)	N (ind. refra.)
H01				
H02	10.0 (1)	8.588 (5)	10.08 (20)	
H03			9.86 (3)	
H04			0,0978 (15) [sem unid]	
H05	10.0 (1)	7.840 (5)	Delg=9.75 (2) Esp=9.67 (2)	1.51 (2)
H06			9.76 (6)	
H07	10.0 (1)	8.38 (1)	9.8 (2)	1.509 (5)
H08				
H09	1.00 (1)	8.60 (1)		

f~R pela eq.
do fabricante

Tarefas 2: para o relatório

- Você pode garantir que a aproximação de lente delgada é válida para esta lente?
 - **DICA:** considerando uma lente espessa, calcule a posição dos planos principais e estime o erro que você cometeu ao medir i e o na aproximação de lente delgada (em relação ao centro).
 - Que tipo de erro é este?
 - Seus dados permitem você perceber esta diferença?
- Calcule o índice de refração da lente
 - **DICA:** meça as dimensões da lente usando: medidor de raio de curvatura (**cuidado, só temos um!**), micrômetro e paquímetro.
 - Discuta se sua aproximação de lente delgada tem influência na determinação deste valor

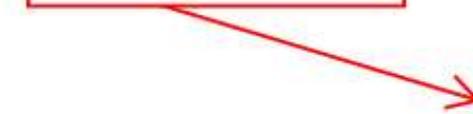
Tentativa 1

também o raio de curvatura da lente e encontramos um $R=100(1)$ mm. ok

Tabela 1: V2-V1 representa a espessura da lente em seu centro e f a distância focal considerando-a como lente delgada. V1 foi tomado como posição zero.

Grandezas	Posição mm	σ mm
V2-V1	8,38	0,01
Espessura borda	2,61	0,01
H1	2,89	0,01
H2	2,89	0,01
f	98	2

qual o erro sistemático?



Da equação 2 calculamos o índice de refração n da lente, desconsiderando o segundo termo do segundo membro já que a lente foi suposta delgada e supondo $R_1=R_2$. Encontramos o valor $n=1,509(5)$.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] - \frac{(n-1)^2}{n} \left[\frac{t}{R_1 R_2} \right] \quad (2)$$

Problema

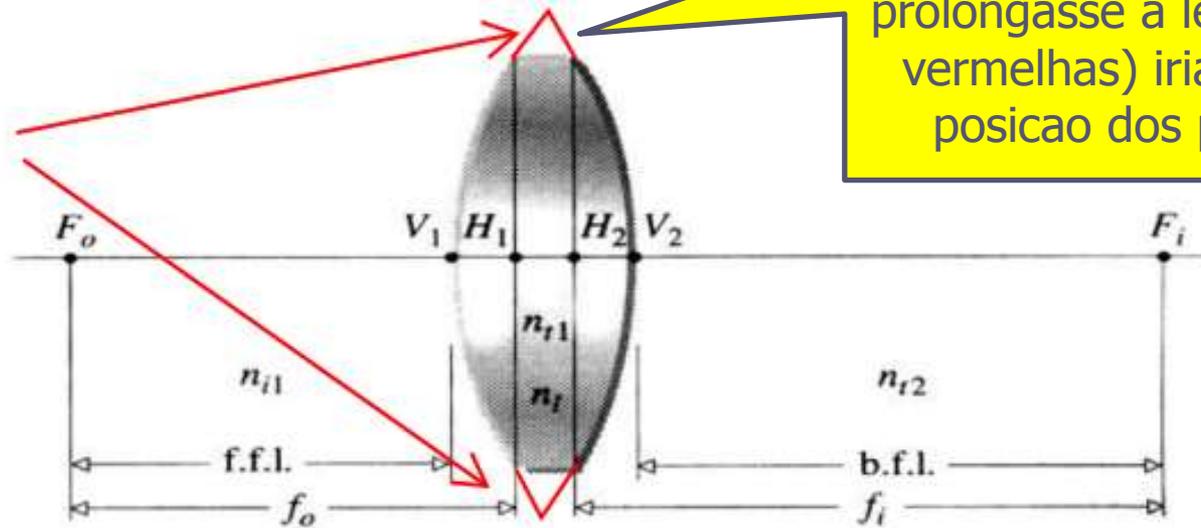


imagem que a gente prolongasse a lente (linhas vermelhas) iria mudar a posição dos planos??

Figura 2: Exemplo de lente convergente similar à utilizada neste experimento.

Consideramos que a lente fosse simétrica ao longo da direção mostrada na figura 1. As incertezas de leitura nas três primeiras medidas da tabela 1 foram extraídas do micrômetro. Para calcular a posição de H_1 e H_2 subtraímos da espessura a posição da espessura da borda e dividimos o valor encontrado por 2. Medimos também o raio de curvatura da lente e encontramos um $R=100(1)$ mm. ok

os planos principais estão onde os raios aparentam fazer a curva...

Análise da eq. do fabricante

Era possível decidir se a lente era delgada ou não apenas observando a equação do fabricante.

Mesmo sem saber qual o índice de refração, o erro relativo em desprezar o último termo é $< 1\%$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] - \left[\frac{(n - 1)^2}{n} \right] \left(\frac{t}{R_1 R_2} \right)$$

	[mm]		[mm]	[mm]	%
r1	255	n	f_del	f_esp	ERRO
r2	255	1.1	1275.0	1276.2	-0.09%
t	5.113	1.5	255.00	255.86	-0.33%
		2.0	127.50	128.14	-0.50%
		2.5	85.000	85.514	-0.60%
		5.0	31.875	32.133	-0.80%
		10.0	14.167	14.296	-0.90%
		15.0	9.1071	9.1932	-0.94%
		50.0	2.6020	2.6279	-0.98%

Análise dos planos principais

- Outra maneira de determinar se a lente era delgada ou não era corrigir o pior erro sistemático possível:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow P_1 = P_2 = (n-1)/R$$

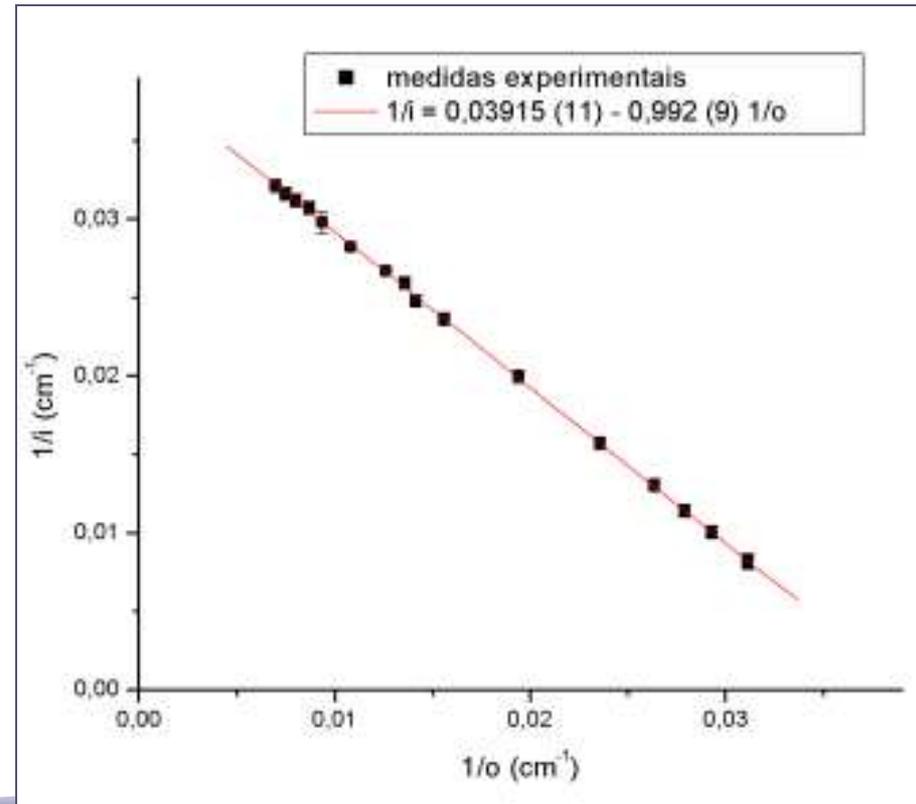
$$h_1 = h_2 = \frac{t}{n \left(2 - \frac{t}{R} \frac{n-1}{n} \right)}$$

Mesmo sem conhecer o índice de refração, sabemos que o pior erro em \mathbf{i} e \mathbf{o} é metade da espessura da lente!

Limites: $\begin{cases} n \rightarrow 1 \Rightarrow h \rightarrow t/2 & \mathbf{h \text{ está no centro (delgada)}} \\ n \rightarrow \infty \Rightarrow h \rightarrow 0 & \mathbf{h \text{ está na borda (espessa)}} \end{cases}$

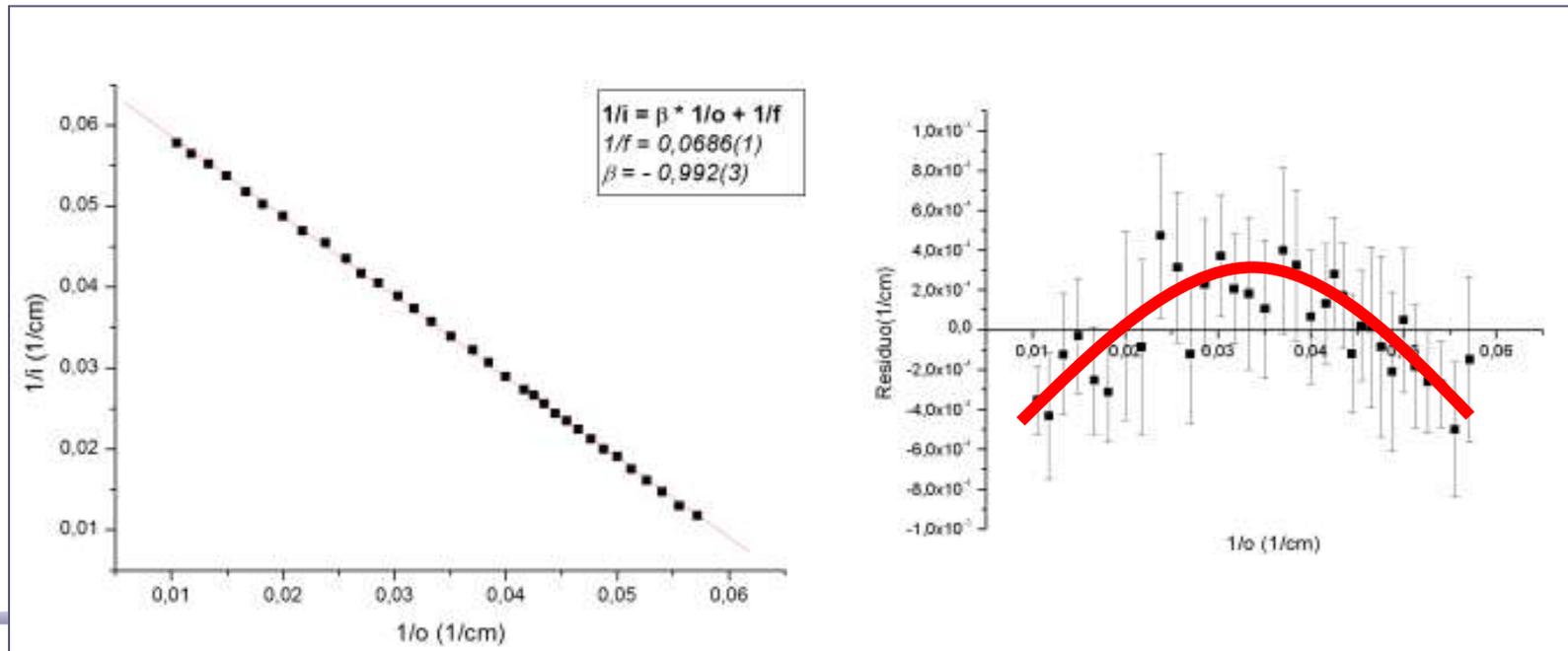
A lente é delgada??

- Ou seja, o ajuste linear poderia ser feito com e sem uma correção de $t/2$ nos valores de i e o ...
- Ao comparar os dois focos encontrados, vocês perceberiam que a diferença é menor que o erro experimental



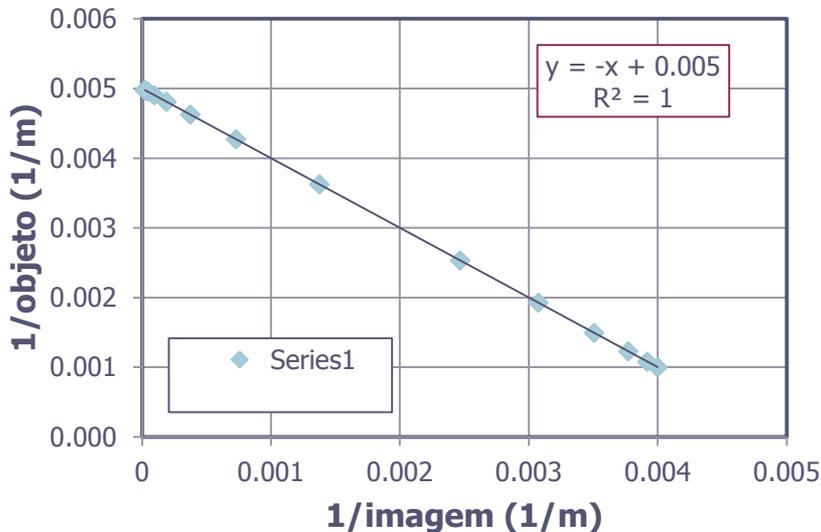
Correção dos planos principais

Em 2009, um grupo fez medidas precisas que mostram que o ajuste linear não é bom (apesar dizerem que era).... A tendência nos resíduos mostrava que era preciso corrigir a posição dos planos principais.

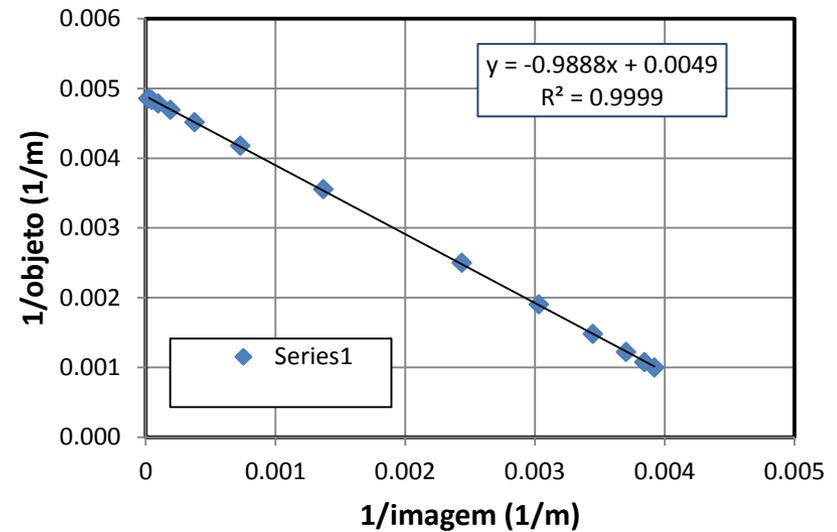


Simulação (f=200mm)

Medida correta a partir do plano principal

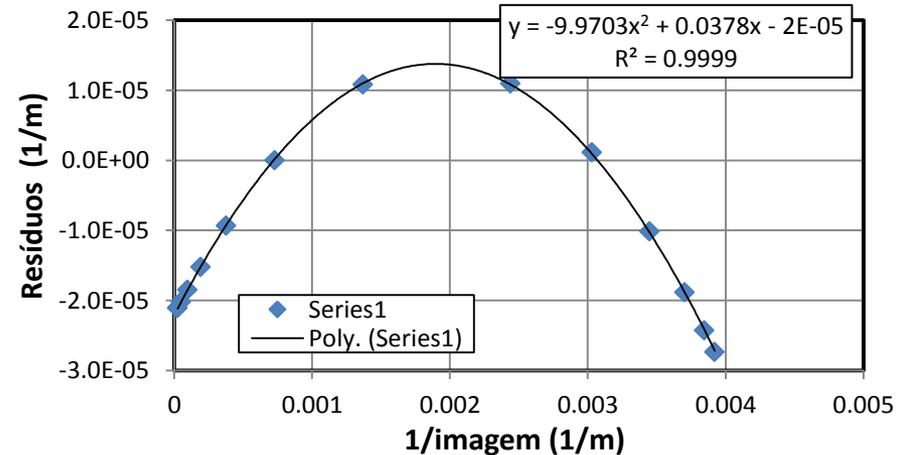


Erro sistemático de +5mm em i e o



f (sem erro) = $1/0.005 = 200\text{mm}$
 f (erro) = $1/0.0049 = 204\text{mm}$

Erro sistemático em i e o implica em resíduos como uma parábola



Tentativa 2

Espessura da lente: $t=7,840(5)$ mm (medida com micrômetro)

Raio de curvatura: $R=10,0(1)$ cm (verificou-se que $R_1 = R_2$)

Pela equação do fabricante para lentes delgadas, com $R_1 = R_2 = R$, obtemos

$$\frac{1}{f_{del}} = \frac{(n - 1)}{2R}$$

Usando o valor de $f_{del} = 9,75(2)$ cm encontrado no ajuste, obtemos uma estimativa para o índice de refração como sendo $n = 1,51(2)$, o que já era de se esperar devido ao material da lente ser de vidro.

- O valor de $n=1.51(2)$ é uma estimativa inicial, pois foi obtido assumindo lente delgada.

Problema

Supondo agora lente espessa, temos a equação dos planos principais

$$h_1 = h_2 = h = \frac{t}{n \left(2 - \frac{t}{R} \right) + \frac{t}{R}}$$

ok, mas nao deve estar exatamente nesta posicao pois $n \neq 1.51$

Substituindo t e R medidos e n estimado, obtemos que $h \sim 0,26\text{cm}$, logo o erro sistemático que cometemos por medir p e p' a partir do centro ao invés do plano principal é $(t-2h)/2 \sim 0,13\text{cm}$, que corresponde à metade da separação entre os planos principais. ok

Descontando esse erro sistemático nas medidas de p e p' e refazendo o ajuste, obtemos que $f_{esp} = 9,67(2)\text{cm}$. Levando em conta que f_{esp} é medida a partir do plano principal e f_{del} a partir do centro, se a hipótese de lente delgada for aceitável, esperamos ter uma relação $f_{esp} = f_{del} - 0,13$. Do fit, temos que $f_{del} - 0,13 = 9,63(2)\text{cm}$, que é compatível com o obtido para lente espessa, logo é plausível assumir que a lente é delgada.

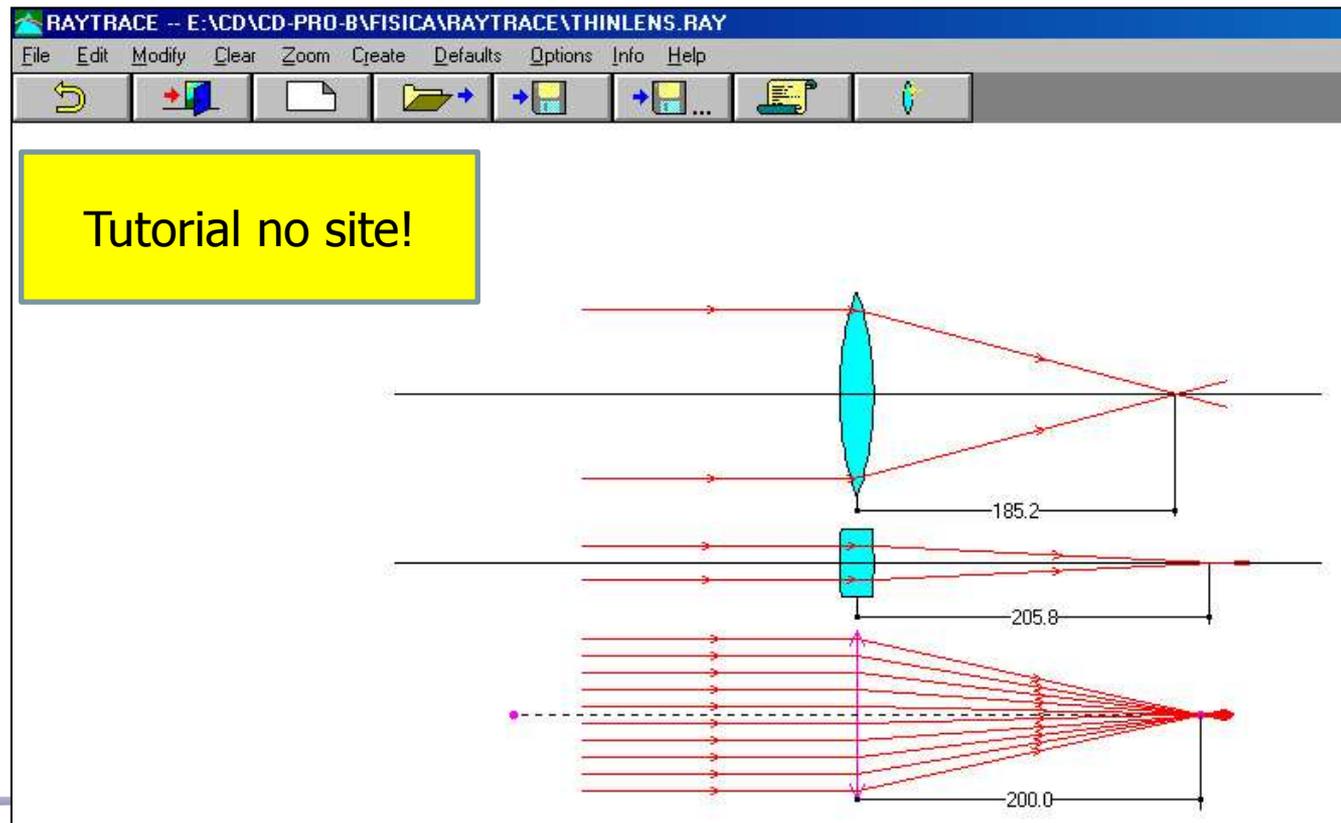
- Para encontrar n :
 - precisaria repetir o processo até convergir
- Para delgada:
 - o argumento é que f_{del} e f_{esp} são compatíveis ($z \sim 2.8$)

Tarefas 3: EXTRA

- Há problemas para se estimar o índice de refração sem assumir uma lente delgada:
 - Você não pode corrigir os valores de i e o porque não sabe o índice de refração...
 - Você não pode calcular o índice de refração porque f foi estimado assumindo lente delgada
- Discuta esta ambiguidade
- Proponha um método e calcule o índice de refração assumindo lente espessa.

Tarefa 4: EXTRA

- A aproximação paraxial é válida para as condições da sua experiência?
 - DICA: você pode usar o programa RayTrace

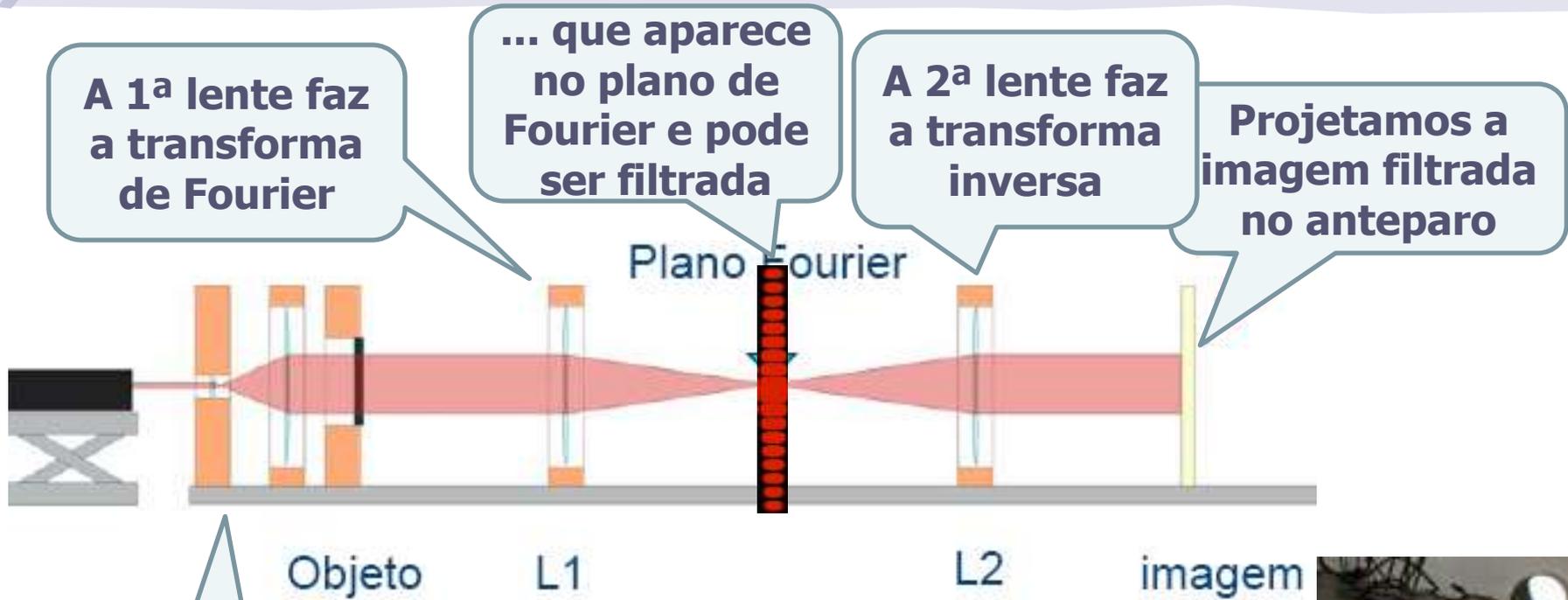




AULA DE HOJE

FONTE DE LUZ COERENTE

Como funciona?



o laser ilumina o objeto

COMPUTADOR ÓTICO

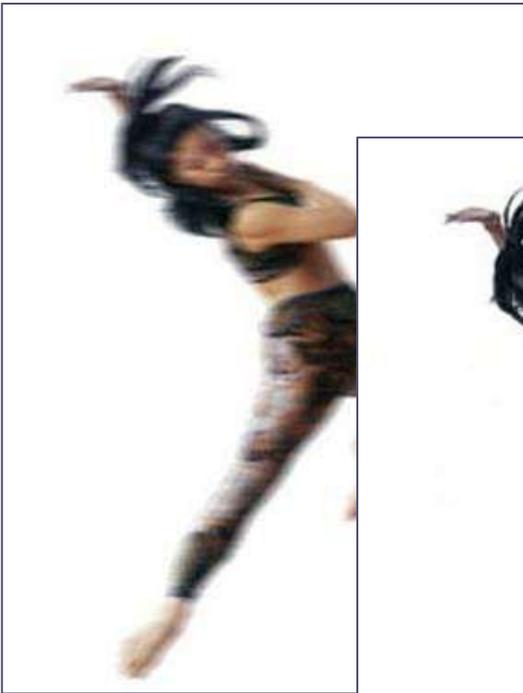


Processamento de Imagem

- Processamento de imagem é a técnica de alterar a imagem de maneira controlada:
 - aumentar ou diminuir a nitidez,
 - aumentar ou diminuir contraste,
 - alterar brilho,
 - eliminar detalhes, etc
- Imagem = Informação ótica, i.e, distribuição bidimensional de fluxo luminoso.

O fluxo pode ser descrito por uma função $I(\mathbf{y}, \mathbf{z})$, que atribui um valor de irradiância I para cada ponto do espaço onde se distribui a imagem.

Exemplos



Before



After

Great Orion Nebula
processed using Caron

Processamento de imagem

- Para processar uma imagem é preciso, de alguma forma, decompô-la numa somatória de funções simples sobre as quais temos controle.
- Essas funções serão as transformadas de Fourier bidimensionais da imagem e vamos ter que aprender como encontrá-las.
- Há duas maneiras de fazê-lo:
 - uma é através de cálculo
 - outra através de um computador ótico
- **Vamos optar pelo computador ótico**

Computador ótico

- **Computador ótico** é um dispositivo que permite a manipulação de imagem de maneira controlada sem a necessidade de efetuar cálculos complicados.
- Esse dispositivo pode e vai ser construído e estudado no laboratório e vamos, nas próximas aulas, discutir como fazê-lo em detalhe.
- Entretanto essa construção requer que:
 - **o objeto cuja imagem se quer manipular seja iluminado por uma fonte de luz coerente**

LASER

A person wearing safety glasses is working in a laboratory setting, adjusting a complex laser system. The scene is dimly lit with blue and red light. A bright blue laser beam is visible, reflecting off a surface. The person is focused on their work, and the background shows various pieces of equipment and a red light source.

AULA DE HOJE
PARTE 1: LASER

LASER: Histórico



- **1917** ► Einstein demonstrou que a emissão estimulada de radiação era possível
- **1939** ► V. A. Fabricant apresenta a idéia de amplificar a radiação emitida através de emissão estimulada
- **1952** ► N. G. Basov + A. M. Prokhorov e C. H. Townes apresentam independentemente a idéia de amplificador para microondas. Nos dois anos seguintes eles construíram no Inst. Lebedev (URSS) e Univ. Columbia (USA) os primeiros Masers.
- **1964** ► Os físicos acima receberam o prêmio Nobel por esses trabalhos.

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



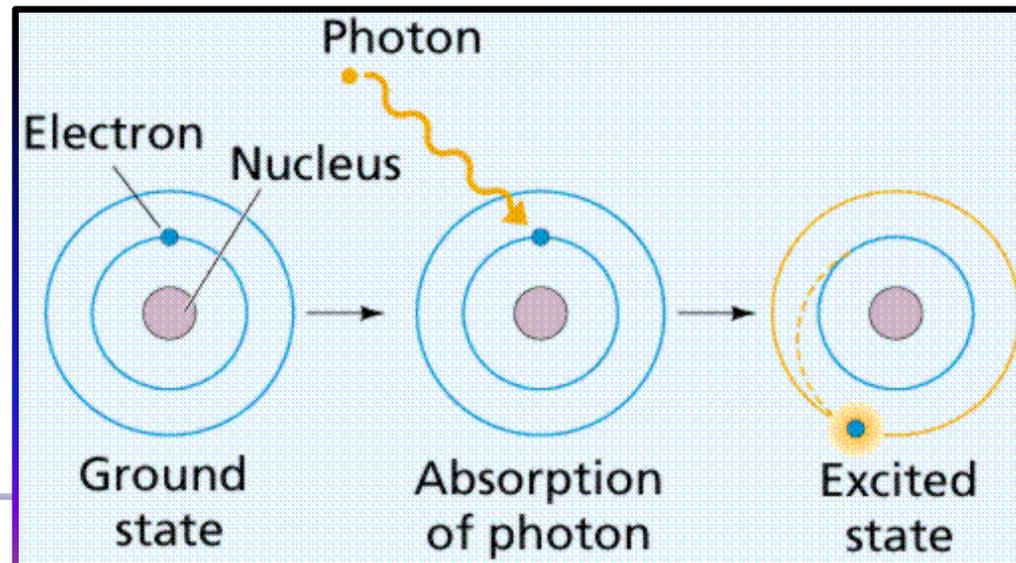
LASER: características



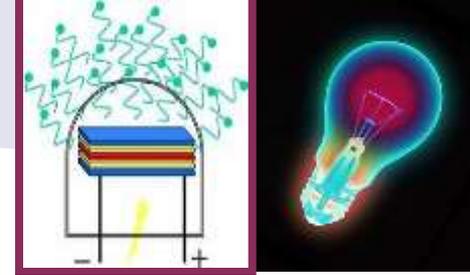
- **Monocromática:** ela consiste de uma única cor ou comprimento de onda. Embora haja atualmente lasers que geram mais de um comprimento de onda, a luz de um laser comum é muito pura, ou seja, ela consiste de um intervalo muito estreito de comprimentos de onda
- **Direcional:** o feixe é bem colimado (ou paralelo), e atravessa longas distâncias com pouca divergência
- **Coerente:** todos os trens de onda que compõem o feixe, estão se movendo juntos no espaço e no tempo: estão em fase.

Um pouco de Quântica...

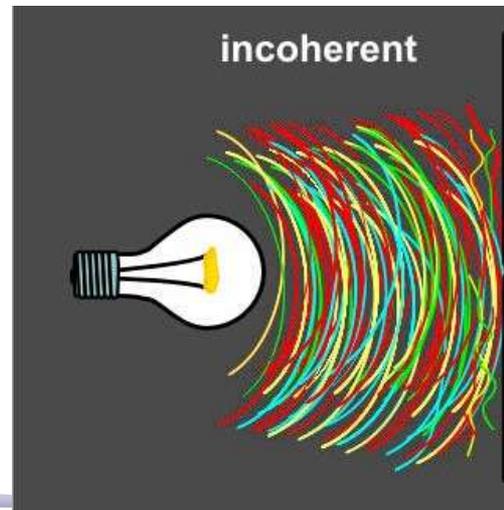
- A radiação eletromagnética é quantizada, e o “quantum” de energia eletromagnética é o **fóton**.
- Energia também é quantizada e por isto apenas algumas órbitas são possíveis para os elétrons ligados aos núcleos.
- Como os elétrons podem mudar de órbita?
 - Para uma órbita de **maior** energia: por **absorção** de energia (radiação, colisões térmicas, etc.)
 - Para uma órbita de **menor** energia: por **emissão** de um quantum de radiação (fóton)
- A energia trocada é exatamente a diferença de energia entre as órbitas, ou seja os fótons tem a mesma frequência e comprimento de onda.



Luz incoerente

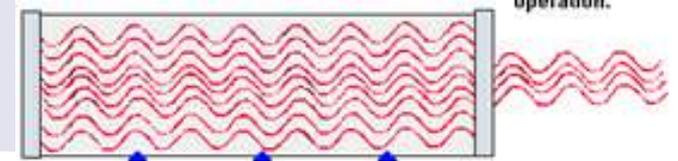


- Lâmpada comum: átomos são excitados por colisões térmicas e voltam às órbitas de menor energia depois de um intervalo de tempo emitindo um fóton.
 - Tanto a excitação como a emissão são randômicas

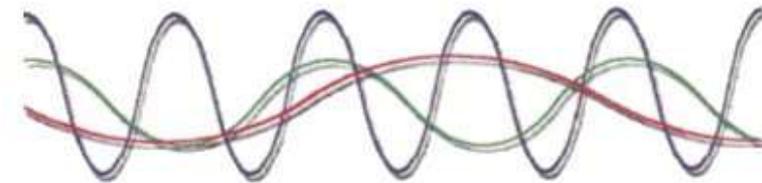


A luz da lâmpada é uma combinação de muitos trens de ondas sem uma direção de propagação definida (diverge) e sem relações de fase definidas (incoerente)

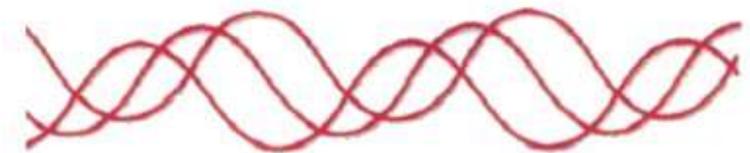
Luz laser



- No laser os elétrons dos átomos emitem na mesma direção e ou ao mesmo tempo ou com diferença de tempo igual a um ou mais períodos de oscilação da onda:.
- O resultado é uma combinação coerente de ondas, colimadas e com uma intensidade muitíssimo maior que a da emissão incoerente.



Sunlight (many different colors)



LED: one color (monochromatic) and waves not in phase (non-coherent)



LASER: One color (monochromatic) and waves in phase (coherent)

Para saber mais veja a apostila de Complementos 2, (Vuolo), p.194 ou "Physics" de Ohanian p.942



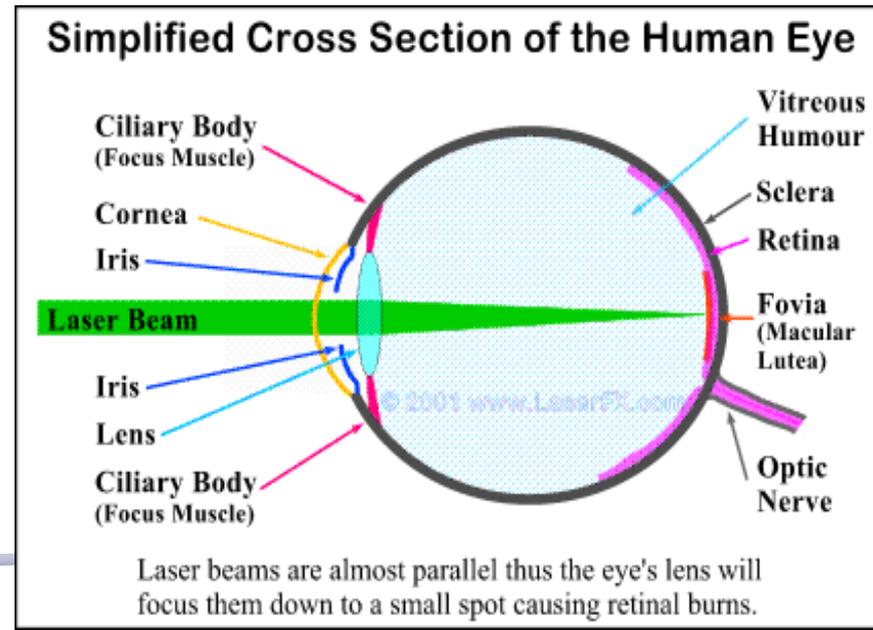
Atenção



- O laser representa grande perigo para os olhos porque a retina é extremamente sensível à luz.
- Você sabe que luz proveniente do sol, focalizada por uma lente pode matar formigas, o laser que é um feixe intenso de luz coerente, ao ser focalizado pelas lentes oculares na retina, queima as células do ponto atingido.

• O dano é irreversível

portanto jamais olhe ou aponte um laser para os olhos de alguém, mesmo lasers de chaveirinhos



Aula de Hoje

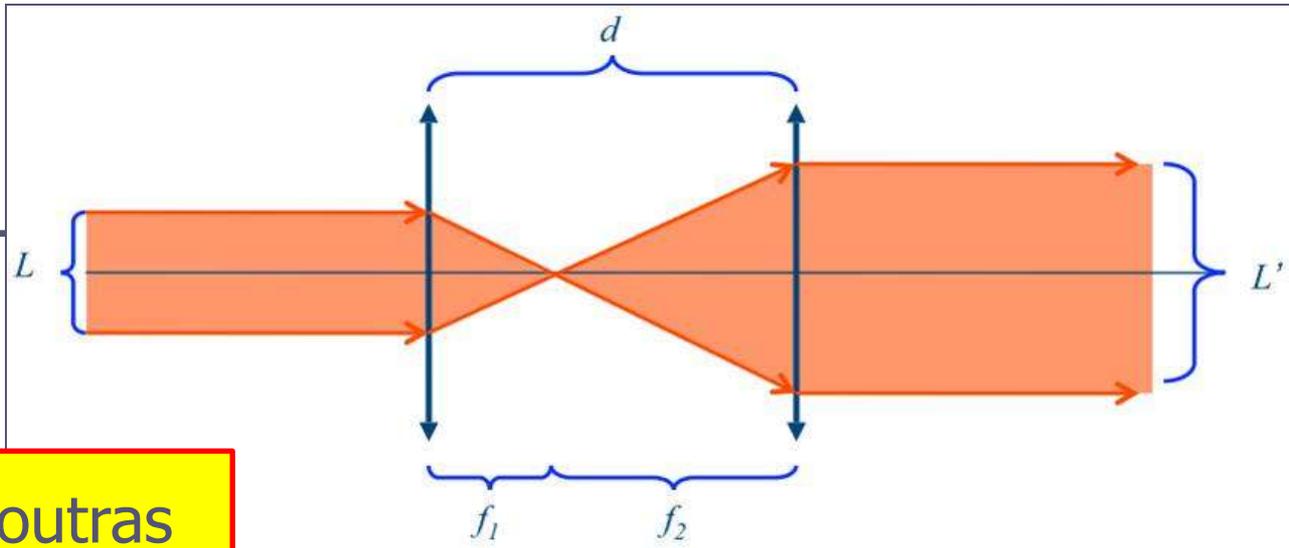
Para o Computador Óptico precisamos:

- **Iluminar o objeto com luz coerente:**

- **Problema:** a fonte de laser disponível só permite iluminar objetos muito pequenos, porque o diâmetro do feixe é da ordem de **1 a 2mm**
- **Solução:** temos que aumentar o diâmetro desse feixe para iluminar objetos da ordem de alguns **cm**

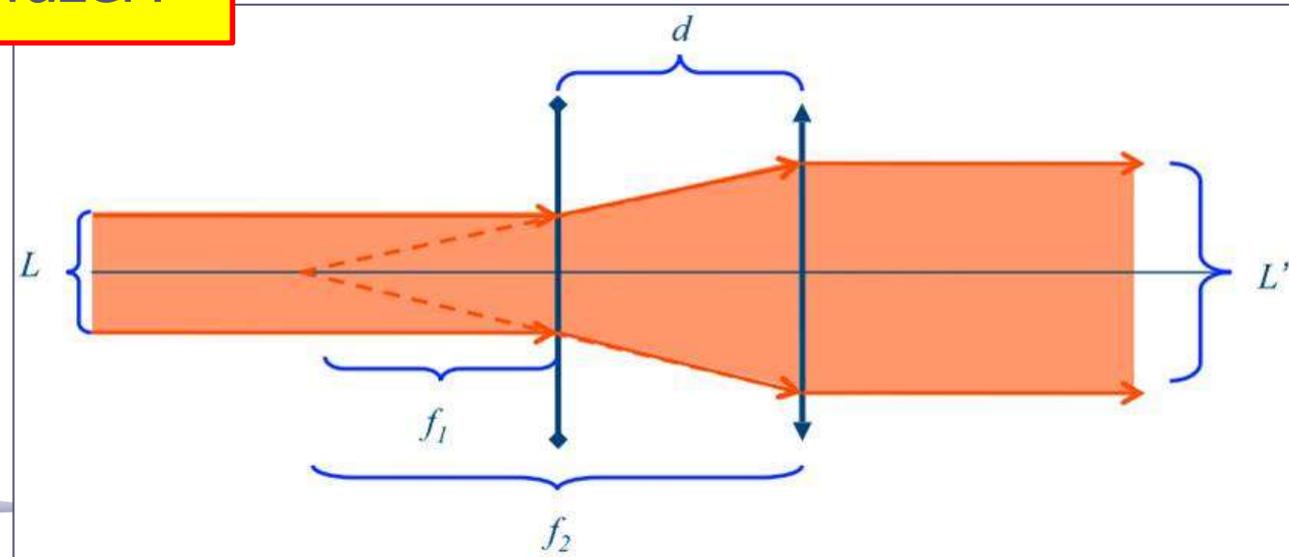
Opções...

- Sistema convergente + convergente



De quais outras maneiras podemos fazer?

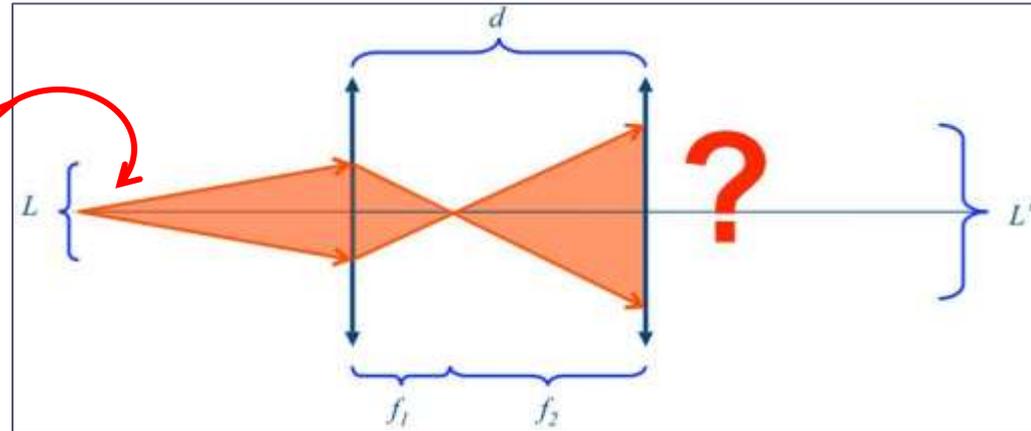
- Sistema divergente + convergente



Possíveis Problemas

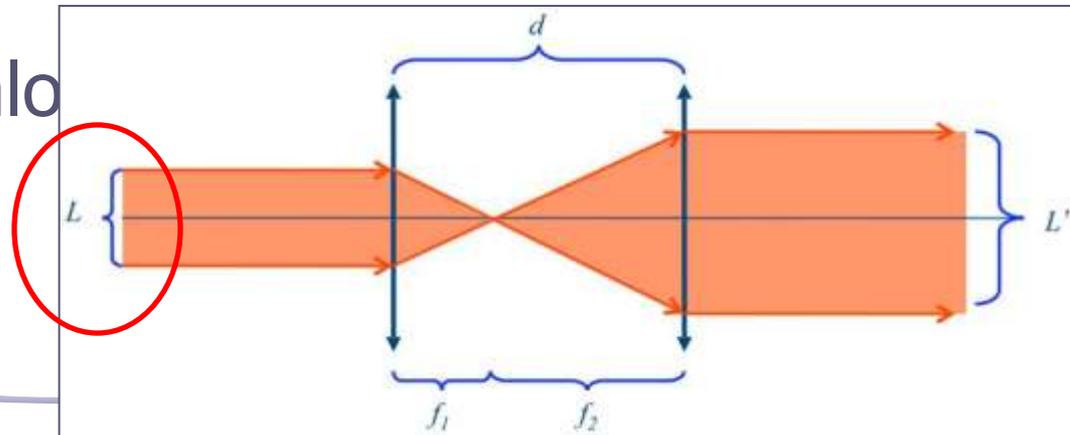
- E se o feixe incidente tiver divergência não nula? O que muda?

Define-se a divergência como sendo o ângulo de abertura do feixe



- Como medir o diâmetro inicial, L , do laser?
 - quase pontual
 - muito brilhante: halo

$$M = \frac{L'}{L}$$





PARTE 2

**MAIS SOBRE O MÉTODO
MATRICIAL**

Tipos de Lentes: Dimensões

- Lentes podem ser **delgadas** ou **espessas**
 - Lentes delgadas são aquelas que as suas dimensões não importam, ou seja, não importa onde o raio de luz atinge a lente, o efeito será sempre o mesmo.
 - Lentes espessas são aquelas que as dimensões e posição de incidência dos raios são importantes

Vocês concluíram que as nossas lentes podem ser consideradas delgadas



Tipos de Lentes: Complexidade

- Lentes podem ser:
 - **simples:** quando têm um único elemento óptico
 - **compostas:** quando têm mais de um elemento óptico



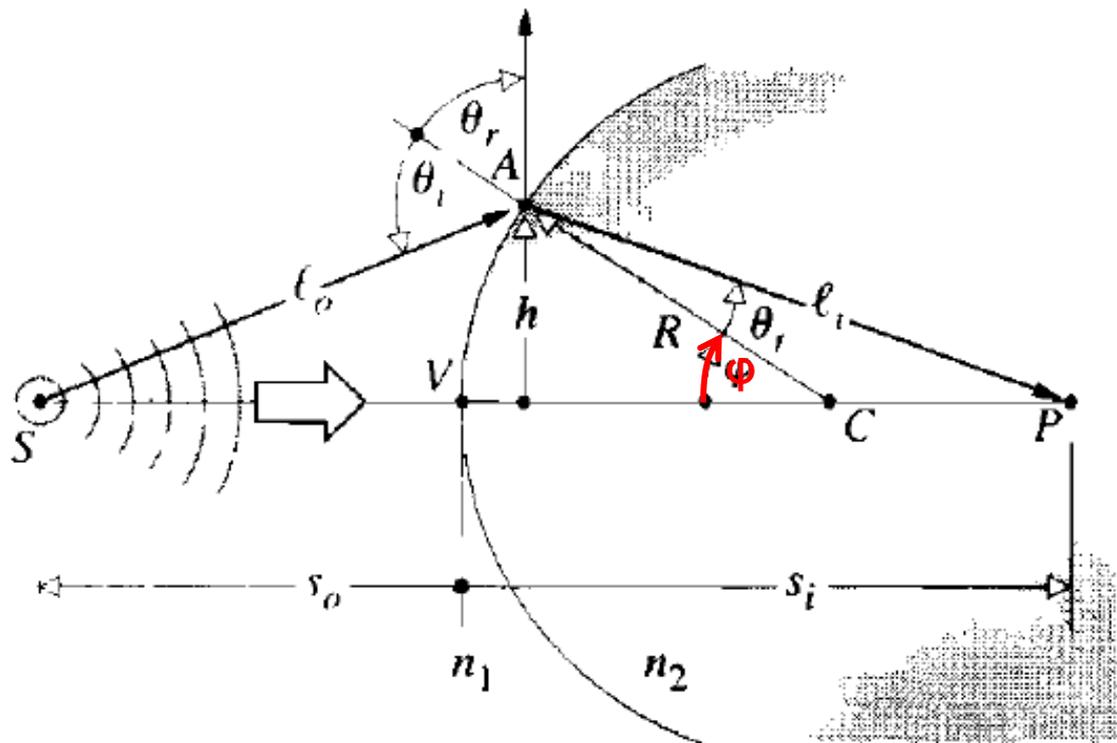
Para aumentar o diâmetro teremos que usar uma composição!



Aproximação Paraxial

Para lentes **simples** e **compostas**, ou **delgadas** e **espessas**, precisamos da aproximação paraxial para a óptica geométrica:

- Um raio paraxial tem direção próxima da direção do eixo, ou seja, incide na lente em ângulos pequenos, de tal modo que:



$$\tan \varphi \approx \varphi < 10^\circ$$

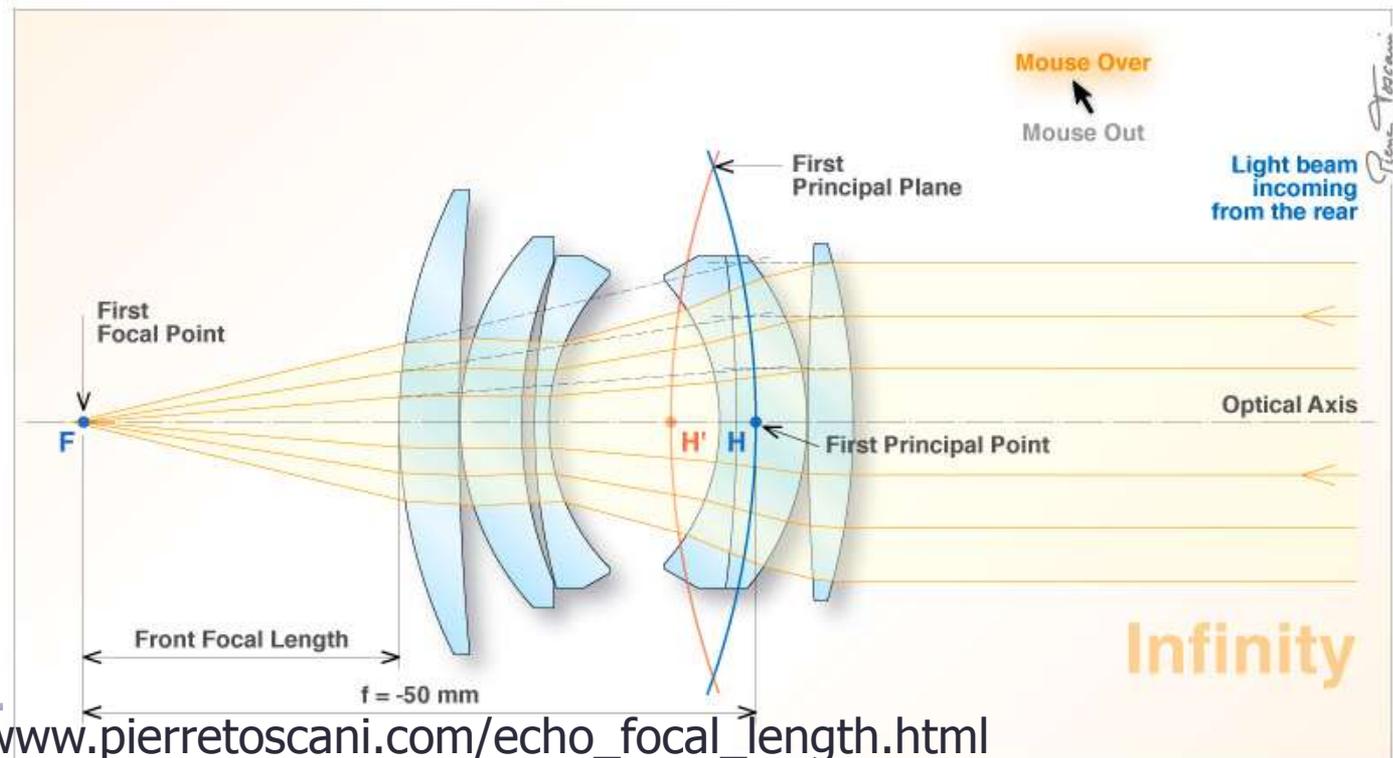
$$h < R / 6$$

Figure 5.6

Refraction at a spherical interface. Conjugate foci.

Lentes Espessas

- Como trataremos de uma associação de lentes, apesar de cada uma ser delgada, **a associação não será delgada!**
 - Ou seja, as distâncias são obtidas a partir dos planos principais da lente (H_1 e H_2)



Associação de Lentes

- Quando colocamos 2 ou mais lentes juntas fica muito complicado calcular a trajetória de cada raio e o efeito final.
 - Possível resolver numericamente (simulação: RayTrace)
- Muito mais simples resolver usando o **método matricial**:
 - a grande vantagem é poder escrever a propagação de um raio luminoso por matrizes independentes para cada meio envolvido e combiná-las.

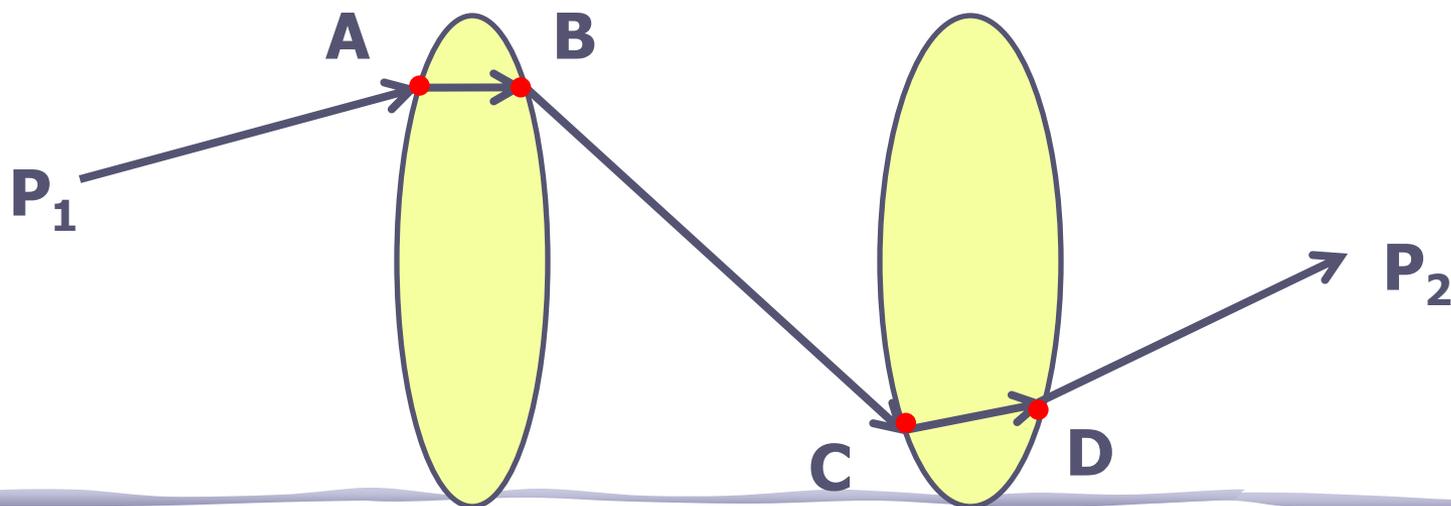
Associação de Lentes

- Quando temos uma associação de lentes, a única diferença é que teremos mais matrizes:

$$P_2 = M_{P_1 \rightarrow P_2} P_1$$

- Neste caso:

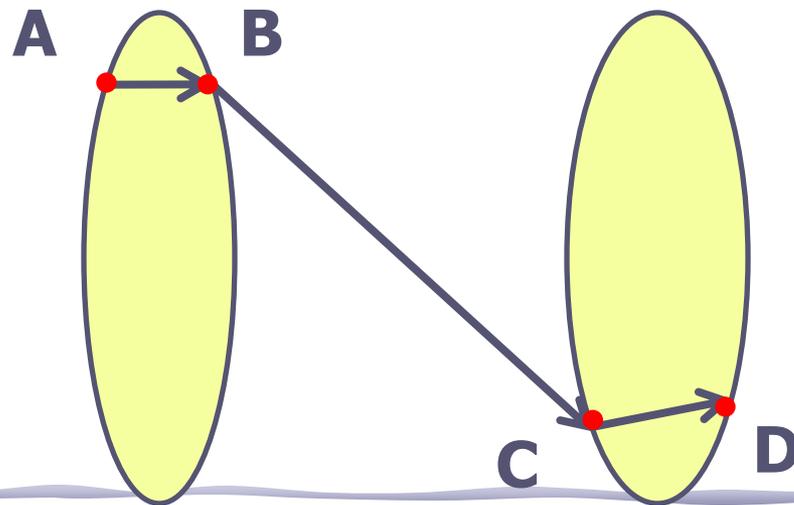
$$M_{P_1 \rightarrow P_2} = M_{D \rightarrow P_2} \cdot M_{C \rightarrow D} \cdot M_{B \rightarrow C} \cdot M_{A \rightarrow B} \cdot M_{P_1 \rightarrow A}$$



Associação de Lentes

- Vamos nos concentrar apenas na matriz de transferência da lente equivalente
- Neste caso:

$$M_{A \rightarrow D} = M_{C \rightarrow D} \cdot M_{B \rightarrow C} \cdot M_{A \rightarrow B}$$



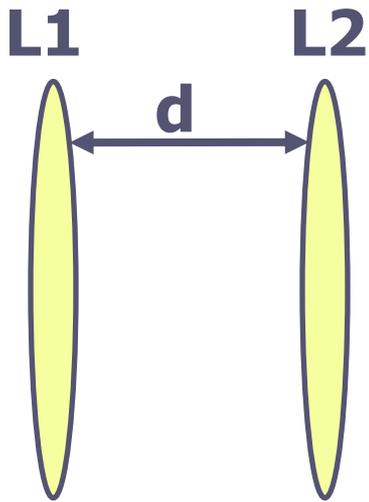
Associação de Lentes

- Vamos nos concentrar apenas na matriz de transferência da lente equivalente:

$$M_{L1+L2} = M_{Lente2} \cdot M_{L1 \rightarrow L2} \cdot M_{Lente1}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) - \frac{1}{f_1} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix}$$



Associação: distância focal

- O termo inferior esquerdo é o negativo do inverso da distância focal (ver apostila):

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad C = \frac{-1}{f}$$

- Portanto

$$\frac{-1}{f} = -\frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) - \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Associação: planos principais

- Os planos principais também podem ser calculados com os coeficientes da matriz de transferência (ver apostila):

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad h_1 = \frac{D-1}{C} \quad \text{e} \quad h_2 = \frac{A-1}{C}$$

- Portanto:

$$h_1 = -f_{eq} \left[\left(1 - \frac{d}{f_2} \right) - 1 \right] = d \frac{f_{eq}}{f_2}, \quad h_2 = d \frac{f_{eq}}{f_1}$$

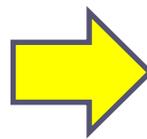
Como aumentar o feixe do laser

- No caso do feixe do laser, queremos que um feixe paralelo, saia paralelo $\phi_1 = \phi_2 = 0$, portanto:

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) - \frac{1}{f_1} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix}$$

$$r_2 = \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) r_1 + d \phi_1$$

$$\phi_2 = -\frac{1}{f_{eq}} r_1 + \left(1 - \frac{d}{f_2}\right) \phi_1$$



$$-\frac{1}{f_{eq}} r_1 = 0$$

Como aumentar o feixe do laser

- Isso significa que $f_{\text{eq}} = \infty$, ou:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} = 0$$

- E portanto:

$$d = f_1 + f_2$$

Como aumentar o feixe do laser

- A magnificação pode ser calculada como:

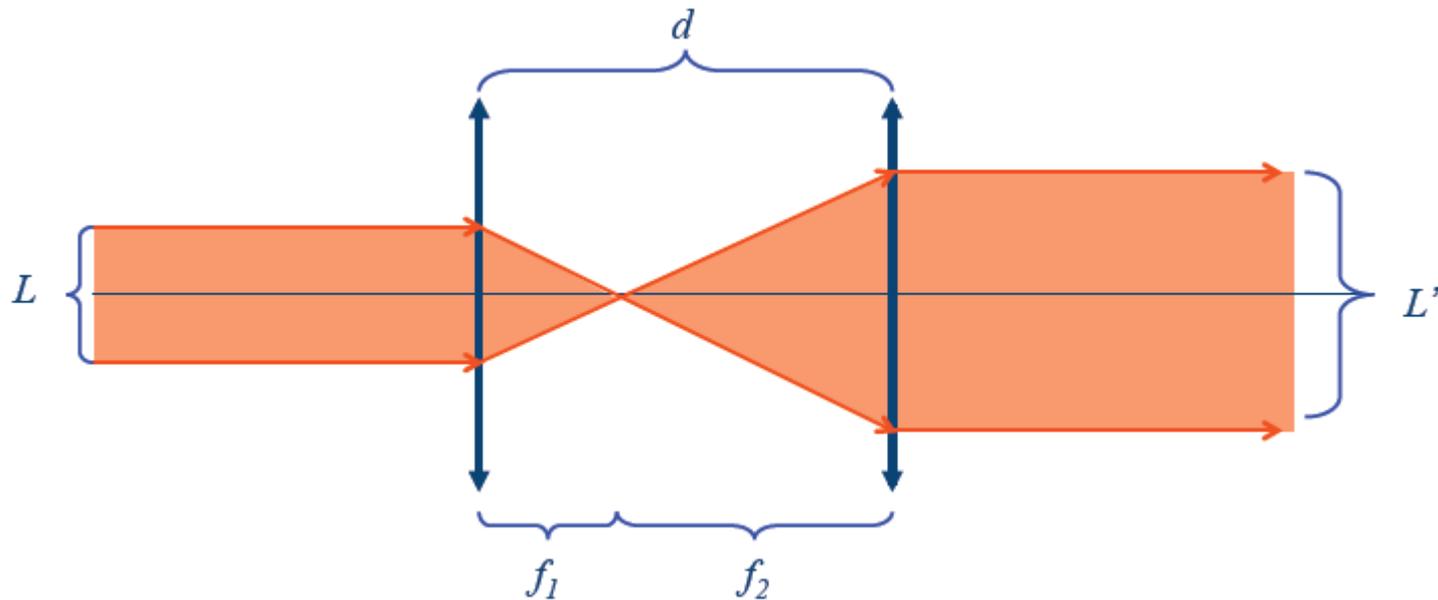
$$M = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{onde:} \quad r_2 = \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)r_1 + d\phi_1$$

- Como $\mathbf{d} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$, e $\boldsymbol{\phi}_1 = \mathbf{0}$, temos:

$$r_2 = \left(1 - \frac{f_1 + f_2}{f_1}\right)r_1 = -\frac{f_2}{f_1}r_1 \quad \Rightarrow \quad M = -\frac{f_2}{f_1}$$

ESTA SEMANA

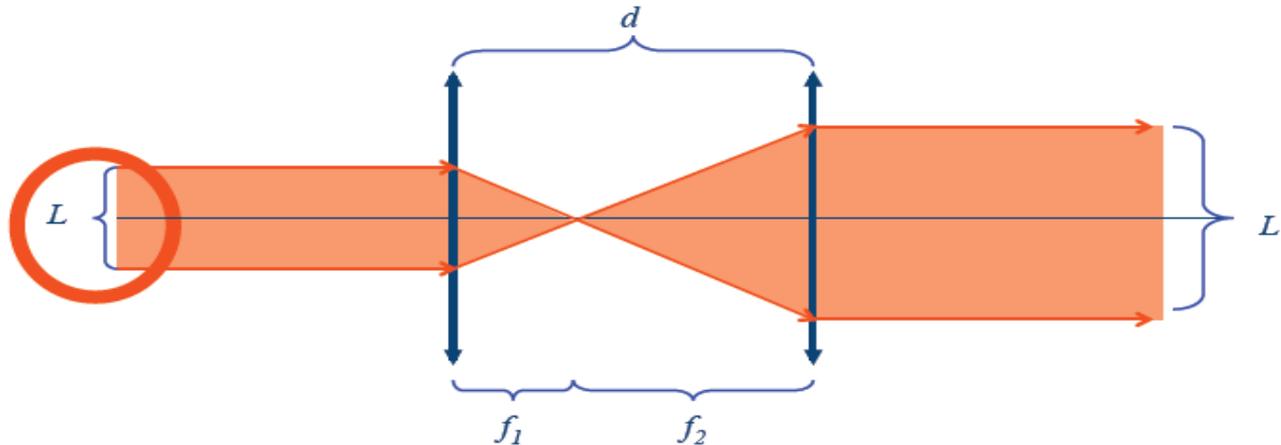
- Vamos usar um sistema de duas lentes convergentes para aumentar o diâmetro do feixe laser. Vamos usar este método porque não temos as lentes divergentes apropriadas para a magnificação necessária.



- O feixe entra paralelo e deve sair paralelo.

Medida dos diâmetros

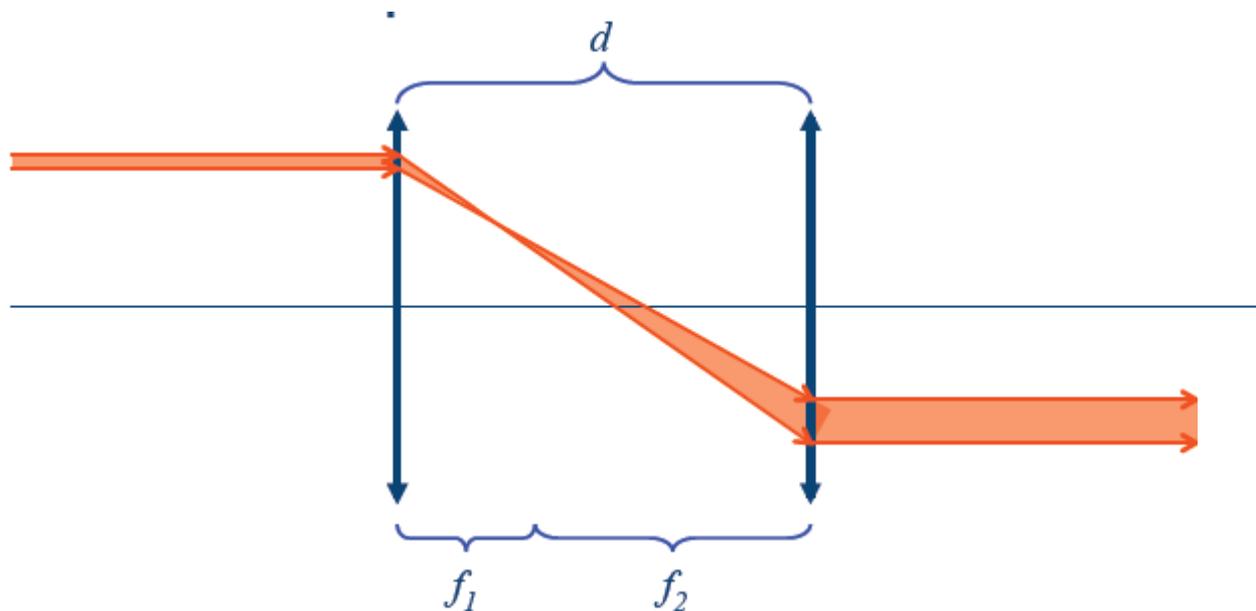
- Como medir esses diâmetros?



- Mesmo que não seja divergente: o laser é muito brilhante (e tem um halo) e o diâmetro é muito pequeno antes do aumento, será que o erro da medida seria aceitável?
 - Faça uma conta aproximada. Se achar que não dá, há outra maneira de medir isso, com erro percentual menor?

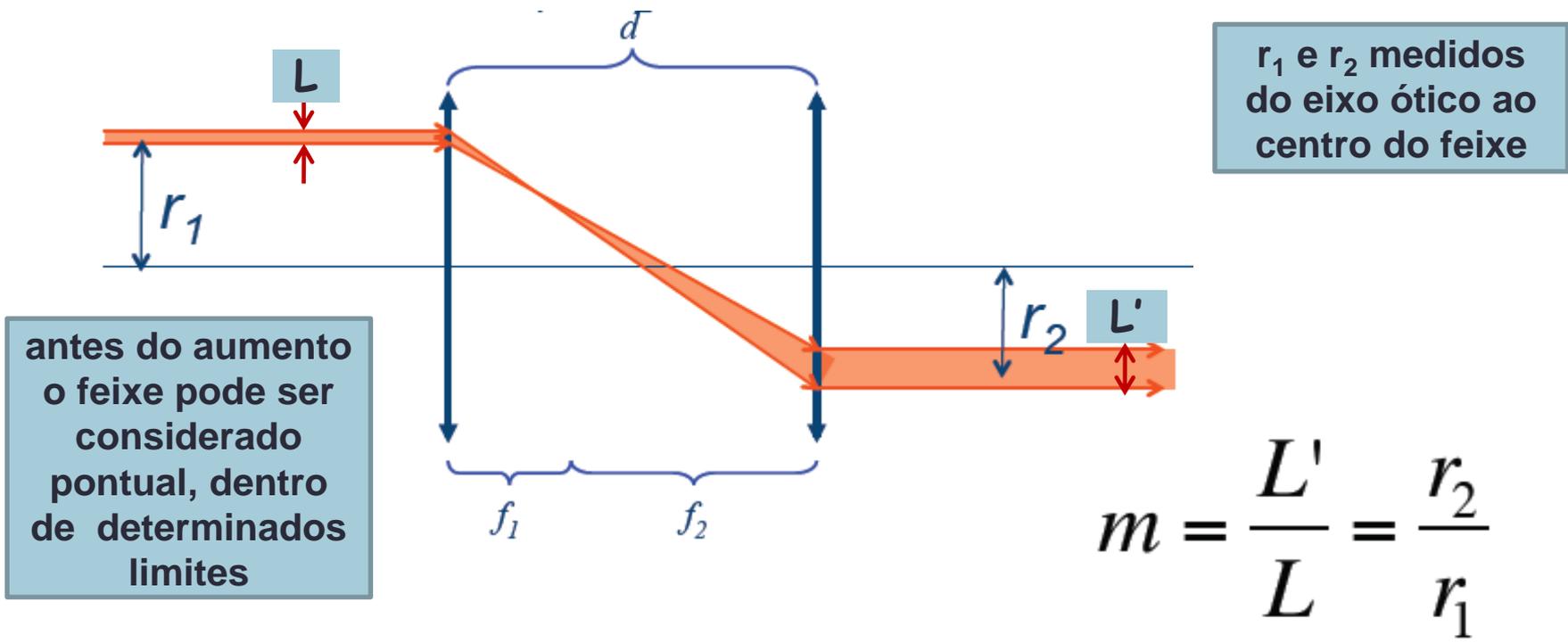
Medida dos diâmetros

- A solução é tratar o feixe como pontual e fazer medidas fora do eixo óptico:



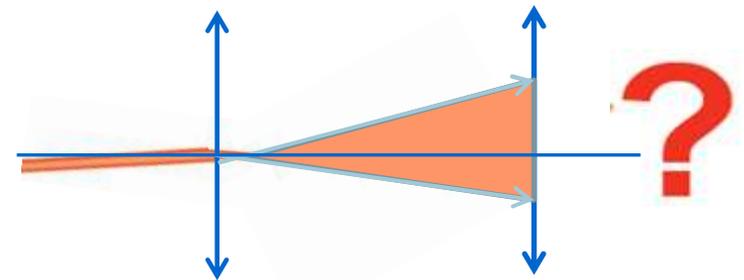
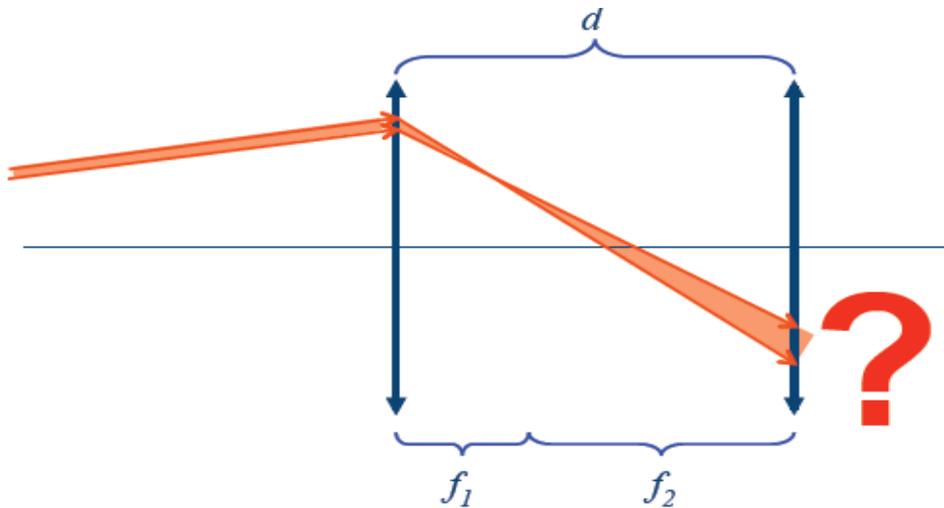
Medida dos diâmetros

- Em vez de medir os diâmetros, tiramos o laser do eixo da lente e medimos os deslocamentos r_1 e r_2 :



Verificação se o feixe é paralelo

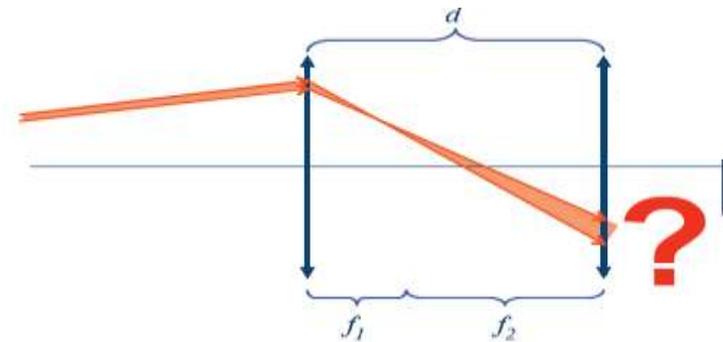
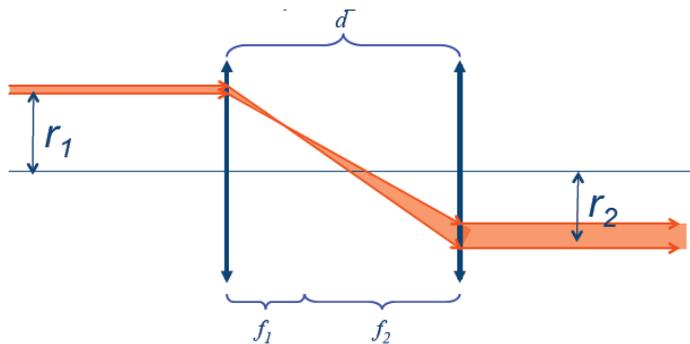
- Mas e se o feixe incidente não for paralelo ao eixo óptico?



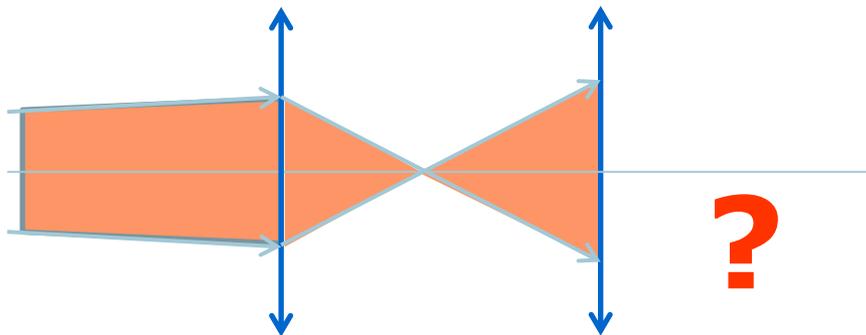
- Verifique o valor de r_2 em vários pontos ao longo do trilho, caso ele varie, refaça o alinhamento!

Pode escolher como medir

- Para medir a divergência, o paralelismo e a magnificação do feixe na saída pode escolher a montagem com o laser fora do eixo óptico:



- ou com o laser no eixo óptico



Quais as vantagens do método que escolheu?

Tarefas 1 – para síntese

- Medir a divergência do feixe
 - Dica: projetá-lo a uma distância grande ou através da medida de **r1** e **r2**.
- Montar um sistema ótico de duas lentes convergentes com distâncias focais conhecidas para aumentar o diâmetro do feixe
 - Experimentalmente, qual a distância entre as lentes para que o feixe saia paralelo? Compare com o valor teórico esperado
 - A previsão teórica está de acordo com a distância medida na bancada? Se não estiver explique porque usando o Raytrace.

Tarefas 2 – para síntese

- Medir a magnificação do feixe através das medidas de r_1 e r_2 , ou através dos diâmetros do feixe antes e depois do sistema de lentes:
 - Precisa medir vários valores e apresentá-los de maneira convincente, com erros aceitáveis.
 - Utilize valores de r_1 acima ou abaixo do eixo.
- Demonstre o paralelismo do feixe na saída:
 - pode ser feito com qualquer uma das montagens escolhidas
 - o paralelismo deve ser verificado através de várias medidas ao longo de todo o comprimento do trilho.

Tarefas 3 – para relatório

- A magnificação obtida pelo método matricial está de acordo (dentro dos erros experimentais) com a medida na bancada? Discuta.
- Simule, com o programa Raytrace, o sistema de lentes utilizado.
 - Determine os planos principais da associação
 - Determine o foco da associação
 - Compare com os valores esperados pelo método matricial

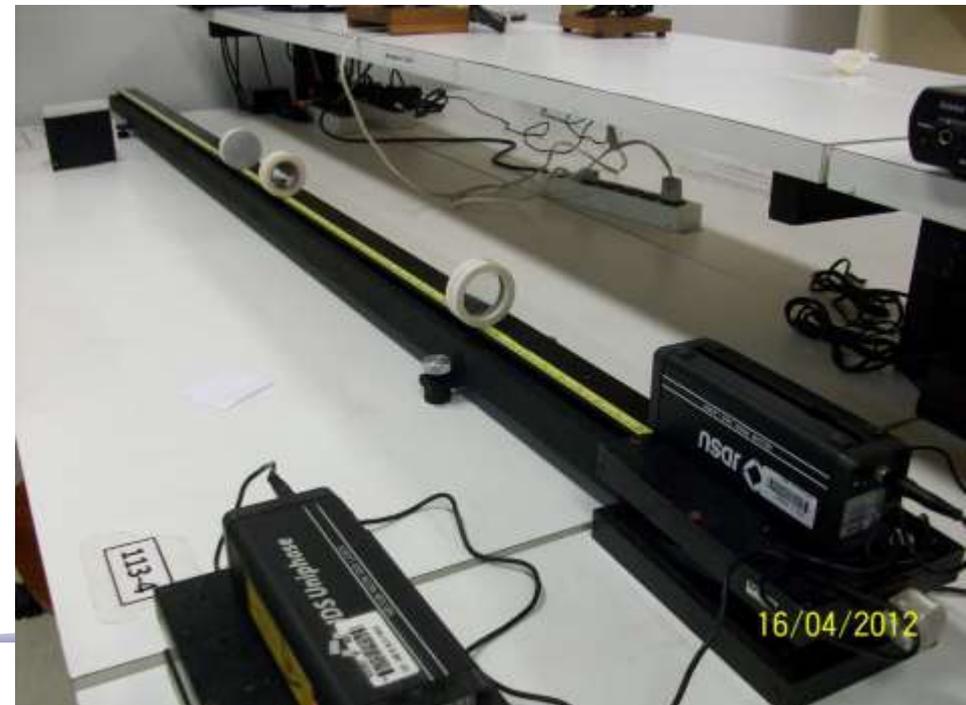
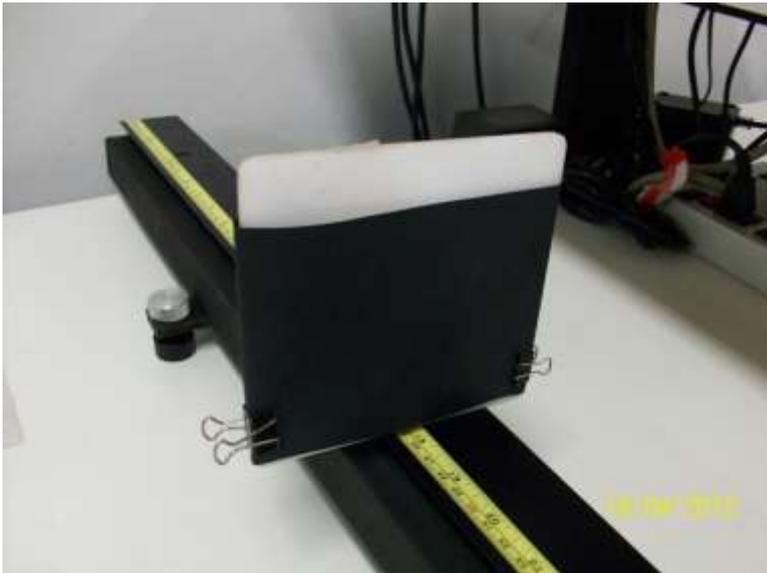
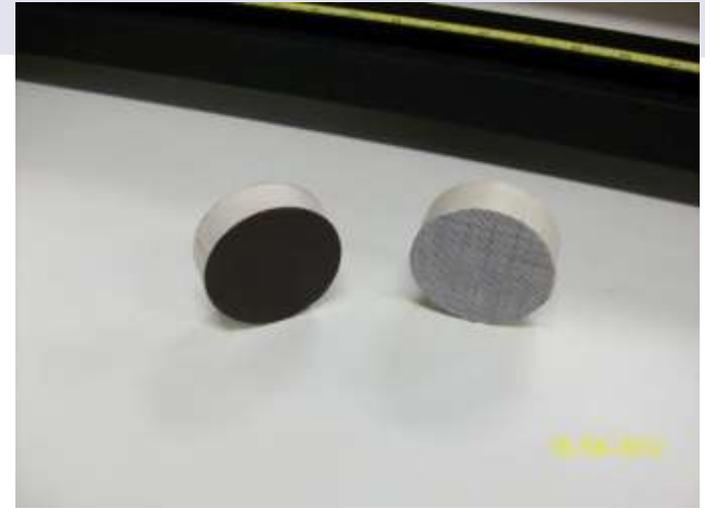
Tarefas 4 - EXTRA

O laser tem uma divergência, ie $\varphi_1 > 0$,
assim:

- Calcule qual a divergência na saída se for usado $\mathbf{d} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$.
- Calcule usando o método matricial qual deve ser a separação \mathbf{d}' entre as lentes para se ter $\varphi_2 = 0$
 - Discuta se o deslocamento $\mathbf{d}' - \mathbf{d}$ era perceptível/mensurável na montagem de vocês

Equipamento

- Laser com suporte ajustável
- Lentes $f = \sim 5\text{cm}$, $\sim 15\text{cm}$ (veja na tabela que está na sala, qual o foco da sua lente)
- Trilho com trena milimetrada
- Anteparo
- Papel milimetrado, paquímetro



Avisos

- Veja na tabela que está na sala, qual o foco da sua lente, elas estão numeradas.
- Os trilhos estão alinhados com os lasers, para facilitar para vocês, então:
 - Não toque no laser, basta ligar a régua de tomadas que eles ligam.
 - Não coloque seu material sobre a bancada
- Mas se desalinhar não tem problema, vocês alinham de novo.

Dicas

- Para alinhar use o anteparo redondo da dimensão dos suportes com lente, ele tem uma escala milimetrada, com cruzamento no centro:
 - sem as lentes o feixe deve permanecer no centro pelo menos até 1m do laser
- Quando subir ou descer o suporte do laser faça com cuidado para não desalinhar:
 - você sempre pode monitorar com o anteparo acima

Dicas

- Use o anteparo retangular para marcar as posições e diâmetro do laser:
 - tem tirinhas de papel milimetrado à sua disposição, assim como papel preto

Ray Trace



Raytrace

