

# Física Experimental IV

[www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

[www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

Prof. Antonio Domingues dos Santos

[adsantos@if.usp.br](mailto:adsantos@if.usp.br)

Ramal: 6886

Mário Schemberg, sala 205

## Aula 2 – Computador Óptico

## Laser + Associação de Lentes

Prof. Leandro Barbosa

[lbarbosa@if.usp.br](mailto:lbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 7157

Ala I, sala 225

Prof. Henrique Barbosa

**(coordenador)**

[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 6647

Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin

[carlin@dfn.if.usp.br](mailto:carlin@dfn.if.usp.br)

Ramal: 6820

Pelletron

Prof. Paulo Artaxo

[artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)

Ramal: 7016

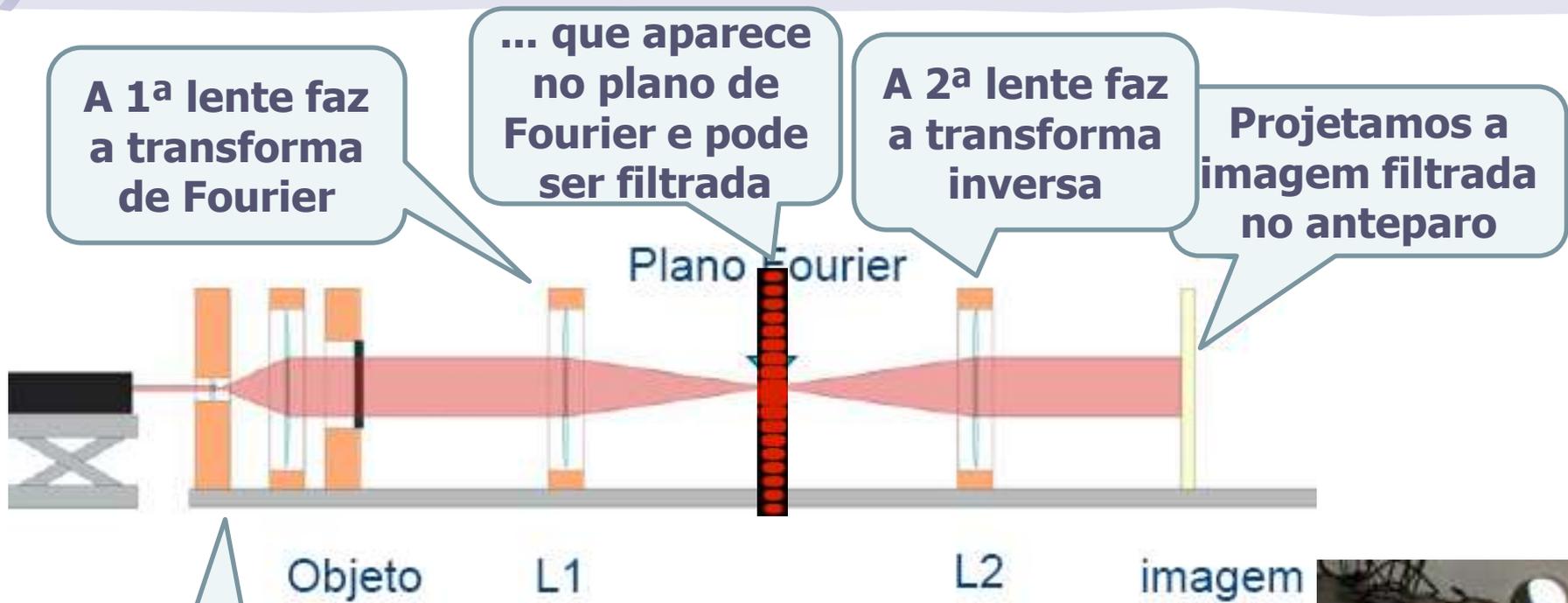
Basílio, sala 101

# 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

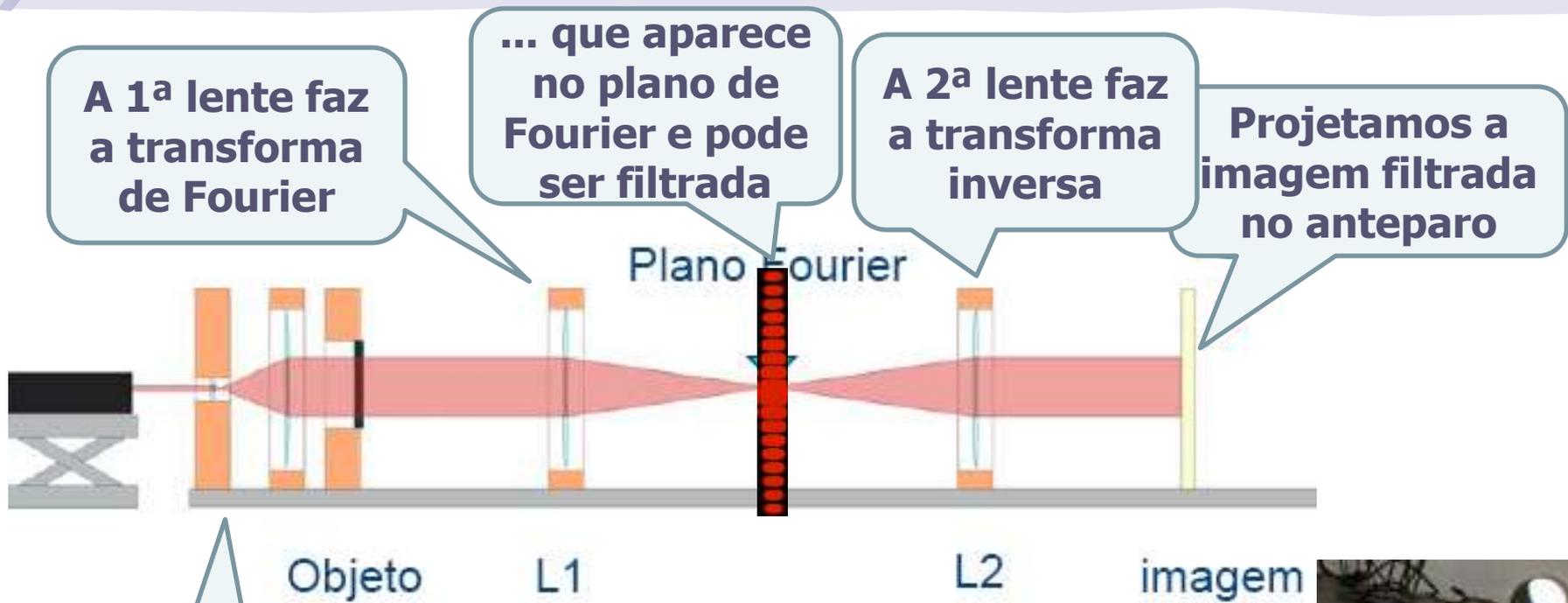
**COMPUTADOR ÓTICO**



# Programação da Exp. 2

- Aula 1: óptica geométrica
  - Medidas com lentes convergente e divergente
- Aula 2: laser
  - Associação de lentes e aumento do diâmetro do laser
- Aula 3: difração
  - Figuras de difração e espectrofotômetro
- Aula 4: transformada de fourier
  - Estudo no plano de fourier
- Aula 5: computador ótico
  - Filtro na transformada de Fourier e recompor a imagem filtrada
- Aula 6: ImageJ
  - Tratamento de imagem no computador

# Como funciona?



o laser ilumina o objeto

**COMPUTADOR ÓTICO**

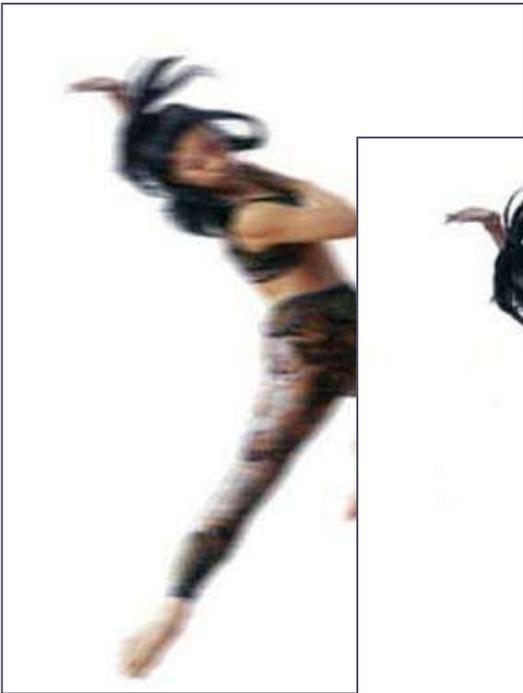


# Processamento de Imagem

- 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 optical setup. A bright blue laser beam is visible, reflecting off various components and creating a path through the apparatus. The scene is dimly lit, with the primary light source being the laser itself, which casts a strong blue glow on the equipment and the person's face. The background shows more laboratory equipment and a red light source in the distance.

**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**



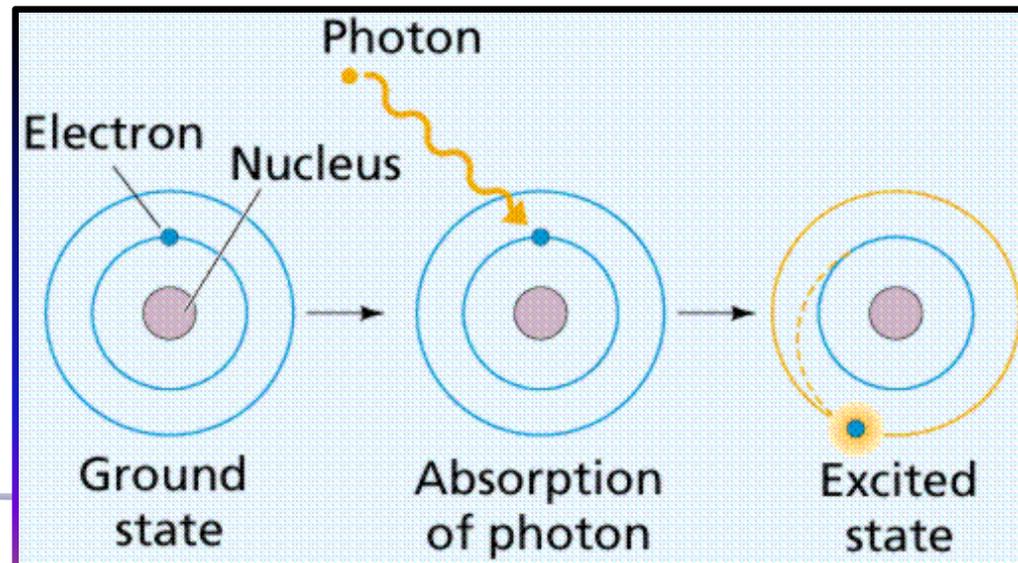
# LASER: características



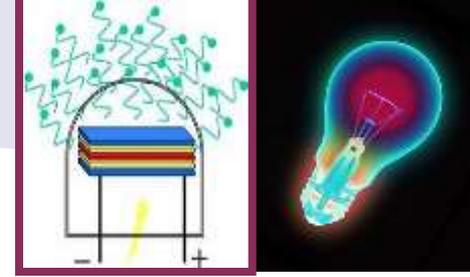
- **Monocromática:** ela consiste de uma única cor ou comprimento de onda. Embora haja atualmente lasers que geram mais de um comprimento de onda, a luz de um laser comum é muito pura, ou seja, ela consiste de um intervalo muito estreito de comprimentos de onda
- **Direcional:** o feixe é bem colimado (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...

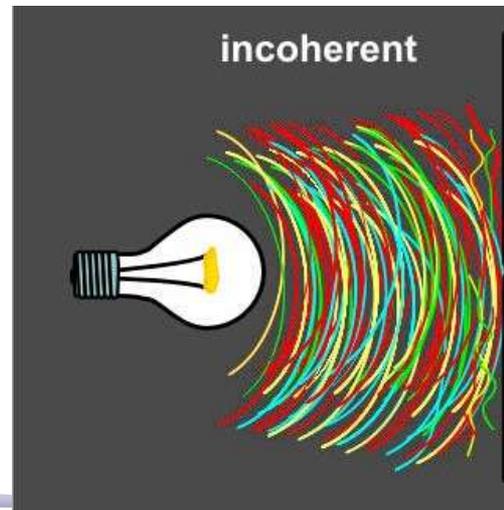
- A radiação eletromagnética é quantizada, e o “quantum” de energia eletromagnética é o **fóton**.
- Energia também é quantizada e por isto apenas algumas órbitas são possíveis para os elétrons ligados aos núcleos.
- Como os elétrons podem mudar de órbita?
  - Para uma órbita de **maior** energia: por **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

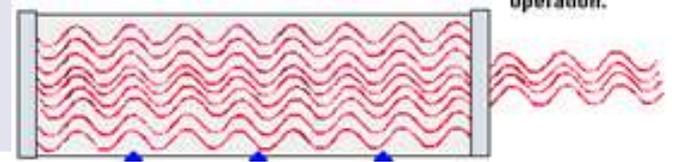


- Lâmpada comum: átomos são excitados por colisões térmicas e voltam às órbitas de menor energia depois de um intervalo de tempo emitindo um fóton.
  - Tanto a excitação como a emissão são randômicas

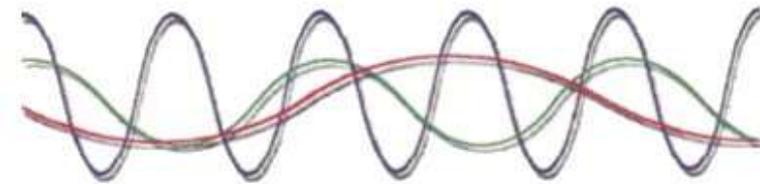


A luz da lâmpada é uma combinação de muitos trens de ondas sem uma direção de propagação definida (diverge) e sem relações de fase definidas (incoerente)

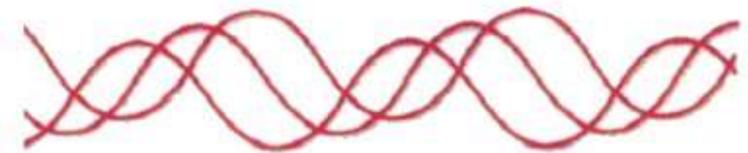
# Luz laser



- 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



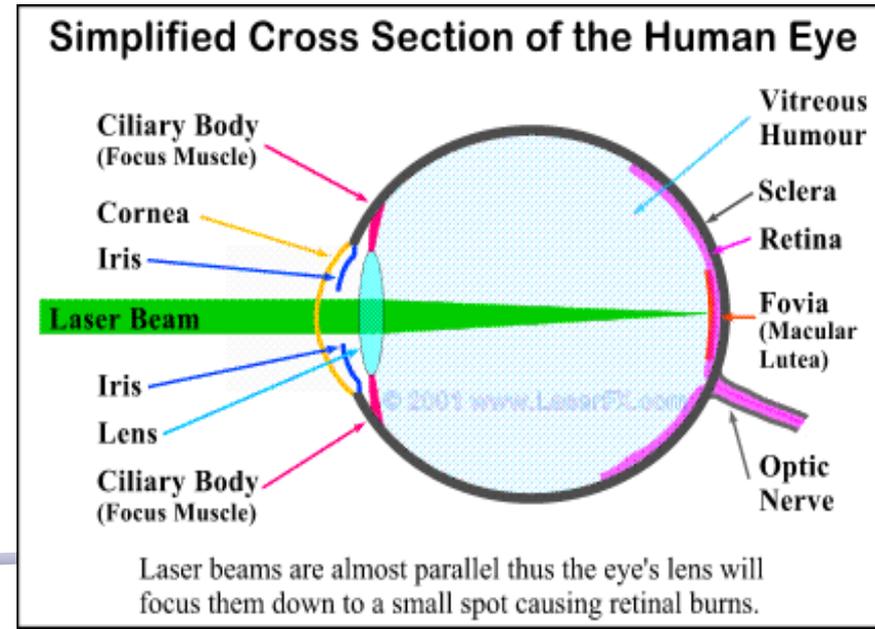
# Atenção



- 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

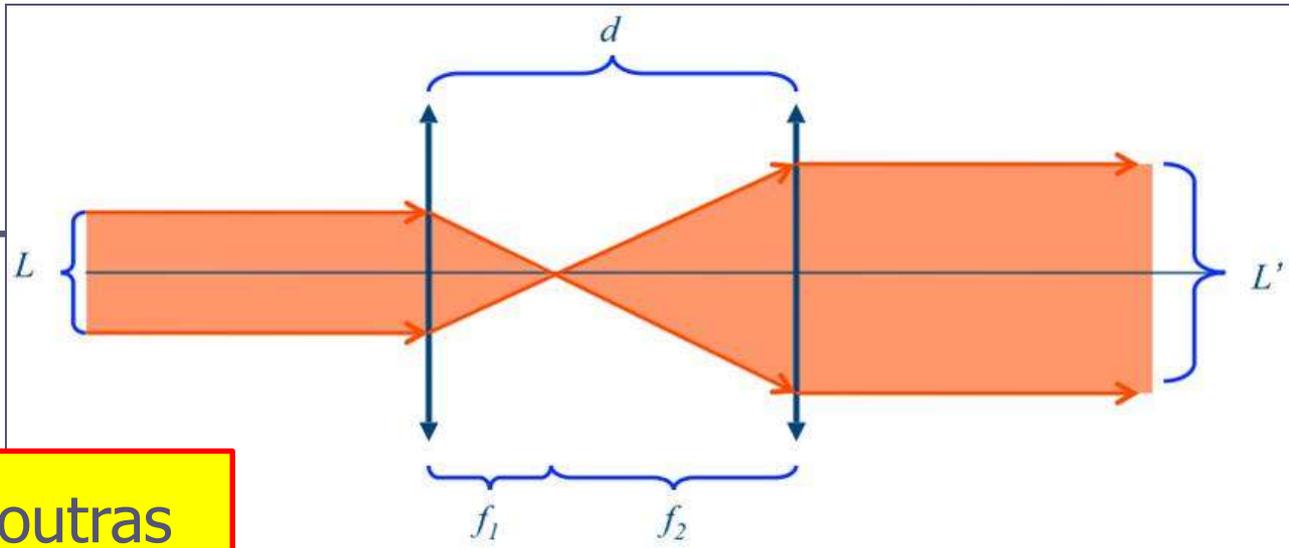
## Para o Computador Óptico precisamos:

- **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**

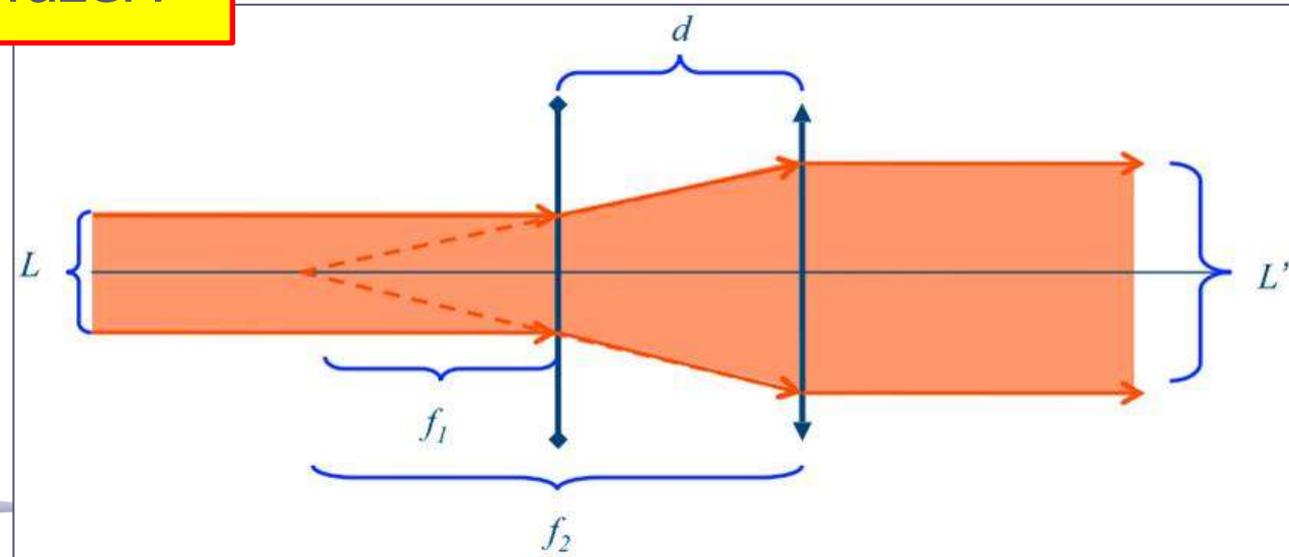
# Opções...

- Sistema convergente + convergente



De quais outras maneiras podemos fazer?

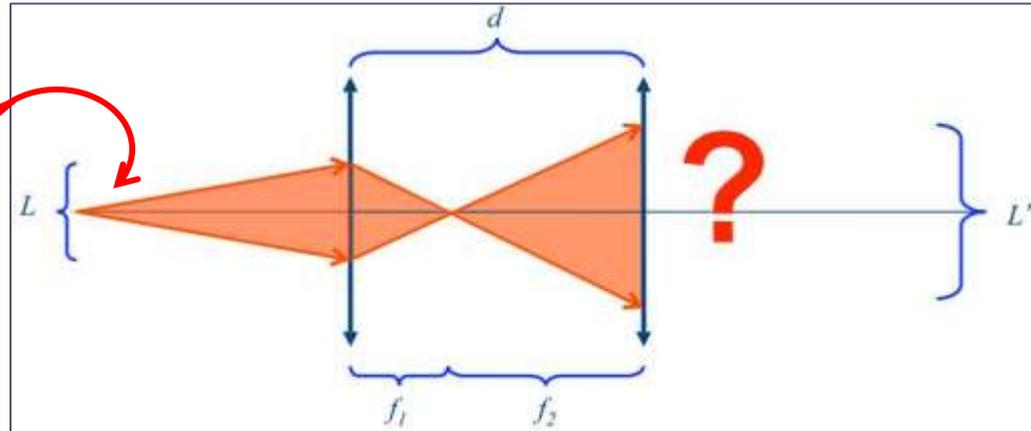
- Sistema divergente + convergente



# Possíveis Problemas

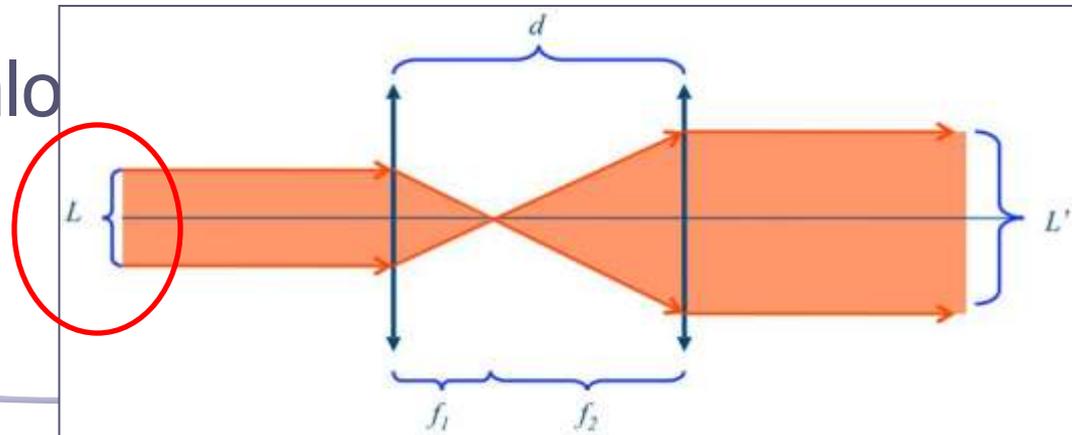
- E se o feixe incidente tiver divergência não nula? O que muda?

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

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





# 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



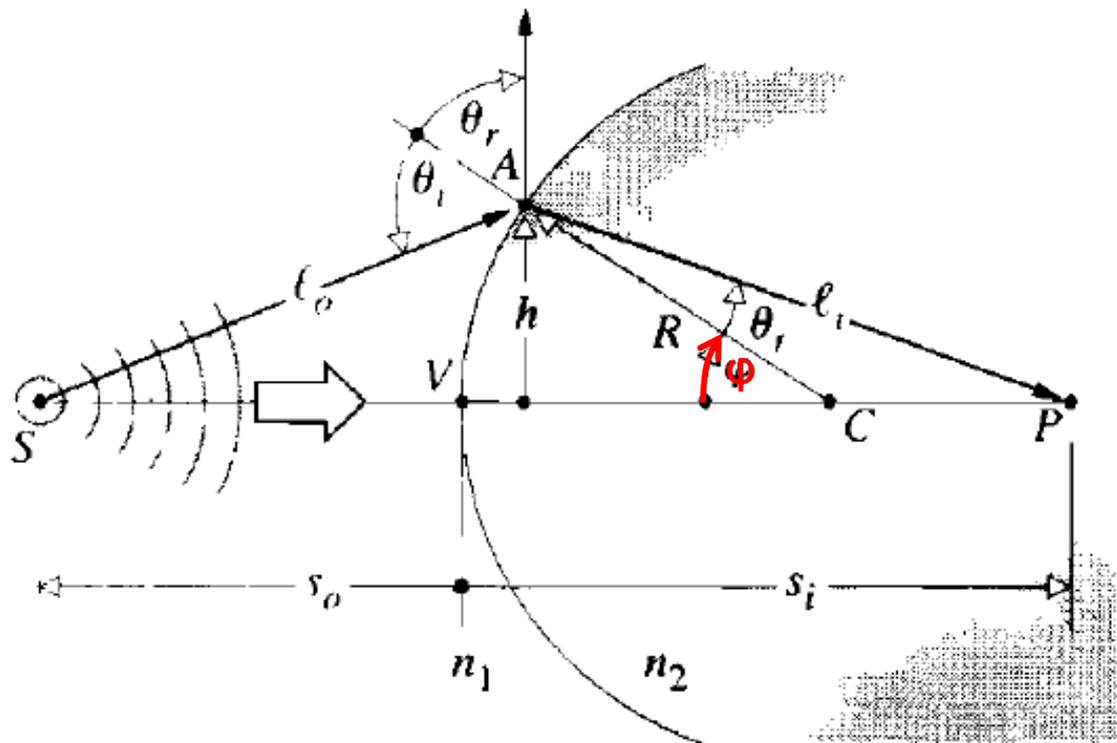
Para aumentar o diâmetro teremos que usar uma composição!



# 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:



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

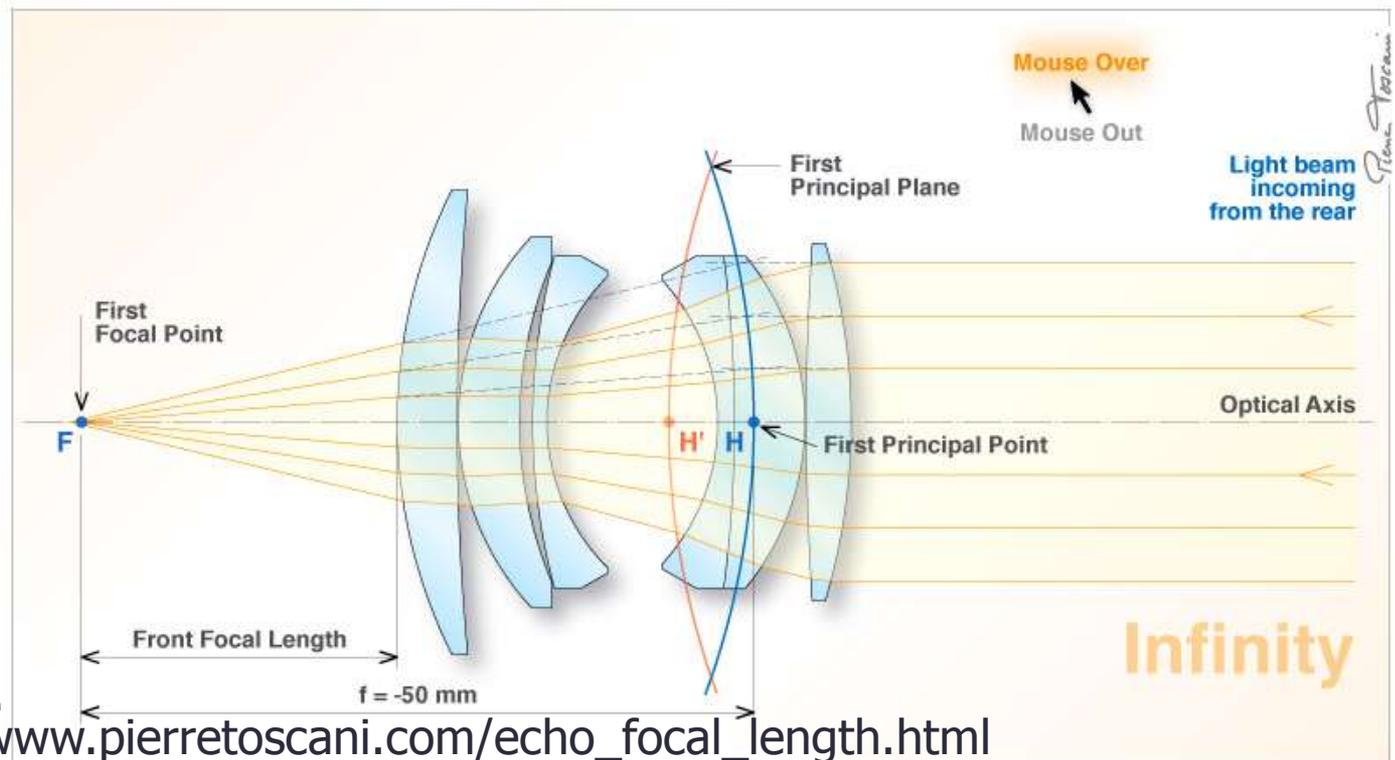
$$h < R / 6$$

**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.

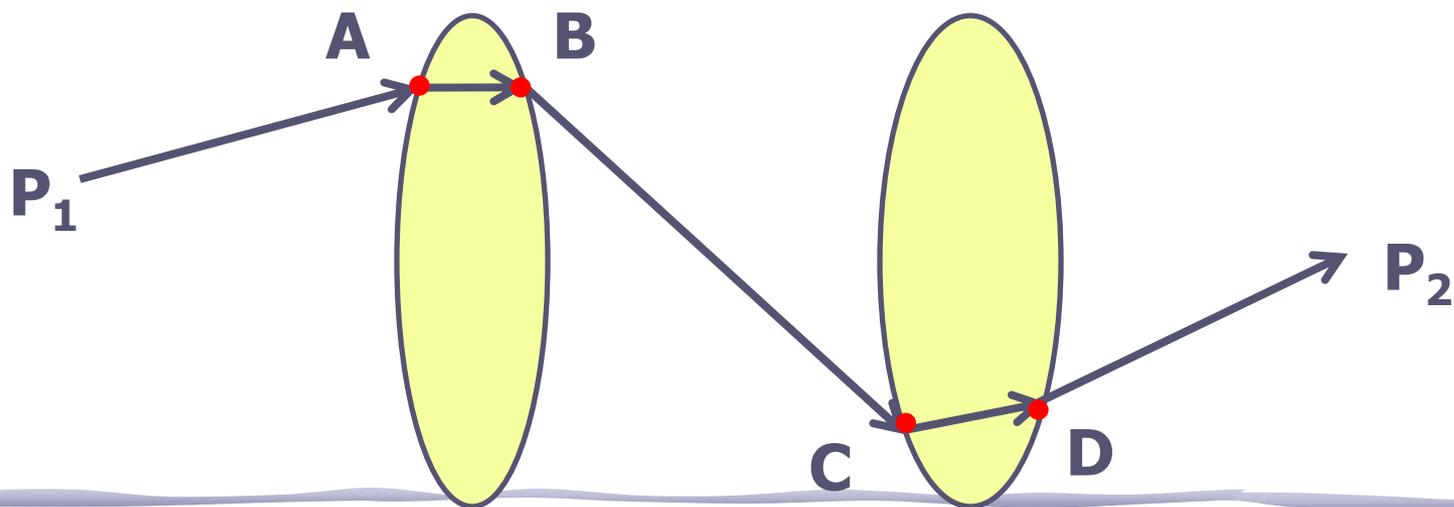
# Associação de Lentes

- 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:

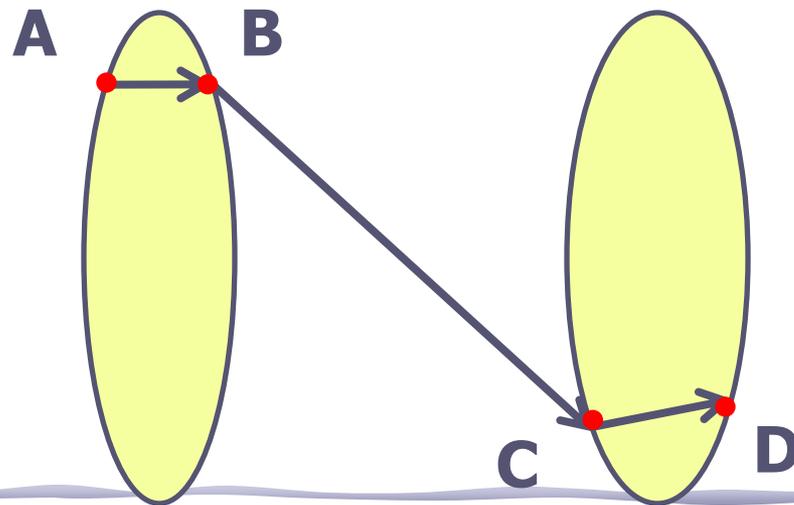
$$M_{P_1 \rightarrow P_2} = M_{D \rightarrow P_2} \cdot M_{C \rightarrow D} \cdot M_{B \rightarrow C} \cdot M_{A \rightarrow B} \cdot M_{P_1 \rightarrow A}$$



# Associação de Lentes

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

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



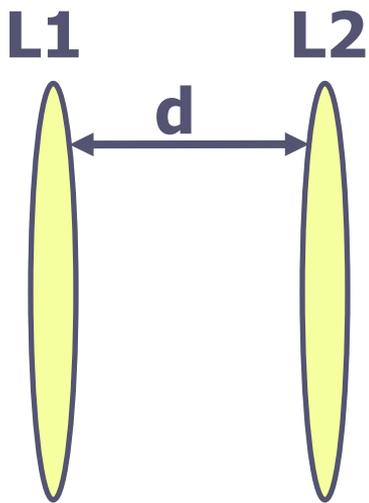
# Associação de Lentes

- 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:

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

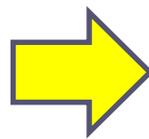
# Como aumentar o feixe do laser

- 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:

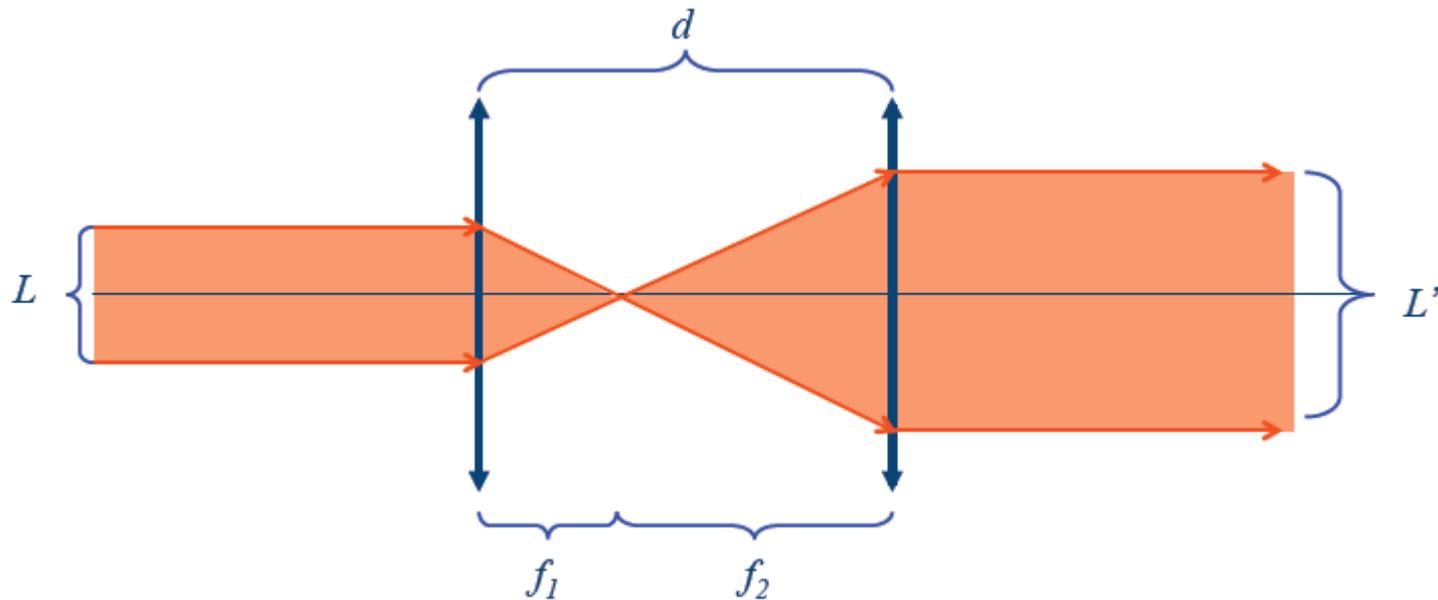
$$M = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{onde:} \quad r_2 = \left(1 - \frac{d}{f_1}\right) r_1 + d\phi_1$$

- 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

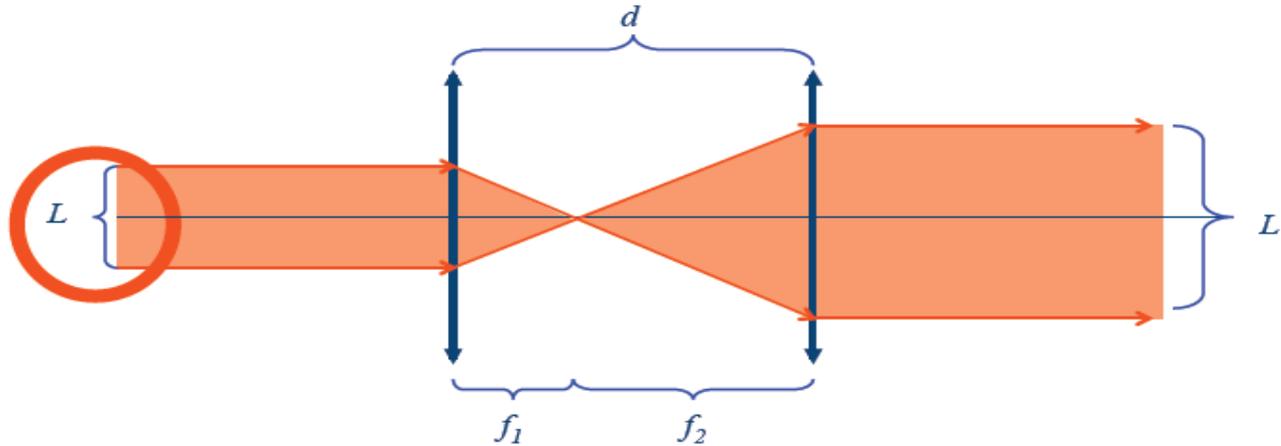
- Vamos usar um sistema de duas lentes convergentes para aumentar o diâmetro do feixe laser. Vamos usar este método porque não temos as lentes divergentes apropriadas para a magnificação necessária.



- O feixe entra paralelo e deve sair paralelo.

# Medida dos diâmetros

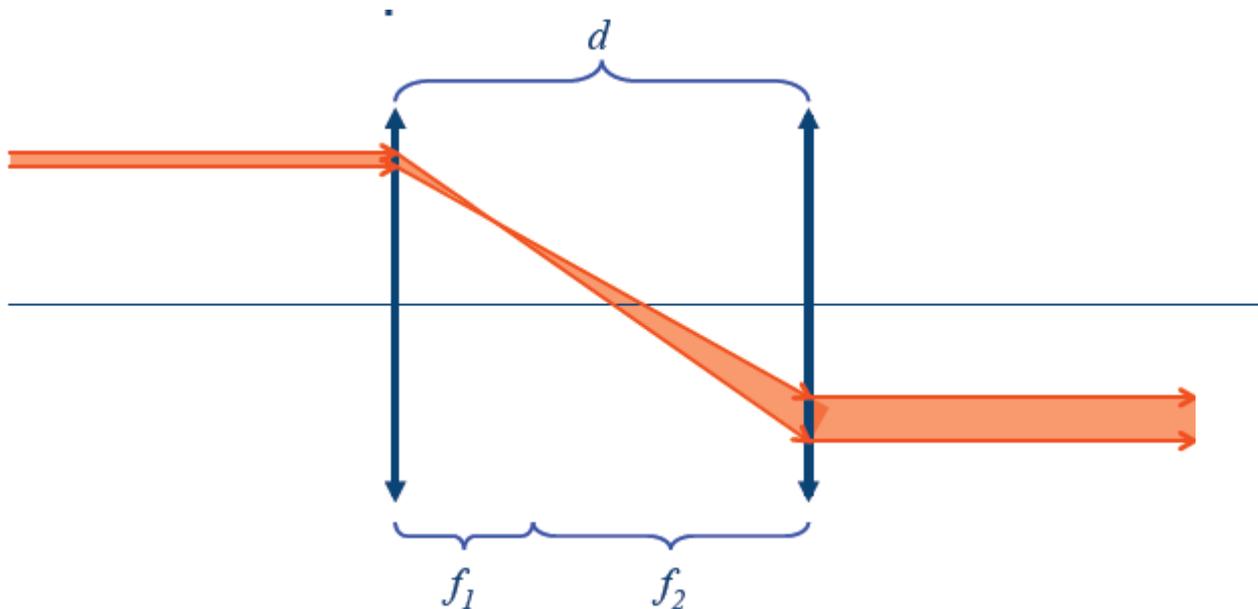
- Como medir esses diâmetros?



- 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?

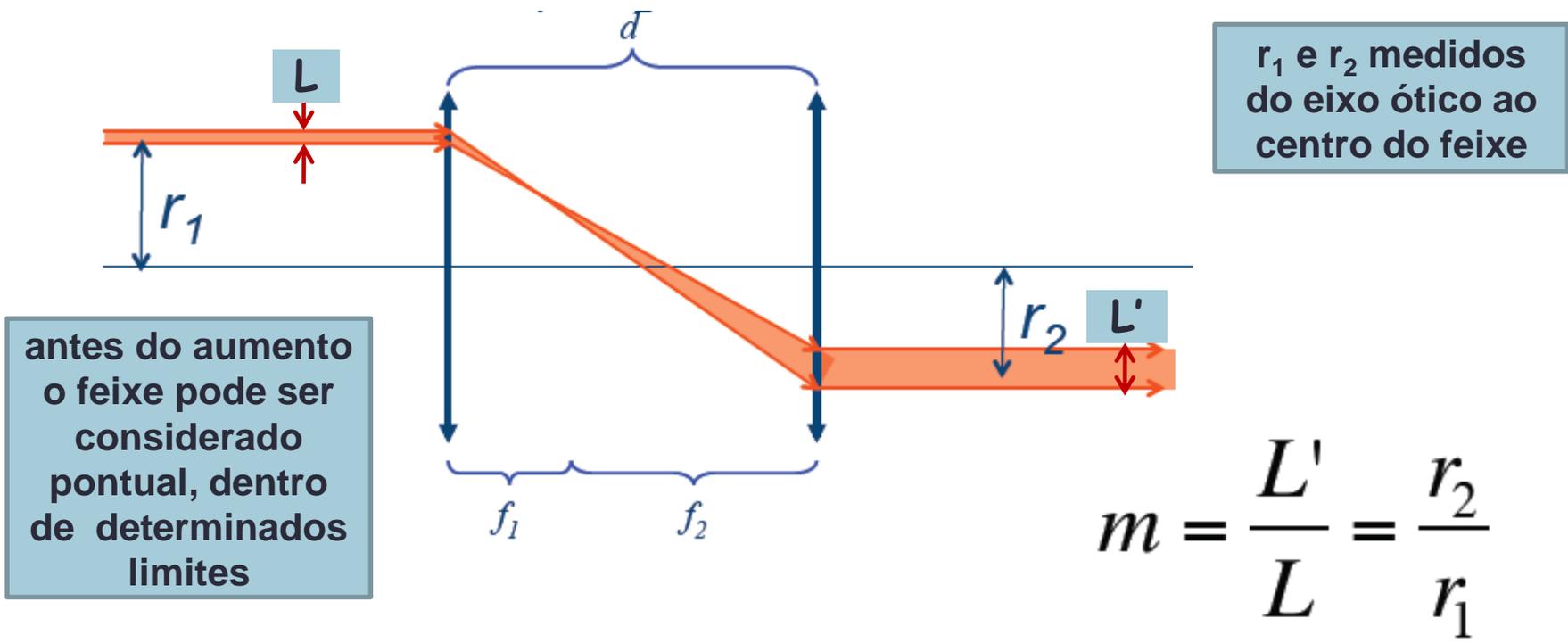
# Medida dos diâmetros

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



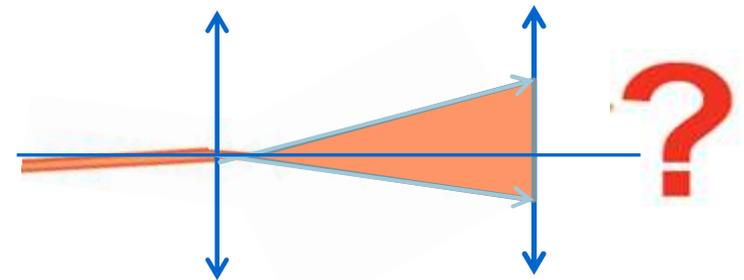
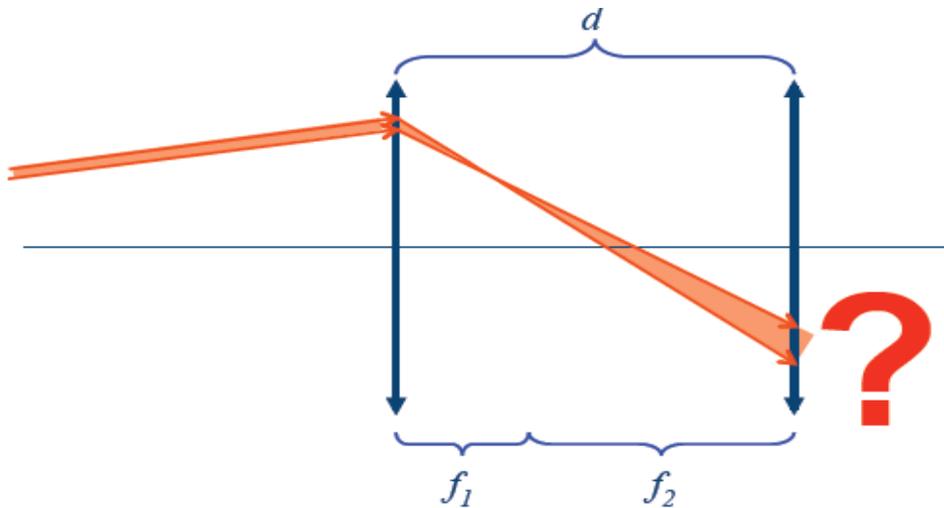
# Medida dos diâmetros

- 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

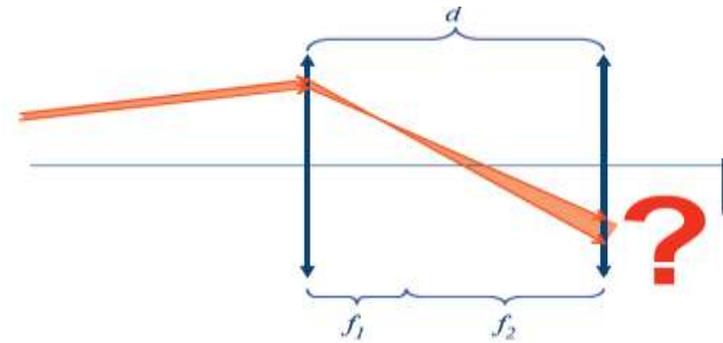
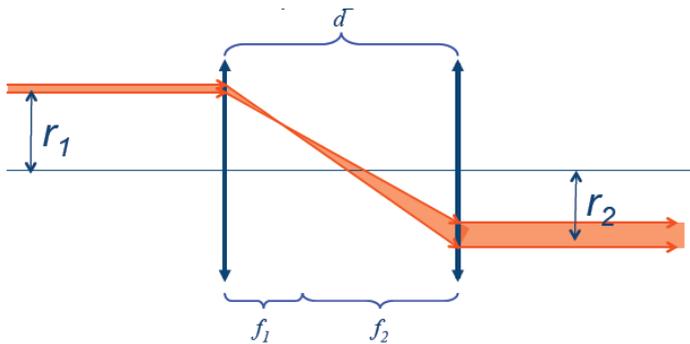
- Mas e se o feixe incidente não for paralelo ao eixo óptico?



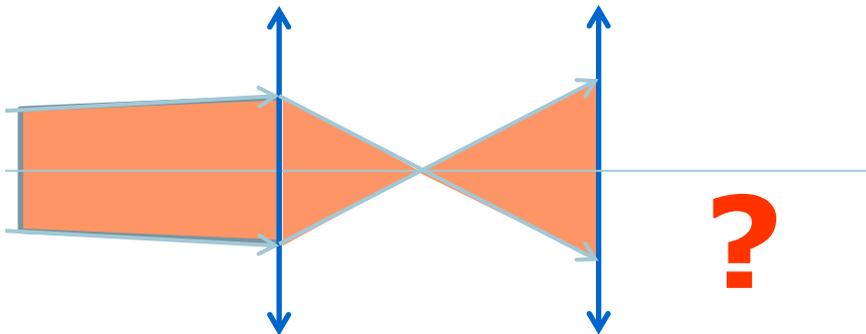
- Verifique o valor de  $r_2$  em vários pontos ao longo do trilho, caso ele varie, refaça o alinhamento!

# 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

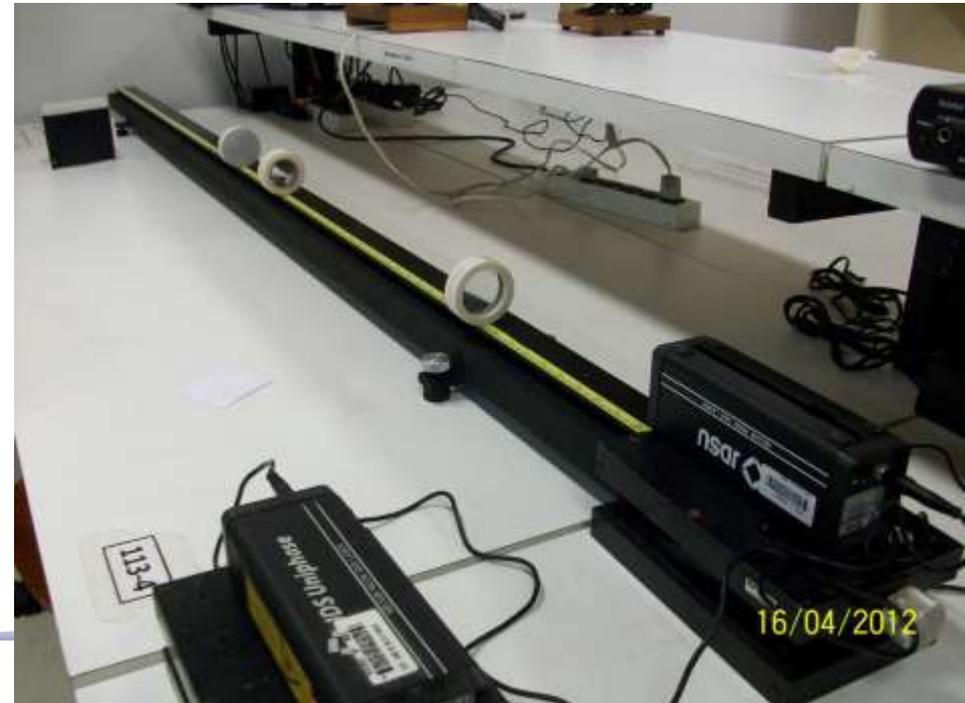
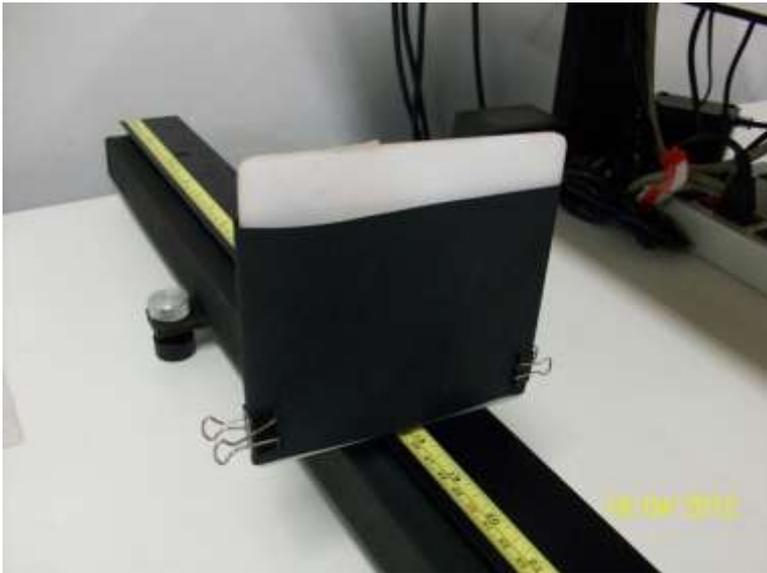
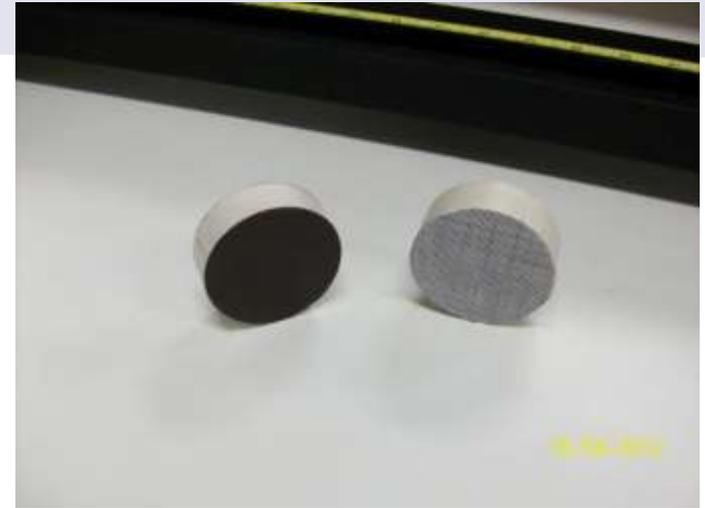
# Tarefas 4 - EXTRA

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

