

# Óptica Geométrica

Na faixa de comprimentos de onda da radiação E/M há no mínimo **três regiões de aproximações** de interesse prático.

E uma dessas regiões é a da **óptica geométrica**. Ela corresponde ao caso quando **o comprimento de onda dos fótons é pequeno** comparado com as dimensões dos equipamentos de medição (e a energia dos fótons é pequena comparada com a sensibilidade destes equipamentos).

Na sequencia, se o **comprimento de onda é comparável** ao tamanho do equipamento (mas as energias continuam a serem desprezíveis) temos a **óptica física** (teoria clássica da radiação eletromagnética).

Finalmente, para comprimentos de onda muito pequenos (altas energias) quando a energia do fóton é muito maior que a sensibilidade de nosso equipamento, as coisas ficam fáceis de novo, podemos **desconsiderar o caráter ondulatório** e considerar o fóton como uma partícula

Qual o processo pelo qual vemos?

## Princípios básicos da óptica geométrica:

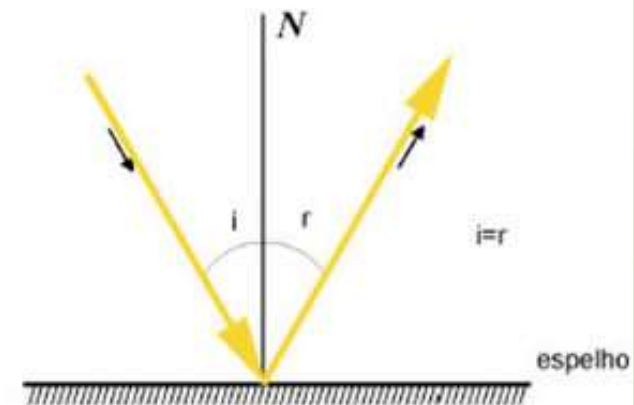
1. A luz se propaga em linha reta
2. A luz não interfere com outros raios de luz que ela **cruza** (um dos argumentos mais fortes utilizado por Huygens na defesa da teoria ondulatória da luz)

Estas são as ideias básicas que levam á óptica geométrica estudada desde a antiguidade, inicialmente nos sistemas mais simples, como os espelhos planos.

A **primeira pergunta** foi qual a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão?

A resposta foi facilmente encontrada : são iguais.  $i = r$

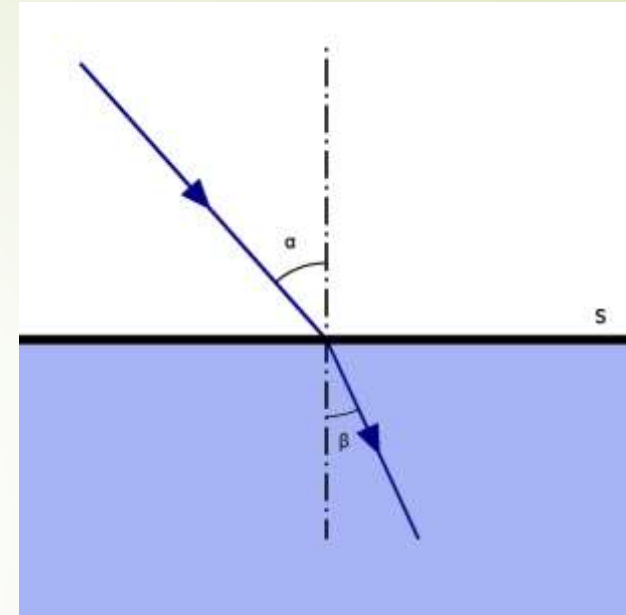
Qual é a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão?



# INTRODUÇÃO

Mais difícil foi analisar o caso da refração. 140 anos DC Cláudio Ptolomeu obteve uma tabela para a refração entre o ar e a água.

Método científico: Observamos, medimos e **tentamos encontrar a regra que conecta os dados.**



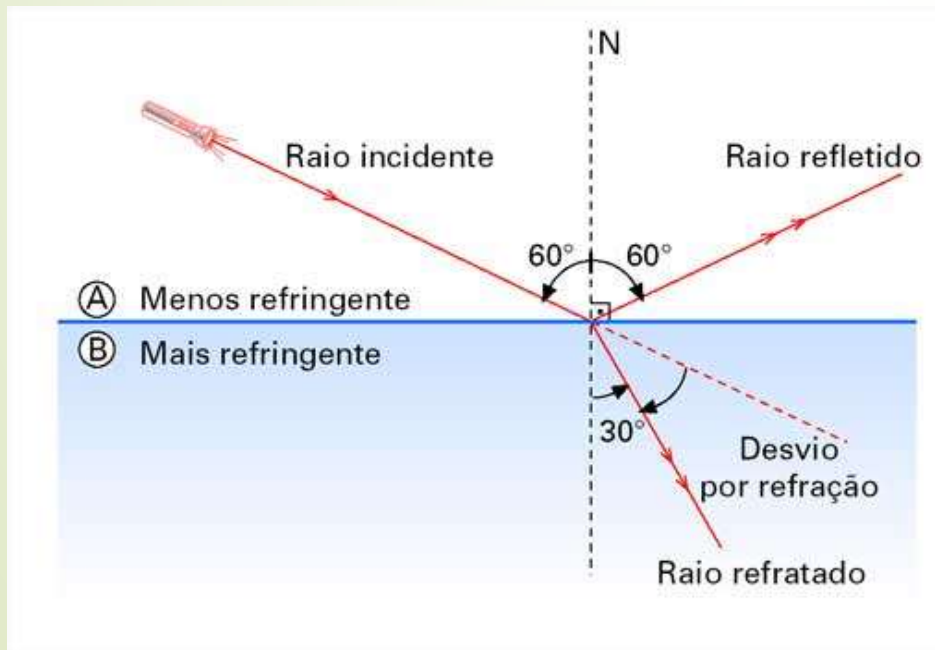
Cláudio Ptolomeu. 140 AC	
Ângulo no ar	Ângulo na água
10	8
20	15
30	22
40	29
50	35
60	40
70	45
80	50

# INTRODUÇÃO

Somente em **1621** Willebrord Snell encontrou esta regra  $n_A \cdot \text{sen } i = n_B \cdot \text{sen } r$   
ou  $\text{sen } i = n \cdot \text{sen } r$

$$n_A < n_B$$

*“Incide num meio mais refringente”*



## Comparando tabelas

Ângulo no ar	Ângulo na água Ptolomeu	Ângulo na água Snell
10	8	7
20	15	15
30	22	22
40	29	29
50	35	35
60	40	40
70	45	45
80	50	48



Para que alguém possa **ver um objeto**, é preciso que os olhos interceptem alguns dos raios luminosos que partem do objeto e os redirecione para a retina. O sistema visual identifica arestas, orientações, texturas, formas e cores, e oferece à consciência uma **imagem** (uma reprodução obtida a partir de raios luminosos) do objeto.

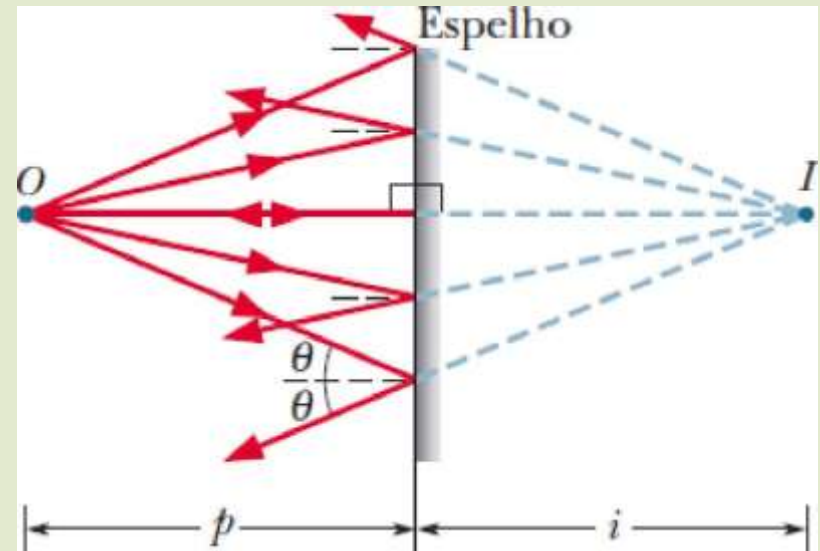
Se a imagem depende de um observador para existir e pode corresponder ou não a um objeto real, é chamada de **imagem virtual**.

Se a imagem não depende de um observador para existir, como as imagens que são projetadas nas telas de cinema, é chamada de **imagem real**.

# ESPELHOS PLANOS

Um **espelho** é uma superfície que reflete raios luminosos em uma direção definida em vez de absorve-los ou de espalhar eles aleatoriamente em todas as direções. Uma superfície metálica polida se comporta como um espelho; uma parede de concreto, não. Um espelho plano é uma superfície refletora plana.

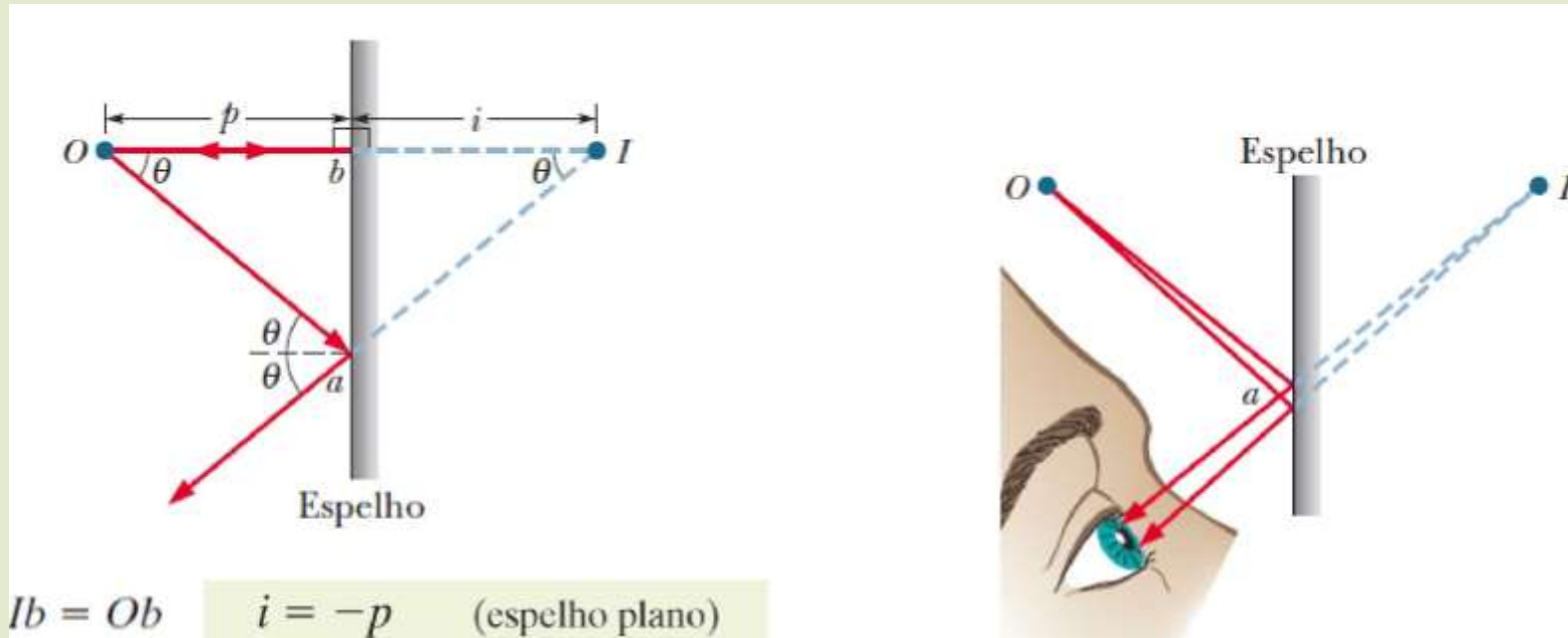
Em um espelho plano, a luz parece vir de um objeto situado do outro lado do espelho.



Uma fonte luminosa pontual  $O$ , chamada de **objeto**, está a uma **distancia  $p$**  de um espelho plano. Raios luminosos provenientes de  $O$  são refletidos pelo espelho. Se o olho do observador intercepta os raios refletidos, ele tem a impressão de que existe uma fonte luminosa pontual  $I$  atrás do espelho, a uma **distancia  $i$** .

A fonte fictícia é uma **imagem virtual** do objeto  $O$ .

# ESPELHOS PLANOS



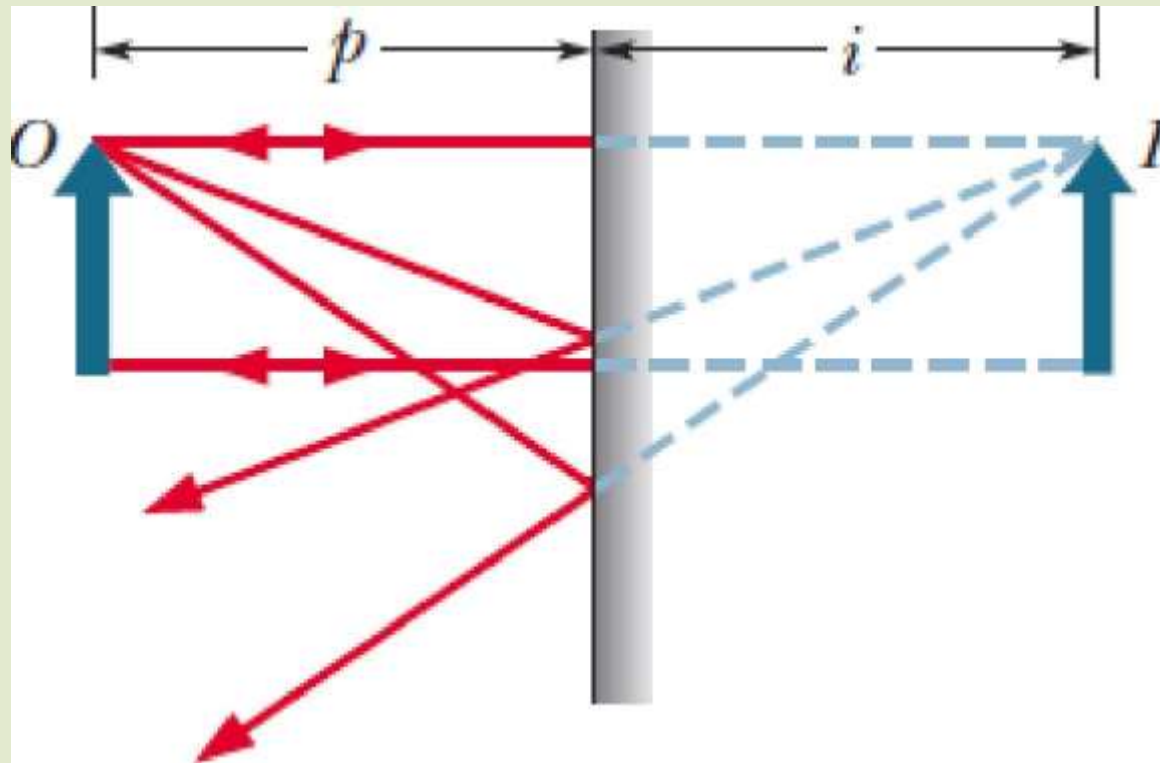
Dois raios são desenhados na figura. O raio  $Oa$  faz um ângulo arbitrário  $\theta$  com a normal à superfície do espelho; o raio  $Ob$  é perpendicular ao espelho.

Um feixe estreito de raios provenientes de  $O$  penetra no olho depois de ser refletido pelo espelho. Apenas uma pequena região do espelho, nas vizinhanças do ponto  $a$ , está envolvida na reflexão. A luz parece se originar em um ponto  $I$  atrás do espelho.



# ESPELHOS PLANOS

Em um espelho plano, **as distâncias** entre o objeto e o espelho e entre a imagem e o espelho **são iguais**.

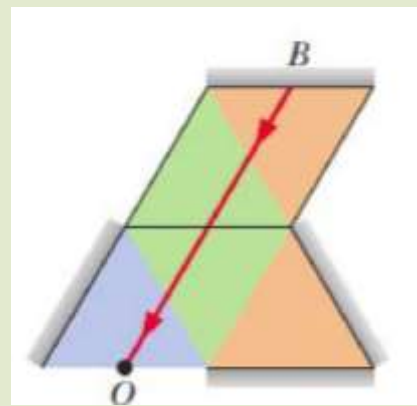
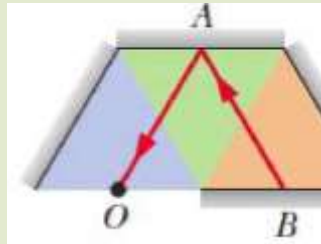


Um objeto de dimensões macroscópicas  $O$  e sua imagem virtual  $I$  em um espelho plano.

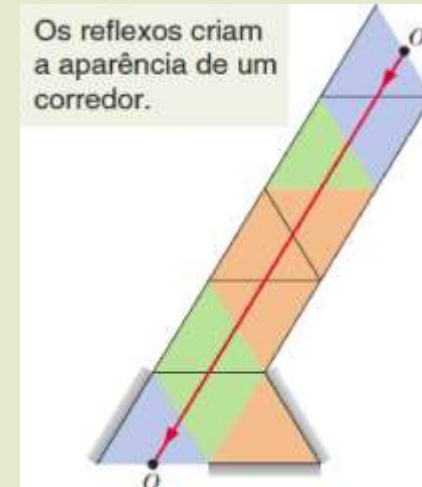
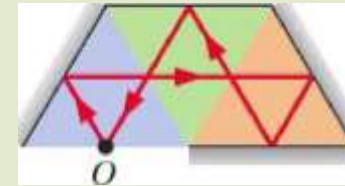
# COMBINAÇÃO DE ESPELHOS PLANOS

Imagine uma combinação de espelhos planos, onde as paredes são cobertas de espelhos do piso ao teto. Andando no interior de um desses labirintos, o que se vê na maioria das direções e uma superposição confusa de reflexos.

Caso 1. De onde parece vir a luz?      Caso 2. De onde parece vir a luz?

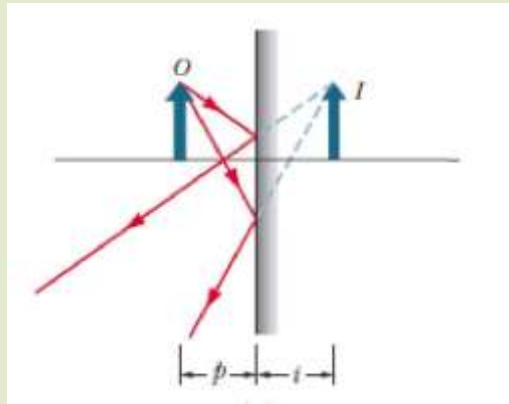


O raio proveniente do espelho *B* chega ao observador em *O* depois de ser refletido pelo espelho *A*. O espelho *B* parece estar atrás do espelho *A*.

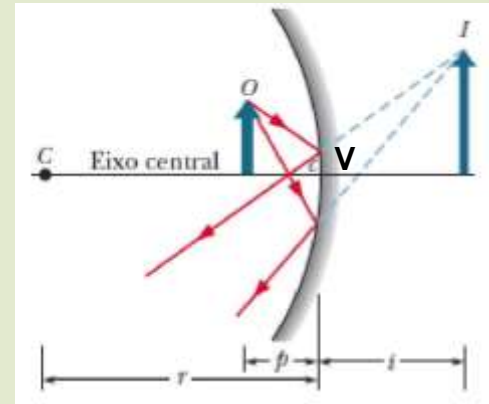


O raio que parte de *O* volta a *O* depois de sofrer quatro reflexões. O observador vê uma imagem virtual de si próprio na extremidade de um corredor aparente.

# ESPELHOS ESFÉRICOS



$$p = i$$



$$p < i \text{ (entre C e V)}$$

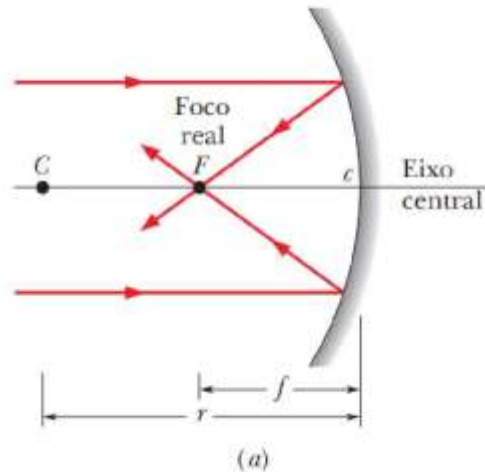
Um **espelho côncavo** possui as seguintes características:

1. O **centro de curvatura**  $C$  (o centro da esfera à qual pertence a superfície do espelho) que estava a uma distância infinita no caso do espelho plano, agora está mais próximo, frente ao espelho.
2. O **campo de visão** (a extensão da cena vista pelo observador) é menor que o do espelho plano.
3. A **distância à imagem** quando o objeto está entre  $C$  e  $V$  é maior que no espelho plano.
4. O **tamanho da imagem** quando o objeto está entre  $C$  e  $V$  é maior que para o espelho plano. É por isso que muitos espelhos de maquiagem são côncavos.

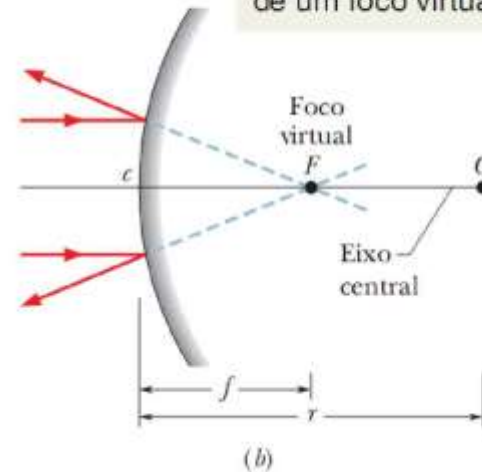
Vamos analisar estas afirmações...

# ESPELHOS ESFÉRICOS

Para localizar o foco, acompanhe raios paralelos ao eixo central.



Os prolongamentos dos raios mostram a posição de um foco virtual.



Em um **espelho côncavo**, raios luminosos paralelos incidentes convergem para um foco real situado no ponto  $F$ , do mesmo lado do espelho que os raios.

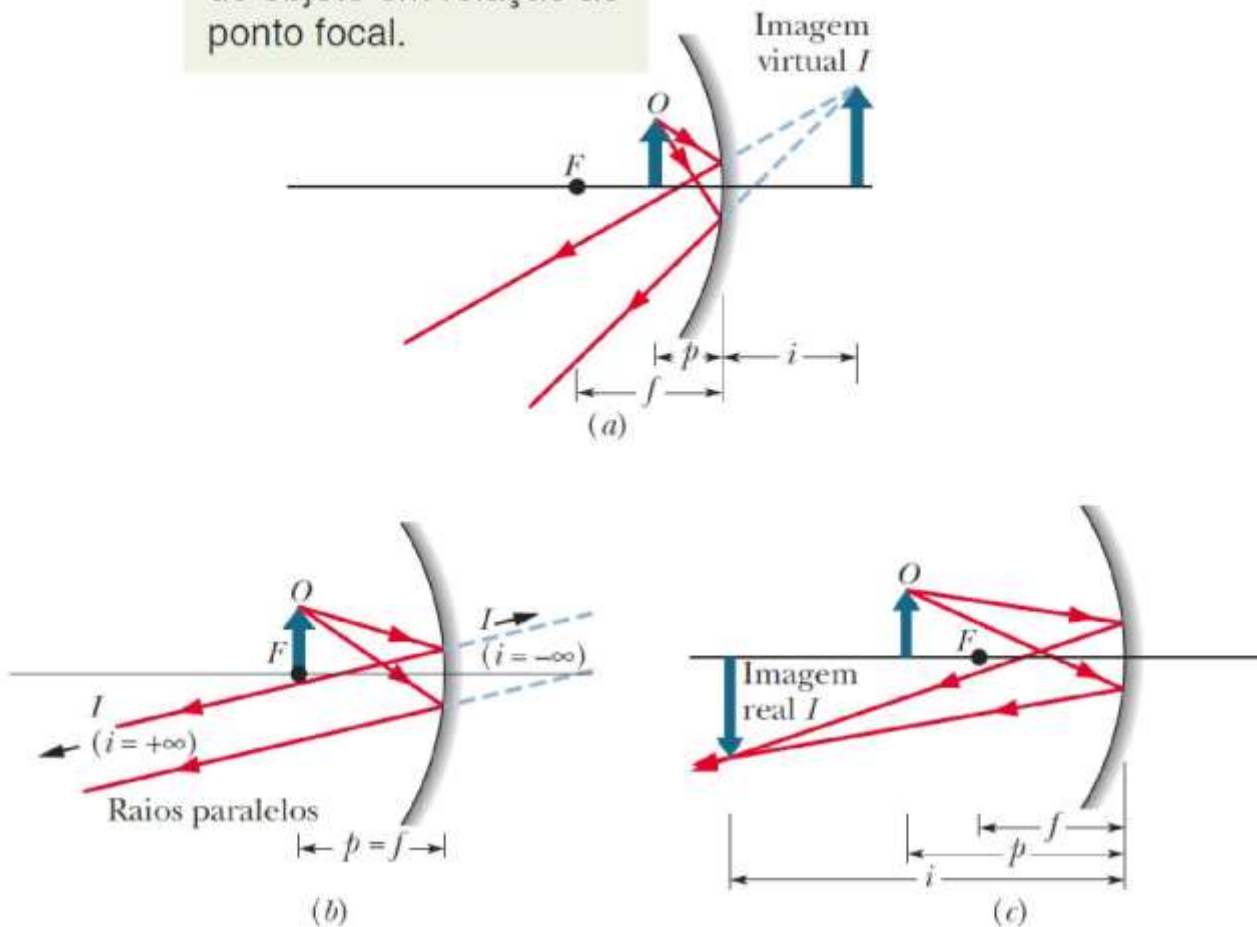
Em um **espelho convexo**, raios luminosos paralelos incidentes parecem divergir de um foco virtual situado no ponto  $F$ , do lado oposto do espelho.

Vejam os a análise da **formação de imagens** no **espelho côncavo**...

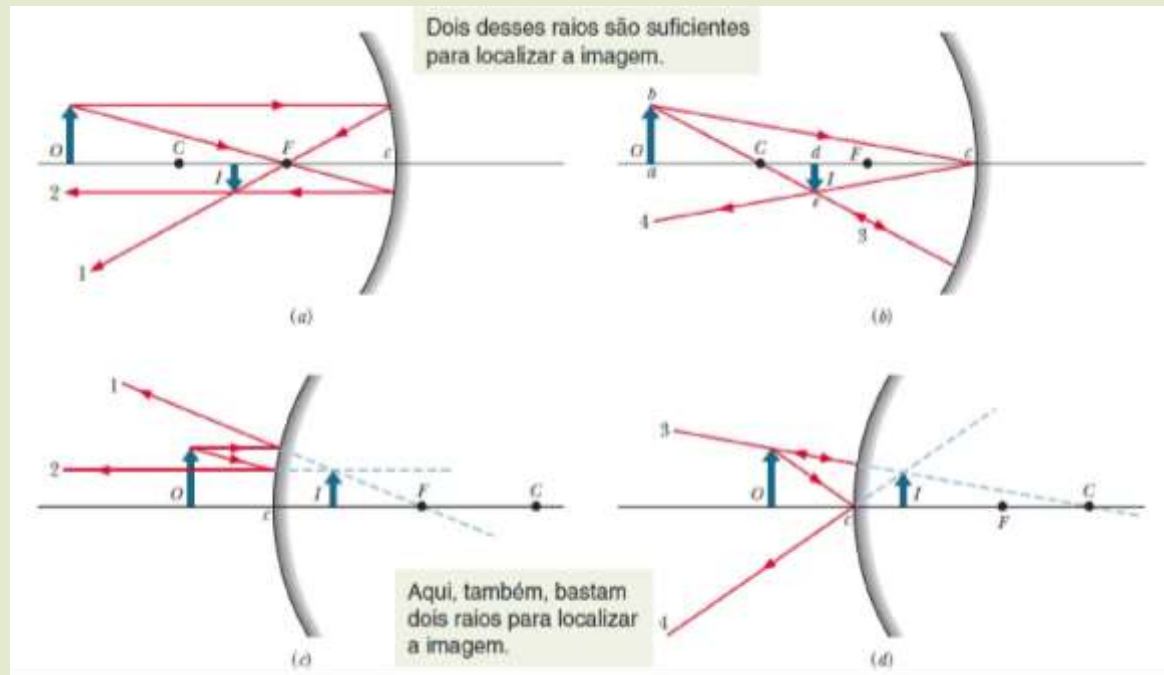
# ESPELHOS ESFÉRICOS

## A posição do objeto e o tipo de imagem

O tipo de imagem varia de acordo com a posição do objeto em relação ao ponto focal.



## Imagens



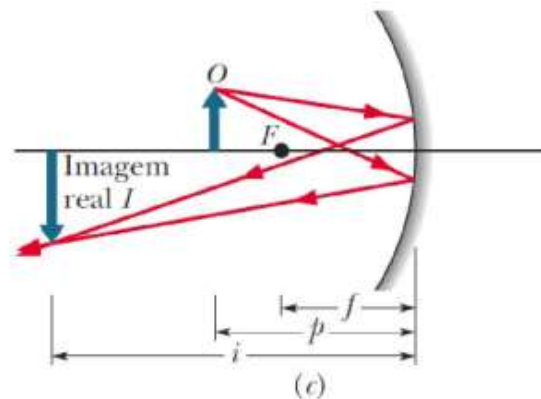
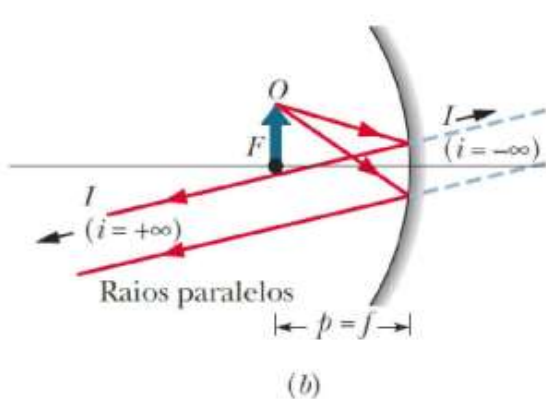
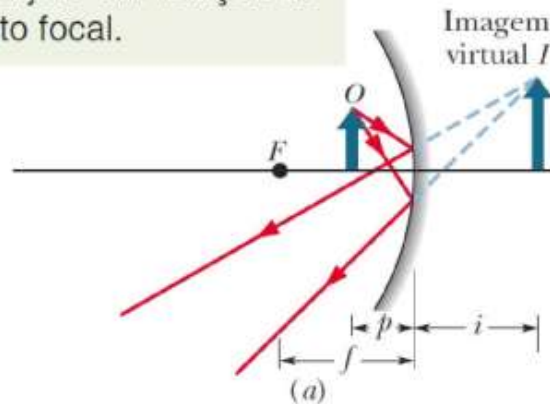
Podemos localizar uma imagem usando os seguintes raios:

1. Um raio (ou prolongação) inicialmente paralelo ao eixo central, que passa por  $F$  depois de ser refletido pelo espelho (raio 1 da Fig. a, e raio 2 da Fig. c).
2. Um raio (ou prolongação) que passa por  $F$  e se torna paralelo ao eixo central depois de ser refletido pelo espelho (raio 2 da Fig. a e raio 1 da Fig. c).
3. Um raio que passa pelo centro de curvatura  $C$  do espelho e volta a passar pelo centro de curvatura depois de ser refletido (raio 3 da Fig. b).
4. Um raio que incide no centro  $c$  do espelho e é refletido com um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência (raio 4 da Fig. d).

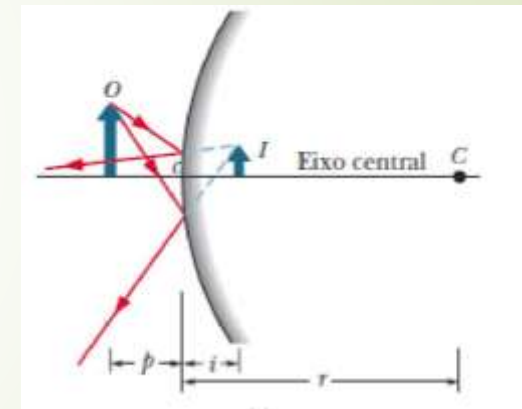


## A posição do objeto e o tipo de imagem

O tipo de imagem varia de acordo com a posição do objeto em relação ao ponto focal.

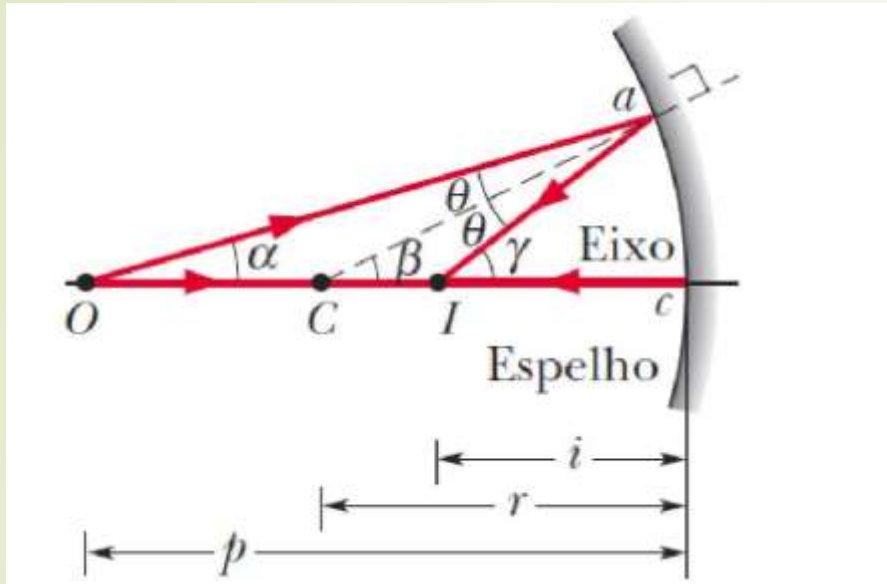


Quais as características de um espelho convexo?



Qual equação relaciona as posições do objeto e da imagem?

# FÓRMULA DOS ESPELHOS ESFÉRICOS



$$\beta = \alpha + \theta \quad \text{e} \quad \gamma = \alpha + 2\theta$$

$$\alpha + \gamma = 2\beta$$

$$\alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{cO} = \frac{\widehat{ac}}{p} \quad \beta = \frac{\widehat{ac}}{cC} = \frac{\widehat{ac}}{r}$$

$$\gamma \approx \frac{\widehat{ac}}{cI} = \frac{\widehat{ac}}{i}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (\text{espelho esférico})$$

## Imagens

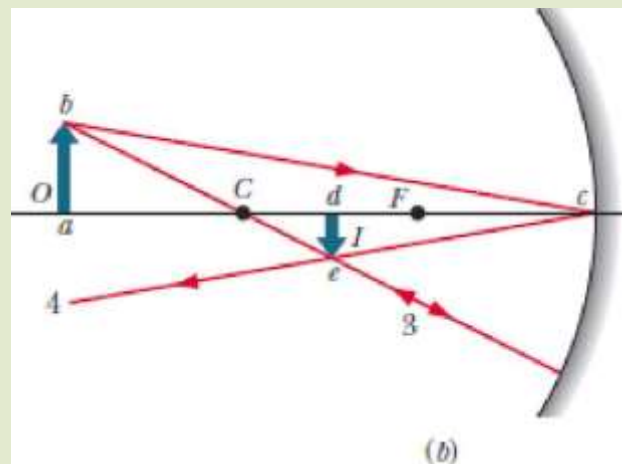
Quando os raios luminosos de um objeto fazem apenas **pequenos ângulos** com o eixo central de um espelho esférico, a distância do objeto,  $p$ , a distância da imagem,  $i$ , e a distância focal,  $f$ , estão relacionadas através da equação

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

O tamanho de um objeto ou imagem, medido perpendicularmente ao eixo central do espelho, é chamado de altura do objeto ou imagem. Seja  $h$  a altura de um objeto e  $h'$  a altura da imagem. Nesse caso, a razão  $h'/h$  é chamada de ampliação lateral do espelho e é representada pela letra  $m$ .

$$|m| = \frac{h'}{h}$$
$$m = -\frac{i}{p}$$

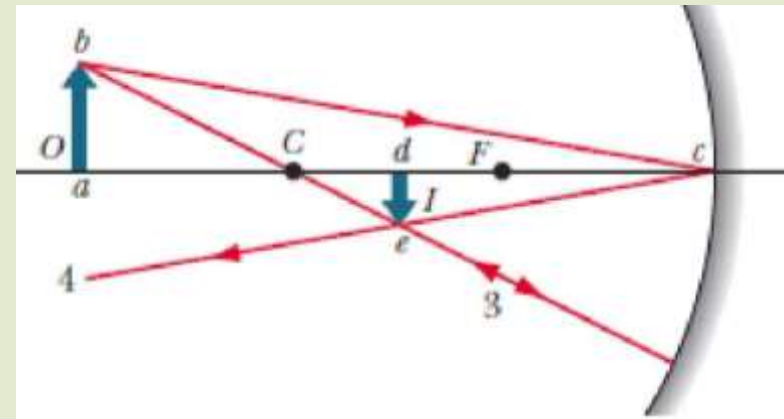
Vamos demonstrar a equação



## Imagens

Observe a figura. O raio  $bc$  é refletido no ponto  $c$  do espelho e, portanto, o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais. Como os triângulos retângulos  $abc$  e  $dec$  da figura são semelhantes (possuem os mesmos ângulos), podemos escrever

$$\frac{de}{ab} = \frac{cd}{ca}$$



A razão do lado esquerdo (a menos do sinal) é a **ampliação lateral  $m$**  do espelho. Como as imagens estão invertidas (e medimos a ordenada  $y$  a partir do eixo óptico  $x$ ) então **para baixo é negativo**.

Como  $cd = i$  e  $ca = p$ , temos que a ampliação  $m$  é:

$$m = -\frac{i}{p}$$

## Exemplo

Uma tarântula de altura  $h$  está diante de um espelho esférico cuja distância focal tem valor absoluto  $|f| = 40 \text{ cm}$ . A imagem da tarântula produzida pelo espelho tem a **mesma orientação** que a tarântula e uma altura  $|h'| = 0,20 |h|$ .

(a) A imagem é real ou virtual? Esta do mesmo lado do espelho que a tarântula ou do lado oposto?

**Resposta:** Como a imagem tem a mesma orientação que a tarântula (o objeto), é virtual e esta localizada do outro lado do espelho.

(b) O espelho é côncavo ou convexo? Qual é o valor da distância focal  $f$ , incluindo o sinal?

## Exemplo

*Não podemos saber de que tipo é o espelho pelo tipo de imagem*, já que tanto os espelhos côncavos como os convexos podem produzir imagens virtuais.

Além disso, *não podemos saber de que tipo é o espelho a partir do sinal da distancia focal  $f$* , porque não dispomos de informações suficientes para aplicar as equações. Entretanto, podemos usar a informação a respeito do aumento.

Sabemos que a relação entre a altura da imagem  $h'$  e a altura do objeto  $h$  é 0,20 (sem informação do sinal). Assim temos:

$$|m| = \frac{h'}{h} = 0,20$$



## Exemplo

Como o objeto e a imagem têm a mesma orientação, é dado do problema que  **$m$  é positivo**:  $m = +0,20$ .

Substituindo este valor na equação e explicitando  $i$ , obtemos:  $i = -0,20p$ , o que não parece de grande utilidade para determinar  $f$ .

Entretanto, podemos usar este resultado para eliminar  $i$ .

Fazendo  $i = -0,20p$  temos:

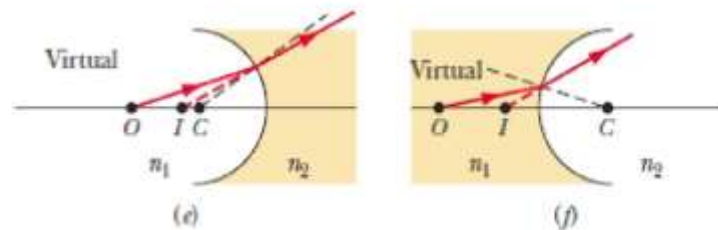
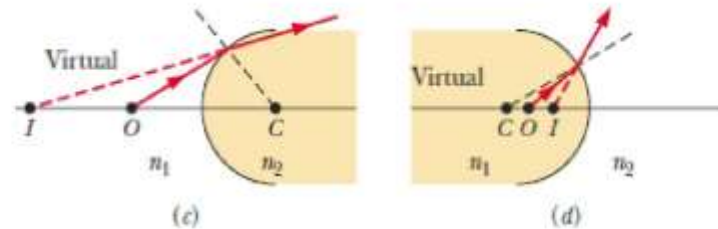
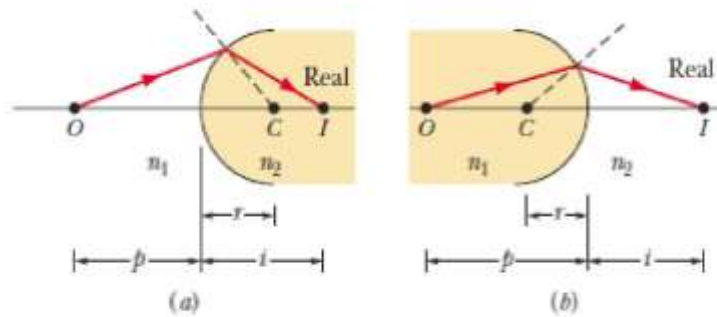
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{p} + \frac{1}{-0,2p} = \frac{1}{p} (-5 + 1)$$

e, portanto,  $f = -40$  cm.

Como  $p$  é positiva (por definição)  $f$  tem que ser negativa, e portanto o espelho é convexo.

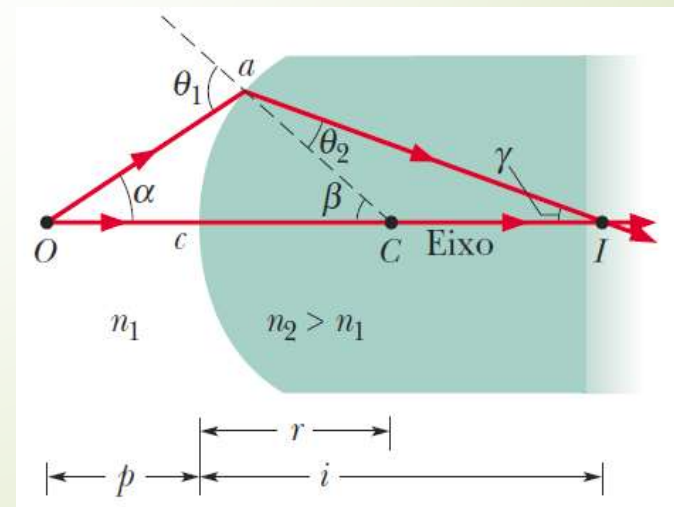
**Vamos ver agora a refração**

# REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS

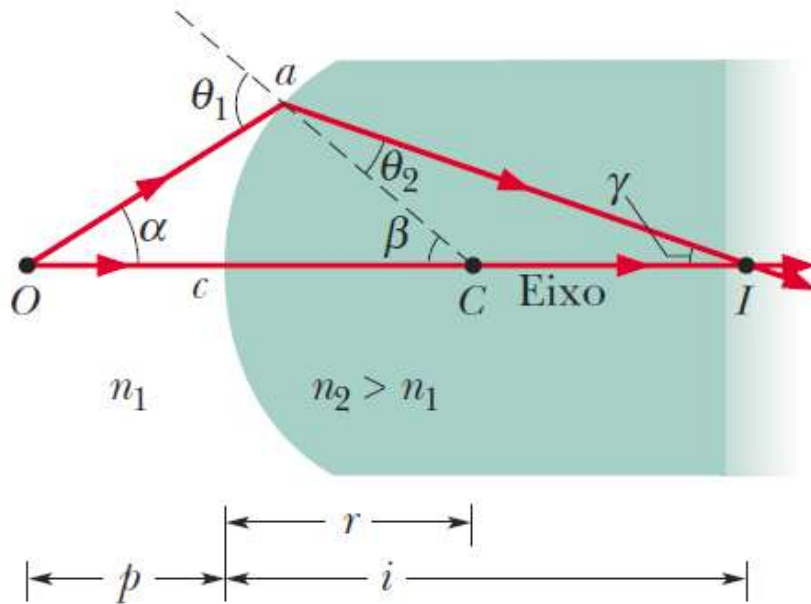


Na figura são apresentados seis formas pelas quais uma imagem pode ser formada por raios refratados entre meios com índices de refração  $n_1$  e  $n_2$  (consideramos  $n_1$  sempre do lado do objeto)

Qual **equação** relaciona as posições do objeto e da imagem neste caso?



# REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad \text{e} \quad \beta = \theta_2 + \gamma$$

$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$

$$\text{tg } \alpha \approx \alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{p} \dots$$

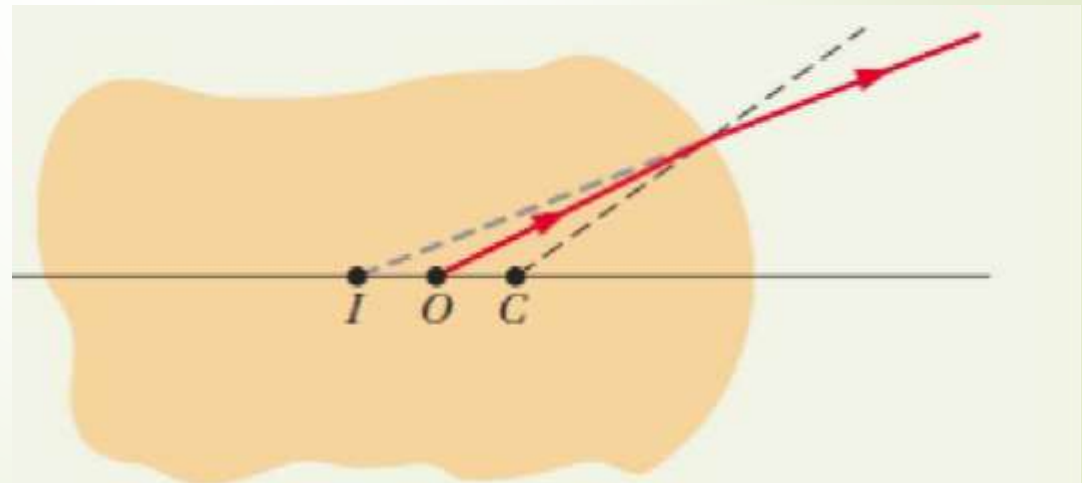
$$\alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{p}; \quad \beta = \frac{\widehat{ac}}{r}; \quad \gamma \approx \frac{\widehat{ac}}{i}$$

Imagem pontual real  
I de um objeto pontual O formada por  
refração em uma interface esférica  
convexa.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

# REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS

**Resolver:** Um mosquito do período jurássico foi encontrado no interior de um bloco de âmbar cujo índice de refração é 1,6. Uma das superfícies do bloco é esfericamente convexa, com um raio de curvatura de 3,00 mm (ver figura). A cabeça do mosquito se encontra no eixo central dessa superfície e quando observada ao longo do eixo central, parece estar a 5,0 mm de profundidade. A que profundidade se encontra realmente?



## Solução:

A cabeça parece estar a 5,0 mm da superfície porque os raios luminosos que chegam ao olho do observador são refratados na interface entre o âmbar e o ar.

De acordo com a equação da refração, a distância da imagem  $i$  e a distância do objeto  $p$  podem ser bem diferentes.

Para aplicar a equação ao problema, devemos observar o seguinte:

1. Como o objeto (a cabeça) e sua imagem estão do mesmo lado da interface, a imagem é virtual e, portanto, o sinal da imagem é negativo:  $i = -5,0$  mm.
2. Como sempre supomos que o objeto está no meio de índice de refração  $n_1$ ,  $n_1 = 1,6$  e  $n_2 = 1,0$ .
3. Como o objeto se encontra diante de uma interface côncava (vista do lado do objeto), o raio de curvatura  $r$  é negativo (para ser positivo deveria estar do outro lado da interface)  $r = -3,0$  mm





# LENTE DELGADAS

Uma **lente** é um corpo transparente limitado por duas superfícies refratoras com um eixo central em comum. Esse eixo central comum é o eixo central da lente.

Uma lente que faz com que raios luminosos inicialmente paralelos ao eixo central se aproximem do eixo é chamada de **lente convergente**; uma lente que faz com que os raios se afastem do eixo central e chamada de **lente divergente**.

**Lente delgada:** é uma lente cuja largura na parte mais espessa e muito menor que a distancia ao objeto, ou a distância à imagem ou que qualquer um dos raios de curvatura das suas superfícies da lente.

Considerando apenas os raios luminosos que fazem ângulos pequenos com o eixo central e chamando de  $f$  à distância focal da lente, temos:



# LENTE DELGADAS

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} \quad (\text{lente delgada})$$

Onde a distancia focal  $f$  é definida por:

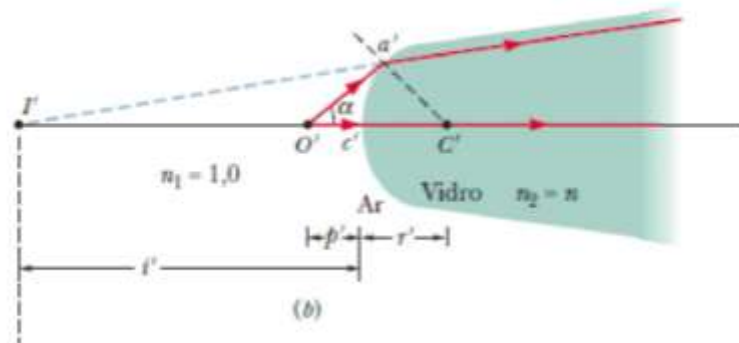
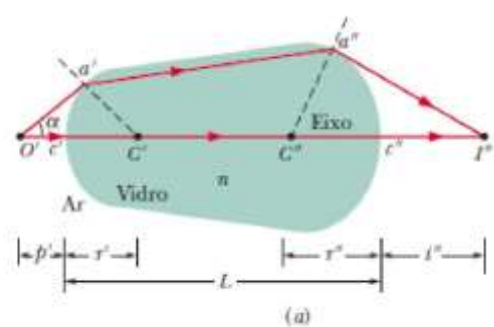
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{lente delgada no ar})$$

Esta ultima equação é chamada de **equação do fabricante de lentes**.

Vamos deduzir ela a partir da análise de duas superfícies refratoras sequencialmente...onde a imagem da primeira é o objeto da segunda!



# FÓRMULA DAS LENTES DELGADAS

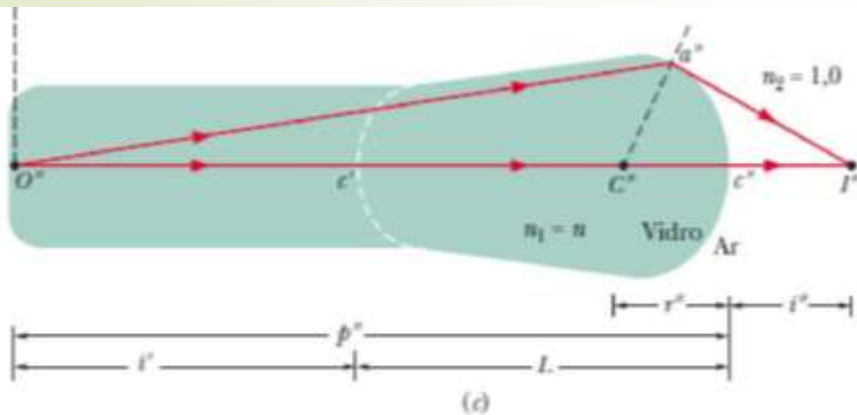


$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{i'} = \frac{n - 1}{r'} \quad (1)$$

$$p'' = i' + L \quad \frac{n}{i' + L} + \frac{1}{i''} = \frac{1 - n}{r''}$$

$$\frac{n}{i'} + \frac{1}{i''} = -\frac{n - 1}{r''} \quad (2) \quad (1)+(2)$$



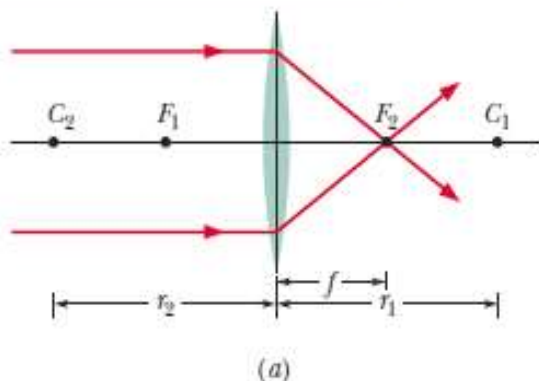
$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{i''} = (n - 1) \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \right)$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{lente delgada no ar})$$

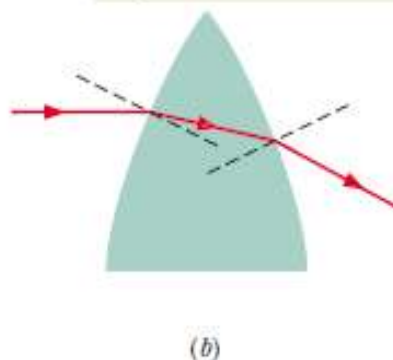


# LENTE DELGADAS: O FOCO

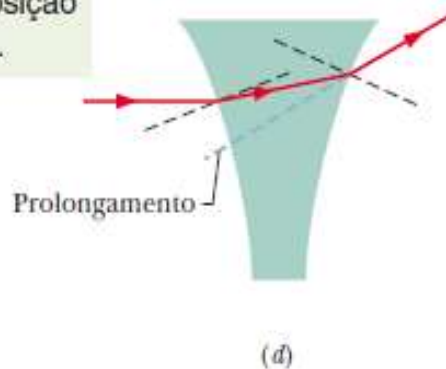
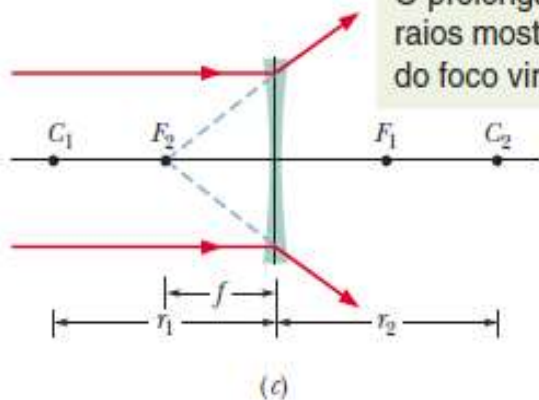
Para localizar o foco  $F_2$  acompanhe raios paralelos ao eixo central.



Os raios mudam de direção apenas nas superfícies.



O prolongamento dos raios mostra a posição do foco virtual  $F_2$ .

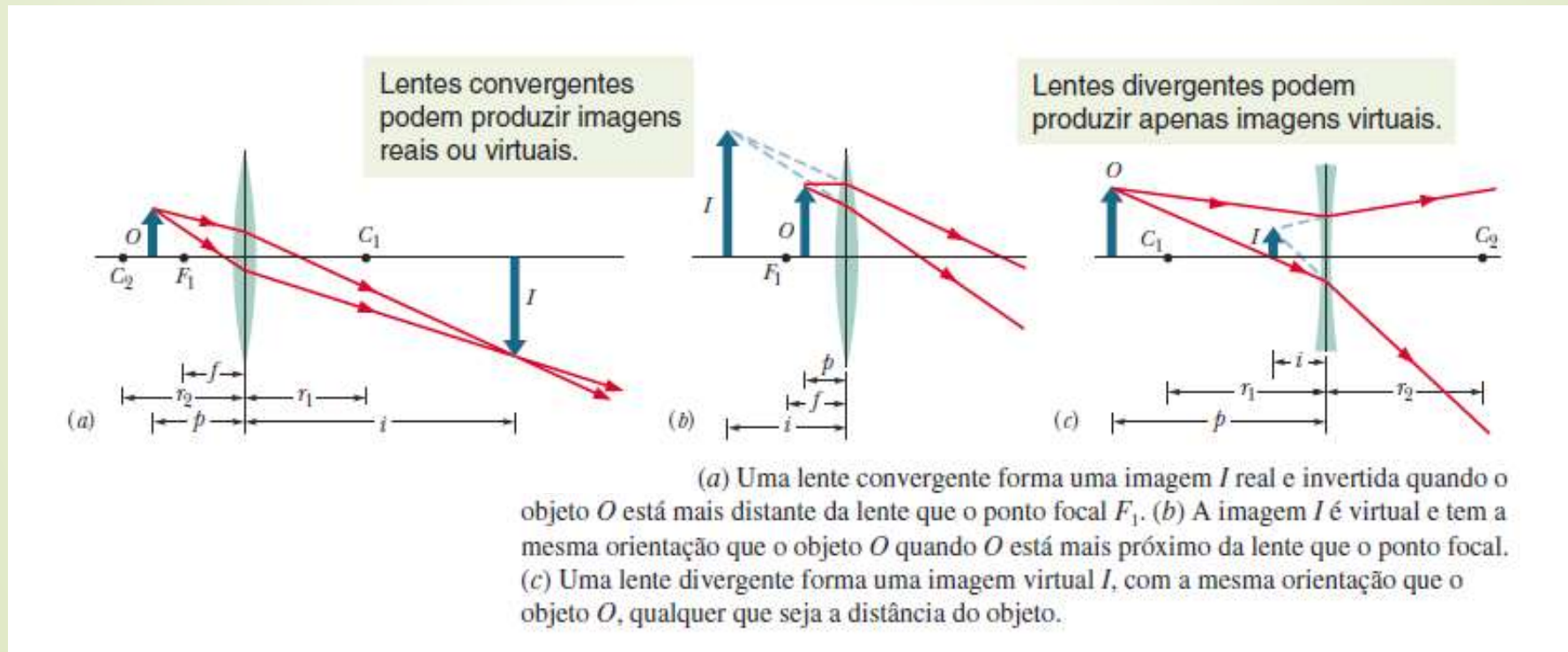


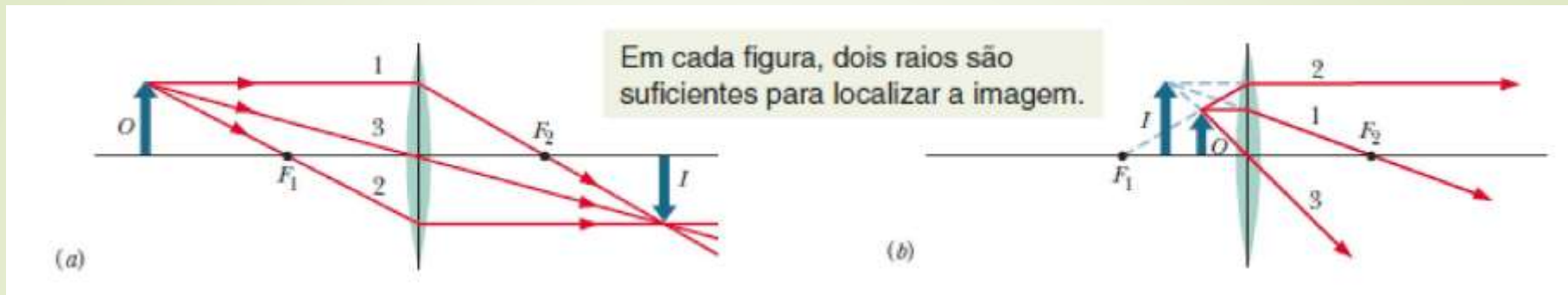
(a) Raios luminosos inicialmente paralelos ao eixo central de uma lente convergente são desviados pela lente e convergem para o ponto focal real  $F_2$ . A lente é mais fina que no desenho; na verdade, supomos que todo o desvio ocorra em um único plano, representado na figura por uma reta vertical passando pelo centro da lente. (b) Ampliação da parte superior da lente representada em (a); as linhas tracejadas são as normais à superfície nos pontos de entrada e saída de um raio luminoso. Observe que os desvios que o raio sofre ao entrar e ao sair da lente são no mesmo sentido e tendem a aproximá-lo do eixo central. (c) Os mesmos raios paralelos divergem depois de passar por uma lente divergente. Os prolongamentos dos raios divergentes passam por um ponto focal virtual  $F_2$ . (d) Ampliação da parte superior da lente representada em (c). Observe que os desvios que o raio sofre ao entrar e ao sair da lente são no mesmo sentido e tendem a afastá-lo do eixo central.

# LENTE DELGADAS: LOCALIZANDO IMAGENS

As imagens virtuais produzidas por lentes ficam do mesmo lado que o objeto e as imagens reais ficam do lado oposto (lembre as regras dos sinais).

Identifique por que as lentes convergentes podem criar imagens reais e virtuais enquanto que as lentes divergentes só podem criar imagens virtuais!!!

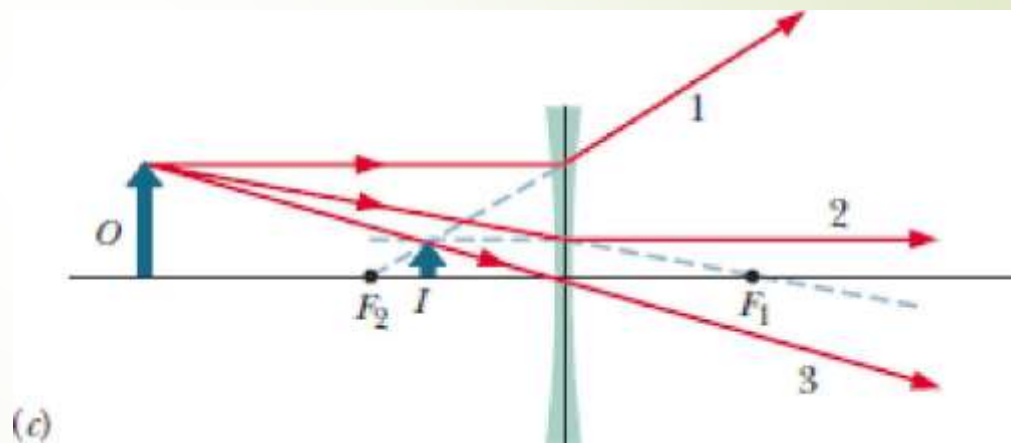




- Um raio inicialmente paralelo ao eixo central da lente passa pelo ponto focal  $F_2$  (raio 1 das figuras).

- Um raio que passa pelo ponto focal  $F_1$  sai da lente, paralelo ao eixo central (raio 2 das figuras).

- Um raio que passa pelo centro da lente sai da lente sem mudar de direção (raio 3 das figuras).

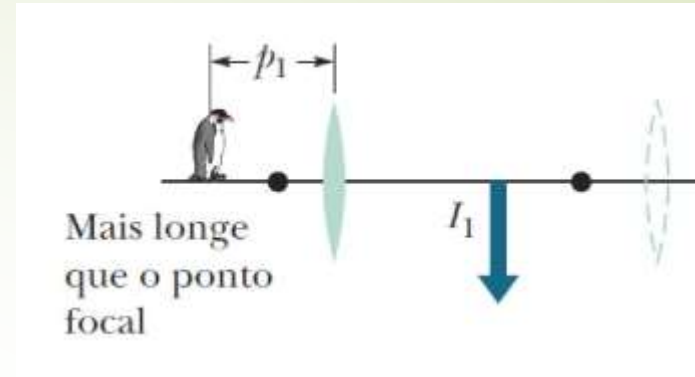


**Finalmente podemos estudar os sistemas de lentes!**

# LENTES DELGADAS: DUAS LENTES

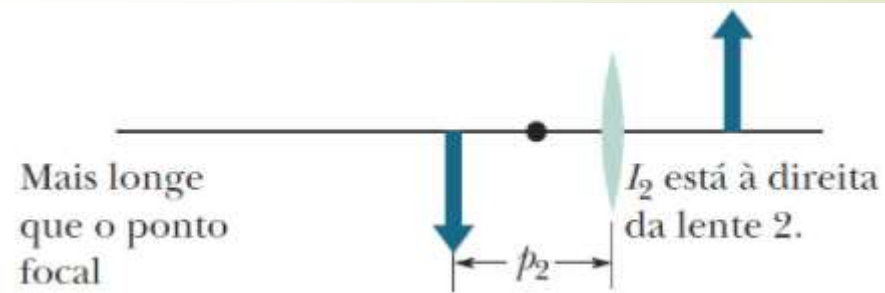
## 1ª parte

Ignorando a lente 2, localizamos a imagem  $I_1$  produzida pela lente 1. Verificamos se a imagem está à esquerda ou à direita da lente, se é real ou virtual e se tem a mesma orientação que o objeto. Calculamos a ampliação lateral  $m_1$ .



## 2ª parte

Ignorando a lente 1, tratamos  $I_1$  como o objeto da lente 2 e localizamos a imagem  $I_2$  produzida pela lente 2.



Se  $I_1$  está à direita da lente 2 (do outro lado da lente 2), consideramos a distância do objeto  $p_2$  como um número negativo para localizar a posição final da imagem,  $I_2$ . Finalmente, calculamos a ampliação lateral  $m_2$ .

A ampliação total é dada por  $M = m_1 \cdot m_2$

Se  $M$  é positivo, a imagem final tem a mesma orientação que o objeto.



**Exercício:** Um inseto está sobre o eixo central de uma lente simétrica delgada, a 20 cm da lente. A ampliação lateral da lente é  $m = -0,25$  e o índice de refração do material de que é feita a lente é 1,65.

(a) Determine o tipo de imagem produzido pela lente; o tipo de lente; se o inseto está mais próximo ou mais distante da lente que o ponto focal; de que lado da lente é formada a imagem; se a imagem é invertida ou não.

A partir do valor de  $m$  e de acordo com a conhecida equação  $m = -i/p$  temos:

$$i = -mp = 0,25p$$

Assim, não é preciso fazer nenhum cálculo para responder à primeira pergunta.....

Vimos que

$$i = -mp = 0,25p$$

1. Como  $p$  é sempre positivo, sabemos que  $i$  é positivo.
2. Isso significa que **a imagem é real** e, portanto, **a lente é convergente** (as lentes convergentes são as únicas que produzem **imagens reais**).
3. O objeto está mais distante da lente que o ponto focal (caso contrário, a imagem seria virtual).
4. Além disso, a imagem é invertida e fica do lado oposto da lente, **como todas as imagens reais formadas por lentes convergentes**.

(b) Quais são os dois raios de curvatura da lente?

# LENTE SIMÉTRICA DELGADA



Conhecemos  $p$  (é um dos dados do problema), mas não conhecemos  $i$ . Assim, o primeiro passo é determinar o valor de  $i$  usando as conclusões a que chegamos no item anterior. O resultado é o seguinte:  $i = (0,25)(20 \text{ cm}) = 5,0 \text{ cm}$ .

Utilizando a equação das lentes finas (L desconsiderado):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{20 \text{ cm}} + \frac{1}{5,0 \text{ cm}},$$

e portanto  $f = 4,0 \text{ cm}$

De acordo com

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n - 1) \left( \frac{1}{+r} - \frac{1}{-r} \right).$$

Substituindo  $f$  e  $n$  por valores numéricos, temos:

$$\frac{1}{4,0 \text{ cm}} = (1,65 - 1) \frac{2}{r},$$

e, portanto,

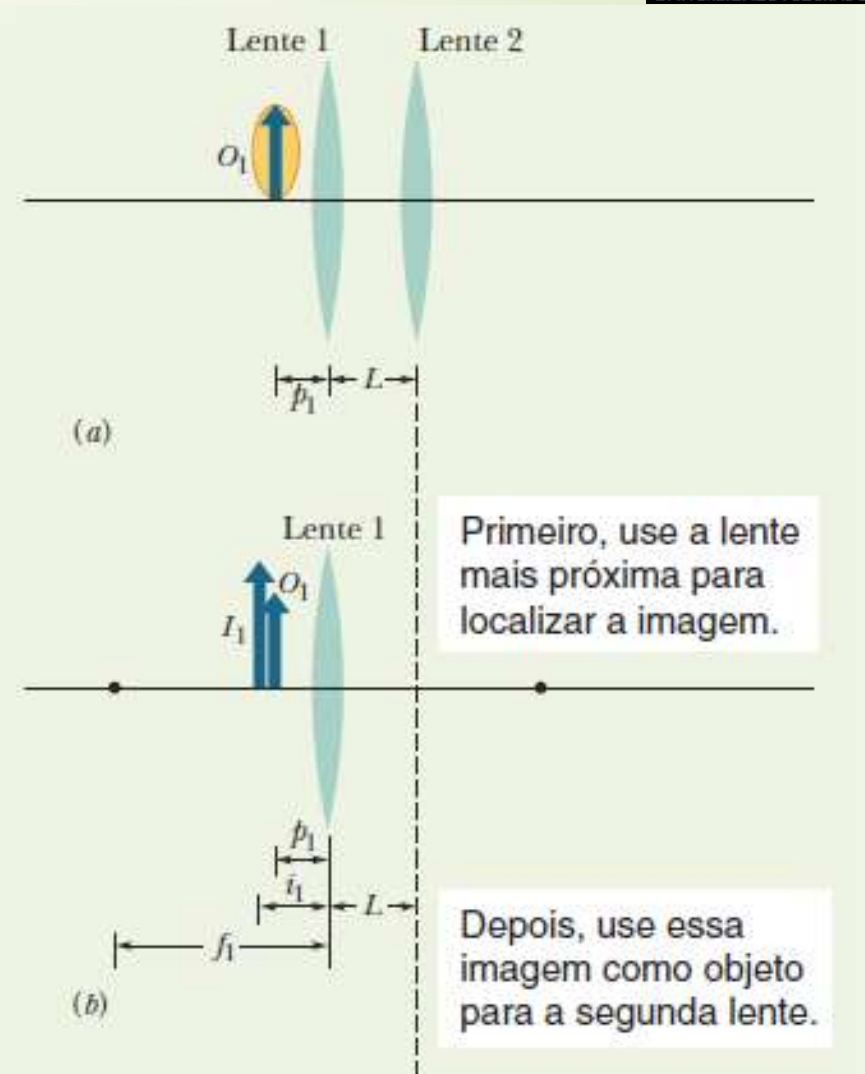
$$r = (0,65)(2)(4,0 \text{ cm}) = 5,2 \text{ cm.} \quad (\text{Resposta})$$

# LENTE SIMÉTRICAS DELGADAS

**Resolver:** A figura mostra uma semente de abóbora amarela colocada diante de duas lentes delgadas simétricas coaxiais 1 e 2, de distâncias focais  $f_1 = +24$  cm e  $f_2 = +9$  cm, respectivamente, separadas por uma distância  $L = 10$  cm.

A semente está a 6,0 cm da lente 1.

Qual é a localização da imagem da semente?



# LENTE SIMÉTRICAS DELGADAS



Lente 1: Ignorando a lente 2, localizamos a imagem  $I_1$  produzida pela lente 1 aplicando a equação da lente

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1}$$

Nesta equação, o objeto  $O_1$  para a lente 1 é a semente, que se encontra a 6,0 cm da lente: assim fazemos  $p_1 = +6,0$  cm.

Substituindo os valores temos:

$$\frac{1}{+6,0 \text{ cm}} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{+24 \text{ cm}}$$

O que dá  $i_1 = -8,0$  cm.

Isso significa que a imagem está a 8,0 cm da lente 1, e é virtual.

(Poderíamos ter antecipado que a imagem é virtual observando que a semente está mais próxima da lente 1 que o ponto focal).

Como  $I_1$  é virtual, ela está do mesmo lado da lente que o objeto  $O_1$  e tem a mesma orientação.

Agora passemos à segunda parte (determinar a posição da imagem gerada pela lente 2)

# LENTE SIMÉTRICAS DELGADAS

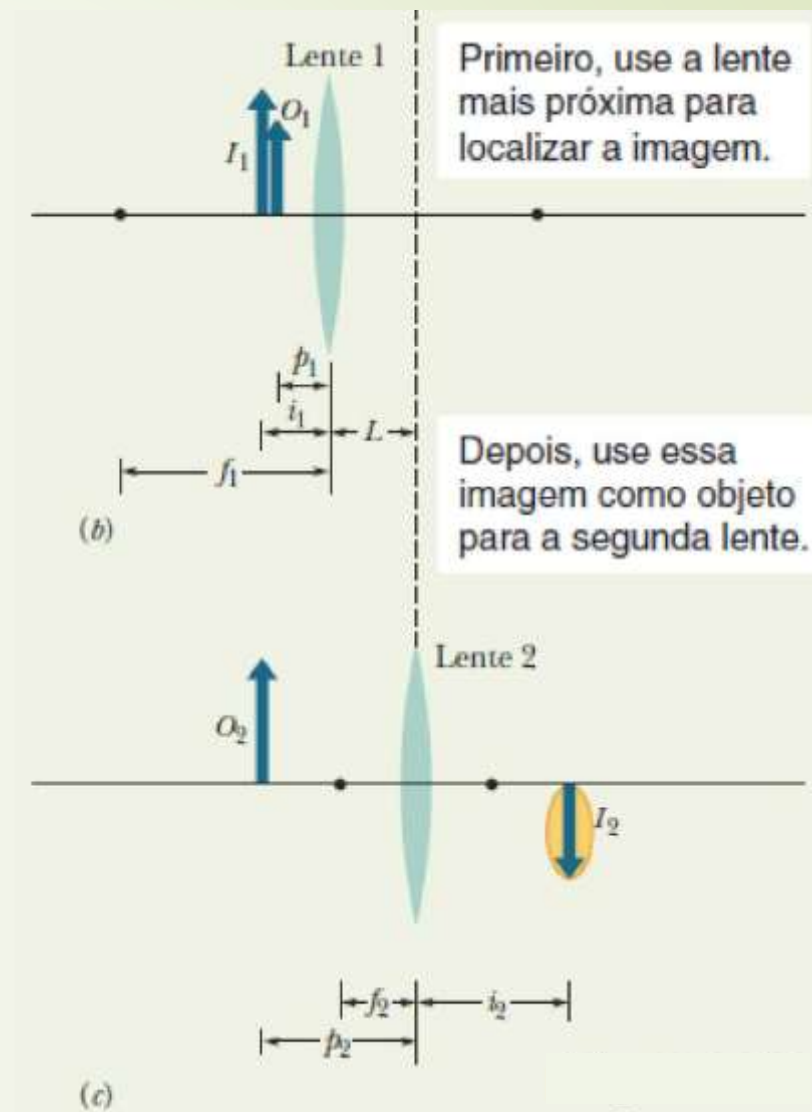
**Lente 2.** Consideramos a imagem  $I_1$ , como o objeto  $O_2$  para a segunda lente e ignoramos a lente 1.

Como o objeto  $O_2$  está mais afastado da lente 2 que o ponto focal, podemos antecipar que a imagem  $I_2$  produzida pela lente 2 é real, invertida e não está do mesmo lado da lente que  $O_2$ .

Os resultados numéricos devem ser compatíveis com essas conclusões.

De acordo com a figura a distância  $p_2$  entre o objeto  $O_2$  e a lente 2 é dada por:

$$p_2 = L + |i_1| = 10 \text{ cm} + 8,0 \text{ cm} = 18 \text{ cm}.$$





# LENTE SIMÉTRICAS DELGADAS

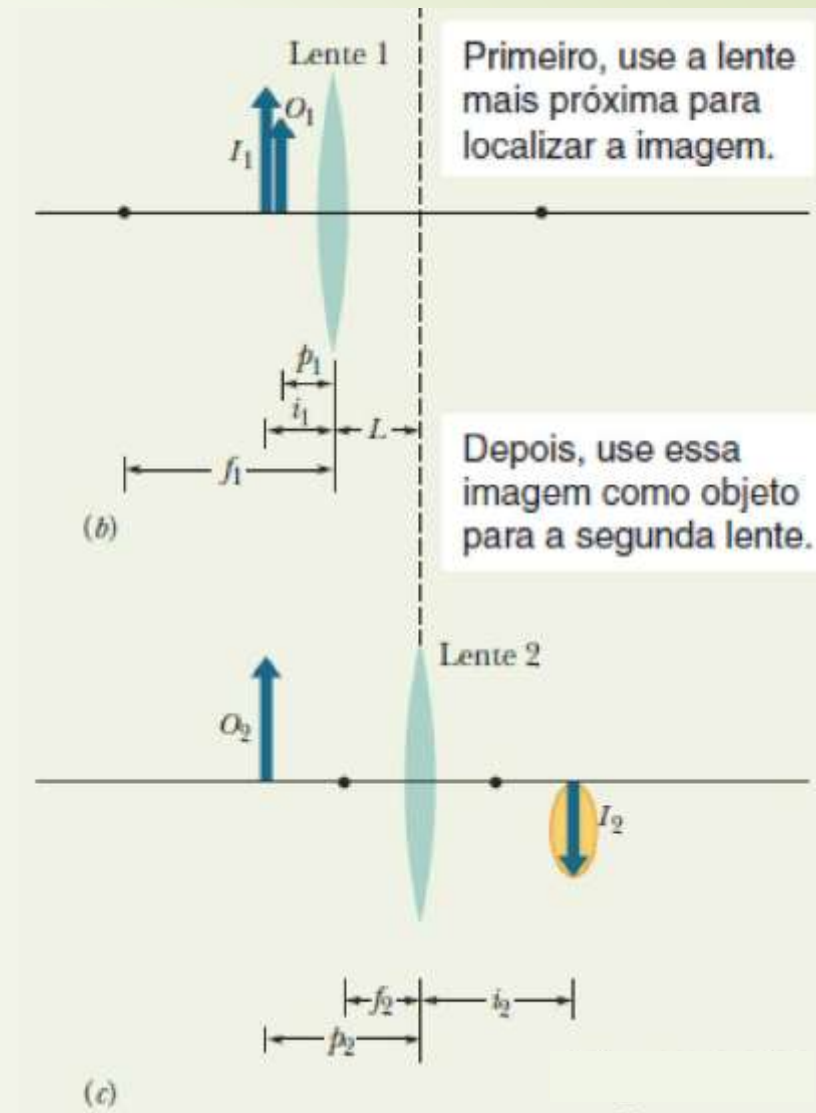
Neste caso teremos:

$$\frac{1}{+18 \text{ cm}} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{+9,0 \text{ cm}}$$

Assim:  $i_2 = +18 \text{ cm}$

O sinal positivo confirma nossas conclusões: a imagem  $I_2$  produzida pela lente 2 é real, invertida e está do lado direito da lente 2, como mostra a figura.

Sendo assim, a imagem poderia ser vista nitidamente em uma tela situada 18 cm à direita da lente 2.



## Lente de Aumento Simples

O olho humano normal só é capaz de focalizar uma imagem de um objeto na retina (situada no fundo do olho) se a distância entre o objeto e o olho for maior que a de um ponto conhecido como **ponto próximo**, representado pelo símbolo  $P_p$ . Quando o objeto está a uma distância menor que a do ponto próximo, a imagem na retina não é nítida.

A figura mostra um objeto  $O$  colocado no ponto próximo  $P_p$  de um olho humano. O tamanho da imagem produzida na retina depende do ângulo  $\theta$  que o objeto ocupa no campo de visão. Aproximando o objeto do olho, como na figura (b), aumentamos o ângulo e, portanto, a capacidade de distinguir detalhes do objeto. Entretanto, como o objeto agora está a uma distância menor que o ponto próximo, não está mais *em foco*, ou seja, não pode ser visto com nitidez.

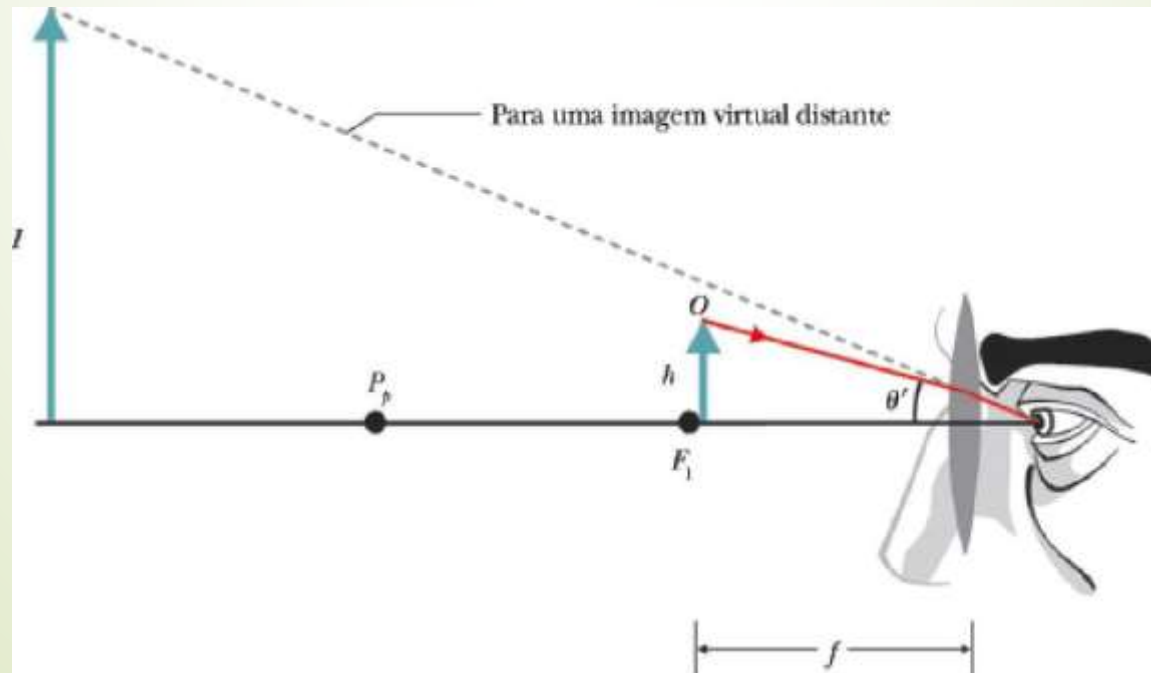


## Lente de Aumento Simples

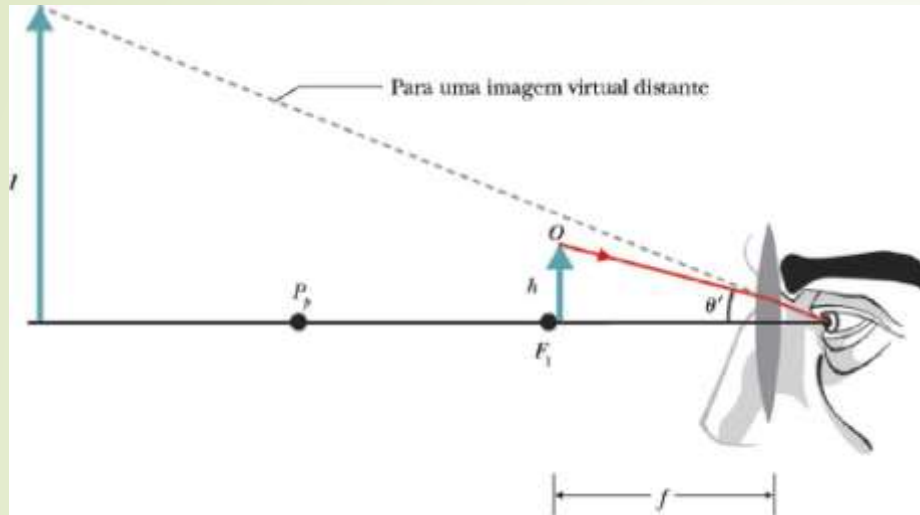
Se o objeto está a uma **distância menor** que o ponto próximo, **é possível tornar a imagem novamente nítida** observando o objeto através de uma lente convergente.

A lente deve estar posicionada de tal forma que o **objeto O** fique entre o ponto focal da lente  $F_1$  (bem próximo de  $F_1$ ), e nosso olho (figura) e portanto o vértice da lente.

O que o observador enxerga nesse caso é a **imagem virtual** do objeto produzida pela lente (muito além do ponto próximo, se o objeto está no foco da lente).



## Lente de Aumento Simples



O ângulo  $\theta'$  ocupado pela imagem virtual é maior que o maior ângulo  $\theta$  que o objeto sozinho pode ocupar e ser visto com nitidez.

A *ampliação angular*  $m_\theta$  (que não deve ser confundida com a ampliação lateral  $m$ ) do objeto é dada por

$$m_\theta = \frac{\theta'}{\theta}$$

Supondo que o objeto  $O$  se encontra no ponto focal da lente e que os ângulos são suficientemente pequenos para que  $\text{tg } \theta \approx \theta$  e  $\text{tg } \theta' \approx \theta'$ , então  $\theta \approx h/25$  cm (sendo 25 cm a distância ao  $P_p$ ) e  $\theta' \approx h/f$  temos neste caso:

$$m_\theta \approx \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (\text{lente de aumento simples})$$

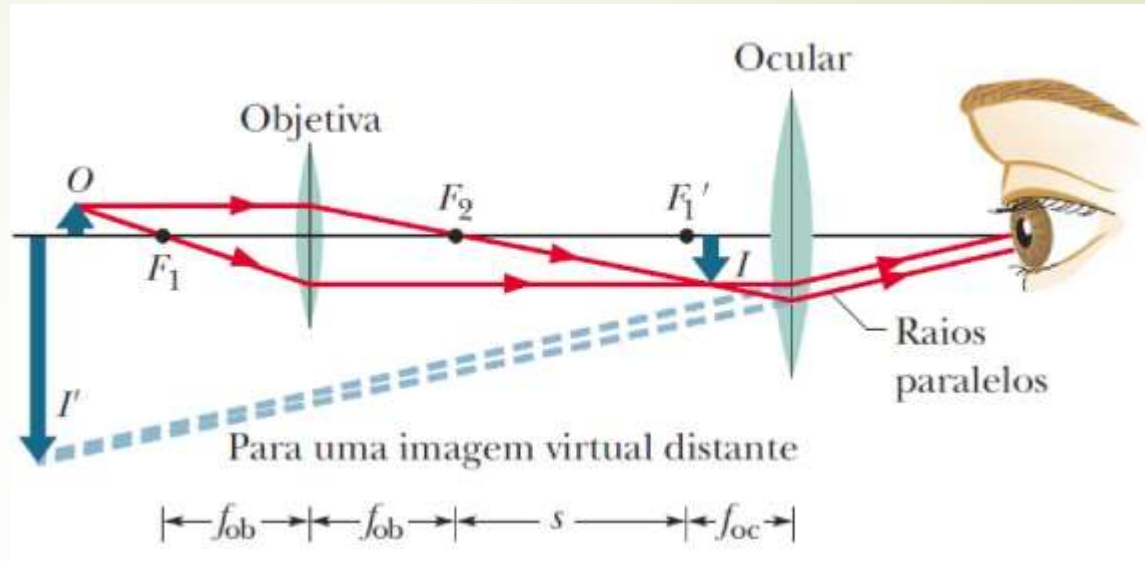
## Microscópio Composto

Diagrama esquemático de um microscópio composto (o desenho não está em escala).

A objetiva produz uma imagem real  $I$  do objeto  $O$  ligeiramente mais próxima da ocular que o ponto focal  $F_1'$ .

A imagem  $I$  se comporta como um objeto para a ocular, que produz uma imagem final virtual  $I'$ , que é vista pelo observador.

A objetiva tem uma distância focal  $f_{ob}$ ; a ocular tem uma distância focal  $f_{oc}$  e  $s$  é o comprimento do tubo.



Se a ampliação lateral produzida pela objetiva é  $m$  e a ampliação total do microscópio é  $M$ , temos:

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{s}{f_{ob}}$$
$$M = mm_{\theta} = -\frac{s}{f_{ob}} \frac{25 \text{ cm}}{f_{oc}} \quad (\text{microscópio})$$

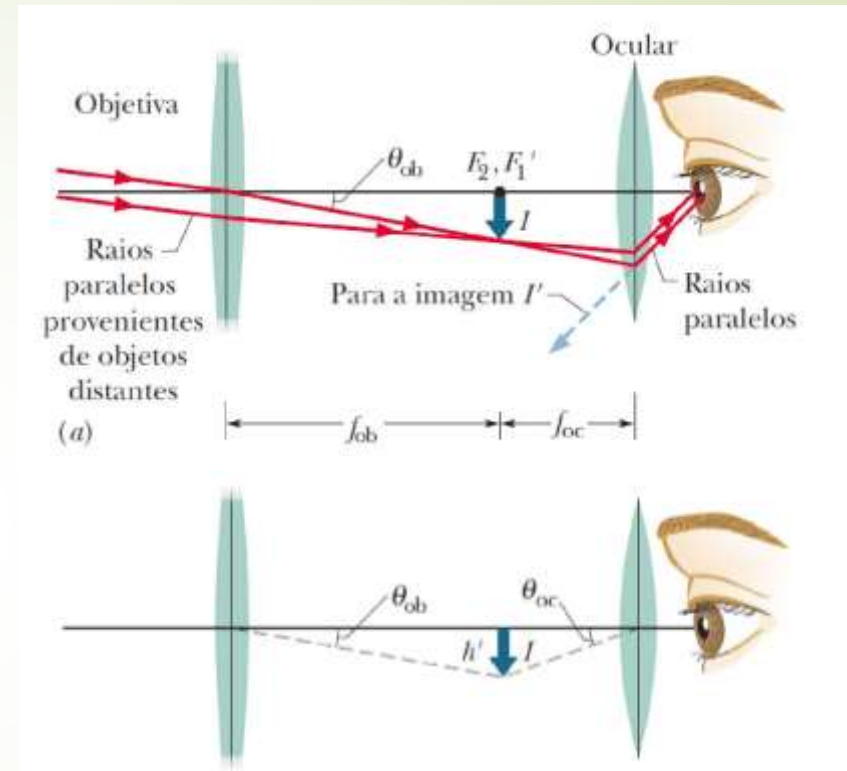


## Telescópio Refrator

Diagrama esquemático de um telescópio refrator. A objetiva produz uma imagem real  $I$  de uma fonte luminosa distante (o objeto), cujos raios chegam aproximadamente paralelos à objetiva. (Na figura, uma das extremidades do objeto esta no eixo central).

A imagem  $I$ , que se forma no local onde estão os pontos focais  $F_2$  e  $F_1'$  se comporta como um objeto para a ocular, que produz uma imagem final virtual  $I$  a uma grande distancia do observador. A objetiva tem uma distância focal  $f_{ob}$ ; a ocular tem uma distância focal  $f_{oc}$ .

A imagem  $I$  tem uma altura  $h'$  e ocupa um ângulo  $\theta_{ob}$  do ponto de vista da objetiva e um ângulo  $\theta_{oc}$  do ponto de vista da ocular.



A **ampliação angular**  $m_\theta$  do telescópio é  $\theta_{oc}/\theta_{ob}$ . De acordo com a figura, no caso de raios próximos ao eixo central (paraxiais), podemos supor que  $\theta_{ob} \sim h'/f_{ob}$  e  $\theta_{oc} \sim -h'/f_{oc}$ , o que dá

$$m_\theta = -\frac{f_{ob}}{f_{oc}} \quad (\text{telescópio})$$



No desenvolvimento do conhecimento, quando estudamos um fenômeno, queremos mais que uma fórmula de cálculo para aplicar a esse fenômeno...

Assim, o método científico diz que: primeiro observamos, depois obtemos números (medimos), depois obtemos uma lei que permite achar estes números (que é a fórmula de cálculo), mas.....

**a verdadeira glória da ciência é encontrar um meio de pensar de forma que a lei seja evidente**

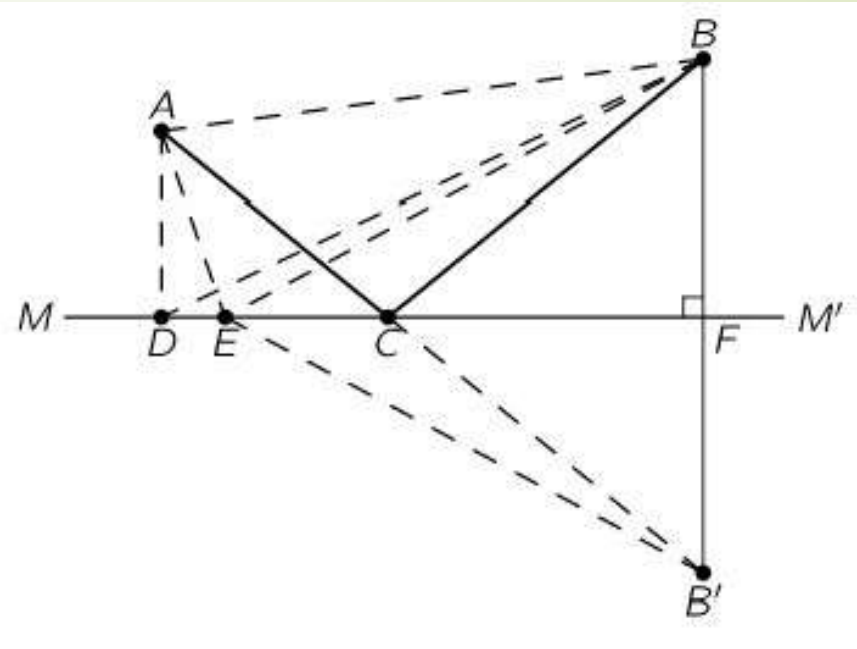
O primeiro a propor uma forma de pensar que tornou a lei da refração evidente foi Fermat em 1650 e foi chamado “*o princípio do tempo mínimo*”

Historicamente, o primeiro a propor algo semelhante foi Heron de Alexandria (geômetra grego) nascido em 10 DC. Ele propôs “o princípio da menor distância” para explicar a propagação da luz (nada mal! explica a propagação e a lei da reflexão 2000 anos atrás!)...

Vejamos como funcionava esse princípio de Heron....

# PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

Se aceitamos que a linha reta é a menor distância entre dois pontos, então a lei da reflexão decorre do princípio de Heron imediatamente: analisar figura



Mas este princípio evidentemente não se aplica à refração!

Vamos demonstrar que o “*o princípio do tempo mínimo*” de Fermat é mais poderoso e explica a reflexão e também a refração, ou seja, conduz à Lei de Snell (Feynman Lectures on physics, volume 1, página 26-4).

# PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

Nosso problema é ir de A até B no menor tempo!

Imagine uma pessoa se afogando e você tentando socorrer (correndo e nadando), você iria por uma linha reta?

....temos essa tendência natural a fazer isso.....e estaria errado!

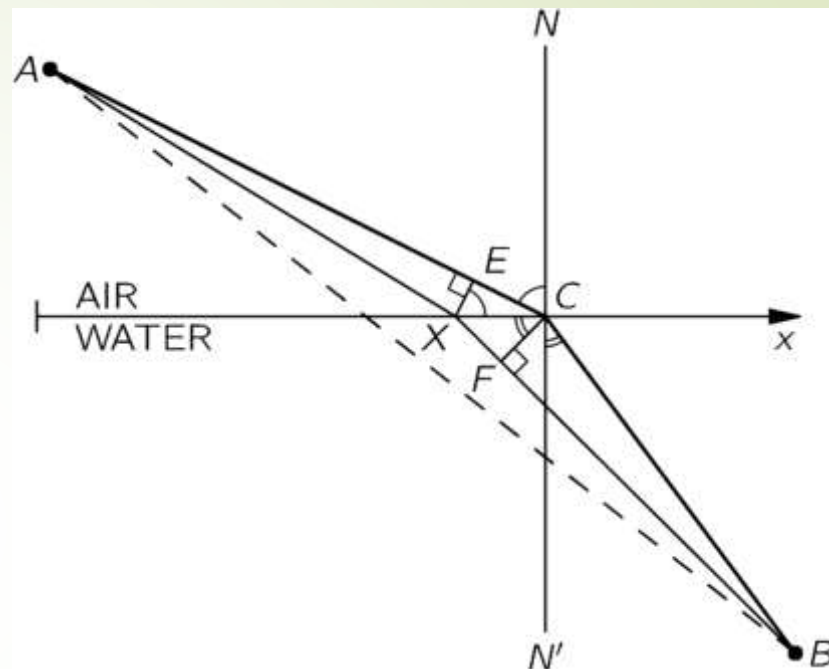
A questão é a sua velocidade nadando e correndo, ou seja: a questão é comparar as distâncias EC e XF com os tempos que demandam para serem percorridas...

É importante perceber que quando estamos no trajeto certo, numa primeira aproximação, os tempos para caminhos levemente diferentes são iguais! Consideremos que a velocidade da luz na água é  $1/n$  vezes a velocidade da luz no ar:

$$t_{EC} = t_{XF} \quad \frac{EC}{v_{EC}} = \frac{XF}{v_{XF}} \quad \frac{EC}{v_{EC}} = \frac{XF}{\frac{v_{EC}}{n}} \quad EC = n XF \quad XC \widehat{\text{sen}} \widehat{EXC} = n XC \widehat{\text{sen}} \widehat{XCF}$$

$$\widehat{\text{sen}} \phi_i = n \widehat{\text{sen}} \phi_r$$

Vejamos as consequências deste princípio....

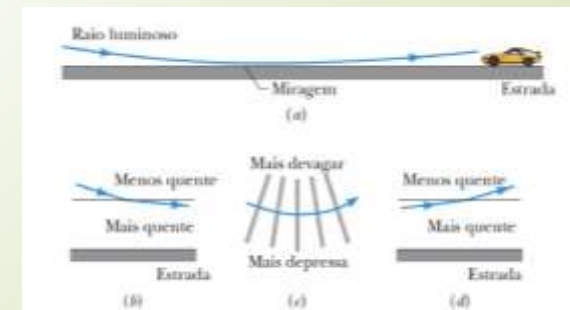
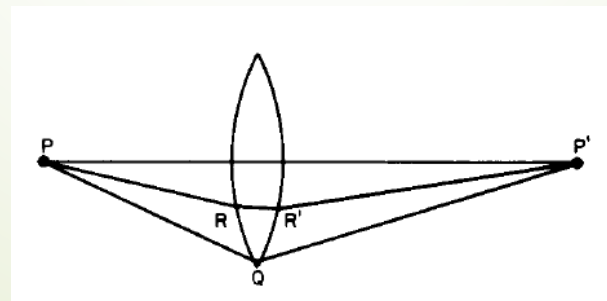
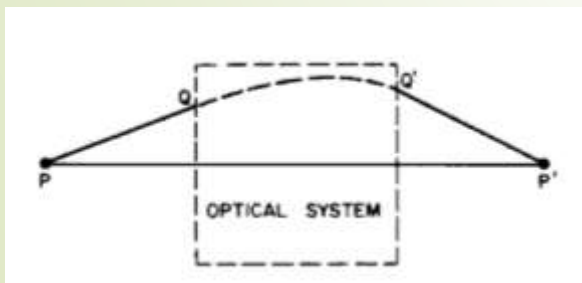
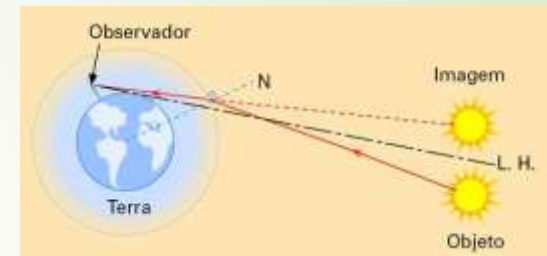
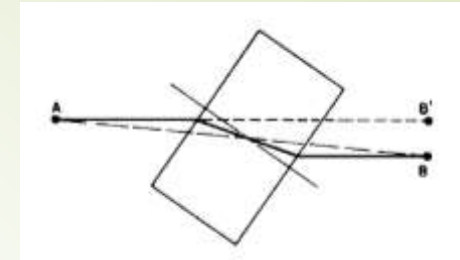


# PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

Consequências:

1. Princípio da reciprocidade ( $A \rightarrow B = B \rightarrow A$ )
2. Comportamento da luz no bloco (diminui o trajeto dentro do bloco)
3. Ao ver o pôr do sol ele já está bem abaixo do horizonte!
4. Água no asfalto?
5. Como fazer para coletar toda a luz que sai de um ponto P, mesmo os raios que vão para Q?

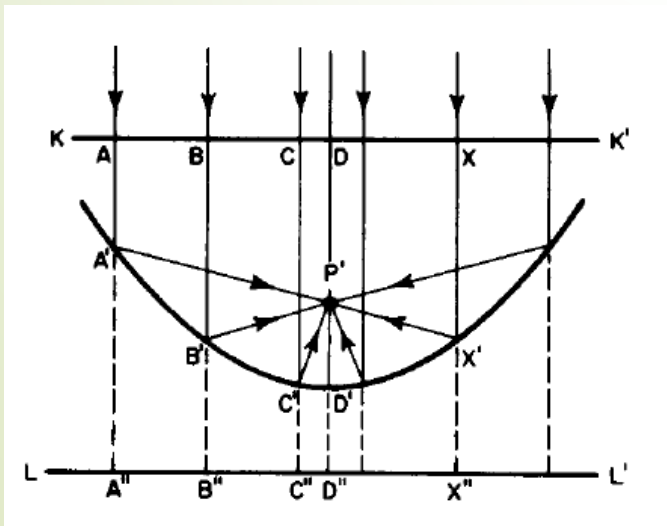
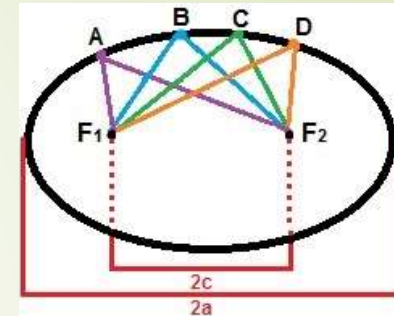
solução: igualando os tempos de todos os diferentes caminhos de P a P' !!! = lente convergente



# PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

Consequências:

6. Como coletar toda a luz que sai de um ponto?
7. Pela definição de elipse, todos os caminhos entre  $F_1$  e  $F_2$  com reflexão nas paredes espelhadas desta figura são iguais!
8. O telescópio do Palomar (São Diego - Califórnia) utiliza esta propriedade, mas a curva que iguala os caminhos é uma parábola!





Quando um novo principio teórico é desenvolvido, como o dos tempos mínimos, os estudantes estão inclinados a dizer: *“bem..., é simples, elegante, surpreendente, etc...mas a questão é se, no final das contas, ele facilita as coisas...veja... eu entendo espelhos pela Lei de Snell e da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão sem me importar com esses princípios”*...parece que é uma questão filosófica...mas...

**a importância de um principio é que ele predize coisas novas!!! ...nos permite ir além do que atualmente conhecemos !!!**

Por exemplo:

O principio de Fermat prediz que a velocidade da luz em água deve ser inferior à velocidade da luz no ar (o que não pode ser obtido da lei de Snell!)



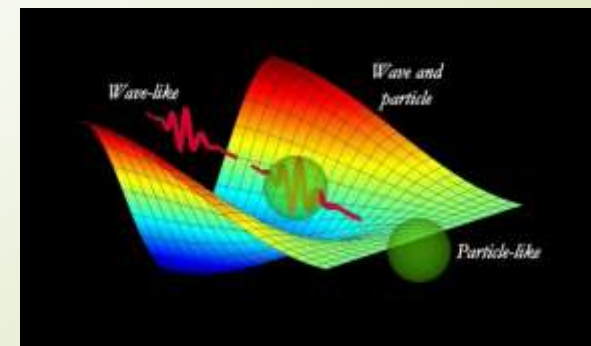
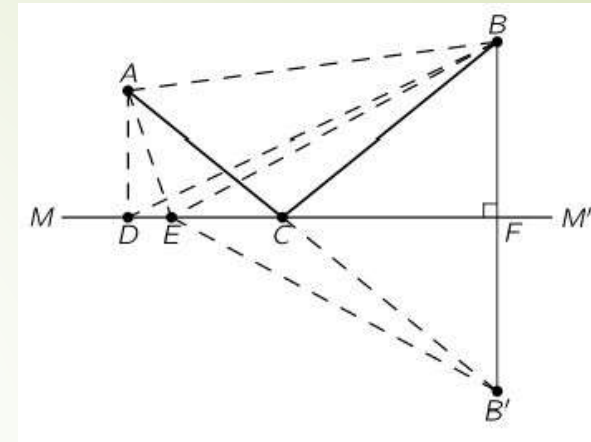
# CORRIGINDO O PRINCÍPIO DE FERMAT

Até aqui, utilizamos uma definição incorreta do princípio do “menor tempo”. Para ir de A até B o menor tempo não é ir por C!!!

O correto é dizer que deve ser um **mínimo**, ou seja: a luz indo por um caminho particular, se fizermos uma pequena modificação do caminho, não haverá mudanças de primeira ordem no tempo (somente de segunda ordem), ou seja é um mínimo!

Este princípio diz que **a luz checa antes** o caminho pelo qual deve ir!!! (diferente da lei de Snell que preserva a causalidade ...sequencia de eventos!!!). Assim, alguns argumentam que com a lei de Snell entendemos a luz, mas com este princípio não!!!

A resposta é que **a luz checa sim, os caminhos** antes de seguir por eles, de forma não local!!! (o que estudaremos na mecânica quântica, onde veremos que a luz fareja os caminhos numa distância de aproximadamente seu comprimento de onda)



# QUESTIONÁRIO



1. Quais as aproximações consideradas na óptica geométrica e quais os princípios básicos?
2. Qual o principal fundamento de Huygens a favor da teoria ondulatória da luz?
3. Postule o Princípio de Fermat e obtenha a Lei de Snell a partir dele.
4. Defina e explique a importância do último processo do método científico (observar, medir, obter a lei e .....)
5. Quais as diferenças entre o Princípio de Heron e o de Fermat
6. Deduza a fórmula das lentes delgadas, das superfícies refratoras esféricas e do espelho esférico
7. Explique como construir um microscópio e um telescópio. Identifique as diferenças construtivas (que fazem a seu funcionamento). Responda à questão: porque não funcionaria se trocamos os instrumentos (microscópio para ver estrelas e telescópio para ver vírus)?
8. Resolva os problemas propostos do Halliday e responda às perguntas

Lista de exercícios e perguntas conceituais disponível em:

<http://www.eletrica.ufpr.br/p/professores:patricio:inicial>

Disciplina TE320 (Física IV)

Gabaritos disponíveis no mesmo endereço