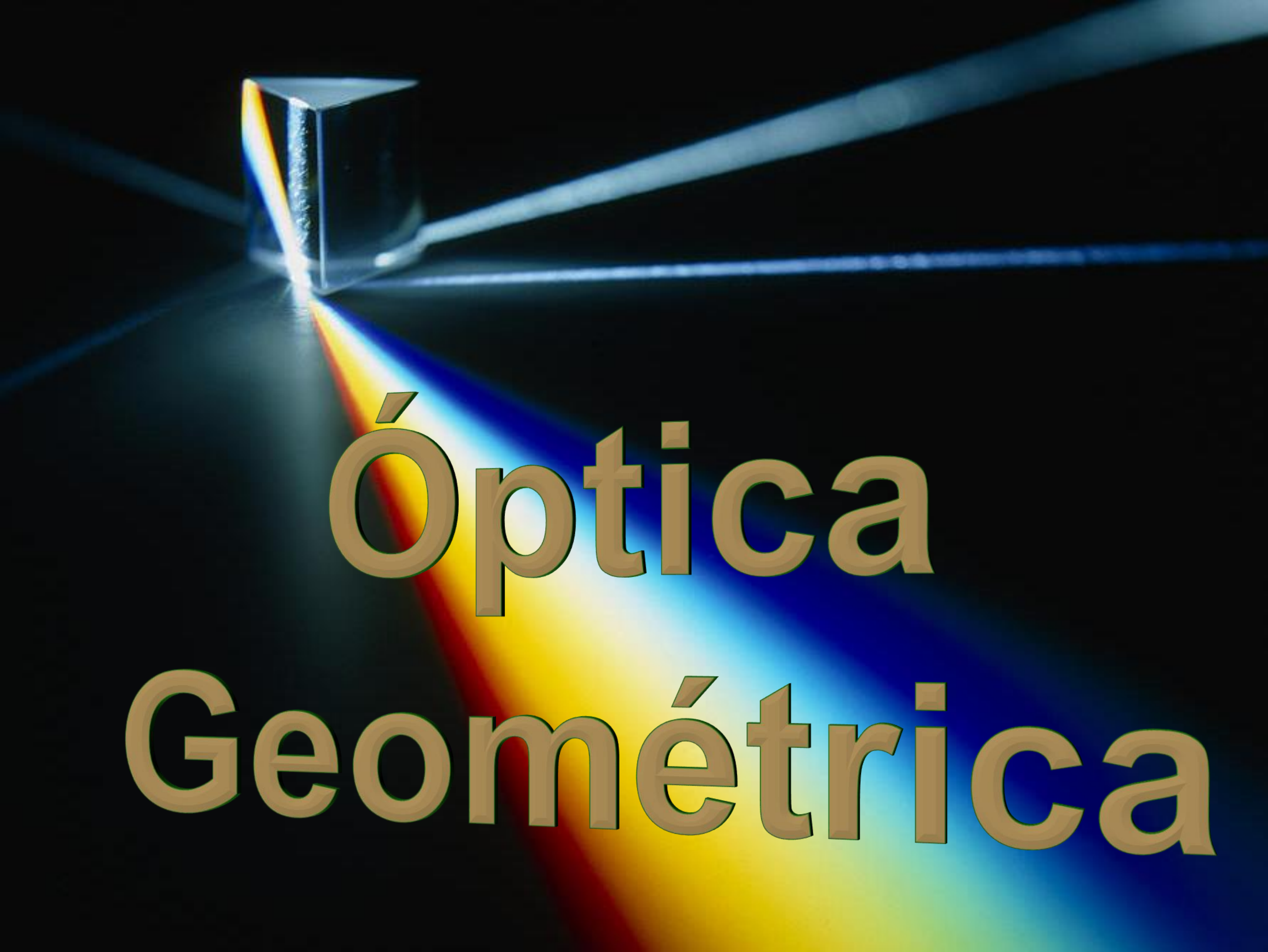

Óptica
Geométrica

INTRODUÇÃO

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

INTRODUÇÃO

Qual o processo pelo qual vemos?

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

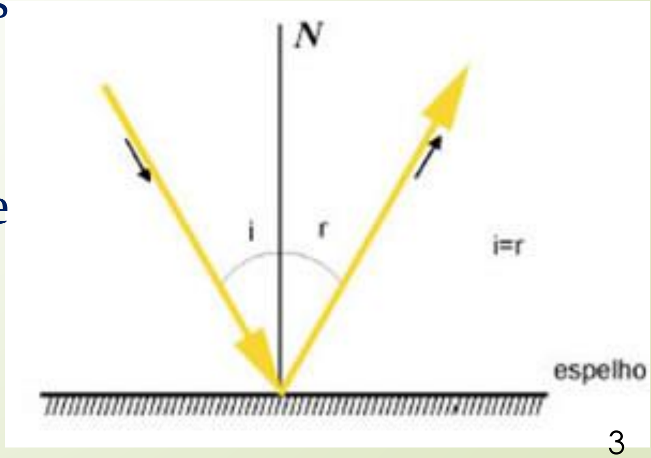
Princípios básicos da óptica geométrica:

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?

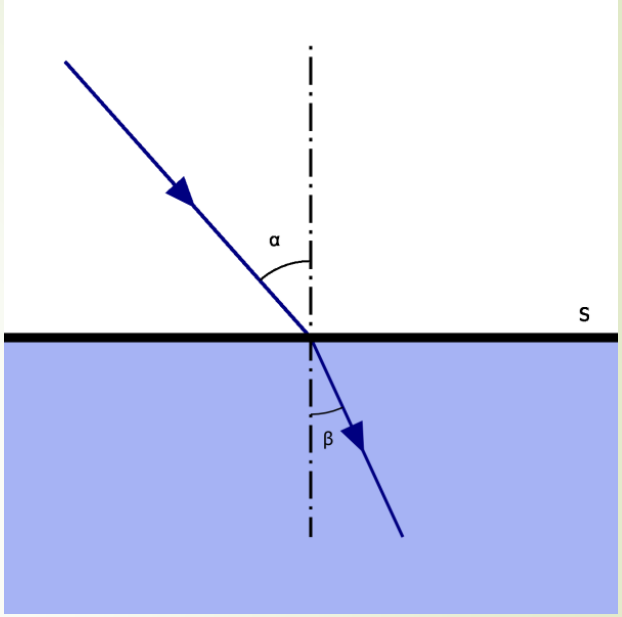


A resposta foi facilmente encontrada : são iguais. $i = r$

INTRODUÇÃO

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

Método cientifico: 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

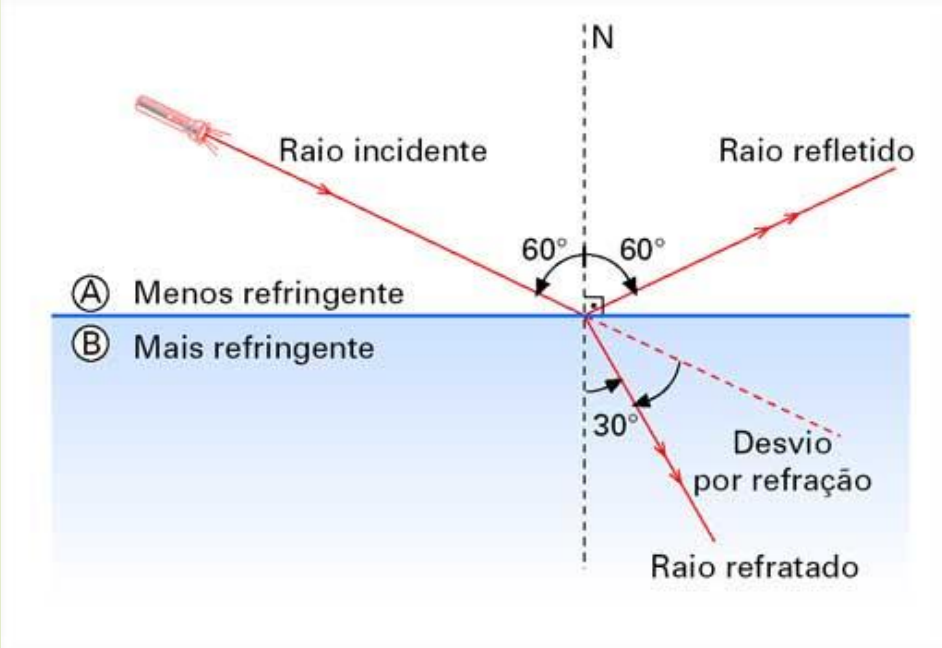
INTRODUÇÃO

Somente em **1621** Willebrord Snell encontrou esta regra $n_A \cdot sen\ i = n_B \cdot sen\ r$

ou $sen\ i = n \cdot sen\ r$

$n_A < n_B$

"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

DOIS TIPOS DE IMAGENS

Para que alguém possa **ver um objeto**, e 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.

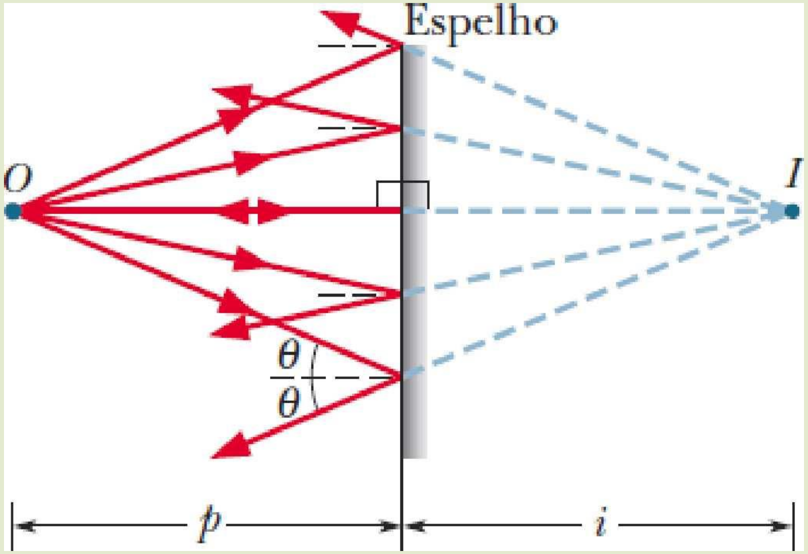
Se a imagem depende de um observador para existir e pode corresponder ou não a um objeto real, é chamada de **imagem virtual.**

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.

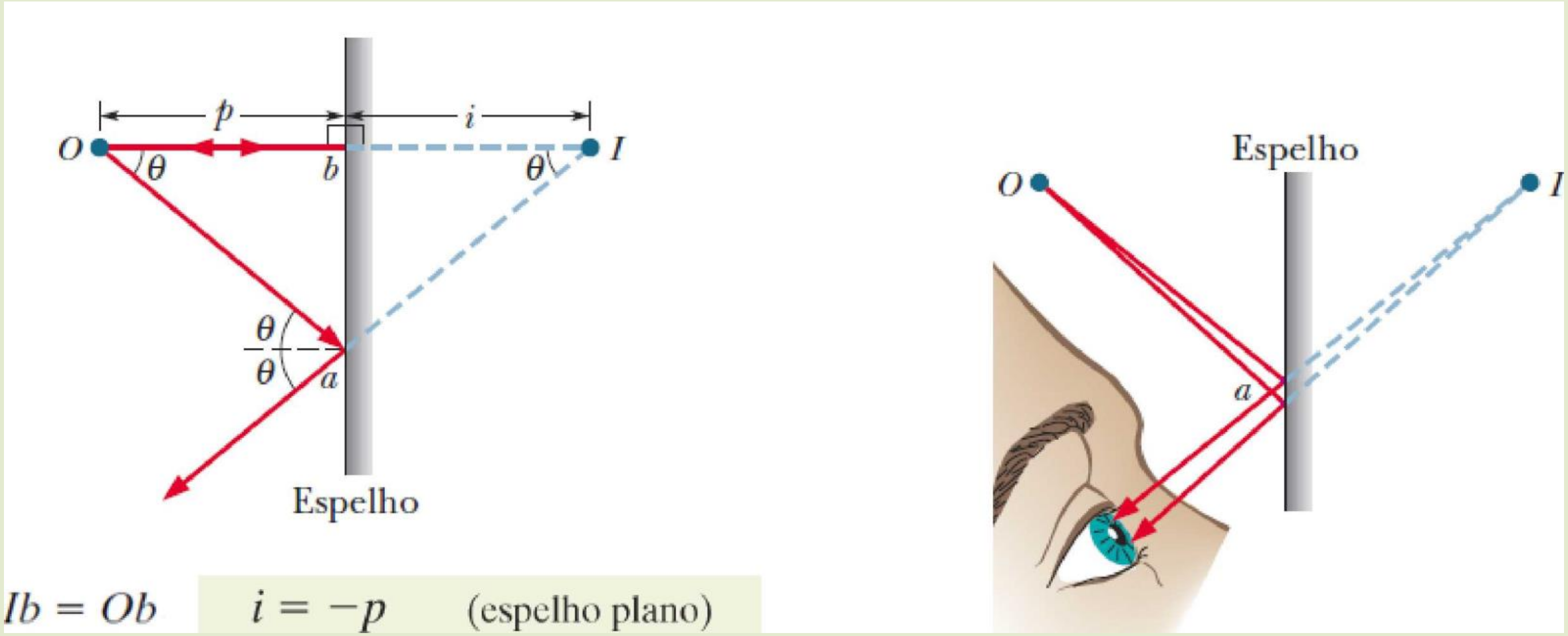
Em um espelho plano, a luz parece vir de um objeto situado do outro lado do espelho.



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

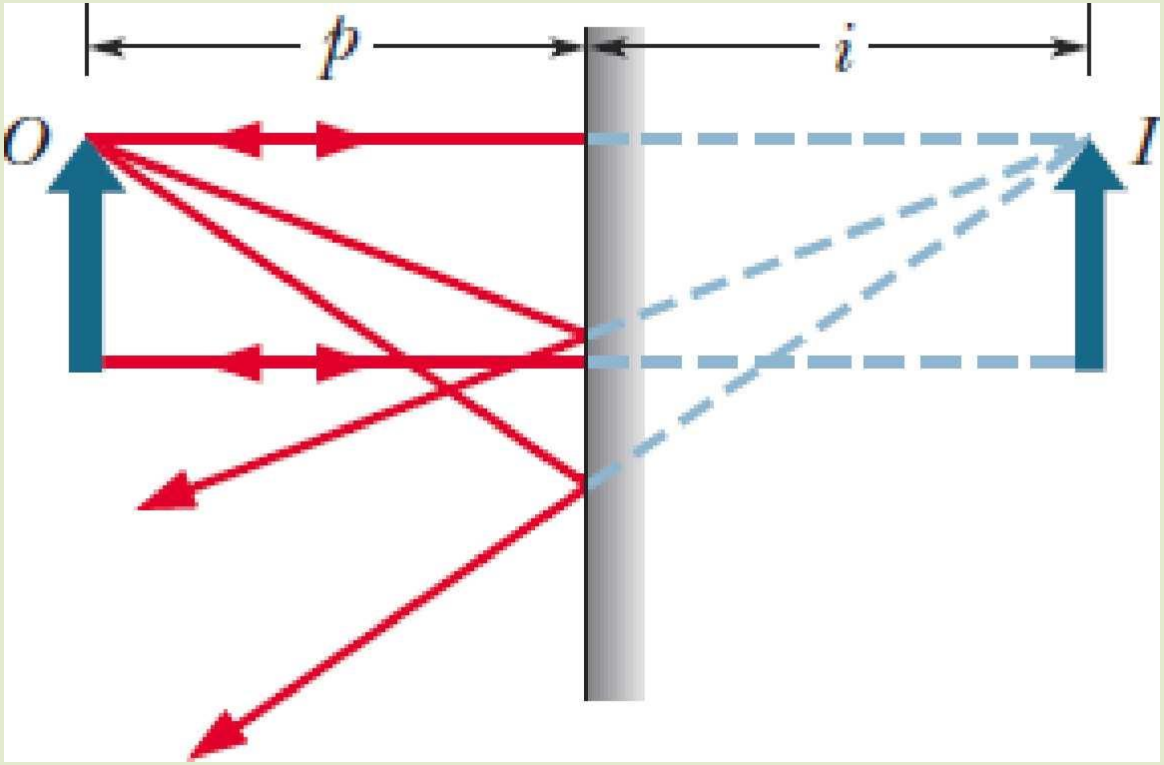


Dois raios são desenhados na Figura. O raio *Oa* faz um angulo arbitrário θ com a normal à superfície do espelho; o raio *Ob* é perpendicular ao espelho.

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**.

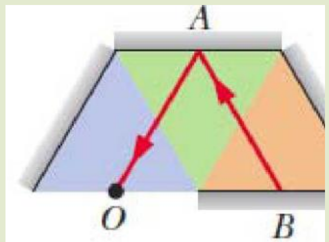


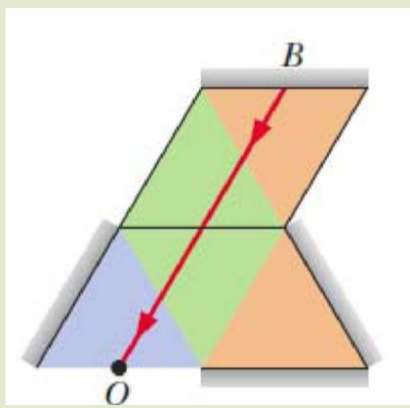
Um objeto de dimensões macroscópicas *O* e sua imagem virtual *I* em um espelho plano.

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.

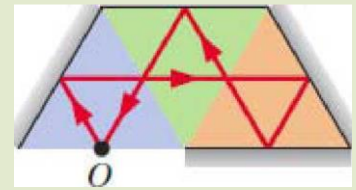
Caso 1. De onde parece vir a luz?

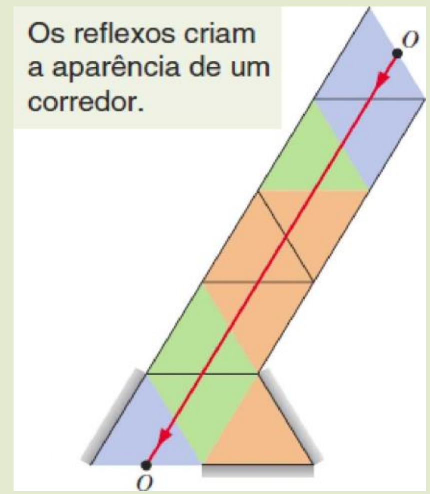




O raio proveniente do espelho *B* chega ao observador em *O* depois de ser refletido pelo espelho *A*. O espelho *B* parece estar atrás do espelho A.

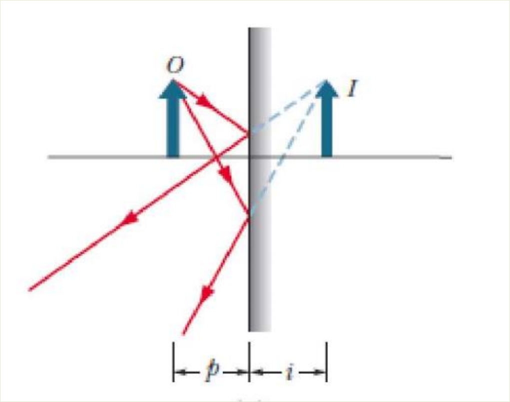
Caso 2. De onde parece vir a luz?

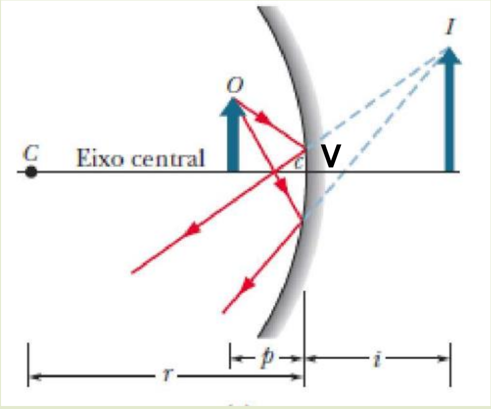




O raio que parte de *O* volta a *O* depois de sofrer quatro reflexões. O observador vê uma imagem virtual de si próprio na extremidade de um corredor aparente.

ESPELHOS ESFÉRICOS





p = i

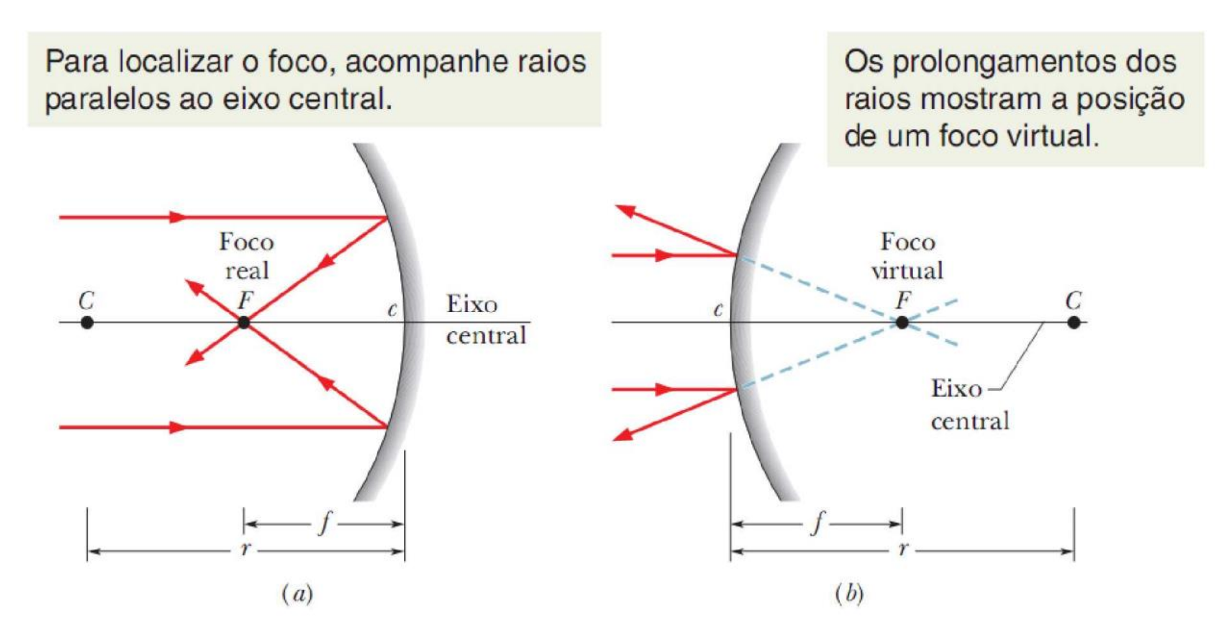
p < i (entre C e V)

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 um 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 **distancia 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

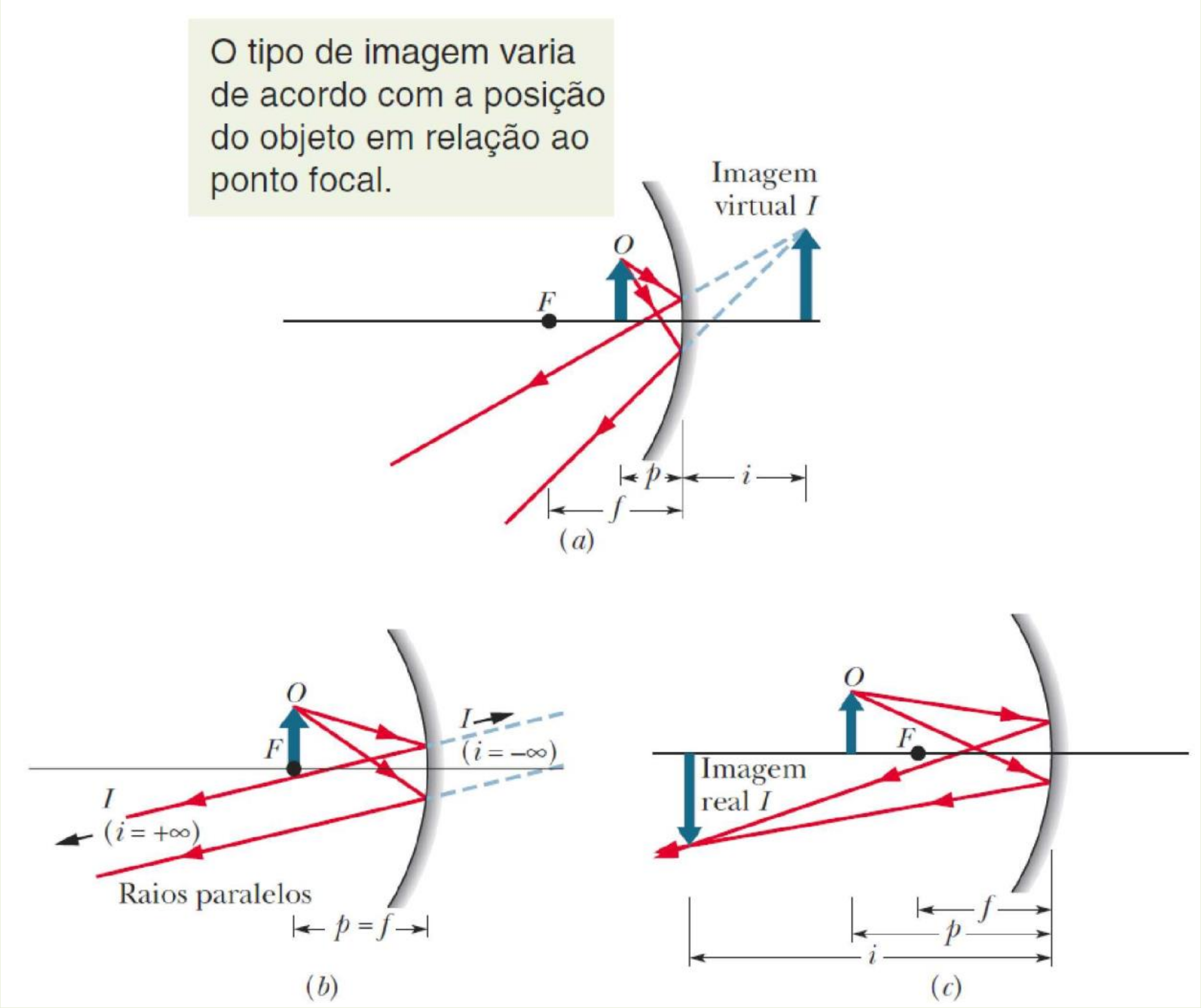


Em um **espelho côncavo**, raios luminosos paralelos incidentes convergem para um foco real situado no ponto *F*, do mesmo lado do espelho que os raios.

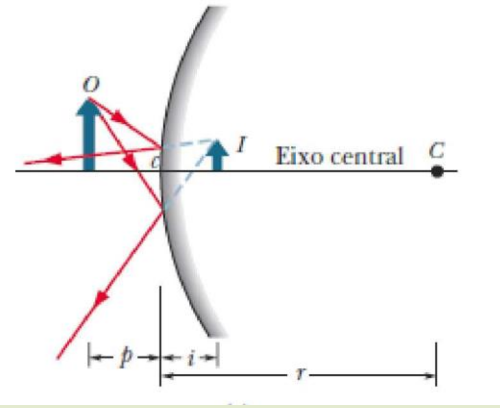
Em um **espelho convexo**, raios luminosos paralelos incidentes parecem divergir de um foco virtual situado no ponto *F*, do lado oposto do espelho.

Vejamos a análise da **formação de imagens** no **espelho côncavo**...

A posição do objeto

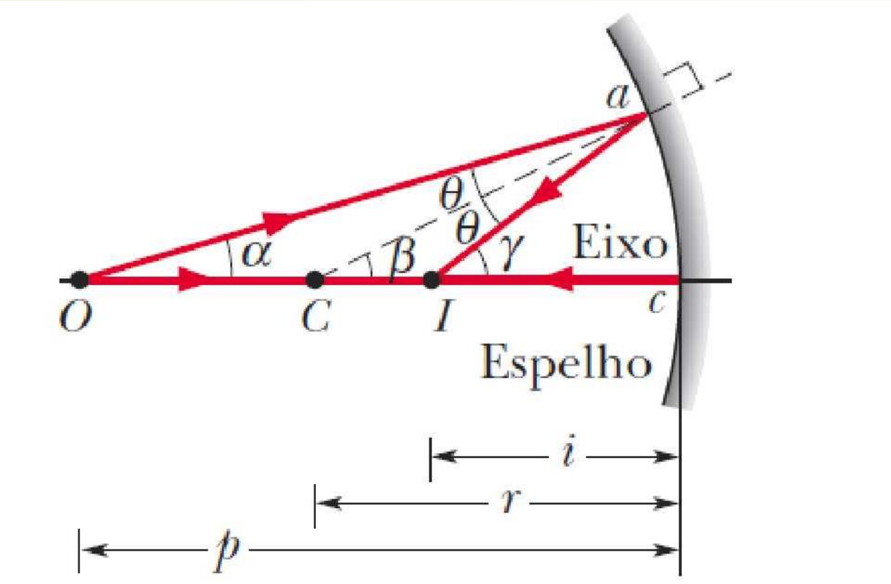


Quais as características de um espelho convexo?



Qual equação relaciona as posições do objeto e da imagem?

FÓRMULA DOS ESPELHOS ESFÉRICOS



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

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

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

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

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

ESPELHOS ESFÉRICOS

UFPR
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

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

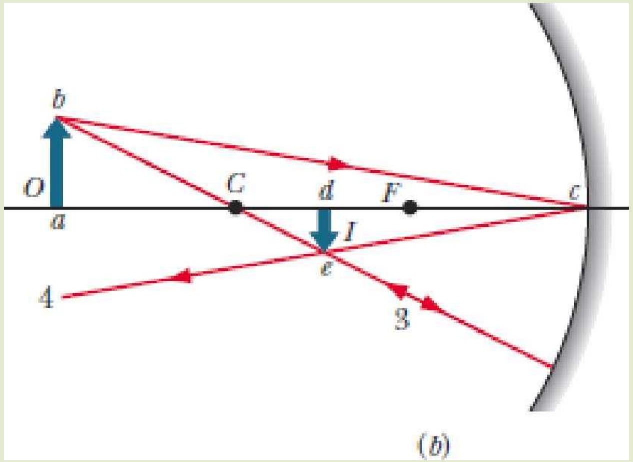
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

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*.

$$|m| = \frac{h'}{h}$$

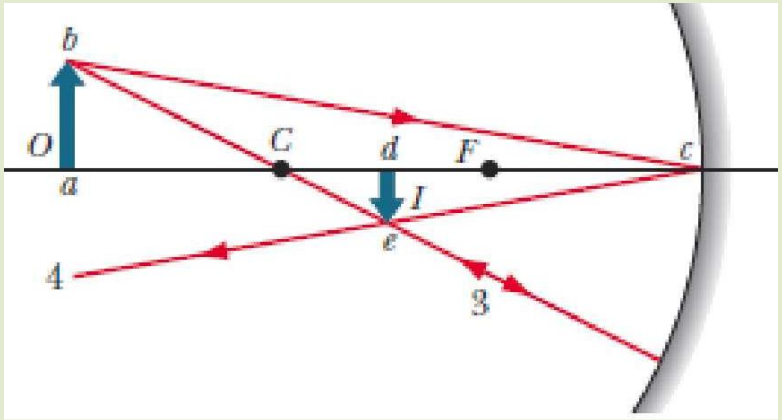
$$m = -\frac{i}{p}$$

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



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

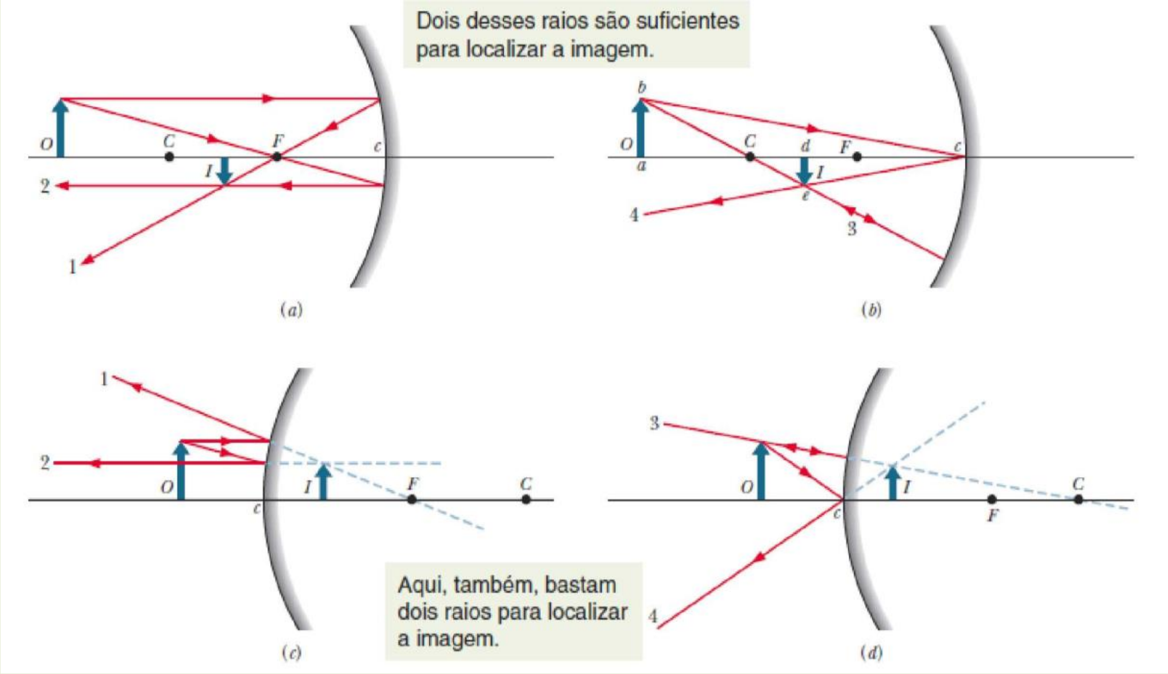
A razão do lado esquerdo (a menos do sinal) é a ampliação lateral *m* do espelho. Como as imagens estão invertidas (e medimos a ordenada y a partir do eixo óptico x) então para baixo é negativo.

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

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

ESPELHOS ESFÉRICOS

Imagens



Resumindo: 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 angulo de reflexão igual ao ângulo de incidência (raio 4 da Fig. d).

Exemplo

Uma tarântula de altura *h* está diante de um espelho esférico cuja distancia focal tem valor absoluto |f| =40 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 e o valor da distancia 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. Assim temos:

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

UFPR
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Exemplo

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

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

Entretanto, podemos usar este resultado para eliminar *i*. Fazendo *i* = -0,20p temos:

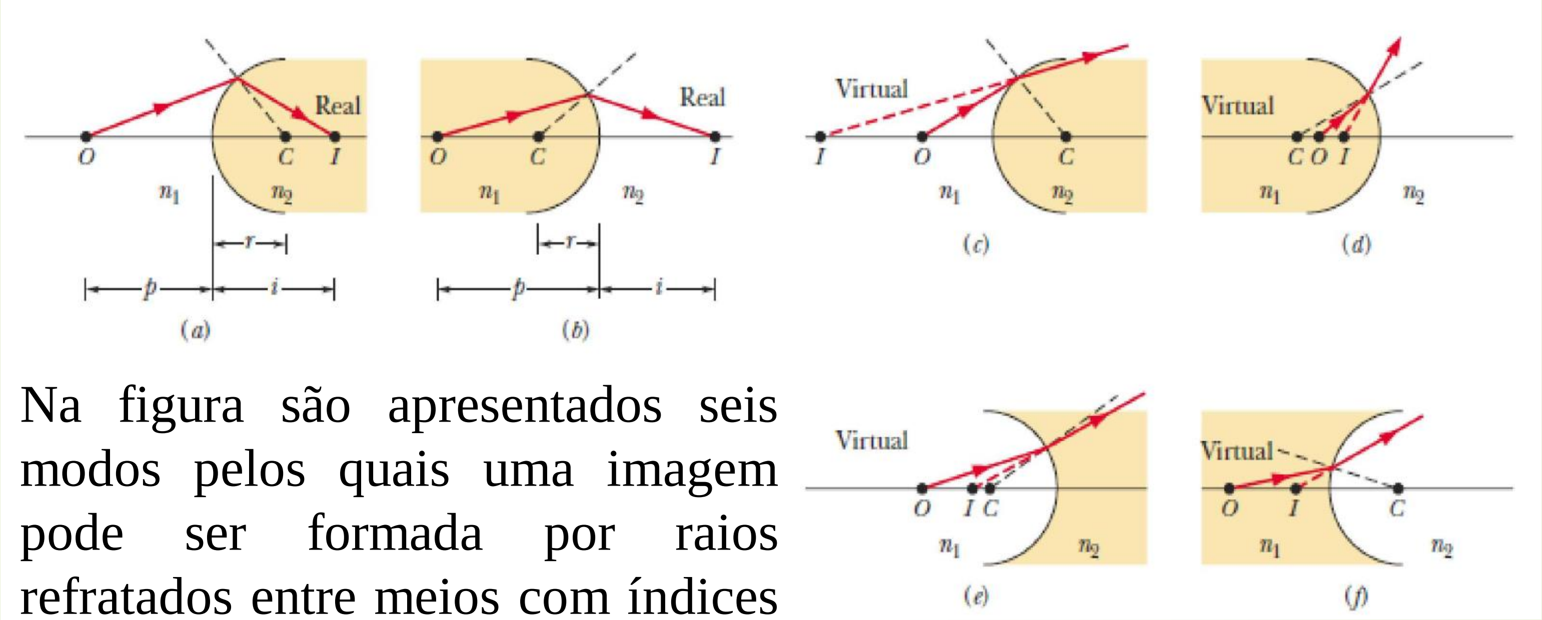
$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}=\frac{1}{-0{,}2p}+\frac{1}{p}=\frac{1}{p}(-5+1)$$

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

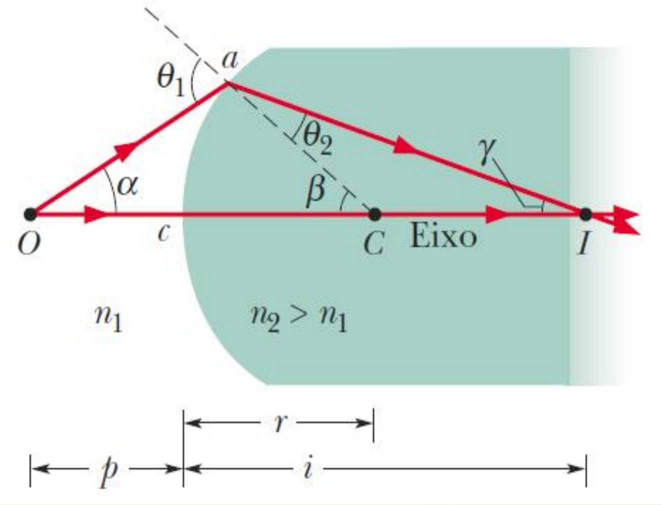
Como *p* é negativa, o espelho é convexo.

Vamos ver agora a refração

REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS



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



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

REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS

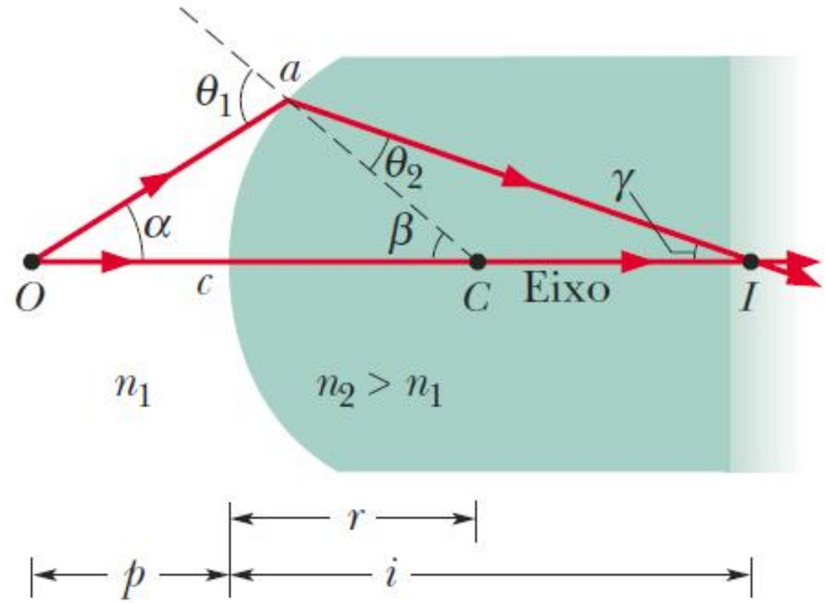


Imagem pontual real I de um objeto pontual O formada por refração em uma interface esférica convexa.

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

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

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

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

$$tg\ \alpha \approx \alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{p} \ldots.$$

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

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

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 e 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?

REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS

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 distancia da imagem ***i*** e a distancia 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 e negativo: i = -5,0 mm.
2. Como sempre supomos que o objeto esta no meio de Índice de Refração n_l, n_l = 1,6 e n_2 = 1,0.
3. Como o objeto se encontra diante de uma interface côncava, o raio de curvatura r é negativo: r = -3,0 mm.

REFRAÇÃO EM INTERFACES ESFÉRICAS

Solução:

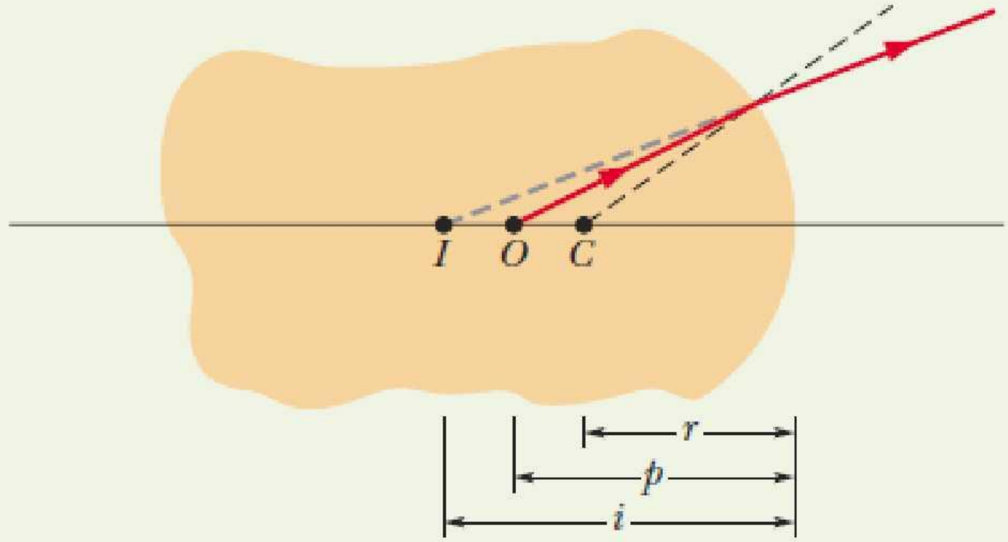
Cálculos

Fazendo essas substituições na equação da refração:

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

$$\frac{1{,}6}{p} + \frac{1}{-5} = \frac{1 - 1{,}6}{-3}$$

$$p = 4{,}0\ mm$$



Um bloco de âmbar contendo um mosquito do período jurássico, com a cabeça no ponto *O*. A superfície refratora esférica do lado direito, cujo centro de curvatura é o ponto *C*, produz uma imagem *I* para um observador que intercepta os raios luminosos provenientes do objeto.

Vamos ver agora as lentes

LENTES 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:

LENTES DELGADAS

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

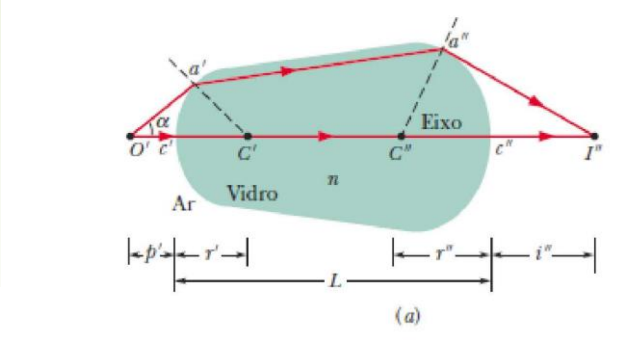
Onde a distancia focal f é definida por:

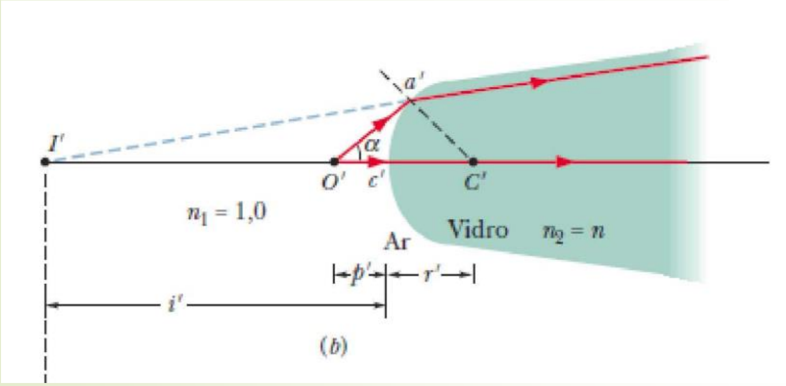
$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \qquad \text{(lente delgada no ar)}$$

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

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

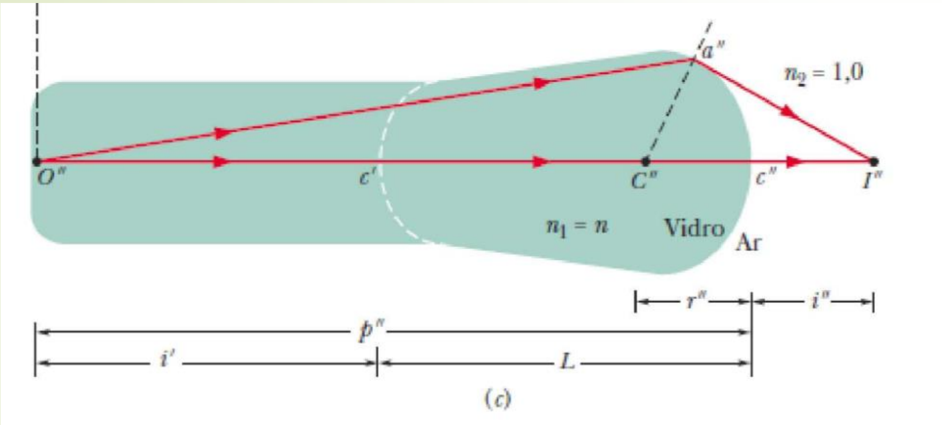
FÓRMULA DAS LENTES DELGADAS





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

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



$$p'' = i' + L$$

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

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

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

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

FÓRMULA DAS LENTES DELGADAS

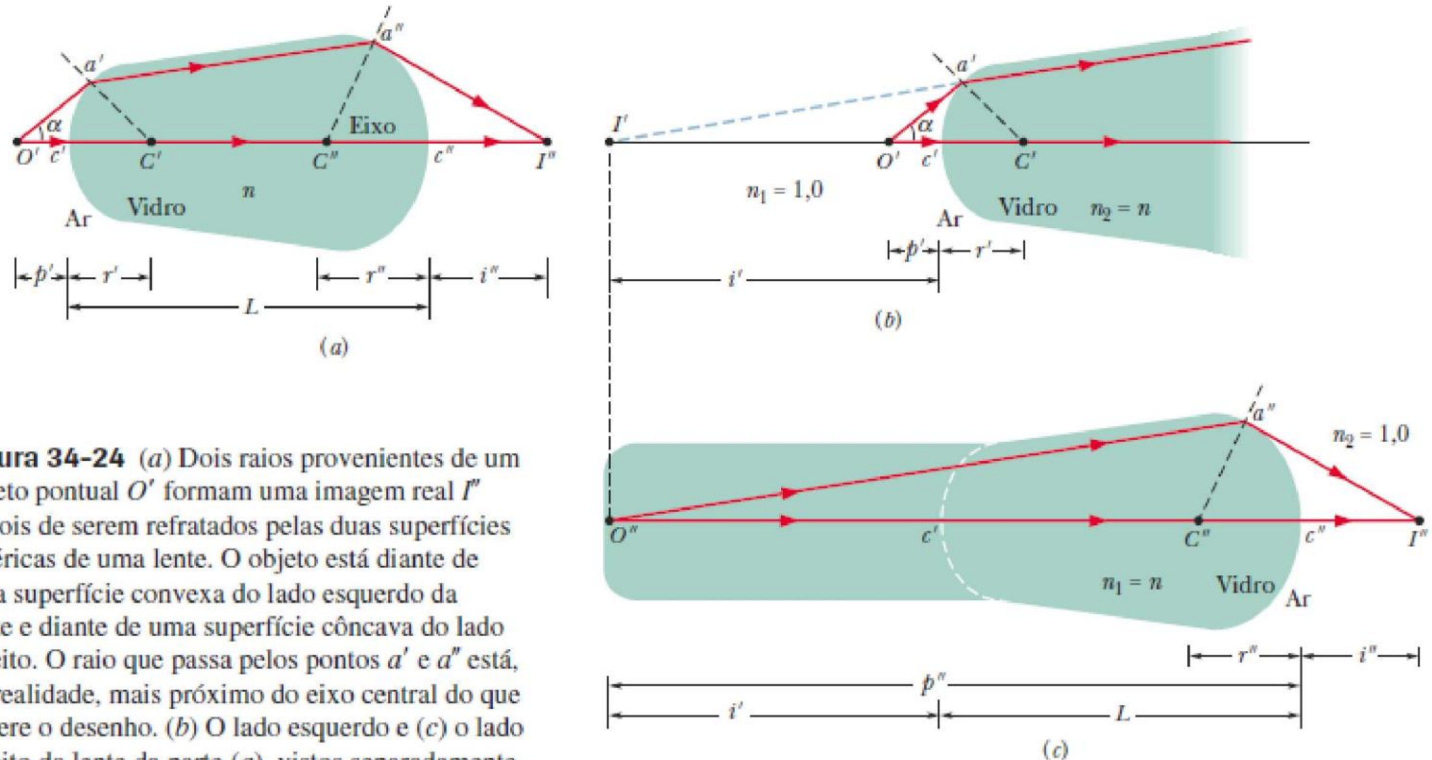


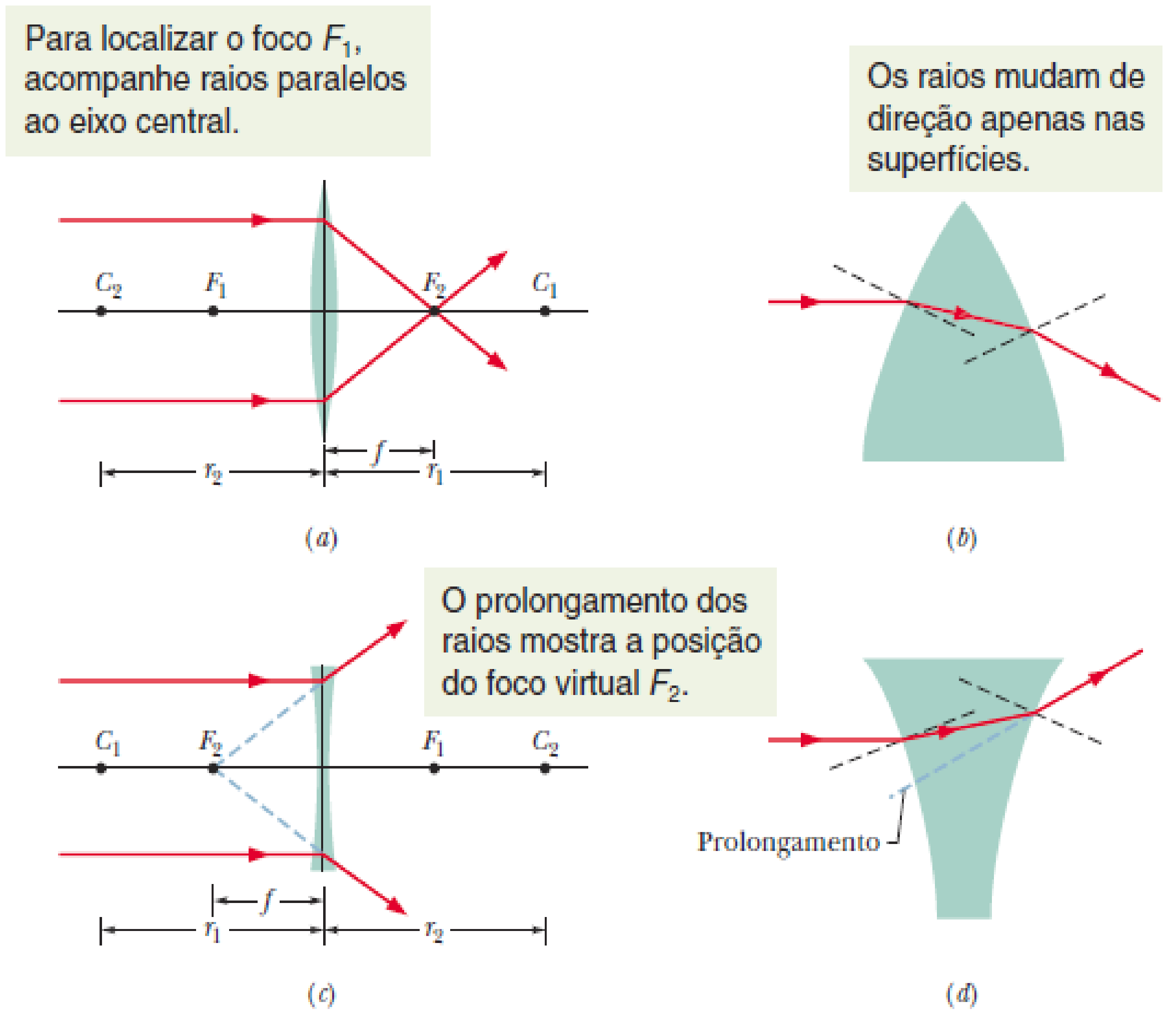
Figura 34-24 (*a*) Dois raios provenientes de um objeto pontual O' formam uma imagem real I'' depois de serem refratados pelas duas superfícies esféricas de uma lente. O objeto está diante de uma superfície convexa do lado esquerdo da lente e diante de uma superfície côncava do lado direito. O raio que passa pelos pontos a' e a'' está, na realidade, mais próximo do eixo central do que sugere o desenho. (*b*) O lado esquerdo e (*c*) o lado direito da lente da parte (*a*), vistos separadamente.

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{r} \quad + \quad \frac{1}{p'} - \frac{n}{i'} = \frac{n-1}{r'} \quad + \quad p'' = i' + L$$

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

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

LENTES DELGADAS: O FOCO

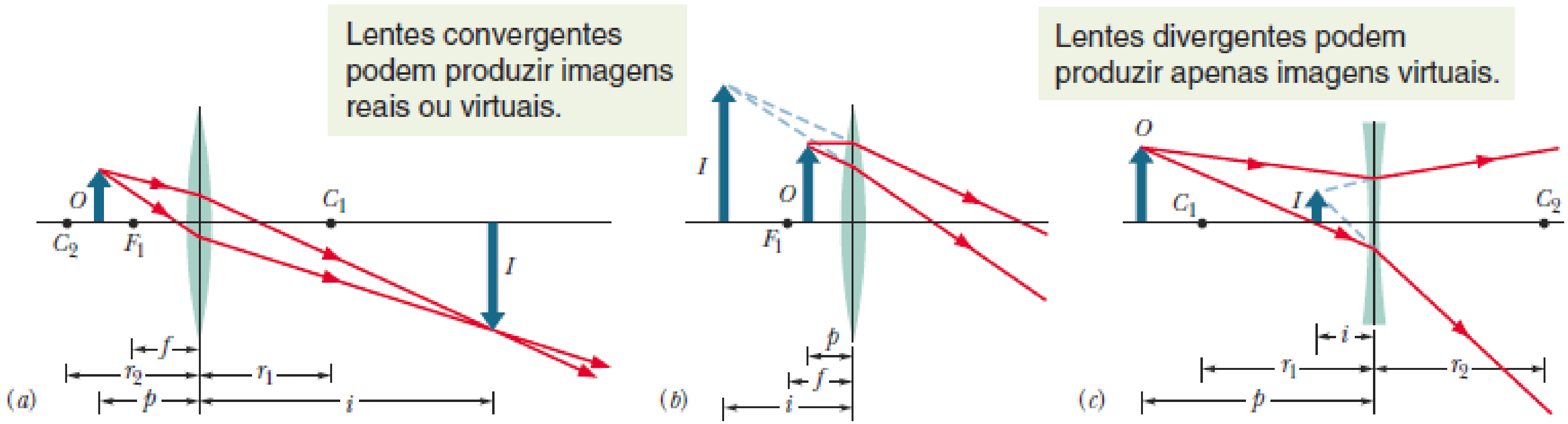


(*a*) Raios luminosos inicialmente paralelos ao eixo central de uma lente convergente são desviados pela lente e convergem para o ponto focal real F_2. A lente é mais fina que no desenho; na verdade, supomos que todo o desvio ocorra em um único plano, representado na figura por uma reta vertical passando 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.

LENTES DELGADAS: LOCALIZANDO IMAGENS

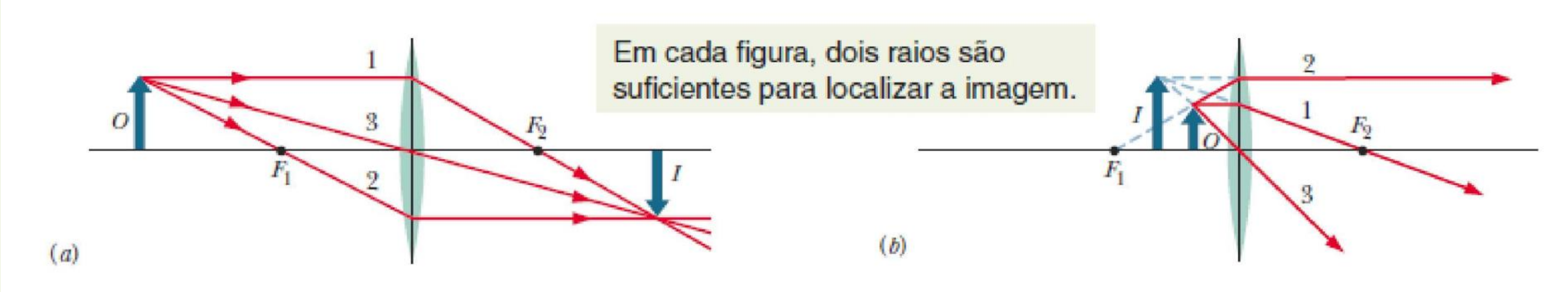
As imagens virtuais produzidas por lentes ficam do mesmo lado que o objeto e as imagens reais ficam do lado oposto (lembre as regras dos sinais).

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



(*a*) Uma lente convergente forma uma imagem *I* real e invertida quando o objeto *O* está mais distante da lente que o ponto focal F_1. (*b*) A imagem *I* é virtual e tem a mesma orientação que o objeto *O* quando *O* está mais próximo da lente que o ponto focal. (*c*) Uma lente divergente forma uma imagem virtual *I*, com a mesma orientação que o objeto *O*, qualquer que seja a distância do objeto.

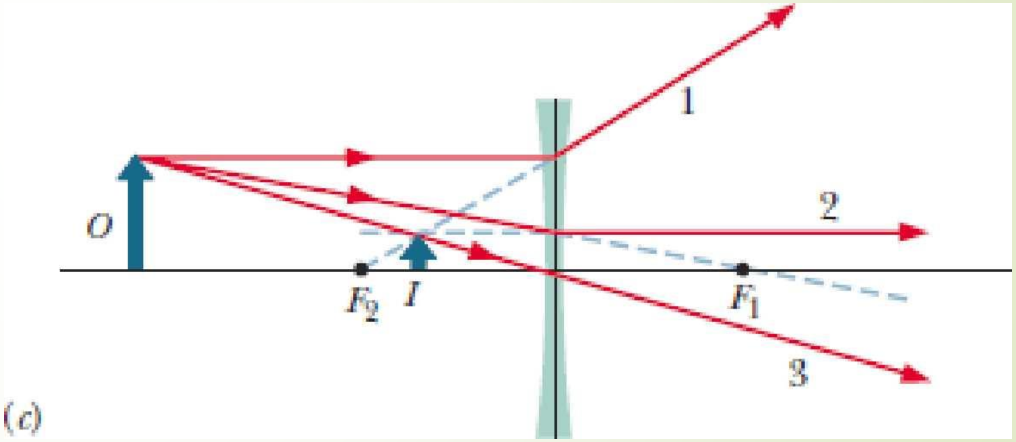
LENTES DELGADAS: LOCALIZANDO IMAGENS



■ 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_1sai 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).

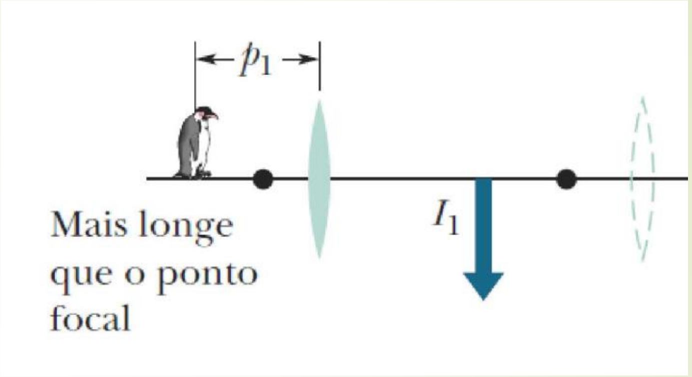


Finalmente podemos estudar os sistemas de lentes!

LENTES DELGADAS: DUAS LENTES

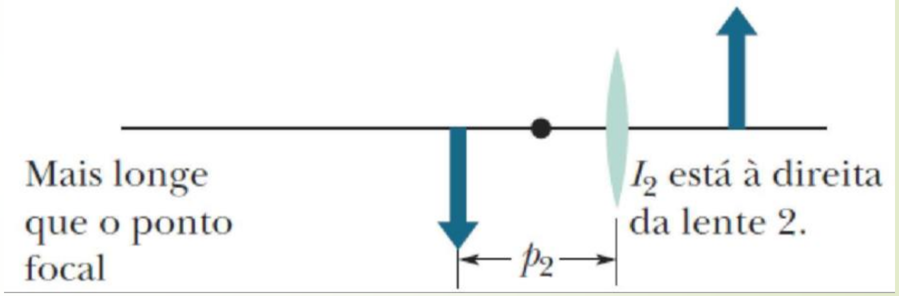
***1ª* parte**

Ignorando a lente 2, localizamos a imagem I_1 produzida pela lente 1. Verificamos se a imagem esta a 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.



<u>**Se I_1 esta a direita da lente 2**</u> (do outro lado da lente 2), consideramos a distancia do objeto p_2 como um numero negativo para localizar a posição final da imagem, I_2. Finalmente, calculamos a ampliação lateral m_2.

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

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

Resolver: 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 e feita a lente é 1,65.

(a) Determine o tipo de imagem produzido pela lente; o tipo de lente; se o inseto esta 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 calculo para responder à primeira pergunta.....

LENTES SIMÉTRICAS DELGADAS

Como

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

Assim, não é preciso fazer nenhum calculo para responder às perguntas:

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 esta 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?

LENTES SIMÉTRICAS DELGADAS

UFPR
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

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 cm) = 5,0 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 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,

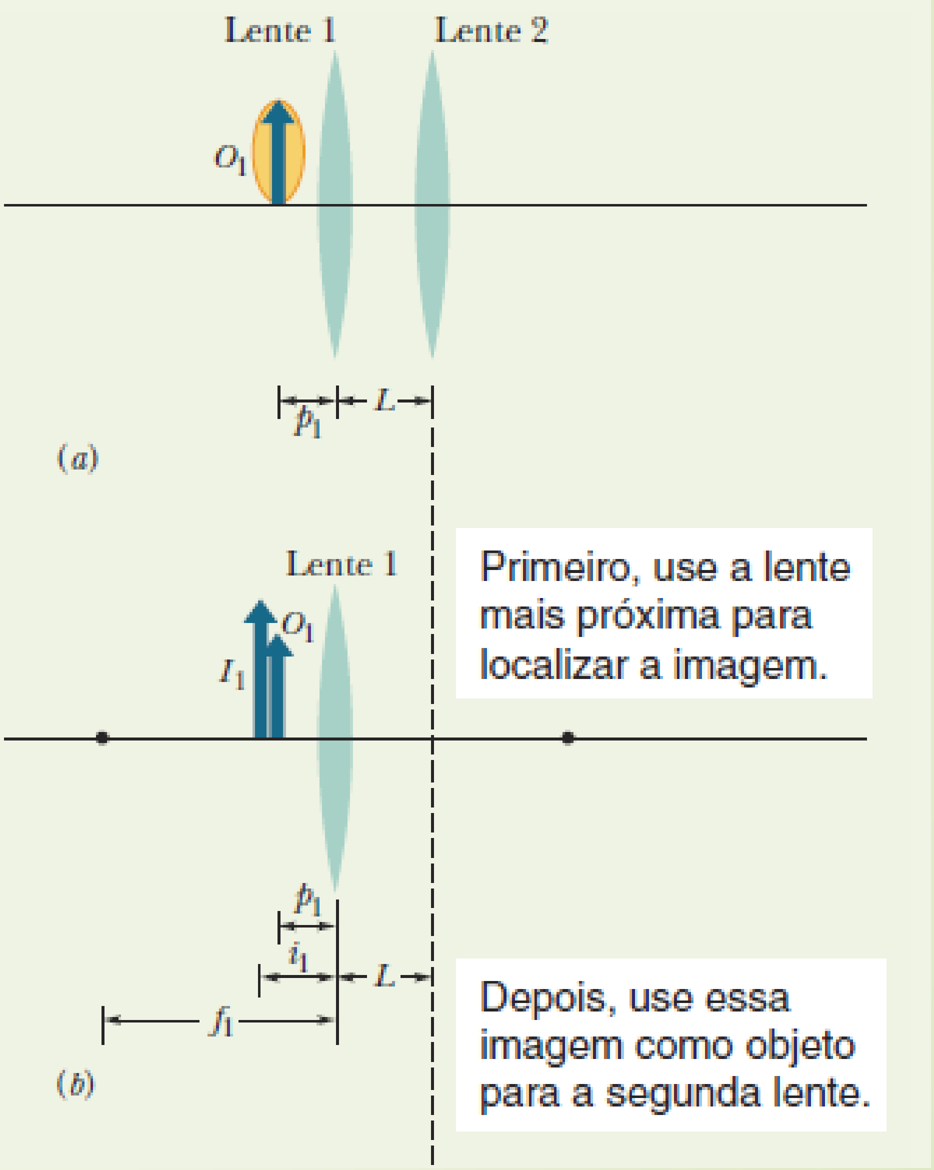
$$r = (0{,}65)(2)(4{,}0\text{ cm}) = 5{,}2\text{ cm}. \qquad \text{(Resposta)}$$

LENTES SIMÉTRICAS DELGADAS

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

A semente está a 6,0 cm da lente 1.

Qual é a localização da imagem da semente?



LENTES 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)

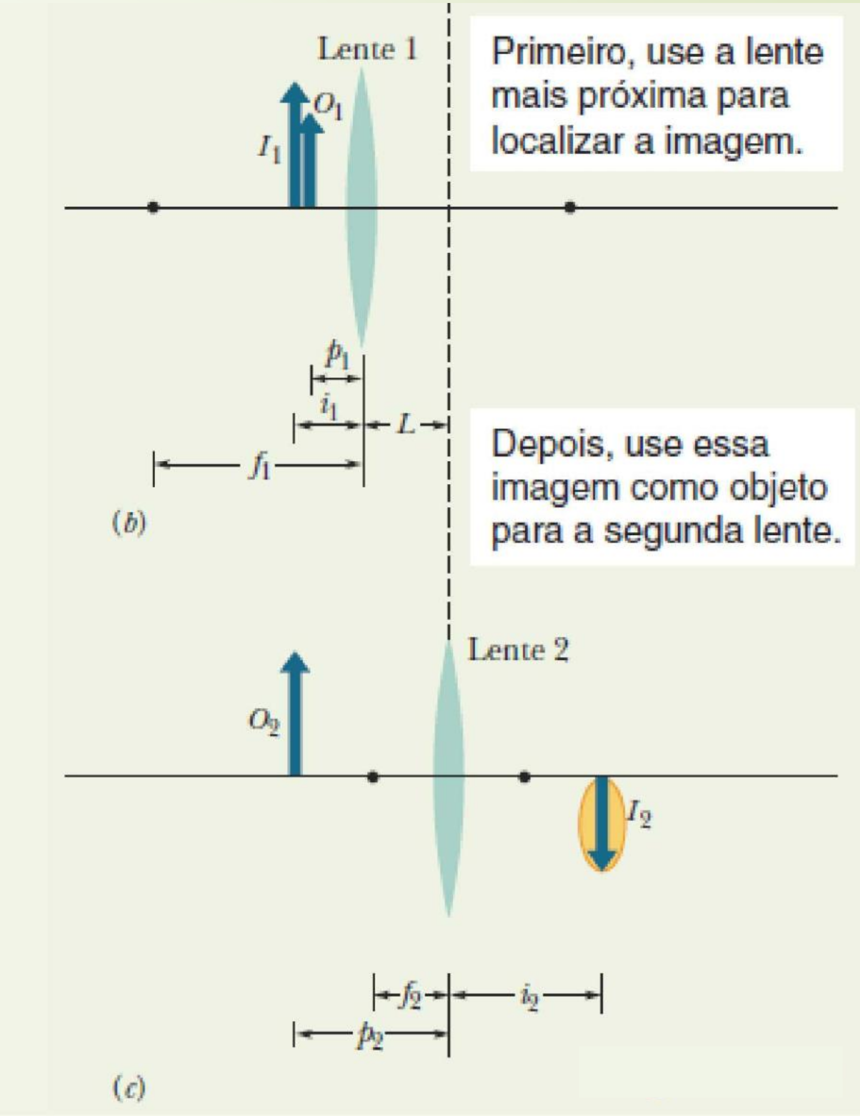
LENTES SIMÉTRICAS DELGADAS

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:

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



LENTES SIMÉTRICAS DELGADAS

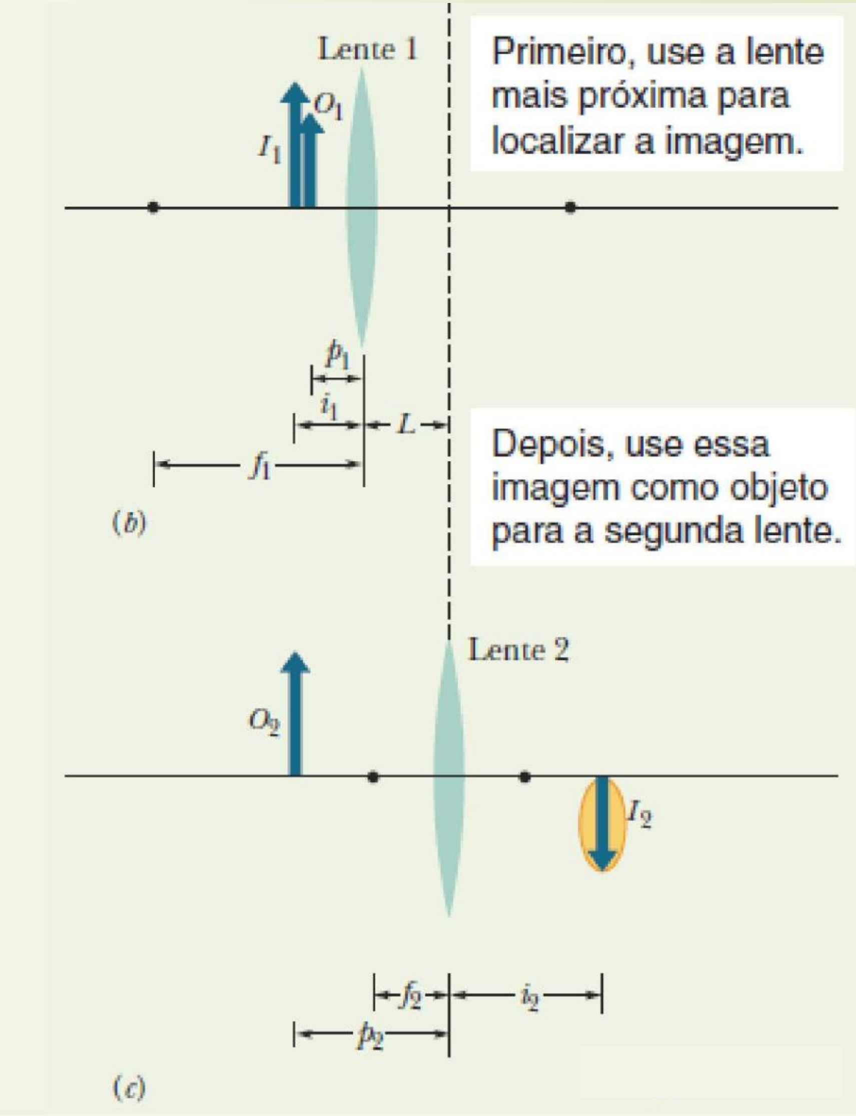
Nesse caso teremos:

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

Assim: $i_2 = +18$ 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.

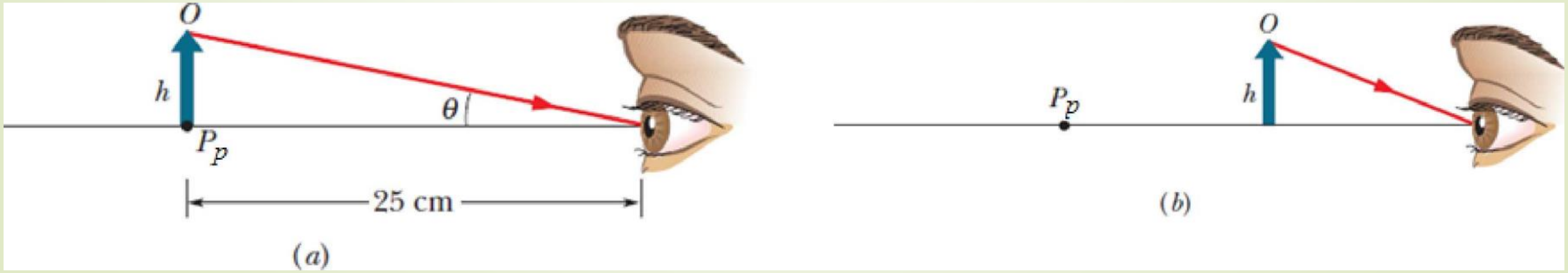
Sendo assim, a imagem poderia ser vista nitidamente em uma tela situada 18 cm à direita da lente 2.



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 distancia menor que a do ponto próximo, a imagem na retina não é nítida.

A figura mostra um objeto *O* colocado no ponto próximo *Pp* de um olho humano. O tamanho da imagem produzida na retina depende do ângulo θ 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.

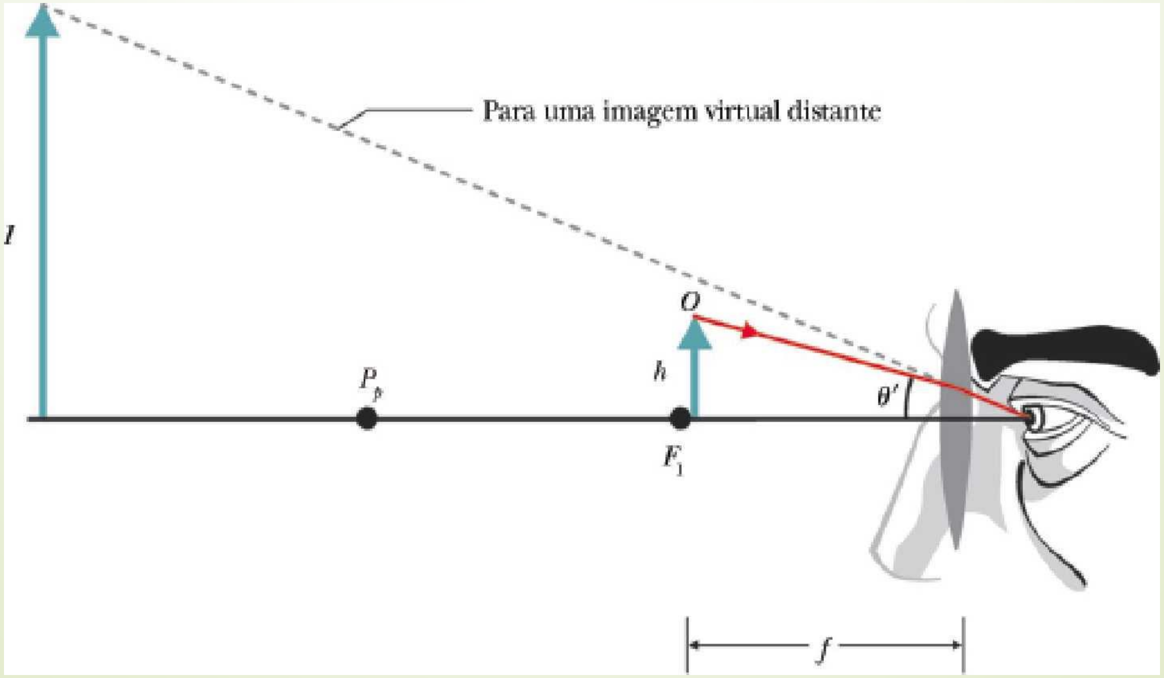


Lente de Aumento Simples

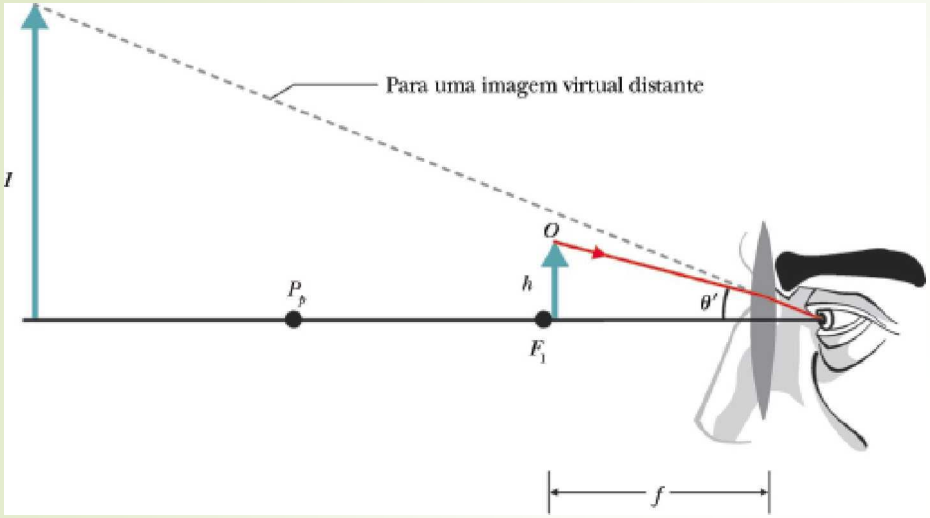
Se o objeto está a uma distância menor que o ponto próximo, é possível tornar a imagem novamente nítida observando o objeto através de uma lente convergente.

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

O que o observador enxerga nesse caso é a imagem virtual do objeto produzida pela lente (além do ponto próximo).



Lente de Aumento Simples



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

A *ampliação angular* m_θ (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 tg θ ≈ θ e tg θ' ≈ θ', então $\theta \approx h/25$ cm (sendo 25 cm a distância ao P_p) e $\theta' \approx h/f$ temos neste casso:

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

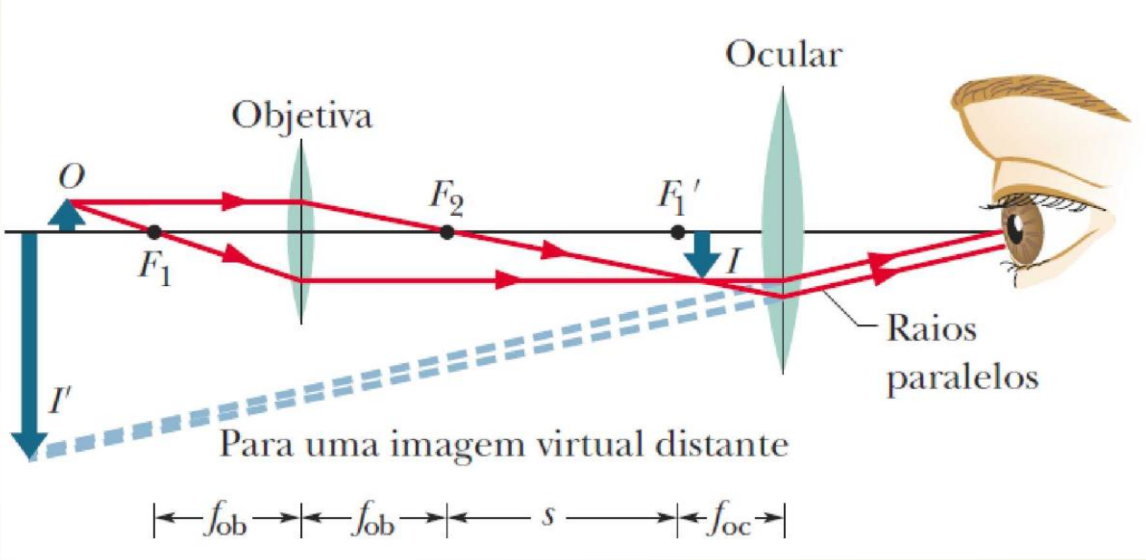
Microscópio Composto

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 distancia 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:

$$m = -\frac{i}{p} = -\frac{s}{f_{ob}}$$

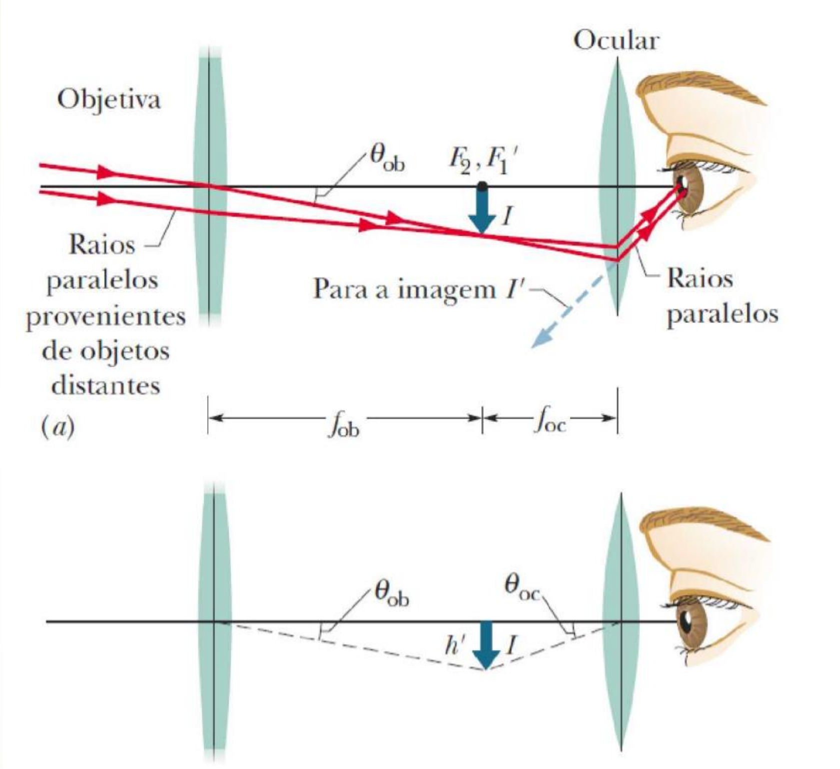
$$M = m m_\theta = -\frac{s}{f_{ob}} \frac{25\text{ cm}}{f_{oc}} \quad \text{(microscópio)}$$

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 angulo 0_{ob} do ponto de vista da objetiva e um angulo 0_{oc} do ponto de vista da ocular.



A ampliação angular m_θ do telescópio é θ_{oc}/θ_{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

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

PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

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

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

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

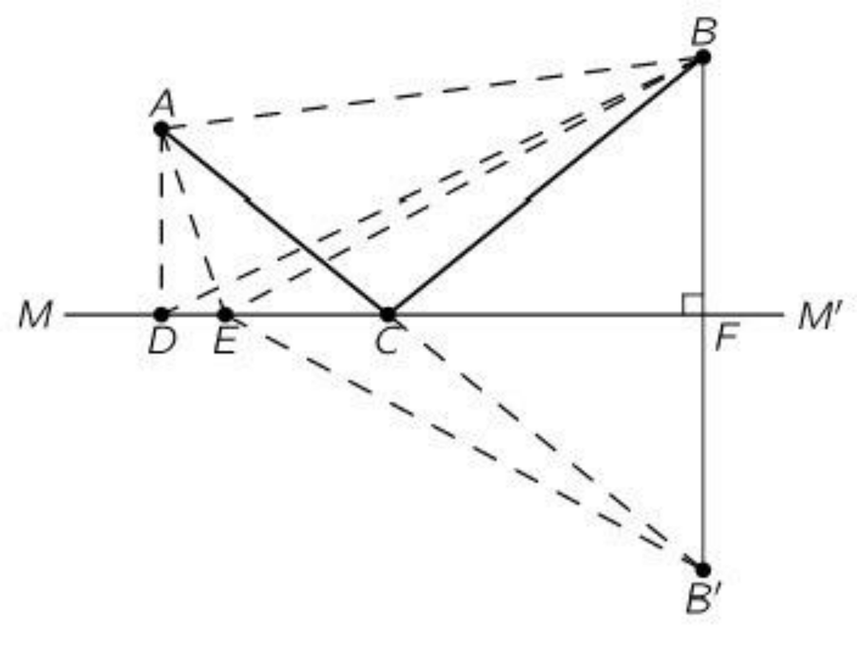
O primeiro a propor uma forma de pensar que tornou a lei da refração evidente foi Fermat em 1650 e foi chamado "*o princípio do tempo mínimo*"

Historicamente, o primeiro a propor algo semelhante foi Heron de Alexandria (geômetra grego) nascido em 10 AC. Ele propus "o principio 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 principio de Heron imediatamente:

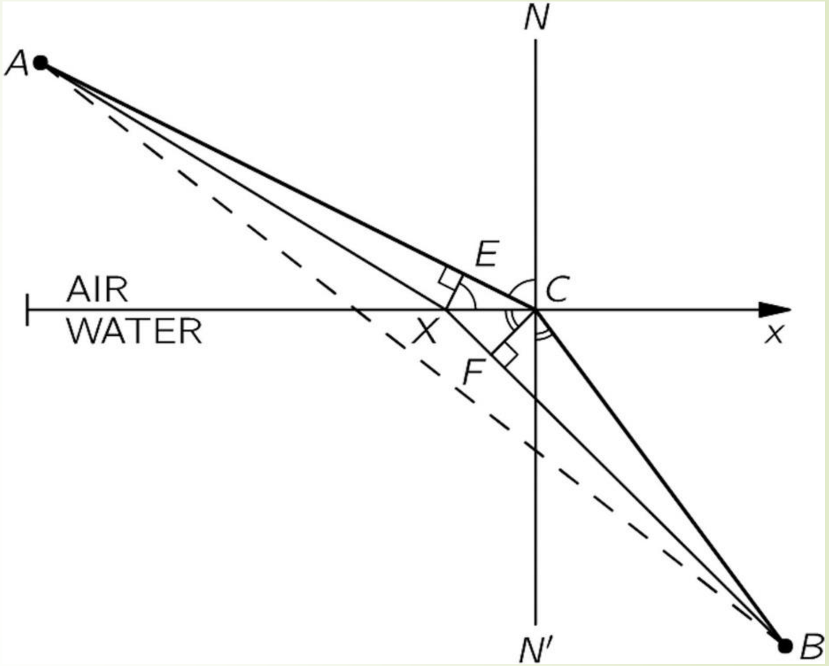


Mas este principio evidentemente não se aplica à refração!

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, pagina 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), iria por uma linha reta?

....provavelmente!........e estaria errado!

A questão tem a ver com 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! Consideramos também (como já era sabido) que a velocidade da luz na água é 1/n vezes a velocidade da luz no ar, então:

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

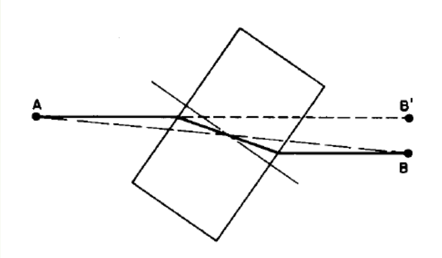
$$sen\, \emptyset_i = n\, sen \emptyset_r$$

Vejamos as consequências deste principio....

PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

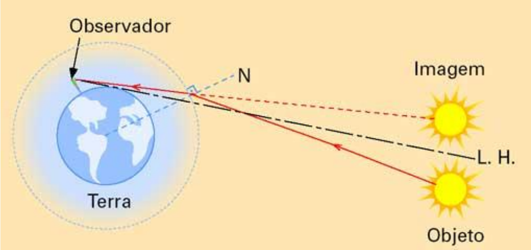
Consequências:

1. Principio da reciprocidade (A→B = B →A)



2. Comportamento da luz no bloco (diminui o trajeto dentro do bloco)

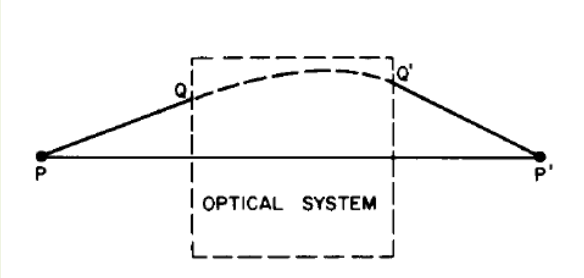
3. Ao ver o pôr do sol ele já está bem abaixo do horizonte!

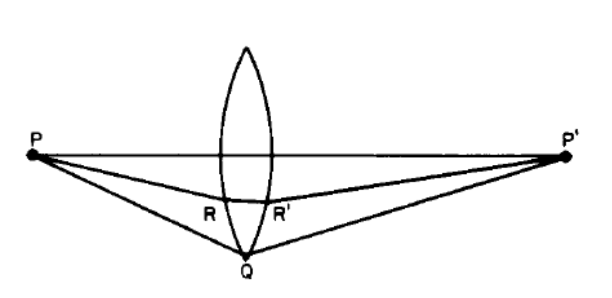


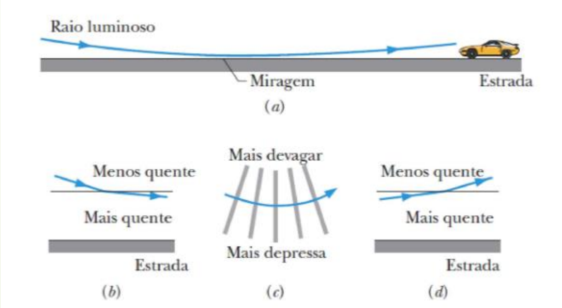
4. Água no asfalto?

5. Como fazer para coletar toda a luz que sai de um ponto P Mesmo a que vai para Q?

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



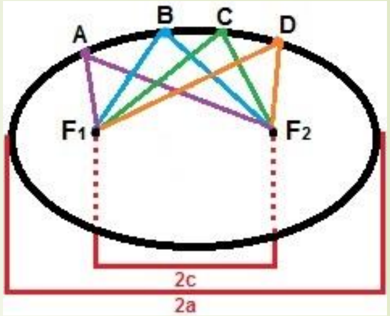




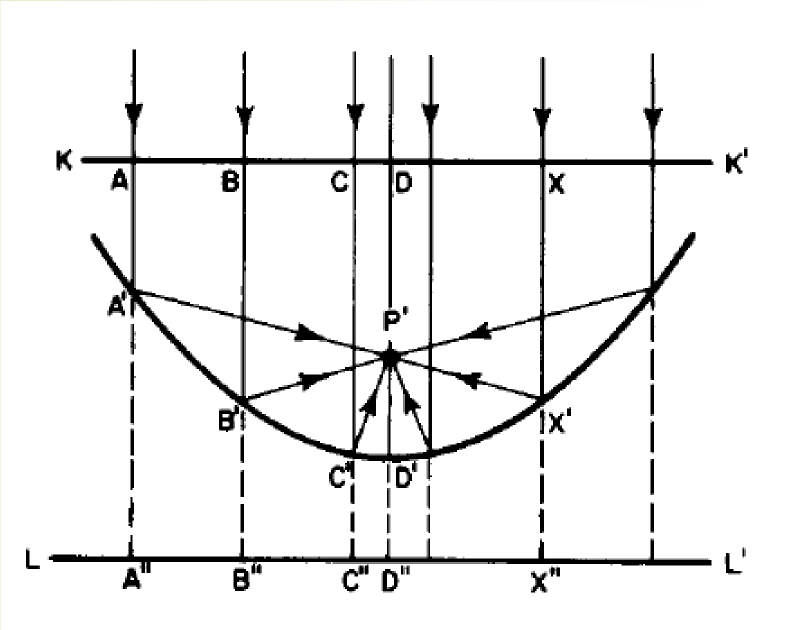
PRINCÍPIO DE FERMAT DO MENOR TEMPO

Consequências:

6. Vejamos o que acontece com uma fonte luminosa no foco de uma elipse



7. O telescópio do Palomar (São Diego - Califórnia) utiliza esta propriedade, mas a curva que iguala os caminhos é uma parábola!



UM PARÊNTESES PARA REFLEXÃO

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 nos ajuda a resolver os problemas...veja... eu entendo espelhos seguindo a 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...

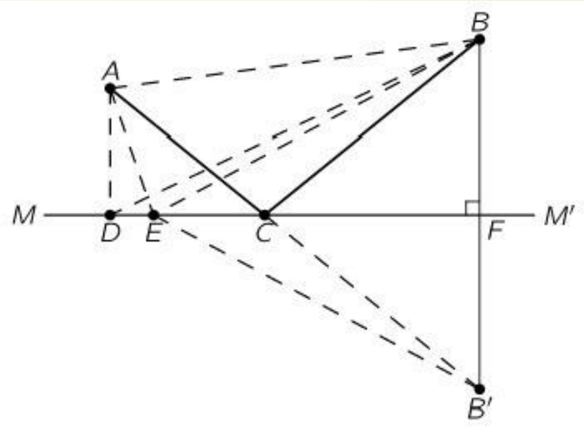
a importância de um principio é que ele predize coisas novas!!! ....nos permite ir além do que atualmente conhecemos !!!

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 PRINCIPIO DE FERMAT

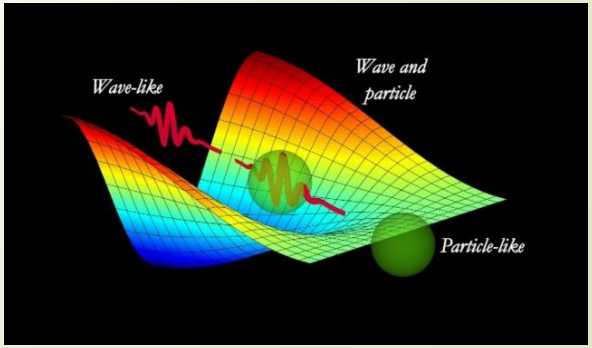
Até aqui, utilizamos uma definição incorreta do princípio do "menor tempo". Para ir de A até B o menor tempo não é ir por C!!!



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 principio 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 principio 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 cientifico (observar, medir, obter a lei e .....)
5. Quais as diferenças entre o Principio de Heron e o de Fermat
6. Deduza a formula 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

ÓPTICA GEOMÉTRICA

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