Fonte: apostila de óptica do lab4 e notas de aula dos Prof. A. Suaide e E. Szanto

Física Experimental IV

www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex
www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

Aula 5 – Computador Óptico

Montagem do Computador Óptico

Prof. Antonio Domingues dos Santos
adsantos@if.usp.br
Ramal: 6886
Mário Schemberg, sala 205

Prof. Leandro Barbosa
lbarbosa@if.usp.br
Ramal: 7157
Ala1, sala 225

Prof. Henrique Barbosa
(**coordenador**)
hbarbosa@if.usp.br
Ramal: 6647
Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin
carlin@dfn.if.usp.br
Ramal: 6820
Pelletron

Prof. Paulo Artaxo
artaxo@if.usp.br
Ramal: 7016
Basilio, sala 101

Programação da Experiência 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: tranformada 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

AULA DE HOJE: computador ótico

Computador Óptico

A Bit-Serial Optical Computer (BSOC), the first computer to store and manipulate data and instructions as pulses of light.

Três “aproximações” para o ótica:

- **Ótica geométrica**

  $\lambda \to 0$ e a luz é tratada como raio

- **Ótica física**

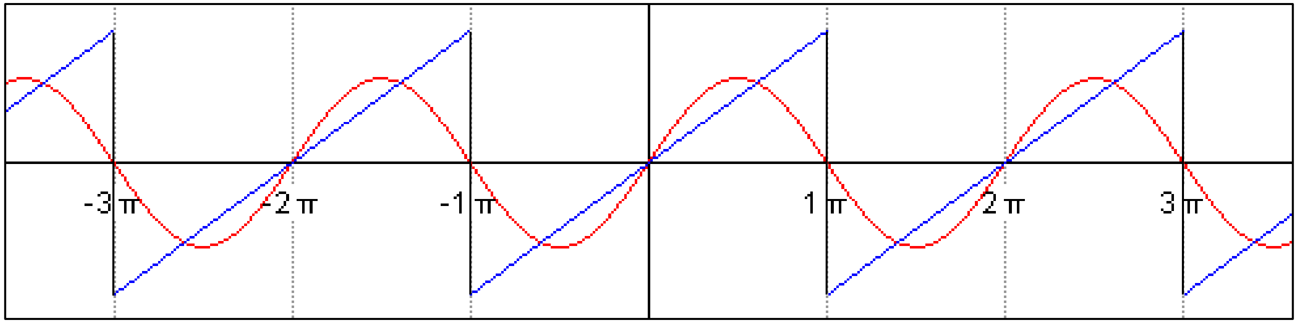
  Princípio de Huygens-Fresnel: cada frente de onda é uma superposição de ondas esféricas

- **Ótica de Fourier**

  Trata a propagação da luz como uma série de ondas planas: para cada ponto de uma frente de onda há uma onda plana cuja propagação é normal àquele ponto

Série de Fourier

- Para relembrar: a teoria de Fourier afirma que qualquer sinal pode ser representado por uma série de ondas senoidais:
  - isso funciona para qualquer tipo de onda, seja no espaço ou no tempo
  - qualquer imagem pode ser representada por uma série de ondas senoidais



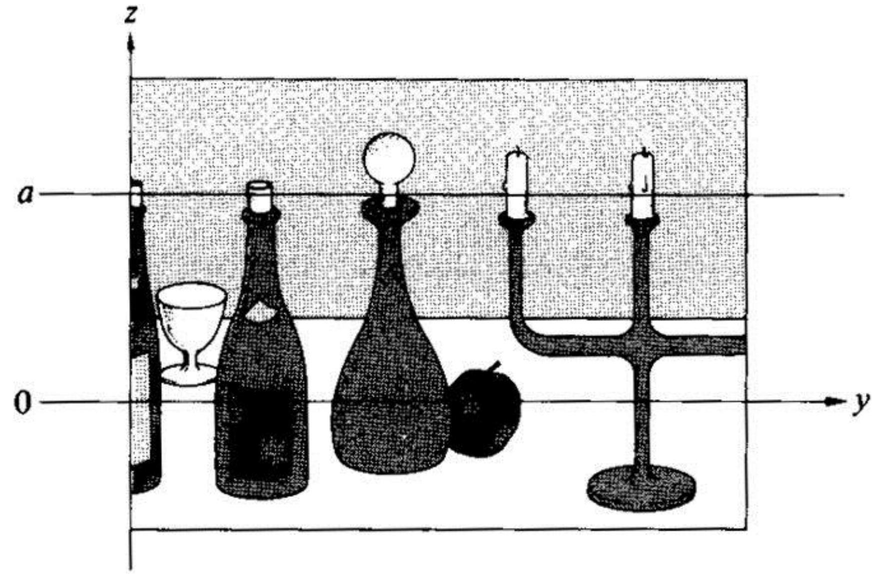
Série de Fourier: imagens

- A amplitude é representada pelo contraste: a diferença entre o claro e escuro na imagem.
- A freqüência espacial é a freqüência com que linhas claras e escuras se alternam ao longo de eixo **x**.

- Uma transformada de Fourier de uma imagem bidimensional incluirá toda uma série de senóides com amplitudes e freqüências espaciais diferentes, partindo da freqüência zero.

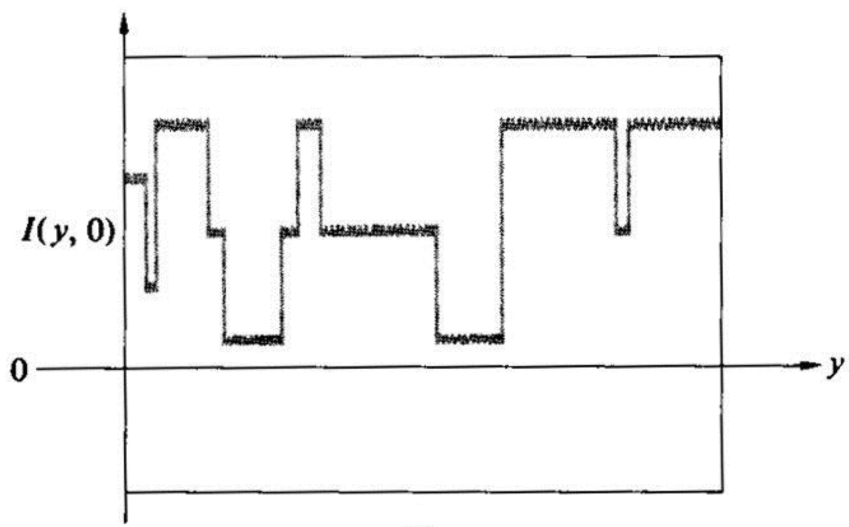
Freqüência Espacial

- Há um valor de intensidade **I** para cada ponto da imagem.
- Como se comporta **I** ao longo do eixo **z=0**?



(a)

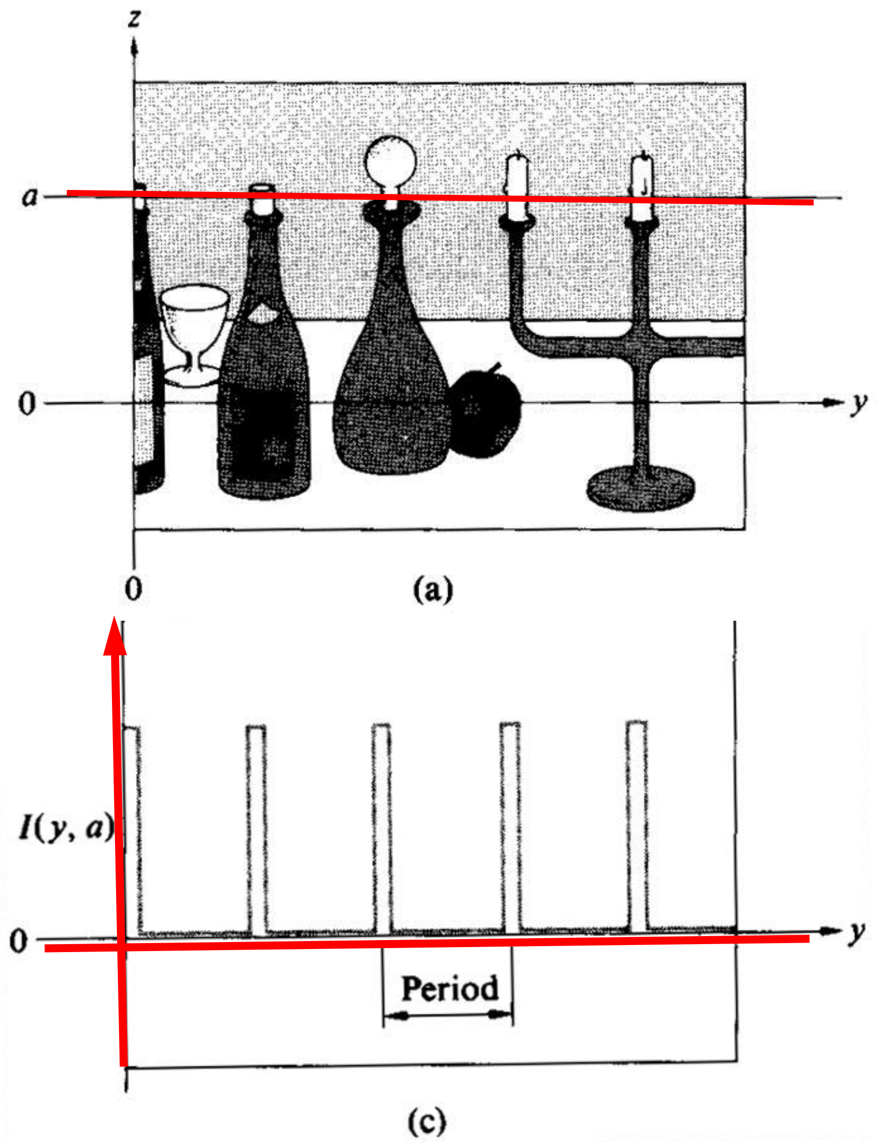
- A função **I(y,0)** é uma superposição de "ondas quadradas" que se pode representar por uma série de funções harmônicas usando a técnica de análise de Fourier.



(b)

Freqüências Espaciais

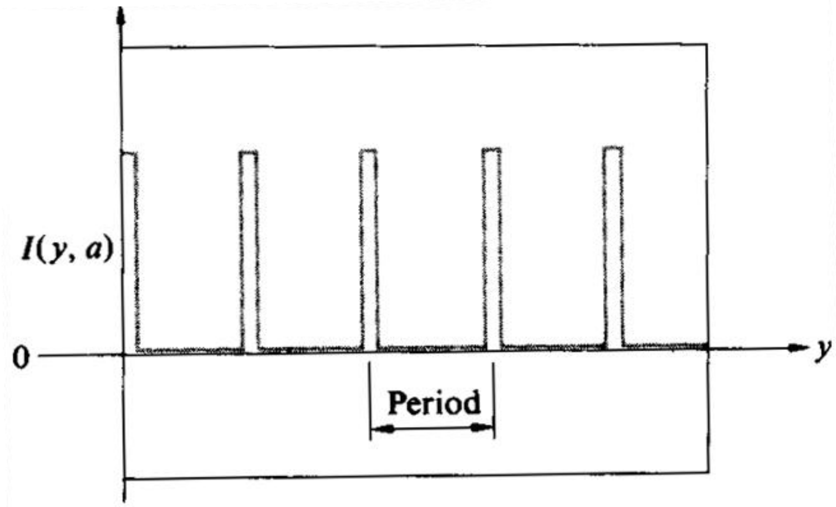
- Para ficar mais fácil de se compreender: vamos ver o que acontece em uma outra linha, **z=a**:



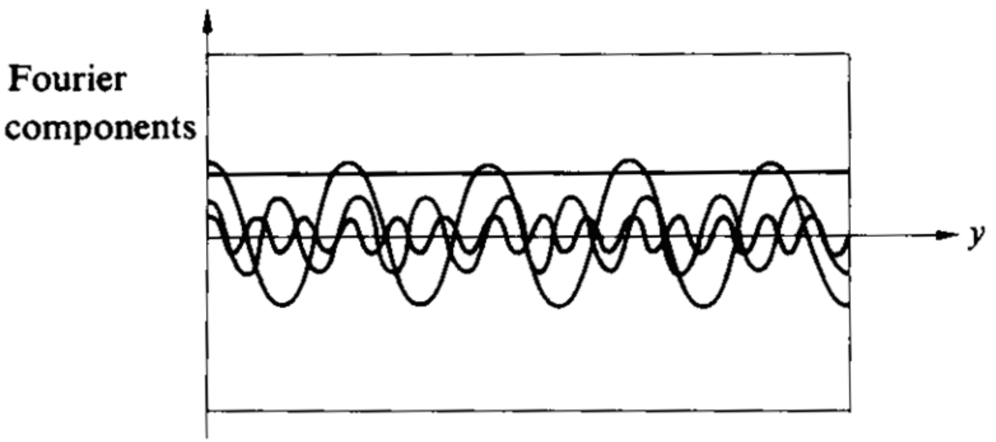
- Essa função agora é uma série de pulsos retangulares igualmente espaçados, que pode ser descrita por uma série de funções harmônicas que são as suas componentes de Fourier.

Espectro de Fourier

- Se os pulsos retangulares estão separados, centro a centro, por intervalos de, digamos, **1cm**:
    - o **período espacial** é igual a **1cm**;
    - seu inverso é a **freqüência espacial** que é igual a **1 ciclo por centímetro**.



(c)



(d)

Esses são os conceitos básicos da óptica de Fourier. Vamos aplicá-la para entender melhor.

Ótica de Fourier

- Pode ser demonstrado (Optics cap 11, seção 11.3) que a figura de difração de Fraunhofer, ou difração de campo distante, de uma abertura é idêntica à transformada de Fourier da função da abertura.
  - estudamos isso na última semana.

- A função da abertura é uma função que descreve as variações de fase e de amplitude produzidas pela abertura na onda plana que nela incidiu.

Difração de Fraunhofer:

- Para cada ponto da **figura de difração** há uma freqüência espacial correspondente (ou seja um $\mathbf{k_x}$ e um $\mathbf{k_y}$) e o campo difratado é escrito como:

$$\hat{E}(k_x, k_y) = \iint \varepsilon(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy$$

- Isso quer dizer que a distribuição de campo elétrico na figura de difração de Fraunhofer é a transformada de Fourier da distribuição do campo elétrico na abertura.
- Essa distribuição é dada pela transformada inversa:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{1}{2\pi} \iint E(k_x, k_y) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$$

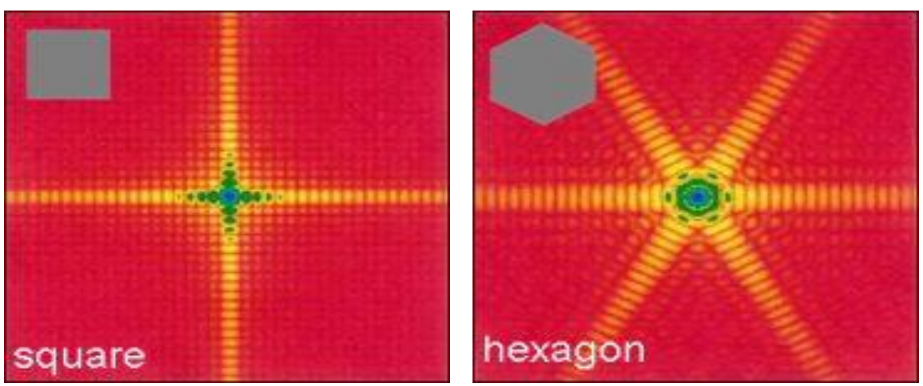
A função da abertura é o campo incidente transformado pelo objeto/fenda/lente/etc onde ocorre a difração.

Difração e Transformada de Fourier

- Resumindo, a figura de difração está relacionada à transformada de Fourier do objeto iluminado.

$$\hat{E}\left(k_x, k_y\right) = \iint \varepsilon(x, y) e^{-j\left(k_x x + k_y y\right)} dxdy$$

A difração é a TF do campo elétrico, mas medimos a intensidade, que é prop a E^2



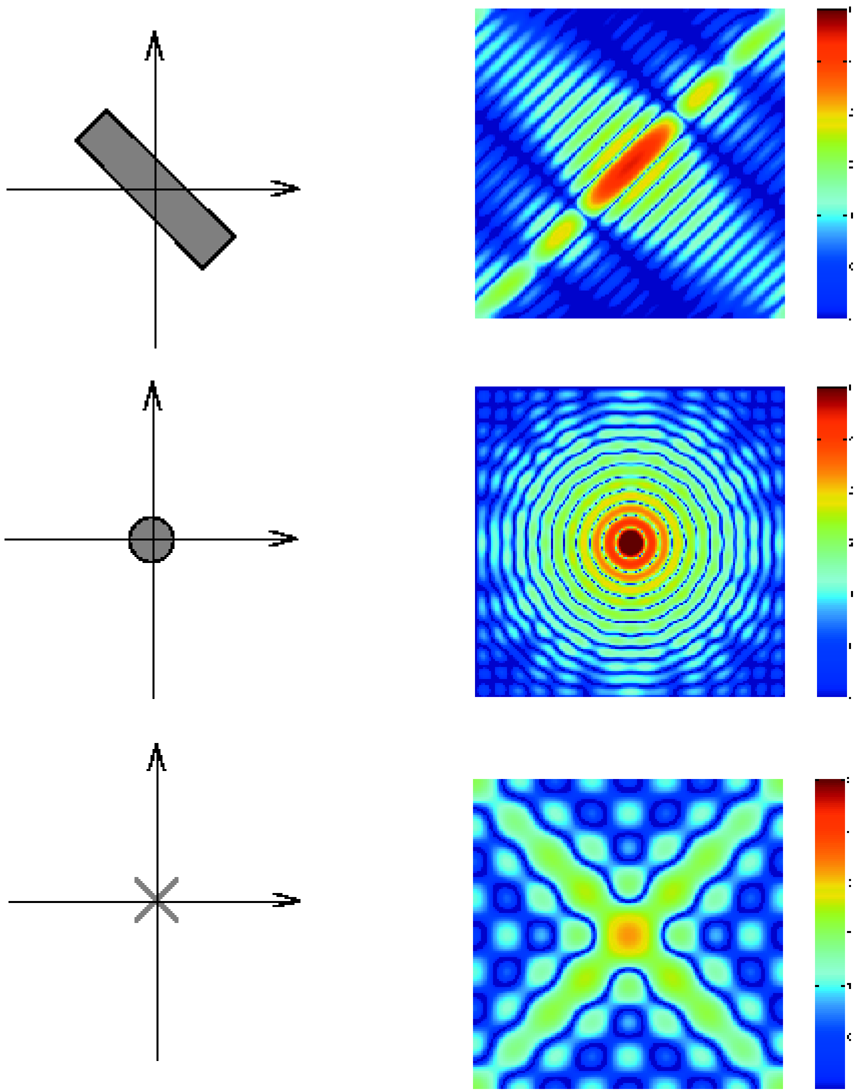
Por isso, a intensidade luminosa, que é o quadrado de E, está diretamente relacionada às componentes da T.F. para cada freqüência espacial.

$$\hat{E}(\vec{R}) \rightarrow \hat{E}(R_x, R_y) \rightarrow \hat{E}(k_x, k_y)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \begin{cases} k_x = k \sin\theta \cos\phi \\ k_y = k \sin\theta \sin\phi \end{cases}$$

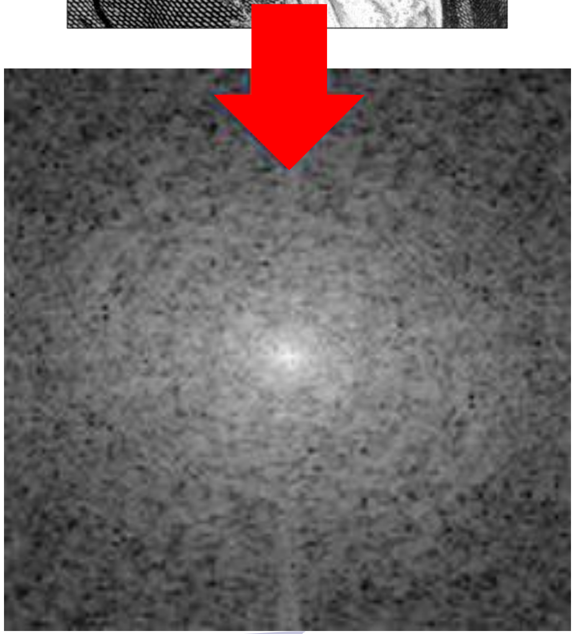
Transformadas de Fourier

- Há uma relação geométrica e quantitativa entre a forma e sua transformada, isto é, entre a figura de difração e o objeto que a gerou



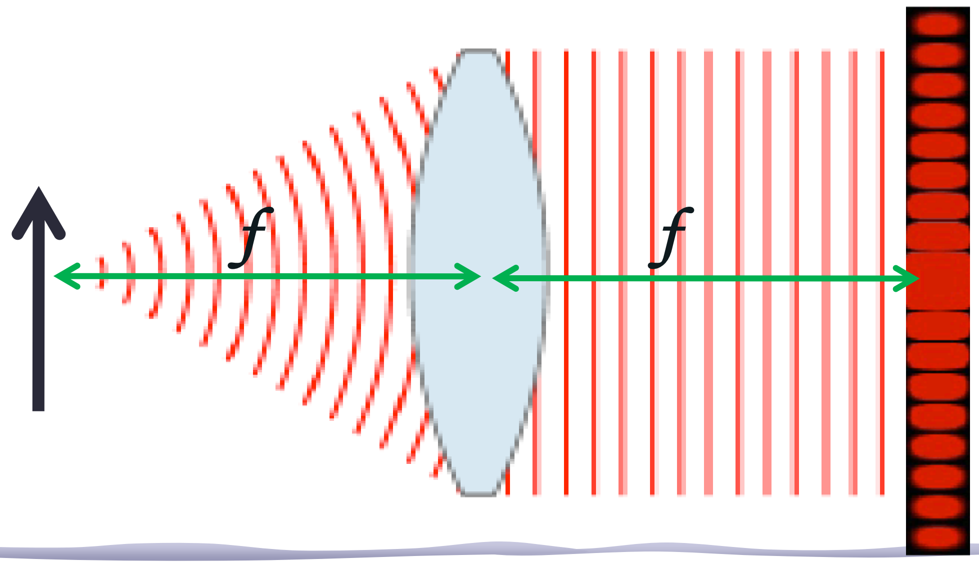
Transformadas de Fourier

- Mesmo em figuras mais complicadas há uma relação geométrica entre a forma e sua transformada, embora seja mais sutil.



Computador ótico

- Como vimos na semana passada:
- Para que a lente produza a transformada de Fourier da **função da abertura** do objeto é preciso:
  - que o objeto seja iluminado por ondas planas (laser=∞)
  - que o objeto esteja no plano focal anterior da lente (o=f)



A transformada vai aparecer no plano focal posterior da lente

Computador Ótico

- Obviamente, se colocarmos esta **TF** como objeto de uma 2ª lente, a imagem da 2ª lente será a imagem original do objeto!

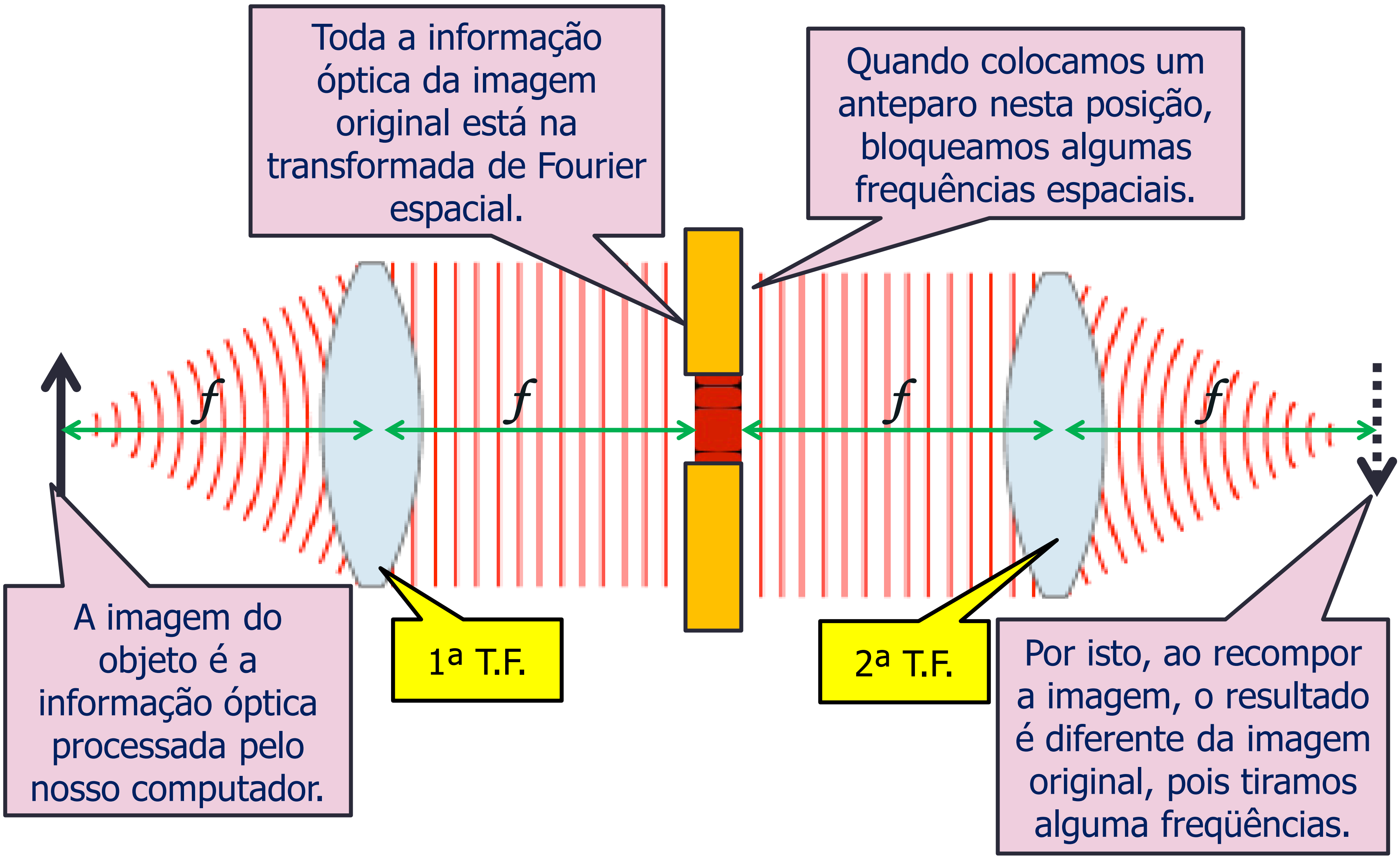
$$\hat{E}(k_x, k_y) = \iint \varepsilon(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dxdy$$

$$\varepsilon(x, y) = \frac{1}{2\pi} \iint E(k_x, k_y) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$$

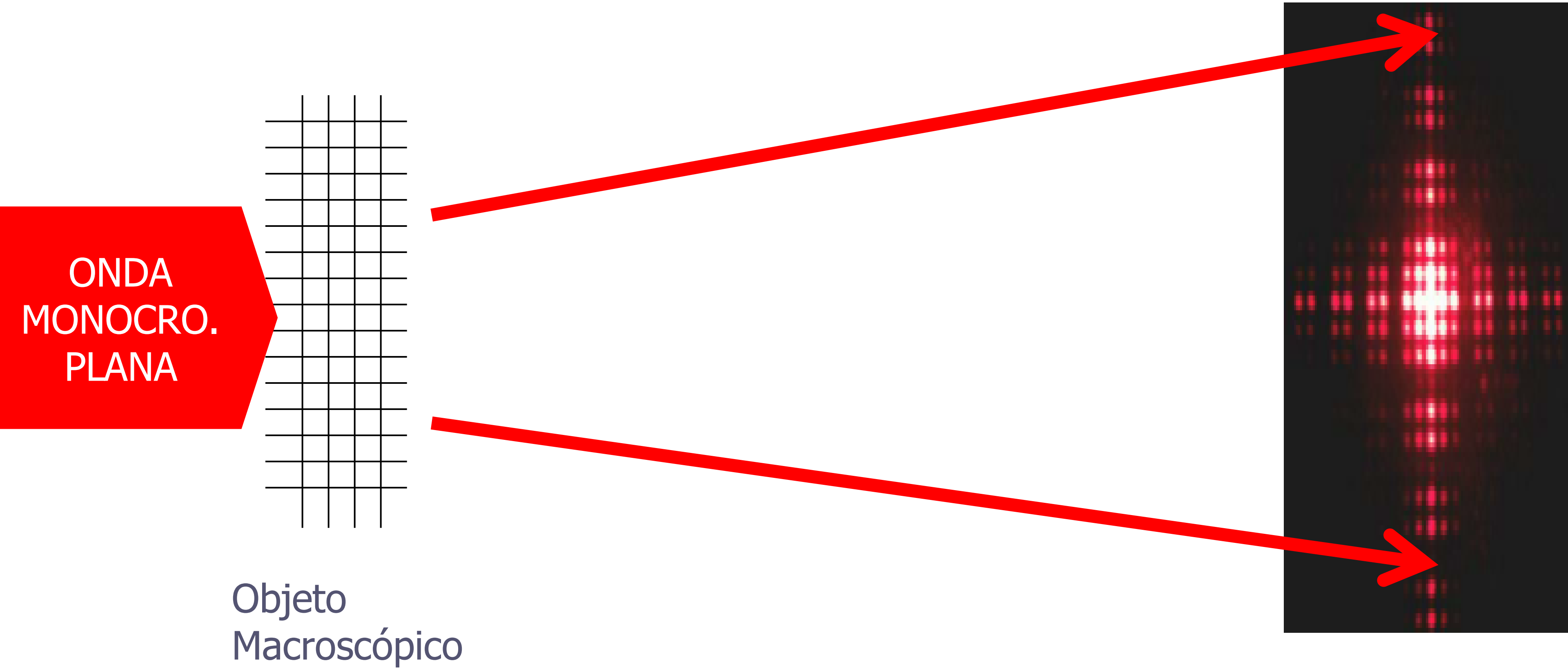
A transformada da transformada é a própria função!

  - A imagem recomposta aparece no plano focal posterior da 2ª lente.

Filtragem espacial



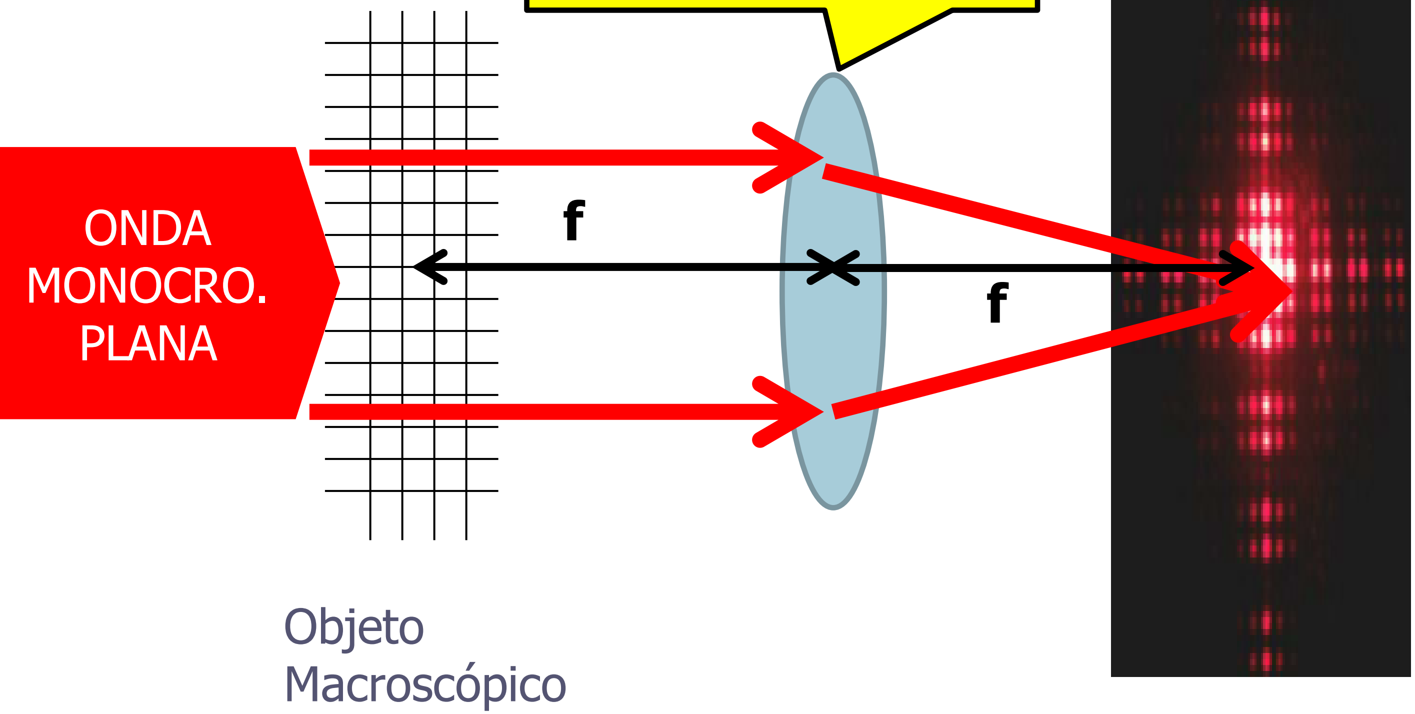
Outra Maneira que entender (1)



Pela condição de Fraunhofer, como o objeto é macroscópico, precisamos estar MUITO longe para observar a difração!!

Outra Maneira que entender (2)

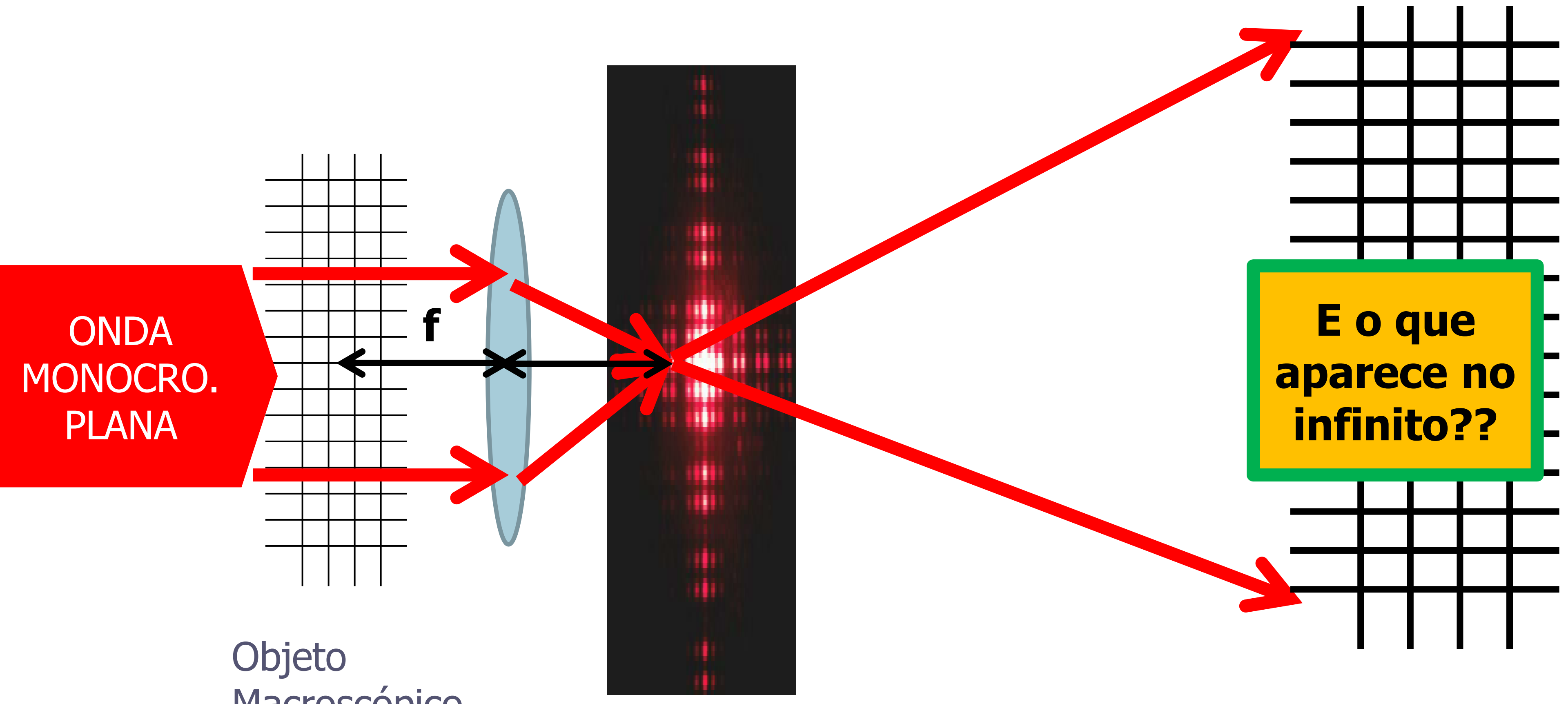
A lente convergente faz os raios paralelos convergirem no foco, certo?



E o que aparece no infinito??

Agora, a condição de Fraunhofer é satisfeita em uma distância = foco

Outra Maneira que entender (3)



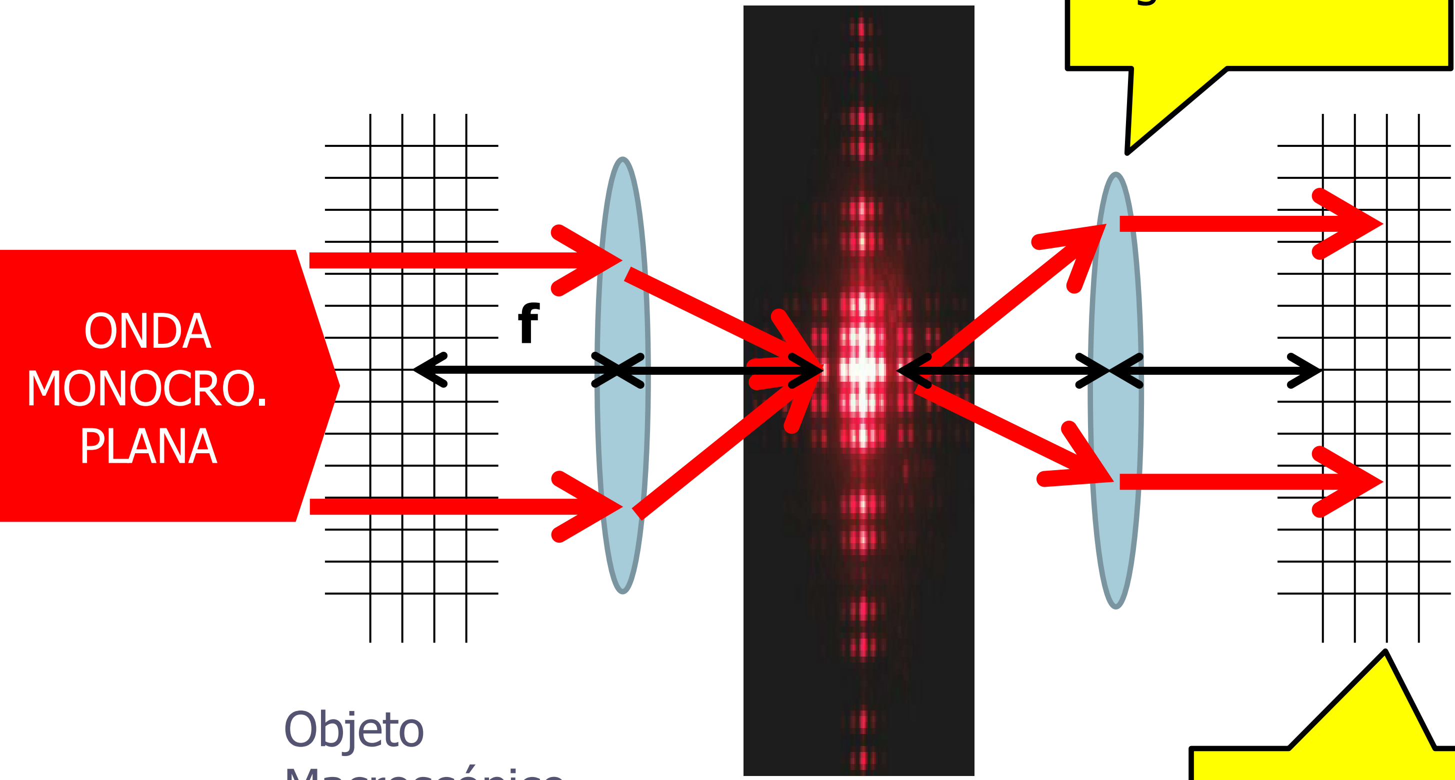
Objeto
Macroscópico

Tem que ser o objeto ampliado! Afinal:

$$1/f = 1/i + 1/o$$

Outra Maneira que entender (3)

E o que faz a
segunda lente??

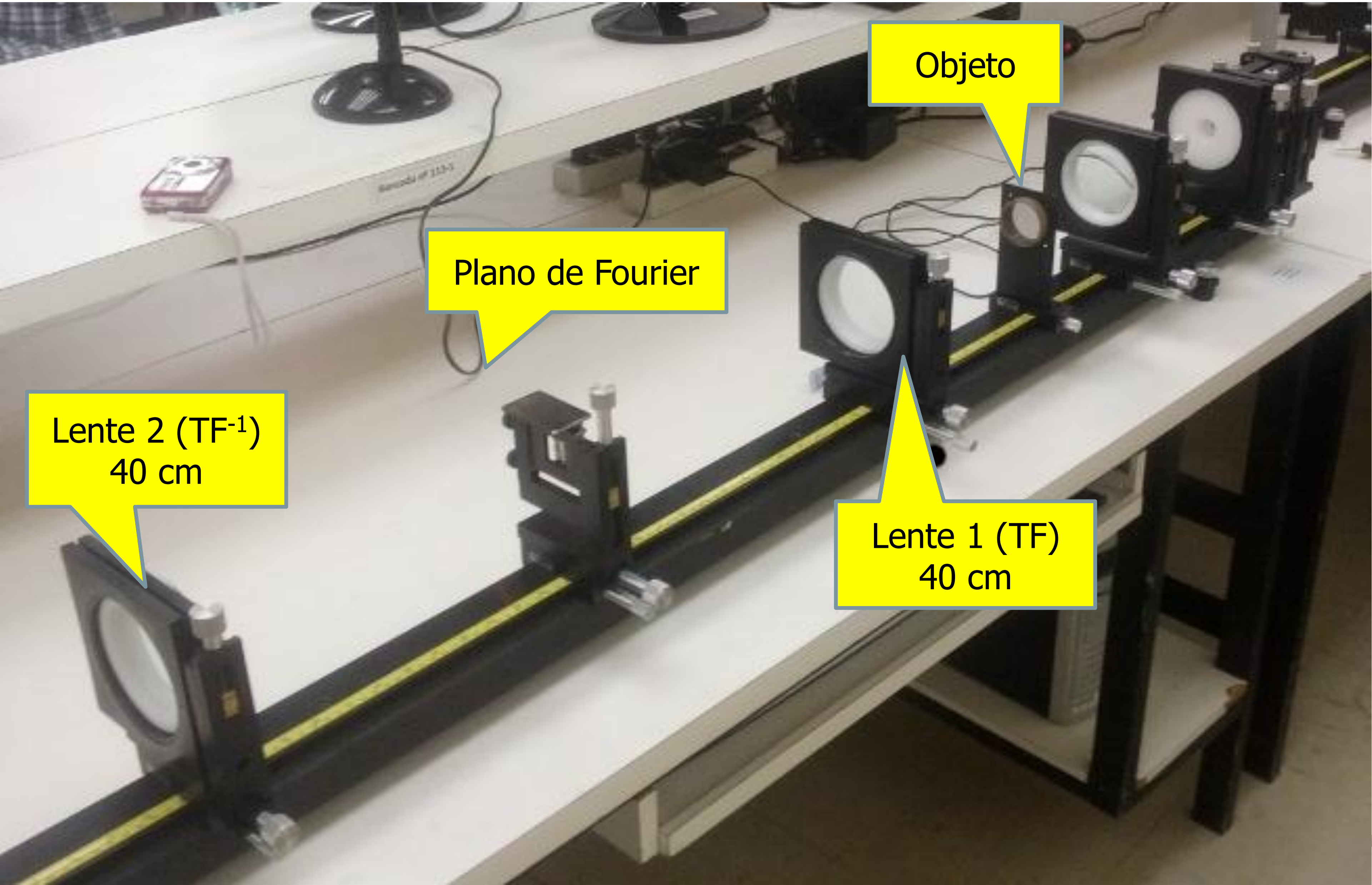


Precisamos da lente 2 ? Ou não?

Objeto
Macroscópico

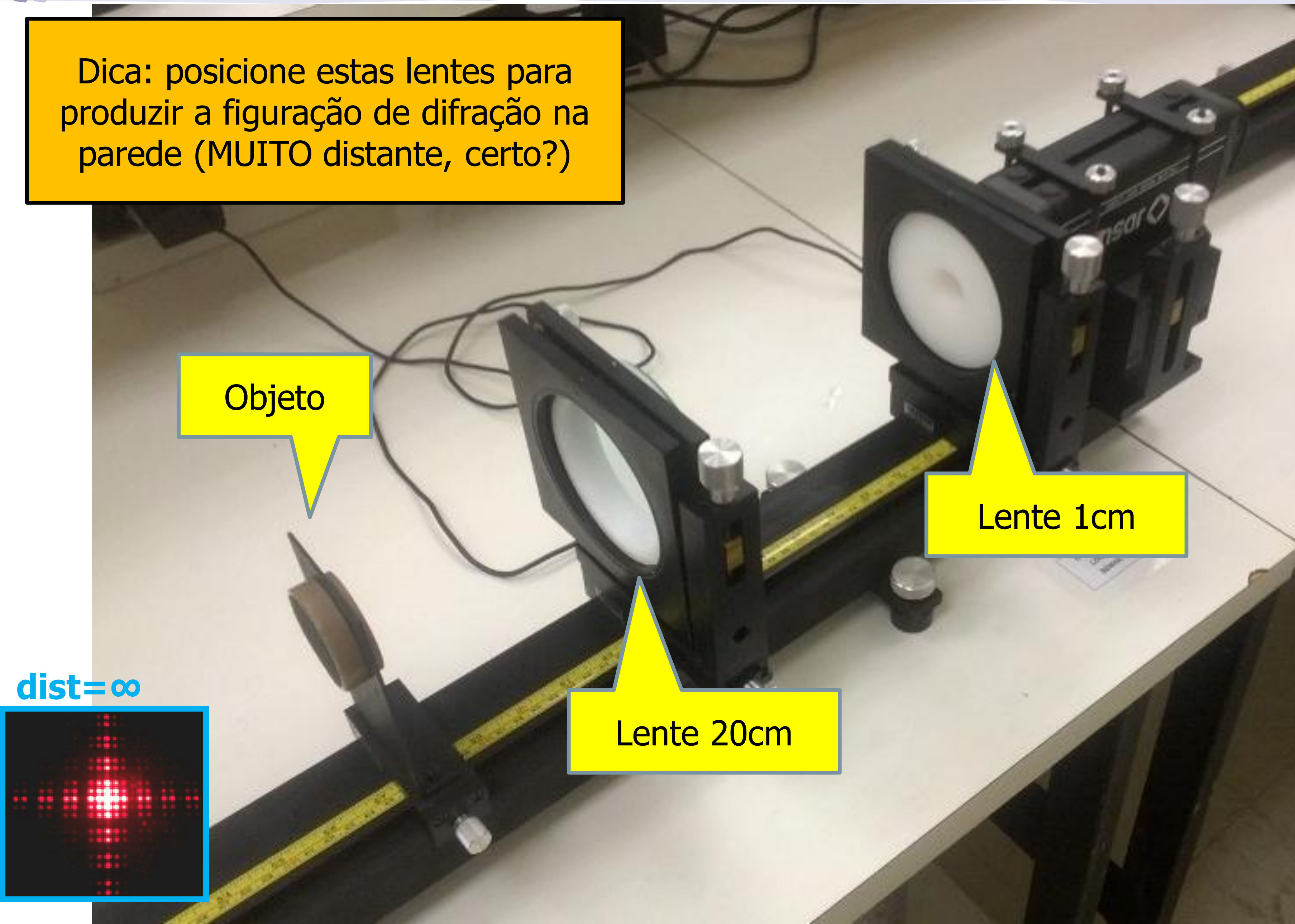
... Faz o objeto aparecer focalizado na distância focal!

Computador Óptico

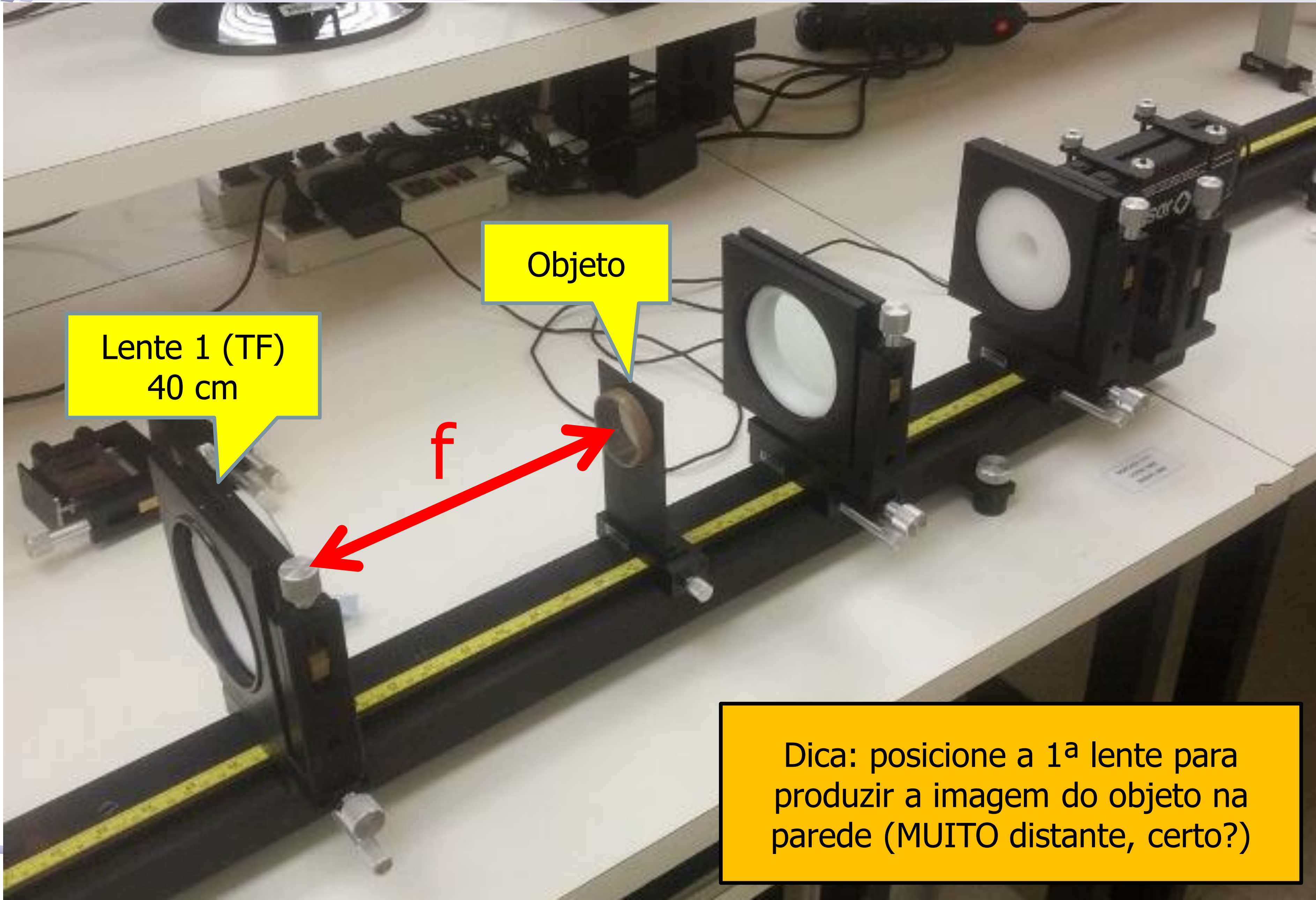


Criação do objeto

Dica: posicione estas lentes para produzir a figuração de difração na parede (MUITO distante, certo?)



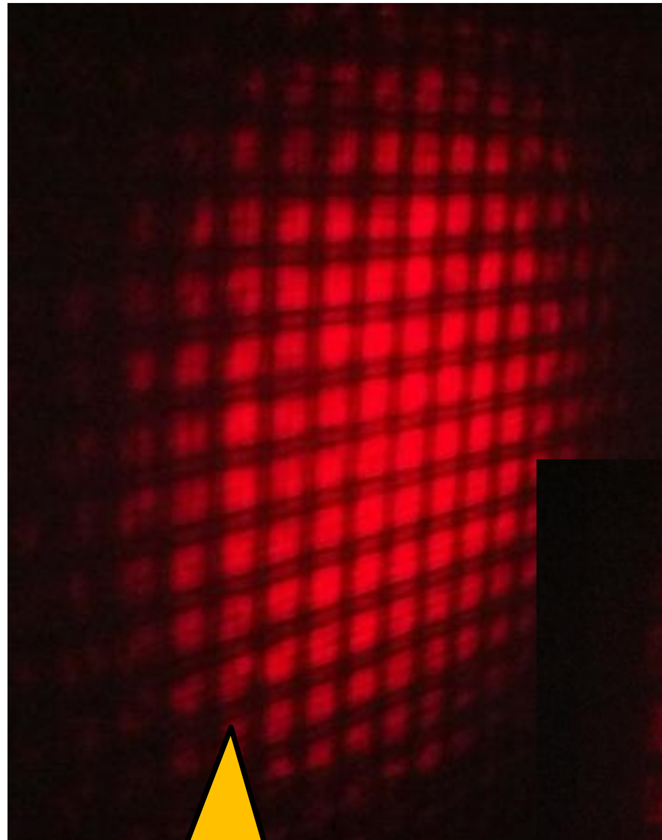
Posição da 1ª lente da T.F.



Dica: posicione a 1ª lente para produzir a imagem do objeto na parede (MUITO distante, certo?)

CUIDADO 1

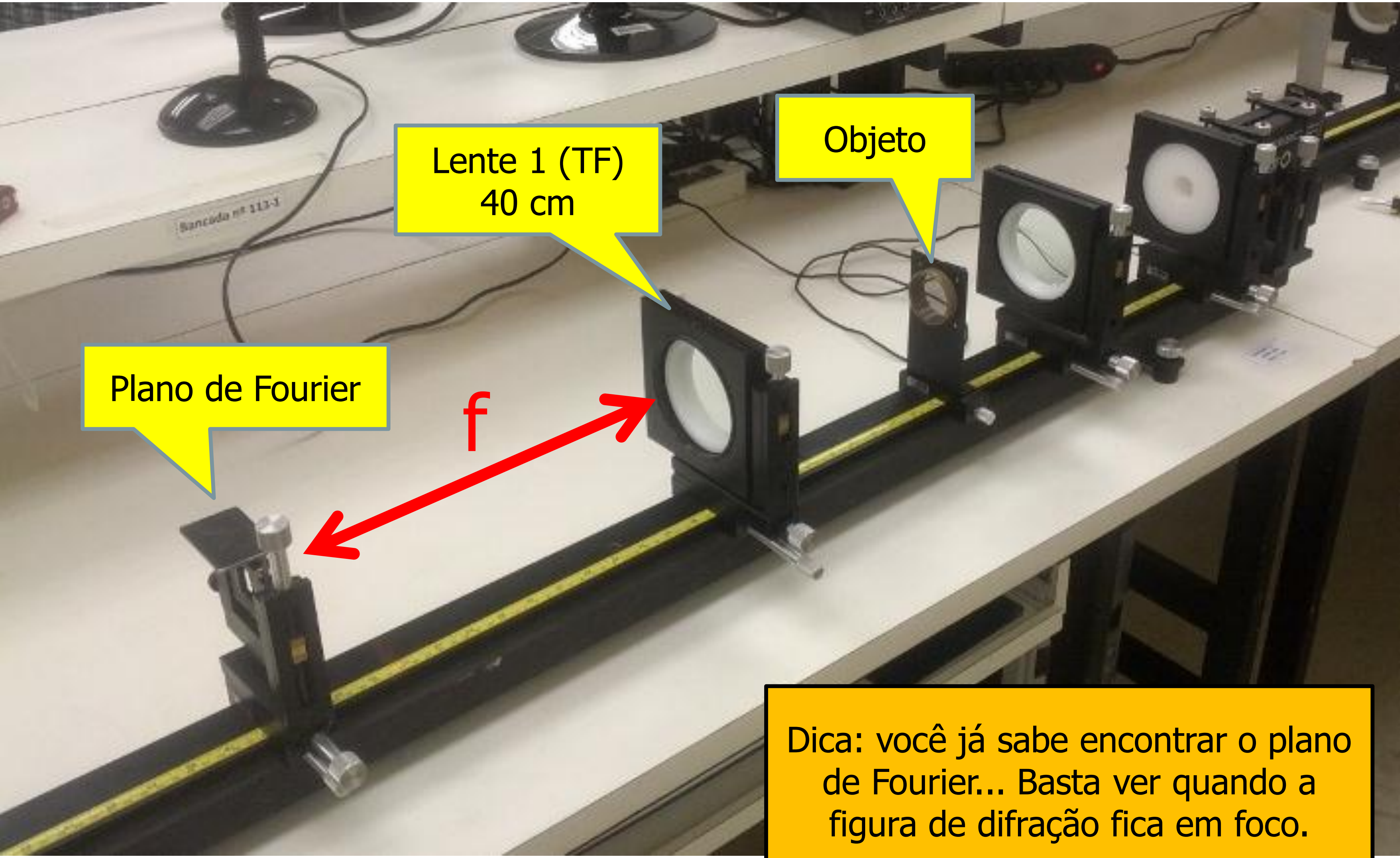
Totalmente fora de foco...



Ruim, vejam as linhas entre as quadriculas....

Perfeito

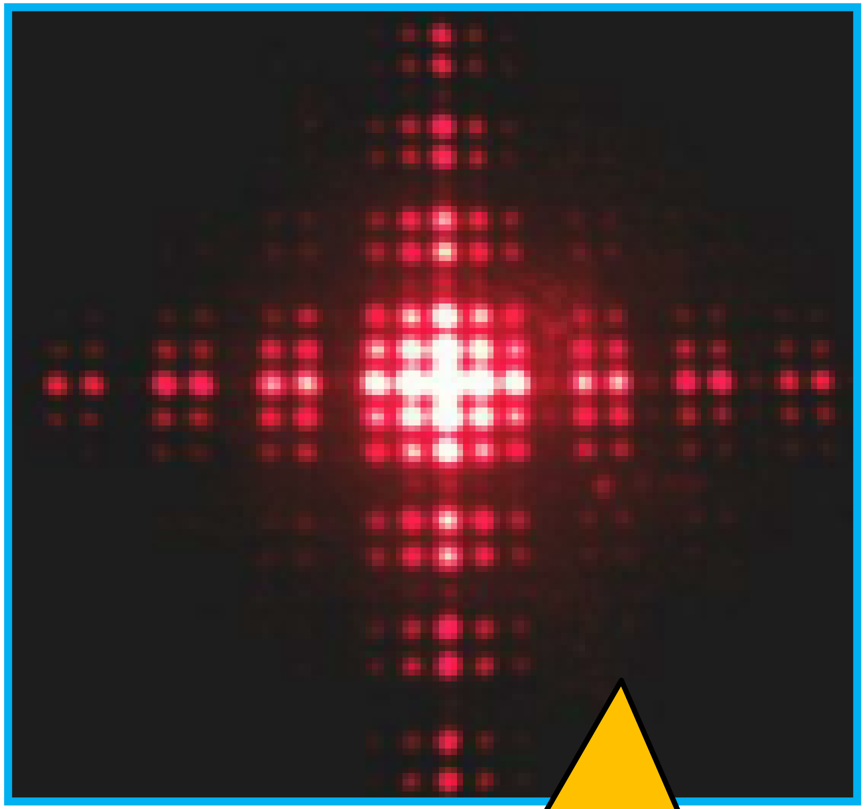
Posição do Plano de Fourier



Dica: você já sabe encontrar o plano de Fourier... Basta ver quando a figura de difração fica em foco.

CUIDADO 2

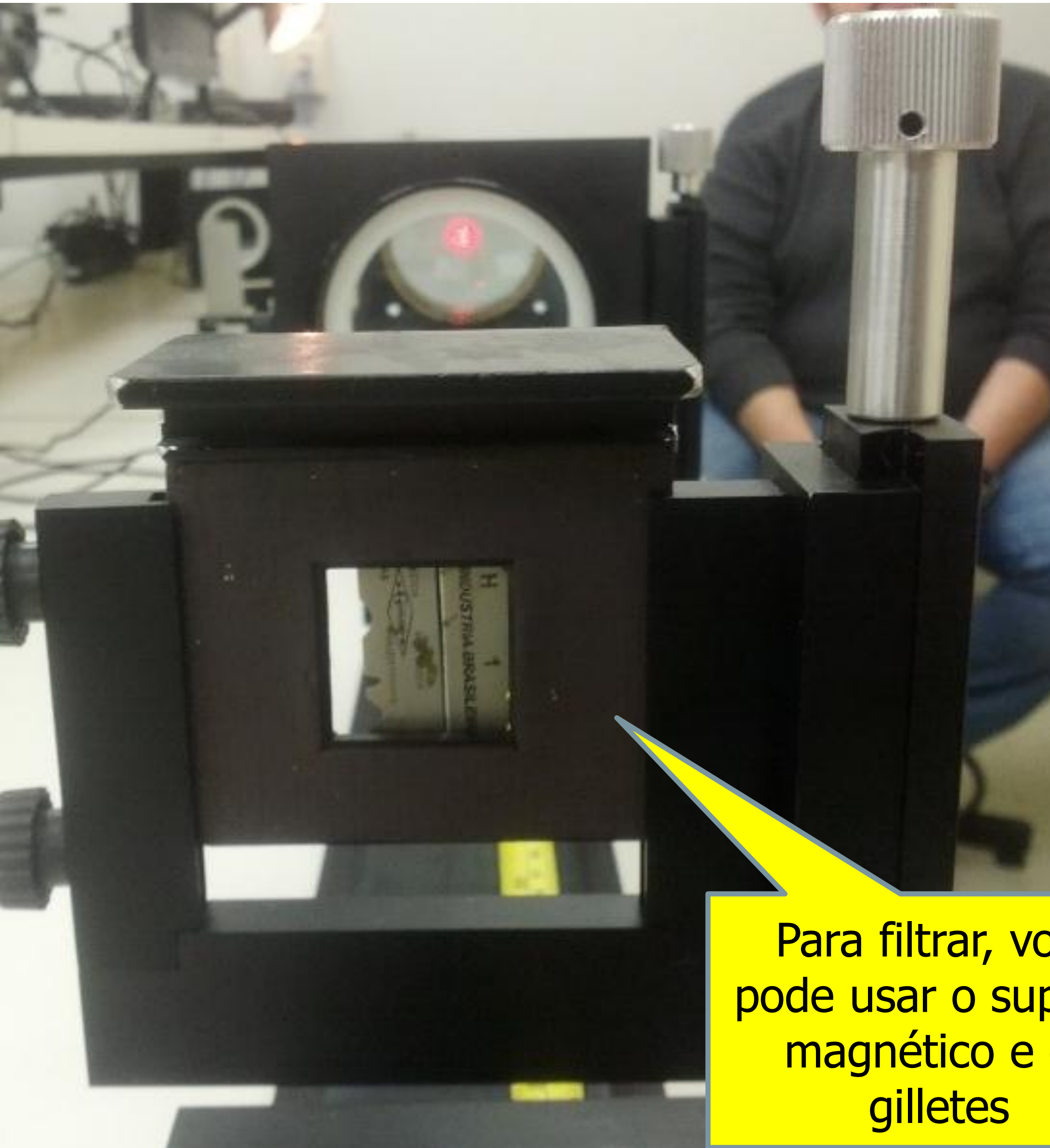
Cuidado ao fotografar...
E na distância objeto-lente 1

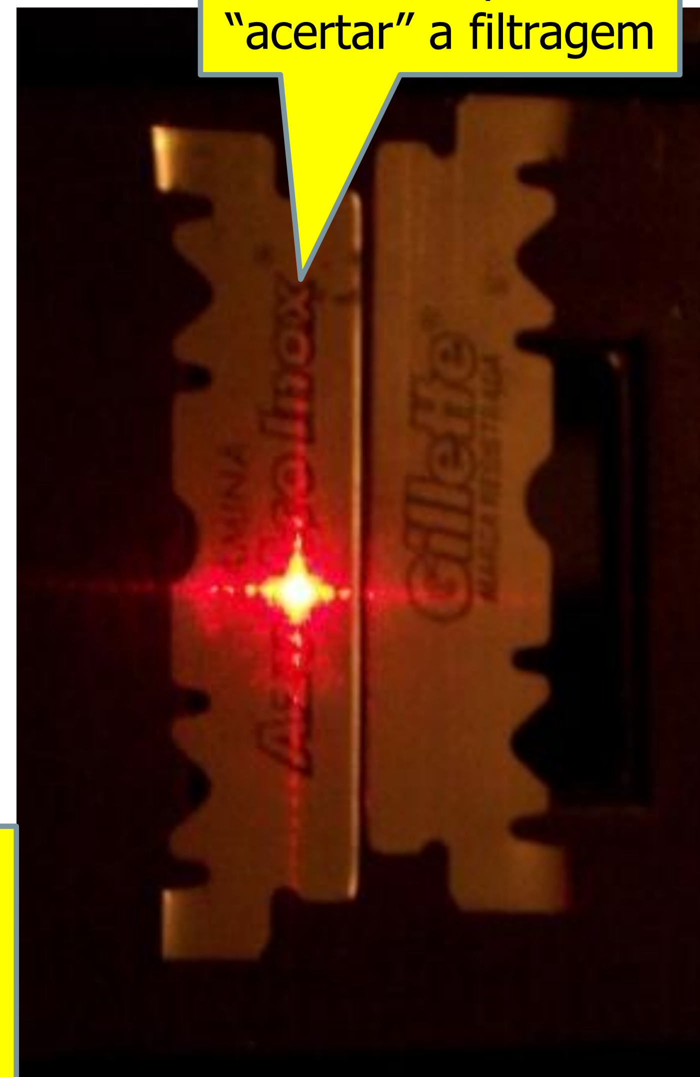


Isso é que esperamos como difração de uma grade regular, certo?

Filtro

Use o botão de
ajuste lateral para
mover o suporte e
"acertar" a filtragem





Para filtrar, você
pode usar o suporte
magnético e os
gilletes

CUIDADO 3

- Todos os cuidados anteriores valem para a hora de fotografar o objeto recomposto!

Medidas da semana

- Monte o conjunto de lentes para aumentar o feixe do laser
  - Ele precisa ser paralelo, lembram-se?
- Em seguida coloque **o objeto** no plano focal da lente **L1** (lente da transformada). Fotografe o objeto.
- Procure a figura de difração do objeto (com um anteparo) no plano focal do outro lado da **L1**. Fotografe a transformada.
- Coloque a lente **L2** a uma distância igual à soma dos focos das lentes **L1** e **L2**.
  - Observe no plano focal depois da lente **L2** a imagem do objeto recomposta pela lente **L2**. Fotografe a imagem recomposta.
- Ou, caso a imagem recomposta fique muito pequena, retire a lente **L2** e projete a imagem recomposta no infinito (~parede da sala).
  - Fotografe a imagem recomposta

Tarefa da semana (1): Fenda

Faça as medidas da semana usando a uma fenda como objeto:

- Fabricar uma fenda usando 2 lâminas gillette, você pode escolher a largura (é você que vai montar no suporte)
- Analise a transformada no plano de Fourier e fora dele. Quais são as diferenças? Você pode justificar qualitativamente a diferença, se houver?
- Compare com a figura da difração de 2 semanas atrás. Há diferenças? Sim? Não? comente....

Tarefa da semana (2): Grade Preta

- Faça as medidas da semana usando a grade de plástico pintada de preto. Em suma:
  - tire uma foto da imagem dessa grade
  - encontre a transformada e fotografe
  - tire uma foto do objeto
  - use a lente 2 ou projete bem longe a imagem recomposta da grade e fotografe
  - compare a imagem recomposta com a imagem formada real da grade

Tarefa da semana (3): filtro

- Para o objeto grade:
  - construa um filtro capaz de eliminar as linhas verticais da grade (com as gillettes no suporte)
  - depois elimine as linhas horizontais
  - você pode pensar num filtro que torne a figura menos nítida? Que freqüências espaciais ele teria que retirar da transformada?
  - tem uma placa com 2 orifícios de diâmetros diferentes, aplique cada um deles na transformada como filtros
  - fotografe tudo, antes e depois da aplicação dos filtros
- Compare e comente todos os resultados obtidos

Síntese: objeto fenda

- Para objeto fenda, a figura na síntese deve ter 4 painéis:

objeto	Imagem recomposta do objeto
Figura de difração da fenda	Transformada do objeto

- A partir das fotos, discuta os seguintes pontos:
  - relacione a geometria do objeto com a da transformada
  - compare a foto do objeto com a da imagem recomposta (transformada inversa)
  - compare a transformada com a figura de difração da fenda

Síntese: objeto grade

- Para a grade, uma figura inicial deve conter 4 painéis:

objeto	imagem do objeto	transformada do objeto	imagem recomposta do objeto

- Depois, para cada filtro, inclua um outra figura assim:

filtro aplicado na transformada	imagem recomposta do objeto, sem filtro	imagem filtrada do objeto

- A partir das fotos, discuta no mínimo os seguintes pontos:
  - descreva o filtro e justifique sua escolha em termo das freqüência que são eliminadas e do papel delas na figura
  - compare a imagem recomposta do objeto (sem filtro) com a imagem filtrada

ATENÇÃO AO TAMANHO DA SÍNTESE (<3Mb)