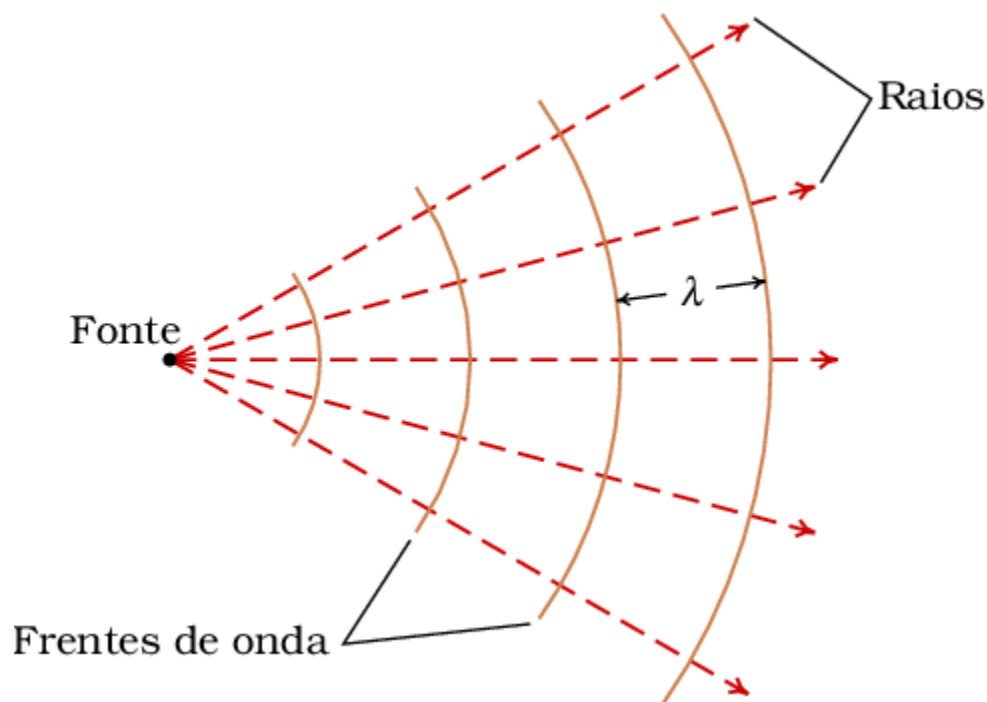


Cap 23 - Ótica Geométrica

Ótica Geométrica

Descreve o comportamento da luz em situações onde sua natureza ondulatória (efeitos de interferência/difração) não fica evidente, e onde ela pode ser modelada por meio de ***raios de luz***

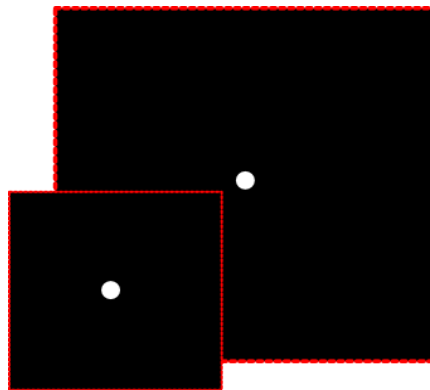


Os raios de luz definem a direção na qual a energia flui.

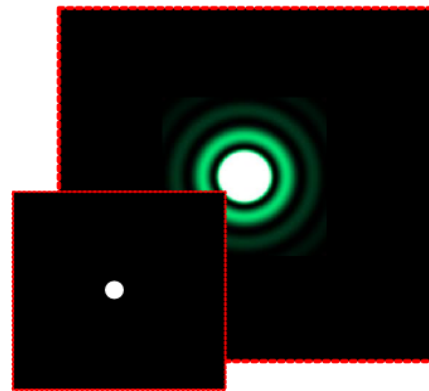
Ótica Geométrica

Na prática: deve ser utilizada sempre que as aberturas/obstáculos no caminho da luz são muito maiores que o comprimento de onda

Ótica Geométrica



Ótica Ondulatória

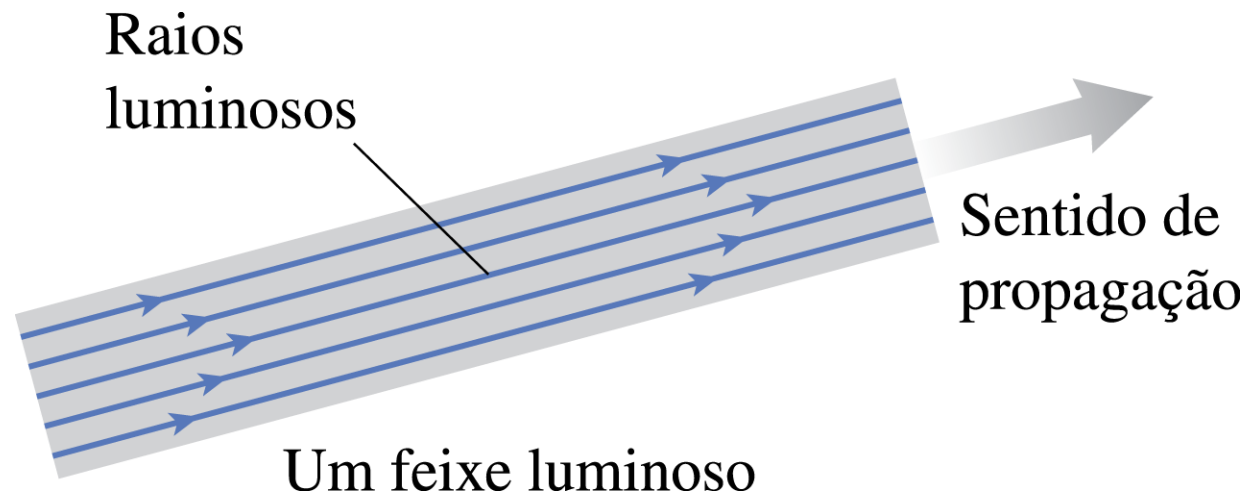


Ex: $p/\lambda = 500\text{nm}$, se a luz passa por aberturas de tamanho $D < \sim 1\text{mm}$, devemos usar a ótica ondulatória, caso contrário, podemos utilizar a ótica geométrica.

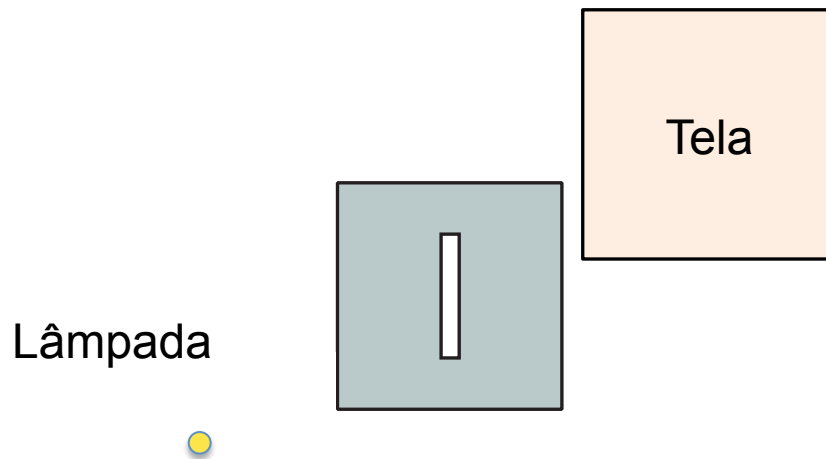
Ótica Geométrica

Princípios:

1 - Propagação retilínea da luz com velocidade $v = c / n$
(em meios homogêneos, transparentes e isotrópicos)

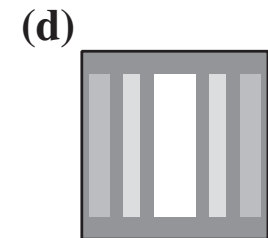
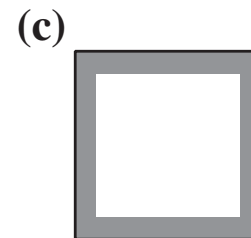
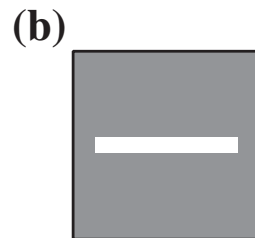
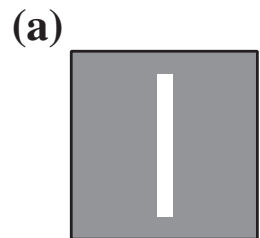


Teste conceitual

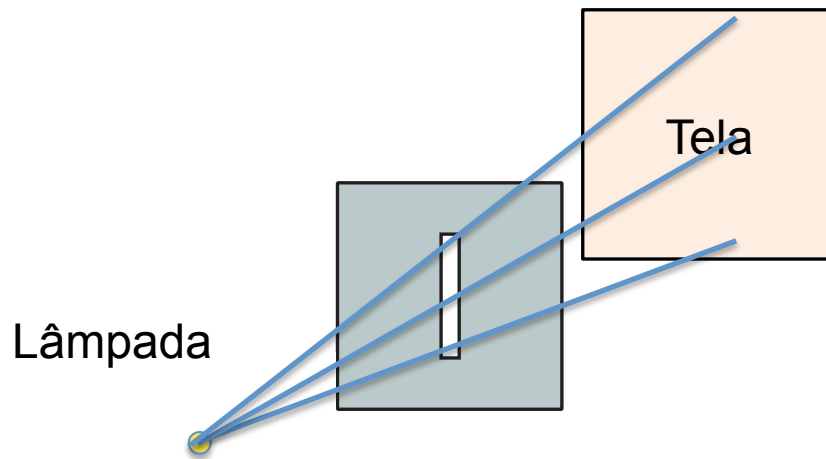


Uma **lâmpada pontual** (muito pequena) ilumina uma abertura vertical com 1cm de largura.

Qual é o formato do padrão luminoso projetado em uma tela atrás da abertura?



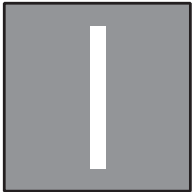
Teste conceitual



Uma **lâmpada pontual** (muito pequena) ilumina uma abertura vertical com 1cm de largura.

Qual é o formato do padrão luminoso projetado em uma tela atrás da abertura?

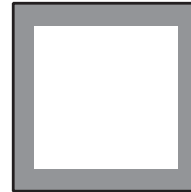
(a)



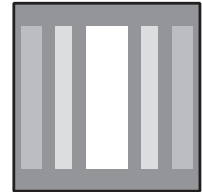
(b)



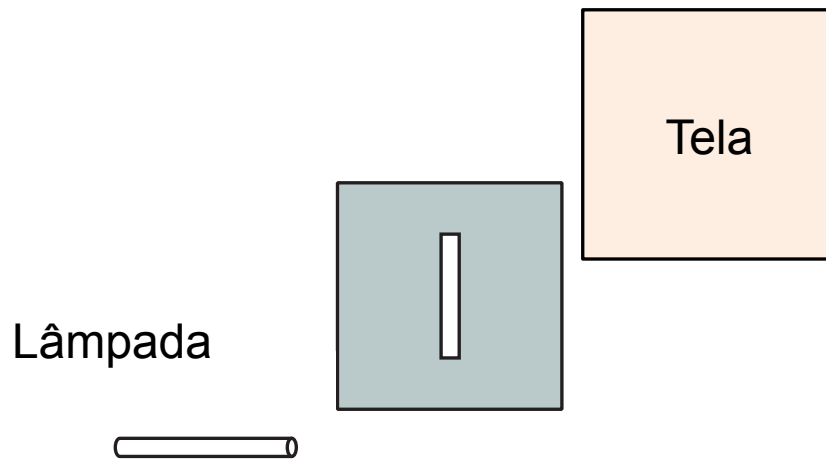
(c)



(d)



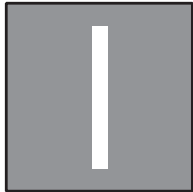
Teste conceitual



Uma **lâmpada horizontal longa** e fina ilumina uma abertura vertical com 1cm de largura.

Qual é o formato do padrão luminoso projetado em uma tela atrás da abertura?

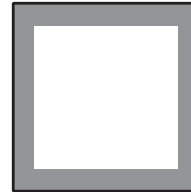
(a)



(b)



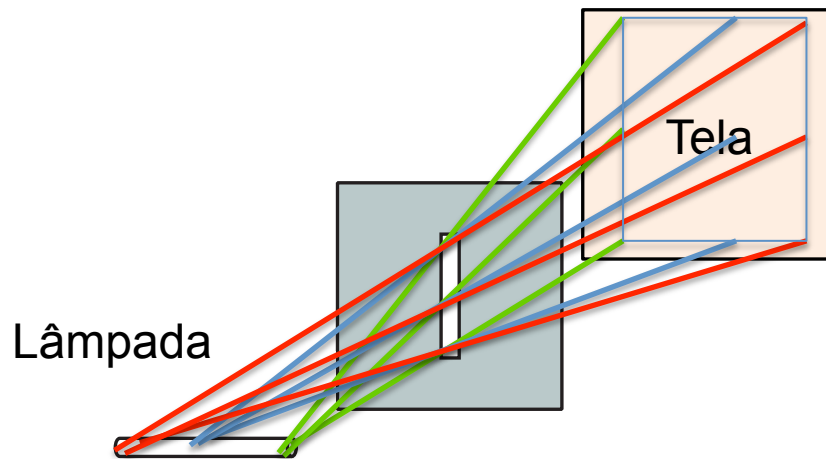
(c)



(d)



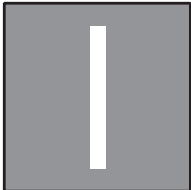
Teste conceitual



Uma **lâmpada horizontal longa** e fina ilumina uma abertura vertical com 1cm de largura.

Qual é o formato do padrão luminoso projetado em uma tela atrás da abertura?

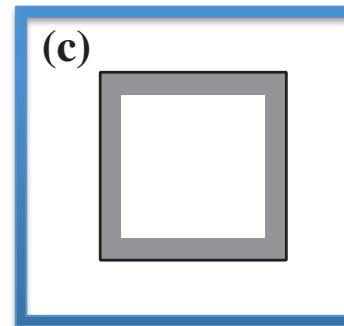
(a)



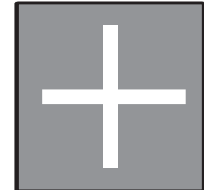
(b)



(c)



(d)

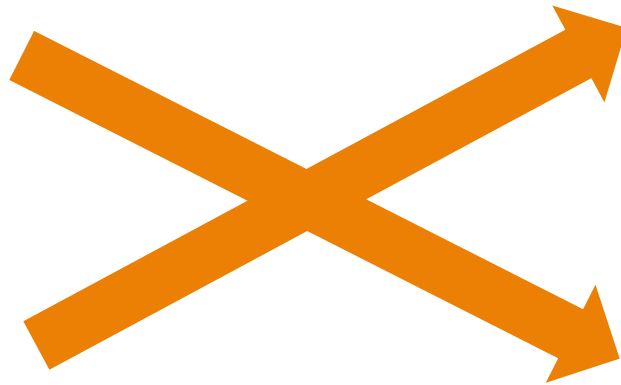


Ótica Geométrica

Princípios:

1 - Propagação retilínea (raios de luz)

2 - Independência dos raios luminosos (um raio não afeta o outro)

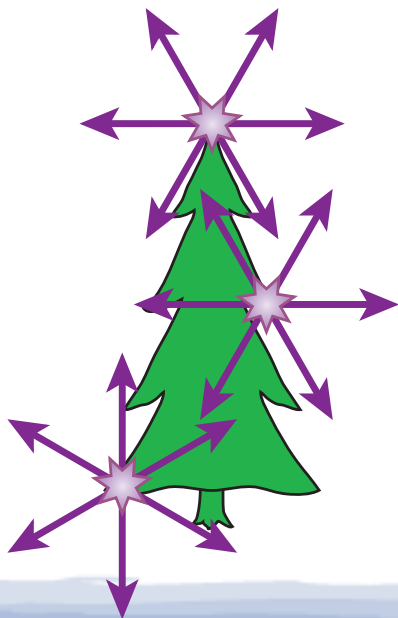


(isto é uma consequência do princípio da superposição das ondas subjacentes)

Ótica Geométrica

Princípios:

- 1 - Propagação retilínea (raios de luz)
- 2 - Independência dos raios luminosos (um raio não afeta o outro)
- 3- **Cada ponto de um objeto físico origina raios de luz, e esses raios se propagam em todas as direções**

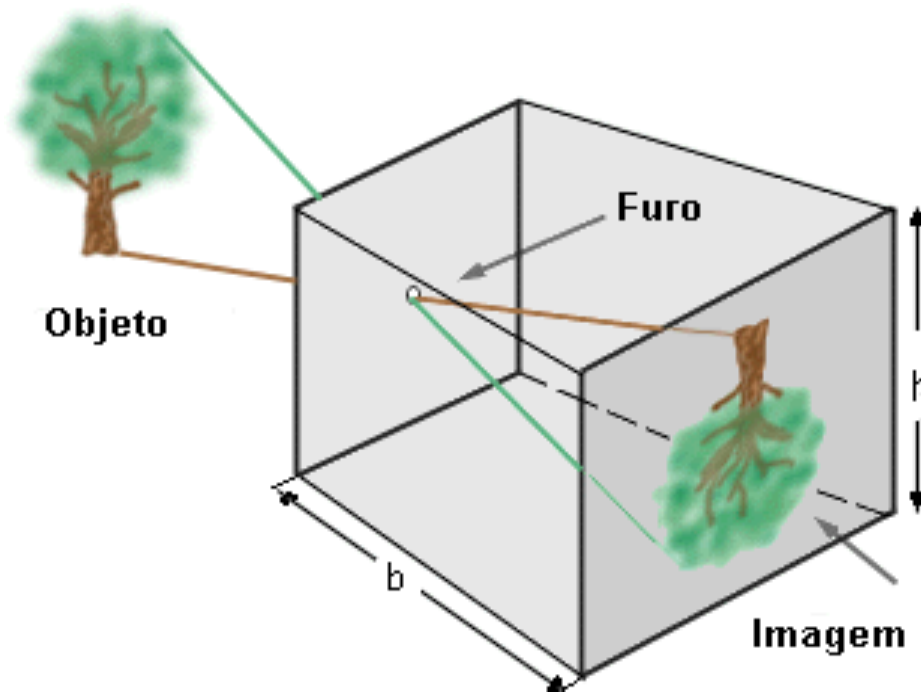


Obs: Isso vale tanto para objetos **luminosos** (geram luz própria), quanto para os **não-luminosos** (apenas refletem luz já no ambiente)

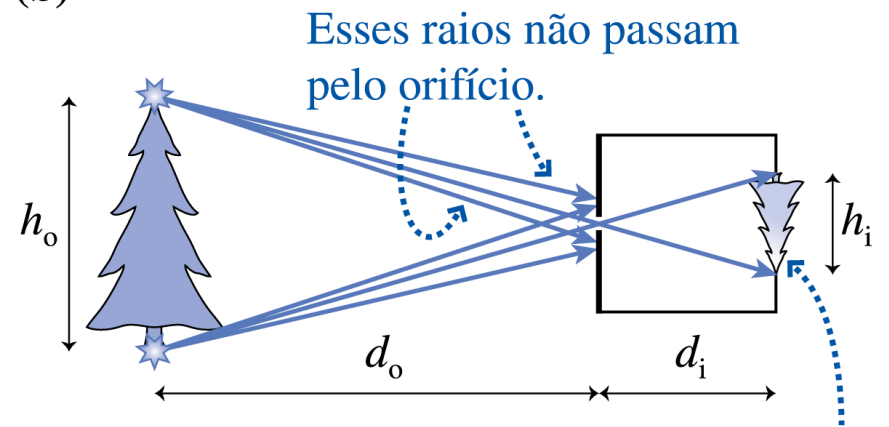
Ótica Geométrica

Cada ponto de um objeto é uma fonte de luz

Aplicação: Câmara Escura



(b)



A imagem está de cabeça para baixo. Se o orifício for suficientemente pequeno, cada ponto da imagem corresponderá a um ponto do objeto.

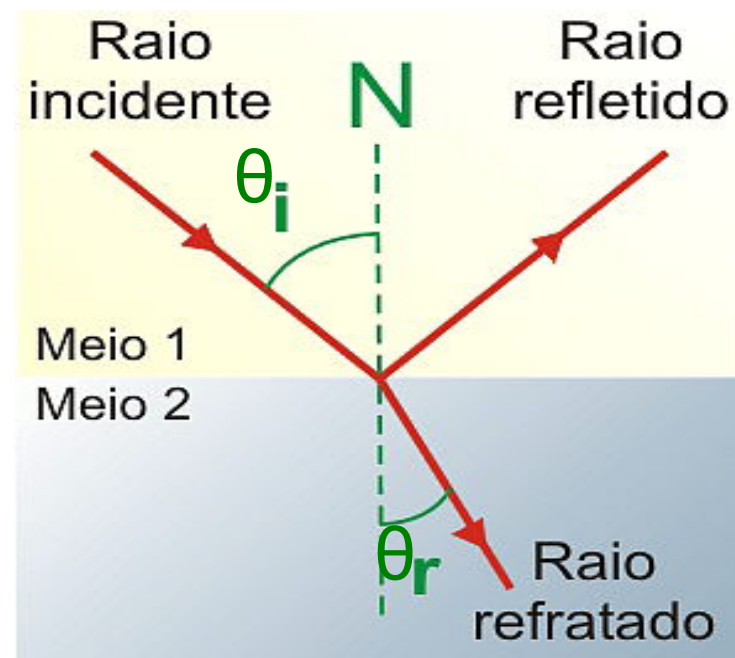
Ótica Geométrica

Princípios:

- 1 - Propagação retilínea** (raios de luz)
- 2 - Independência dos raios luminosos** (um raio não afeta o outro)
- 3 - Cada ponto de um objeto físico origina raios de luz, e esses raios se propagam em todas as direções**
- 4 - Os raios podem ser desviados (refletidos, refratados, ou espalhados) ao interagirem com objetos materiais**

Reflexão e Refração da Luz

Raios de luz são desviados quando encontram meios materiais com diferentes índices de refração



N: normal à superfície ; θ_i = ângulo de incidência ; θ_r = ângulo de refração

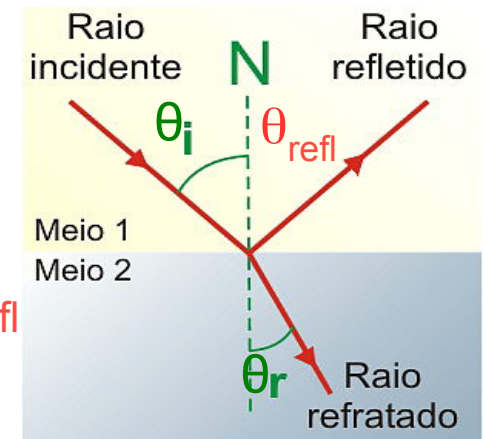
obs: Ângulos sempre contados com respeito à normal N

Leis da Ótica Geométrica

Os *raios incidente, refletido e refratado* estão contidos no plano formado pelo raio incidente e a normal.

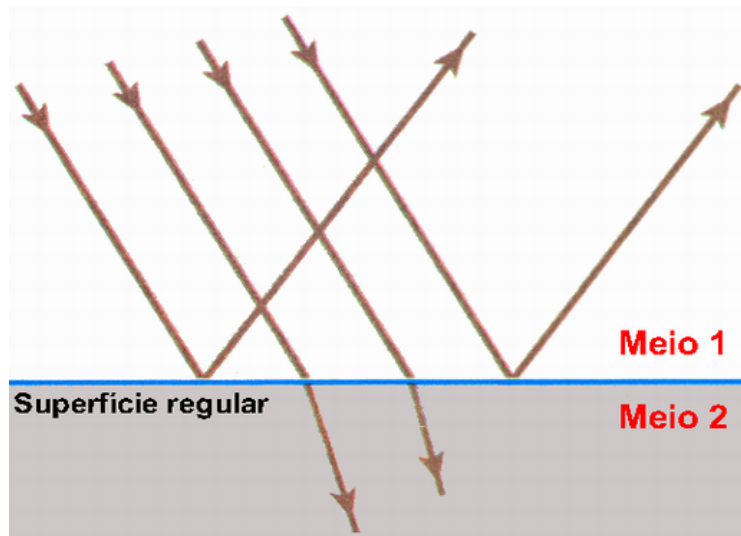
Numa reflexão especular (=‘tipo espelho’): $\theta_i = \theta_{\text{refl}}$

Numa refração: $n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r$ (Lei de Snell)

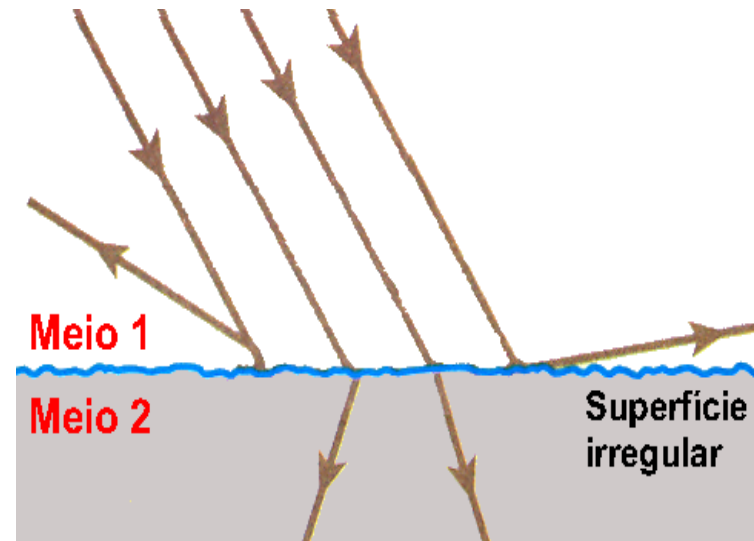


Reflexão

Reflexão Especular



Reflexão Difusa

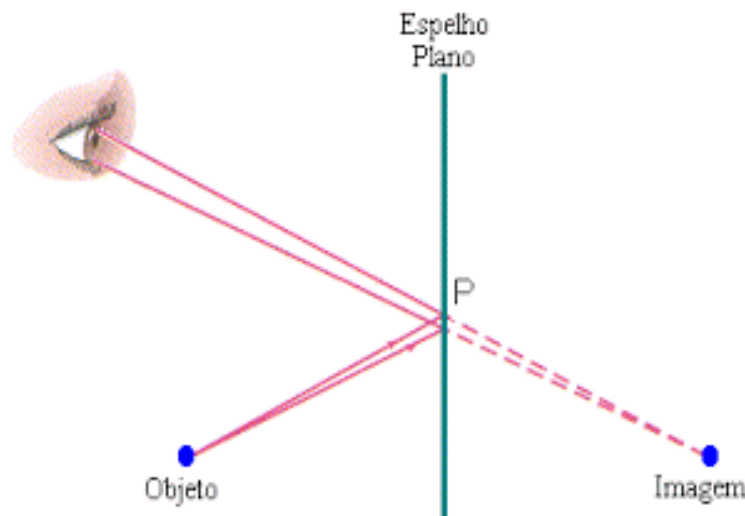


obs: O que considerar como 'irregular' depende do λ_{luz} .

Se a rugosidade for $\gtrsim \lambda_{\text{luz}}$ (para luz visível, $\sim 500\text{nm}$), a reflexão será difusa.

Reflexão em espelhos planos

Formação de Imagens em Espelhos planos

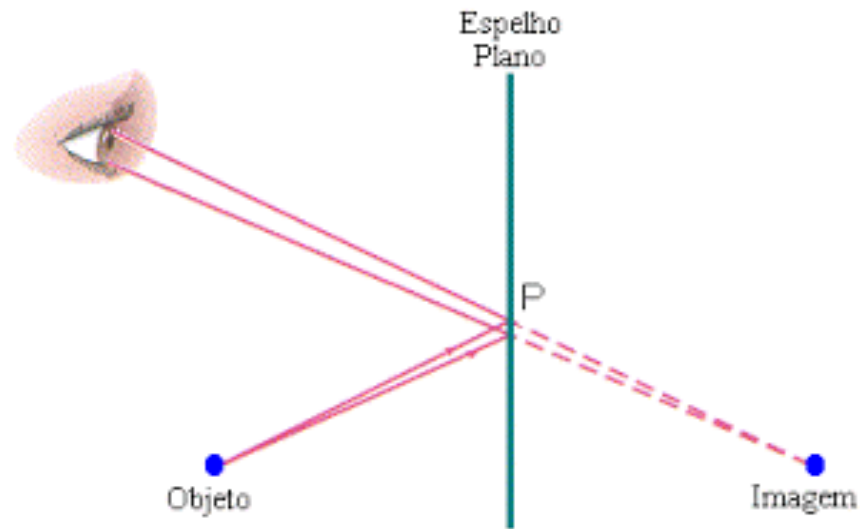


O observador vê a luz *como se* ela viesse de um ponto atrás do espelho. Atrás do espelho não existe objeto algum, por isso dizemos que a imagem é **virtual**.

→ Imagem Virtual: Imagem formada por prolongamentos

Reflexão em espelhos planos

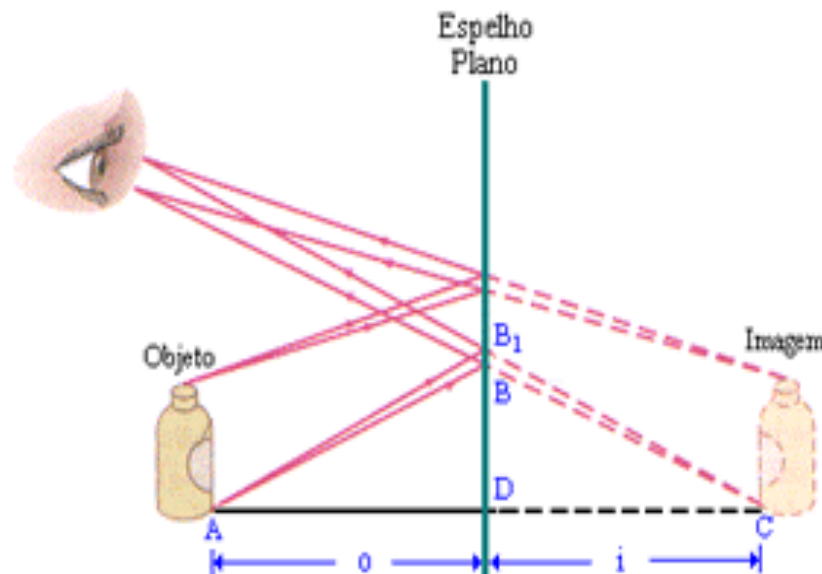
Formação de Imagens em Espelhos planos



A distância do objeto ao espelho é igual à da imagem ao espelho

Reflexão em espelhos planos

Formação de Imagens em Espelhos planos



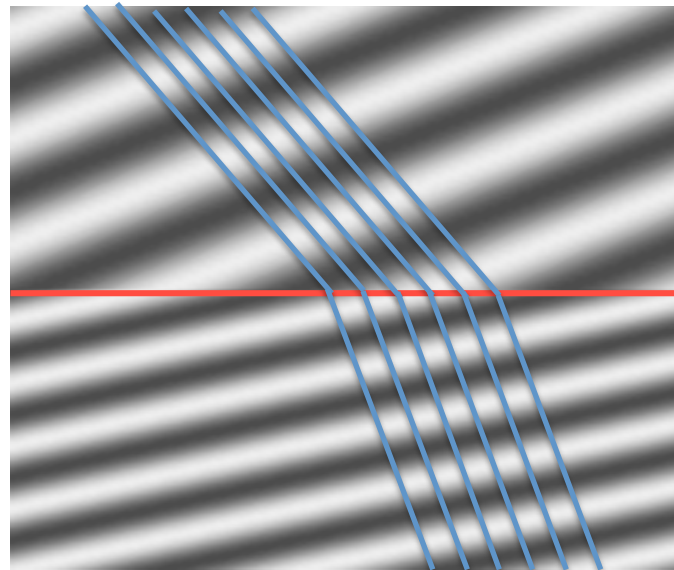
O Objeto e a Imagem têm o mesmo tamanho!!

Refração

Lei de Snell para Refração da Luz

meio 1
(n_1)

meio 2
(n_2)

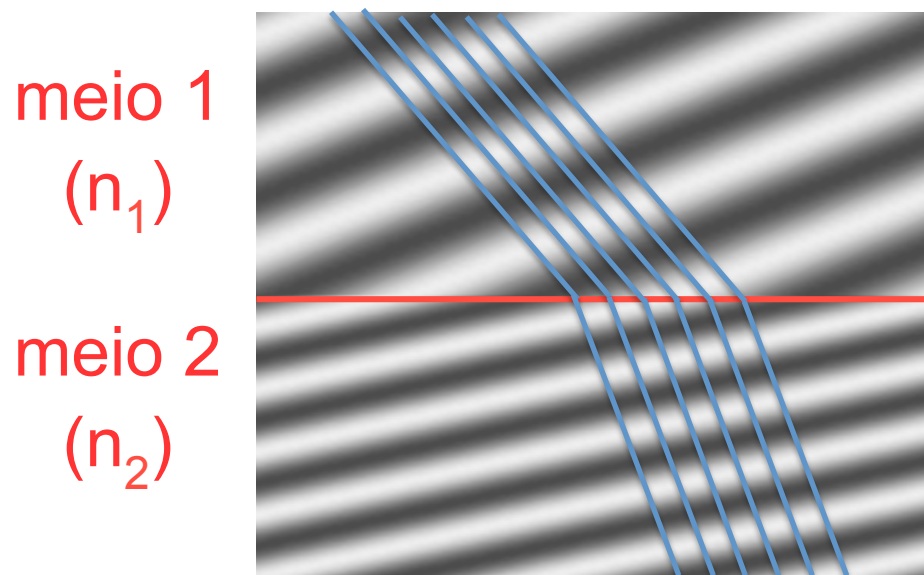


Quem é maior:
 n_1 ou n_2 ?

A) n_1 B) n_2

Refração

Lei de Snell para Refração da Luz



Quem é maior:
 n_1 ou n_2 ?

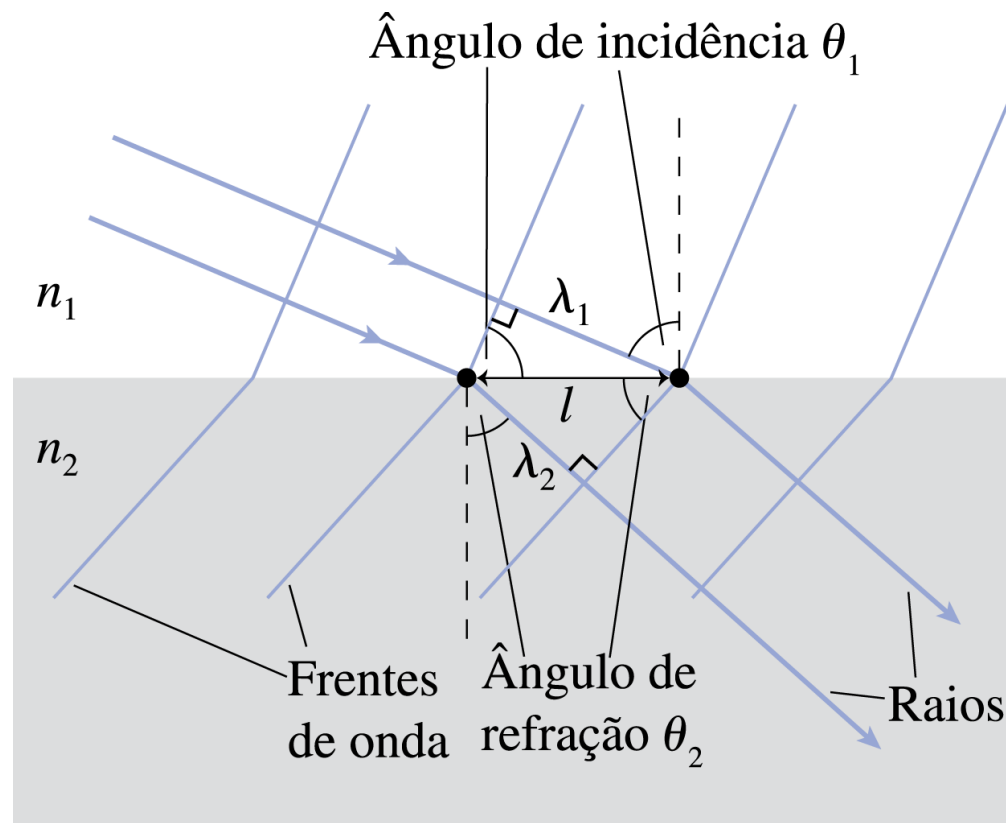
A) n_1 B) n_2

R (visão ondulatória): $\lambda_1 > \lambda_2$.

Mas $\lambda = v/f = c/nf$, e f tem de ser o mesmo nos dois lados. Então $n_1 < n_2$.

R: (visão geométrica): $n_1 / n_2 = \sin(\theta_2) / \sin(\theta_1) < 1$

Refração: Lei de Snell



$$l \sin \theta_1 = \lambda_1 = (c / n_1) / f$$

$$l \sin \theta_2 = \lambda_2 = (c / n_2) / f$$

$$c / l f = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

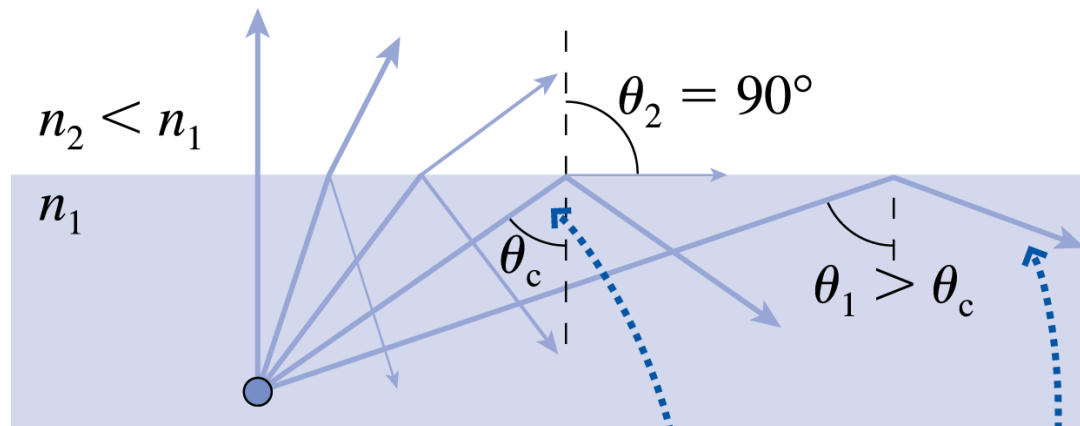
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Reflexão Interna Total

Se $n_2 < n_1$ e θ_1 for suficientemente grande, não há solução para θ_r

O ângulo de incidência está aumentando.

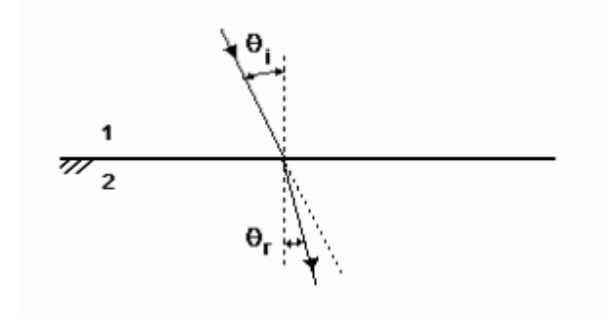
→
A luz transmitida vai se tornando mais fraca.



Ângulo crítico atingido quando $\theta_2 = 90^\circ$

A reflexão vai se tornando mais forte. →

A reflexão interna total ocorre quando $\theta_1 \geq \theta_c$.

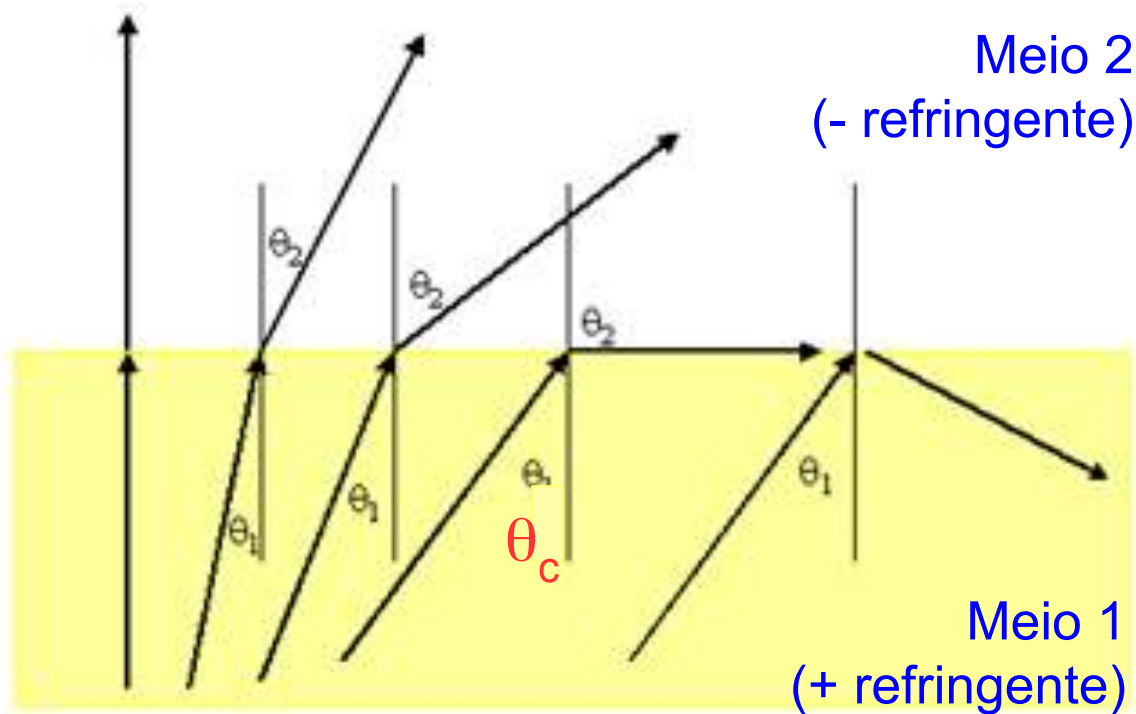


$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_r$$

ângulo crítico:

$$\theta_c = \arcsen(n_2/n_1)$$

Reflexão Interna Total



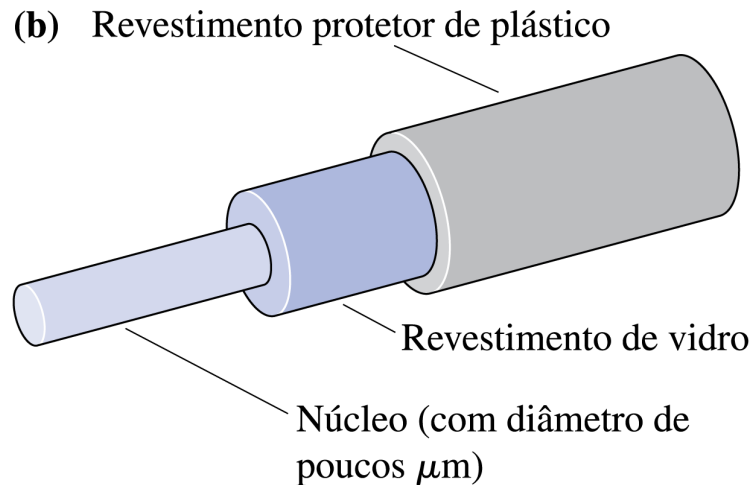
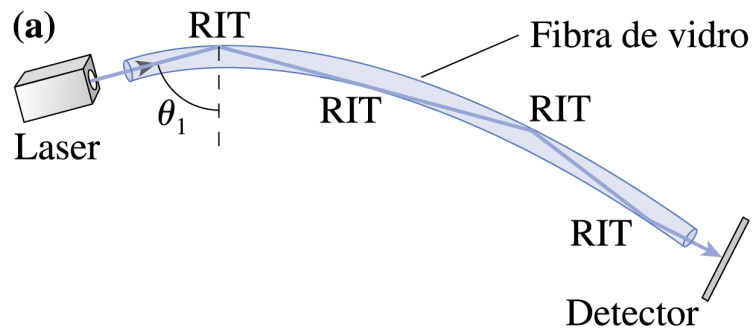
$$n_1 > n_2$$

$$\theta_c = \arcsen(n_2/n_1)$$

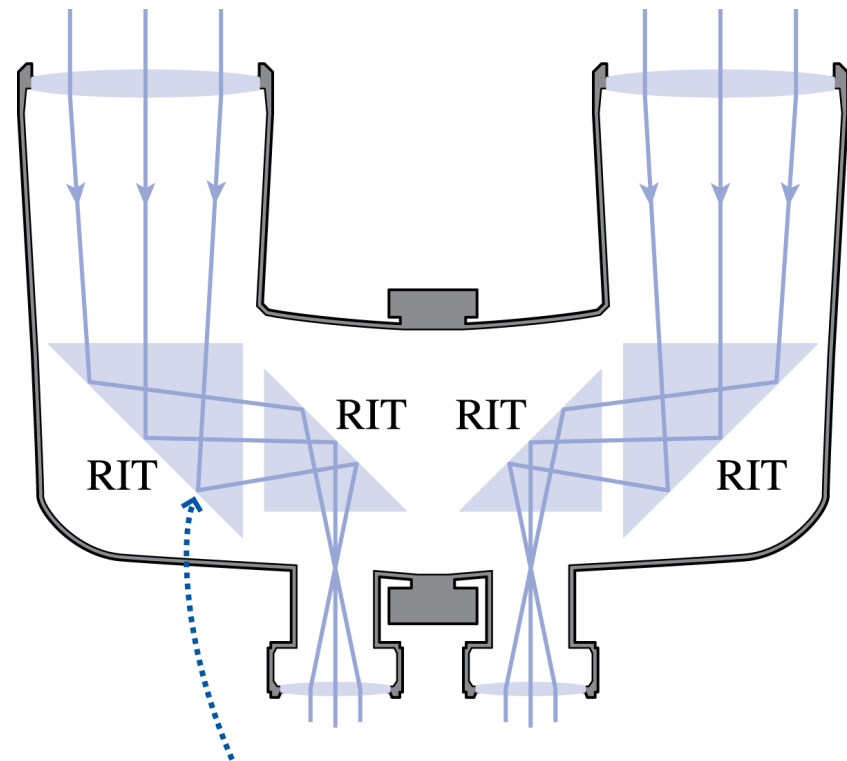
Reflexão Interna Total

Aplicação tecnológica:

fibras Óticas



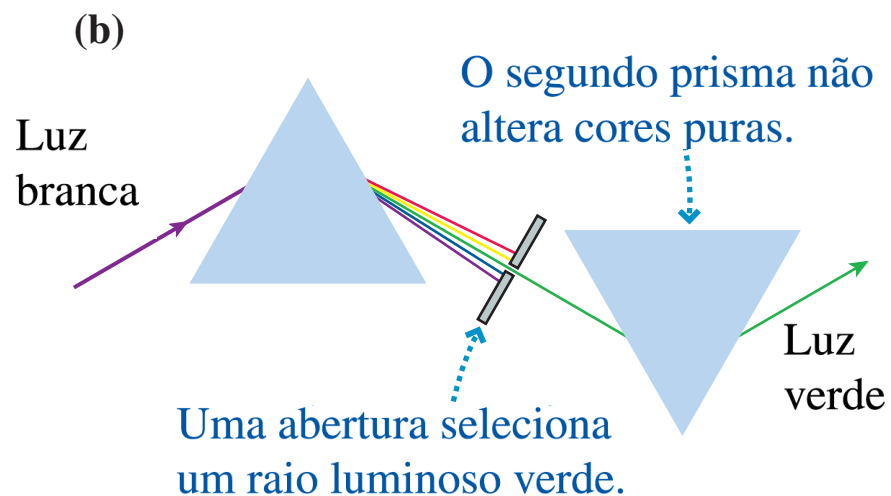
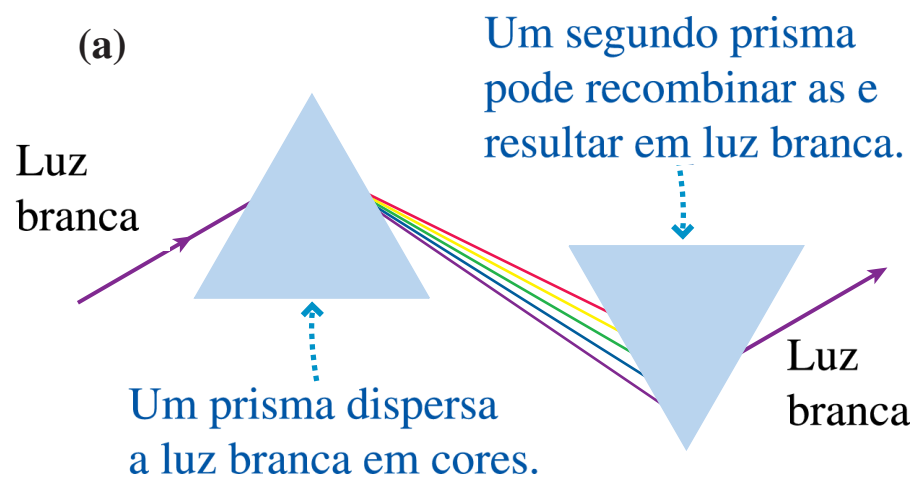
Binóculos



Os ângulos de incidência excedem o ângulo crítico.

Dispersão

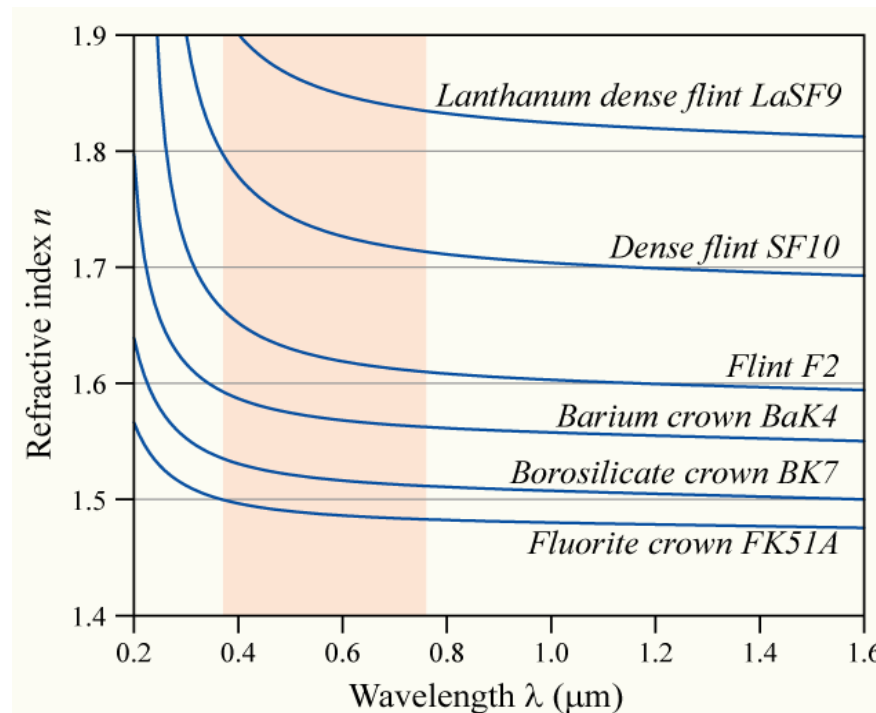
Dispersão da luz: Dependência do n com λ



Dispersão

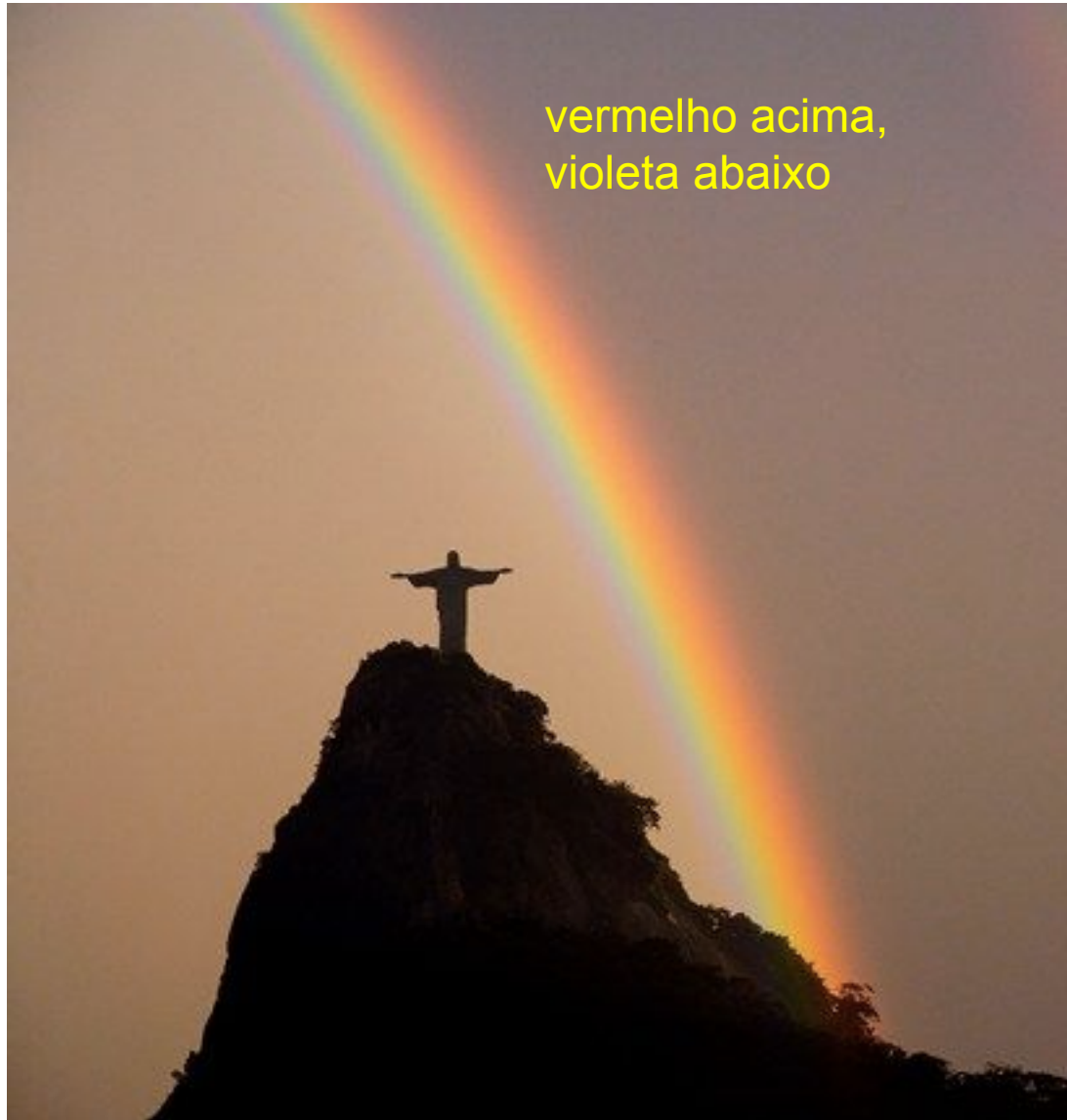
Dispersão da luz: Dependência do n com λ

Ex: em vidros, tipicamente n *diminui* com λ

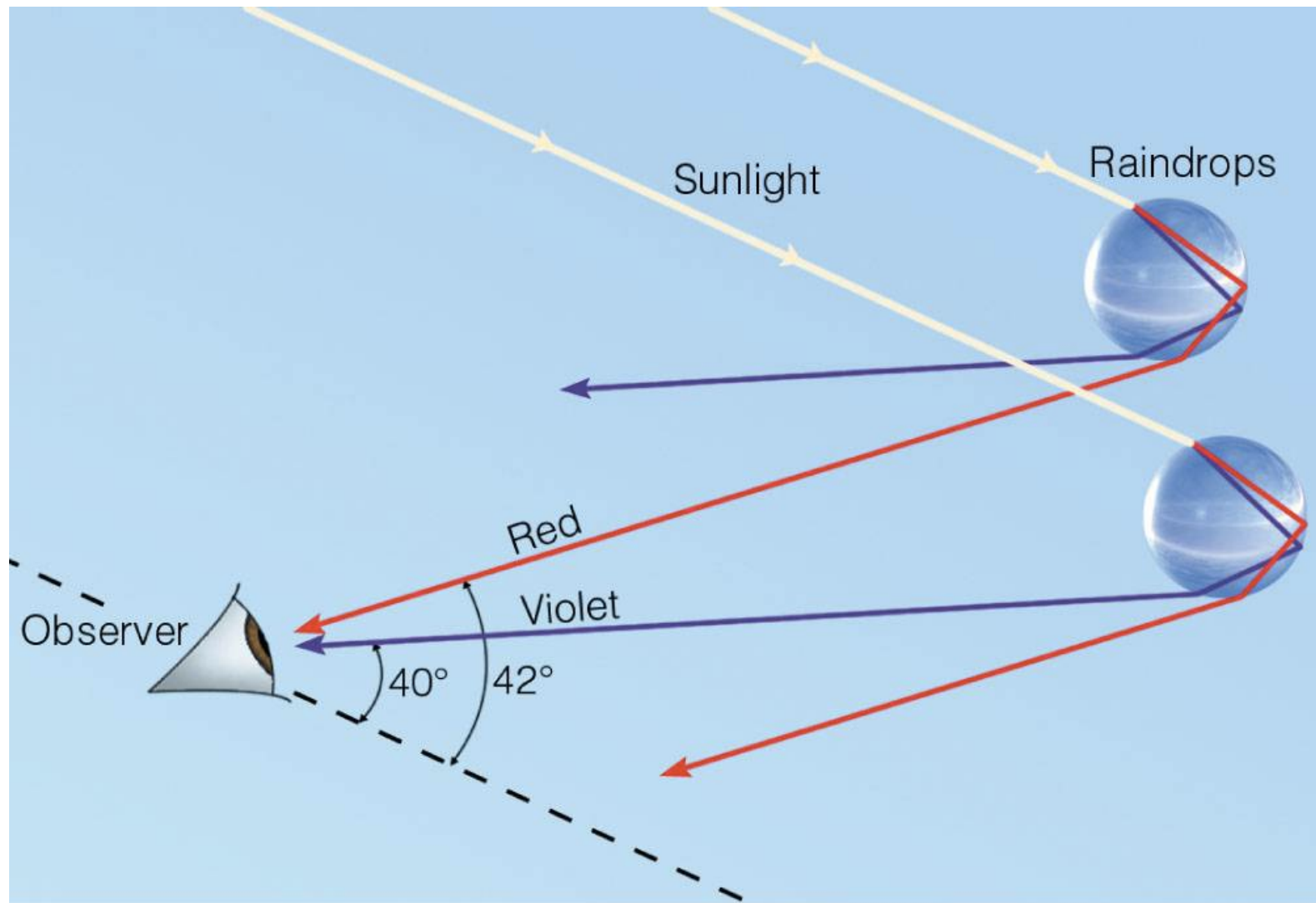


Quanto maior λ , menor o $n \rightarrow$ menos a luz é refratada.

O Arco-íris



O Arco- íris



O Arco-íris



Arco principal

vermelho acima,
violeta abaixo

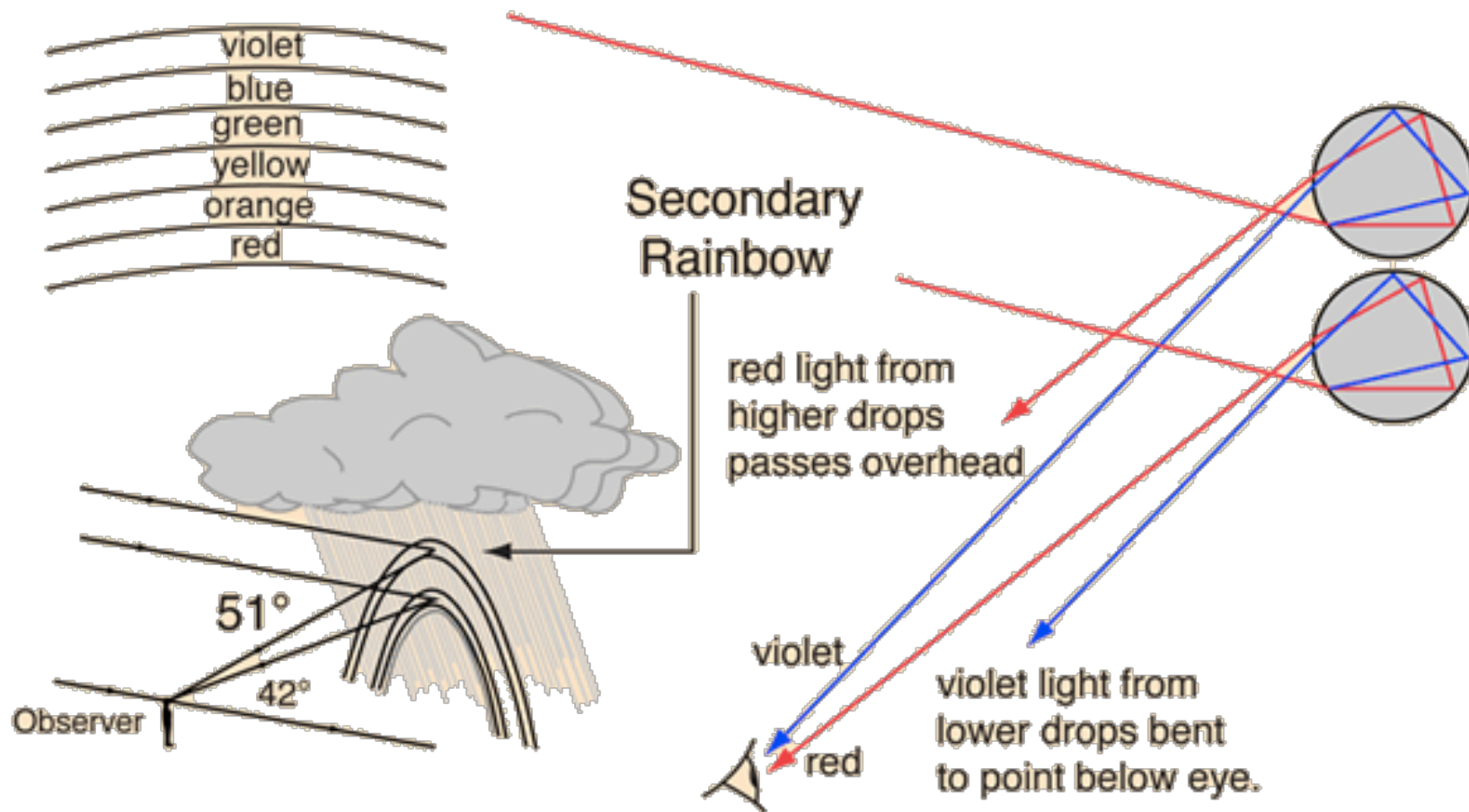
Arco secundário

violeta acima,
vermelho abaixo

mais fraco

O Arco- íris

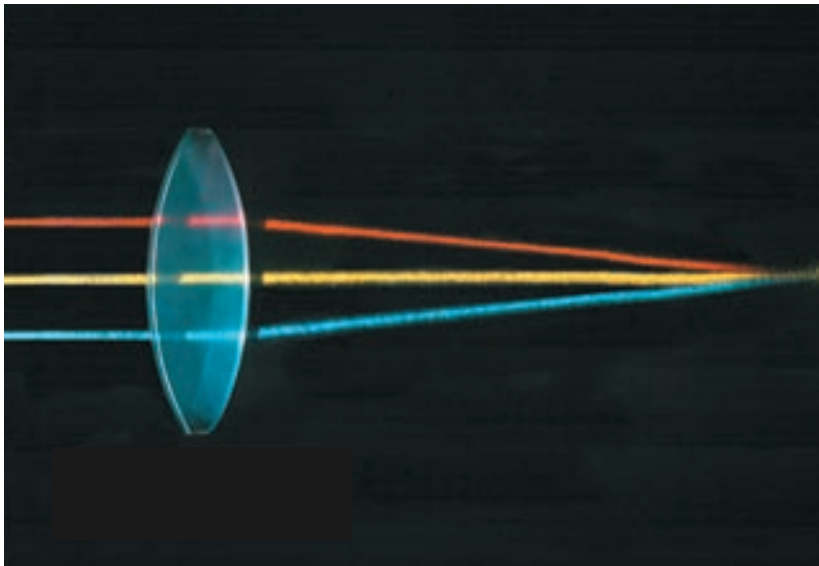
Arco secundário: uma reflexão interna a mais!



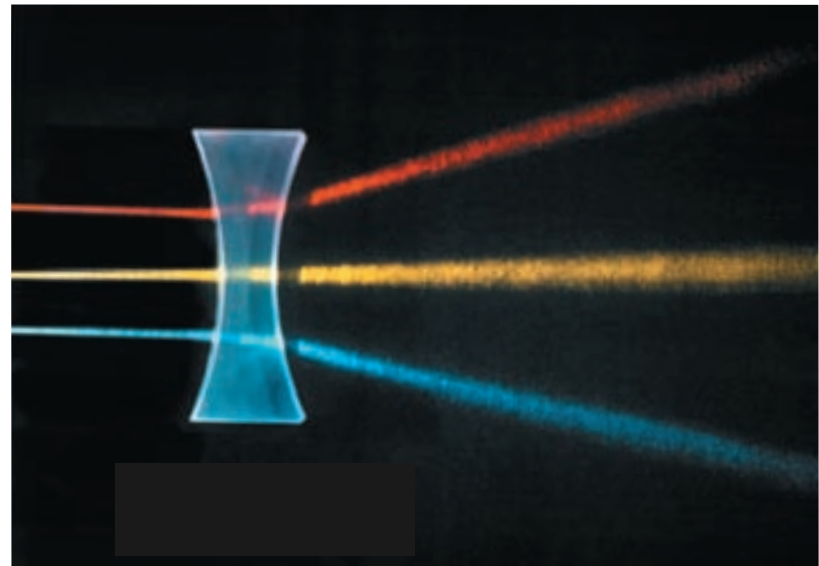
Formação de imagens através de lentes

Lente: um material transparente que usa a refração em superfícies curvas para a formação de imagens.

Lente 'convergente' (convexa)

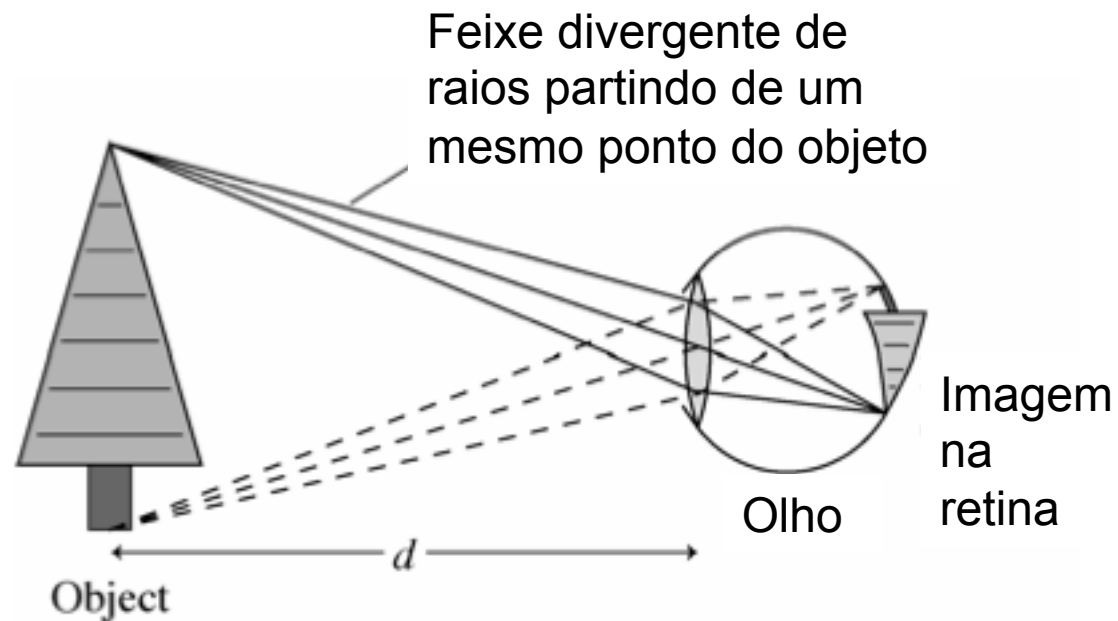


Lente 'divergente' (côncava)

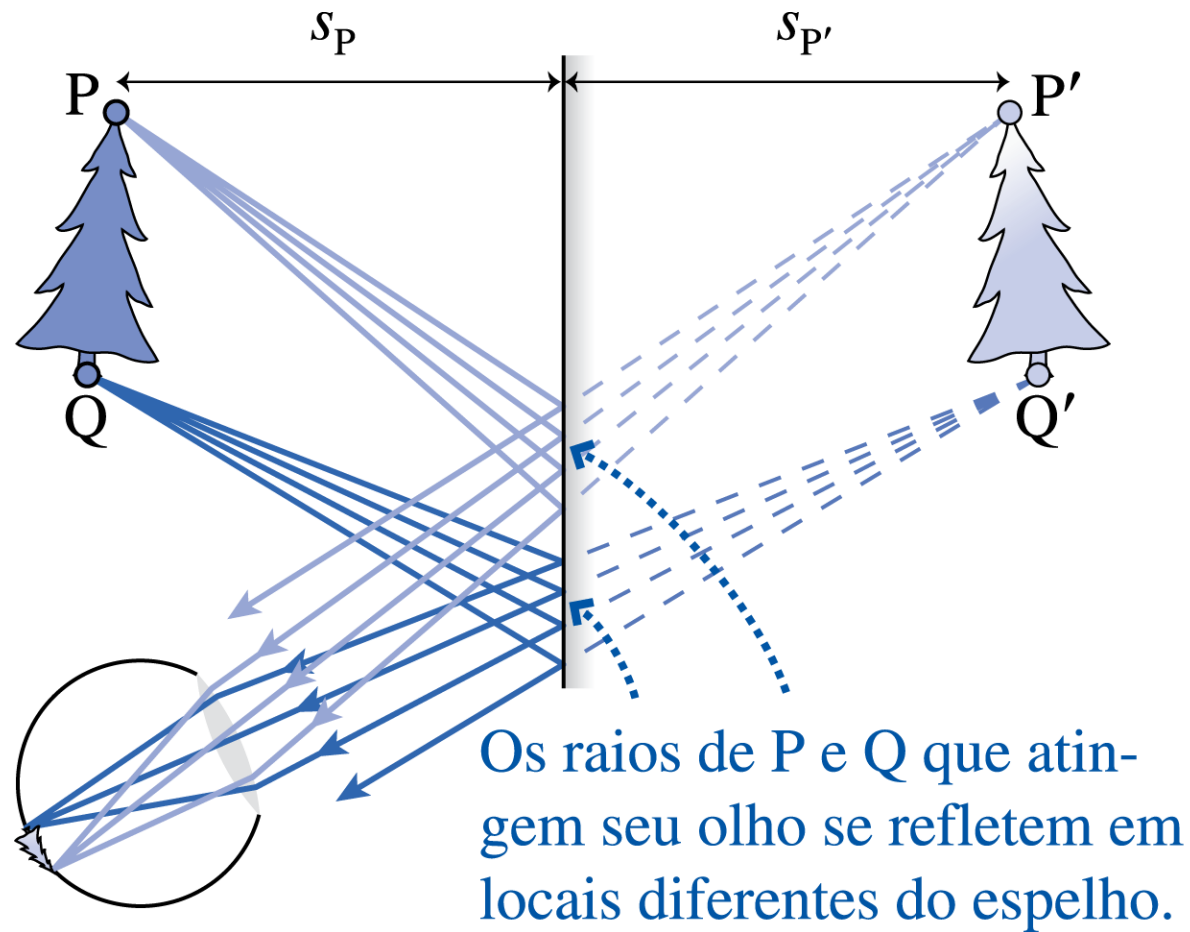


Ótica Geométrica

Como o olho enxerga (rascunho):



Reflexão em espelhos planos

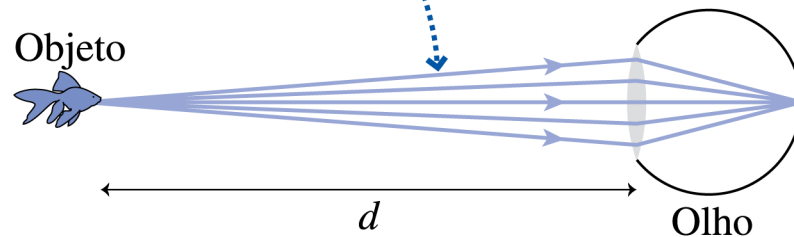


Seu olho captura somente uma pequena fração dos raios refletidos.

Imagem por refração: peixe num aquário

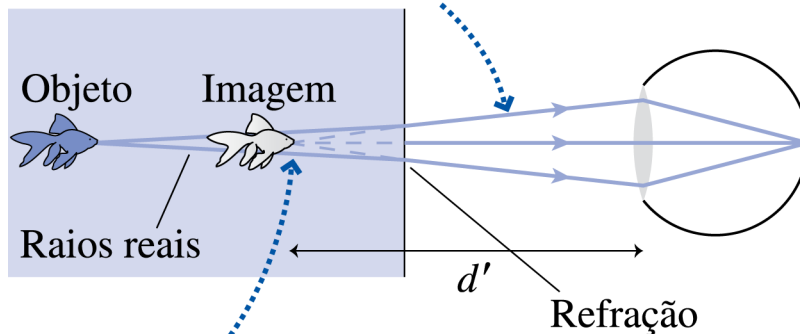
(a) O peixe fora d'água

O olho enxerga o objeto à distância d .

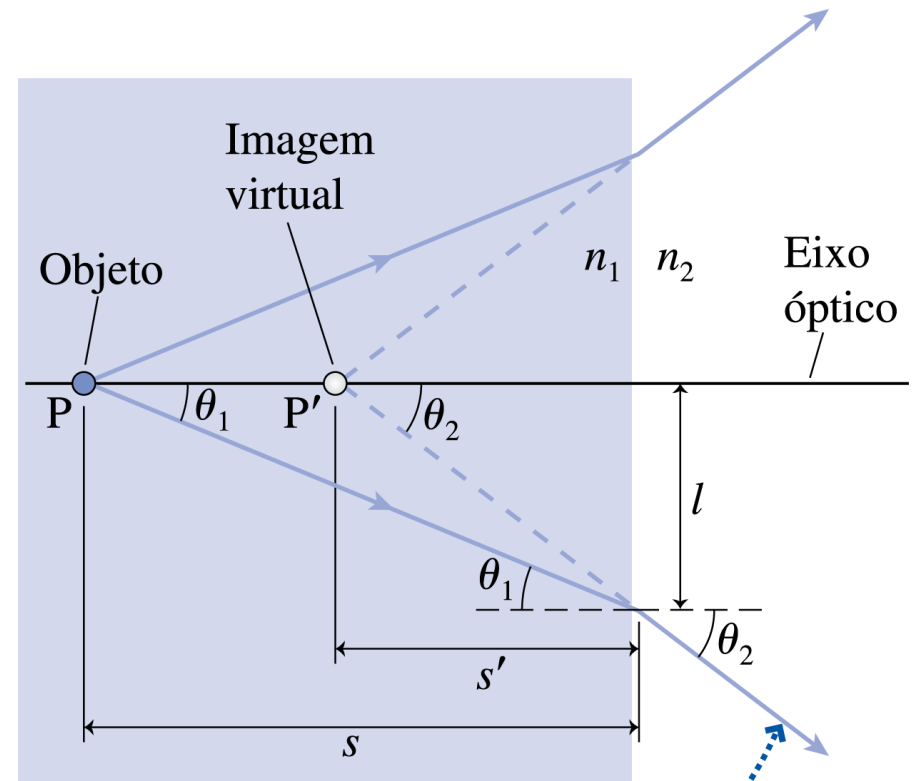


(b) O peixe no aquário

O olho enxerga a imagem à distância d' .



Os raios divergentes parecem provir deste ponto. Trata-se de uma imagem virtual.

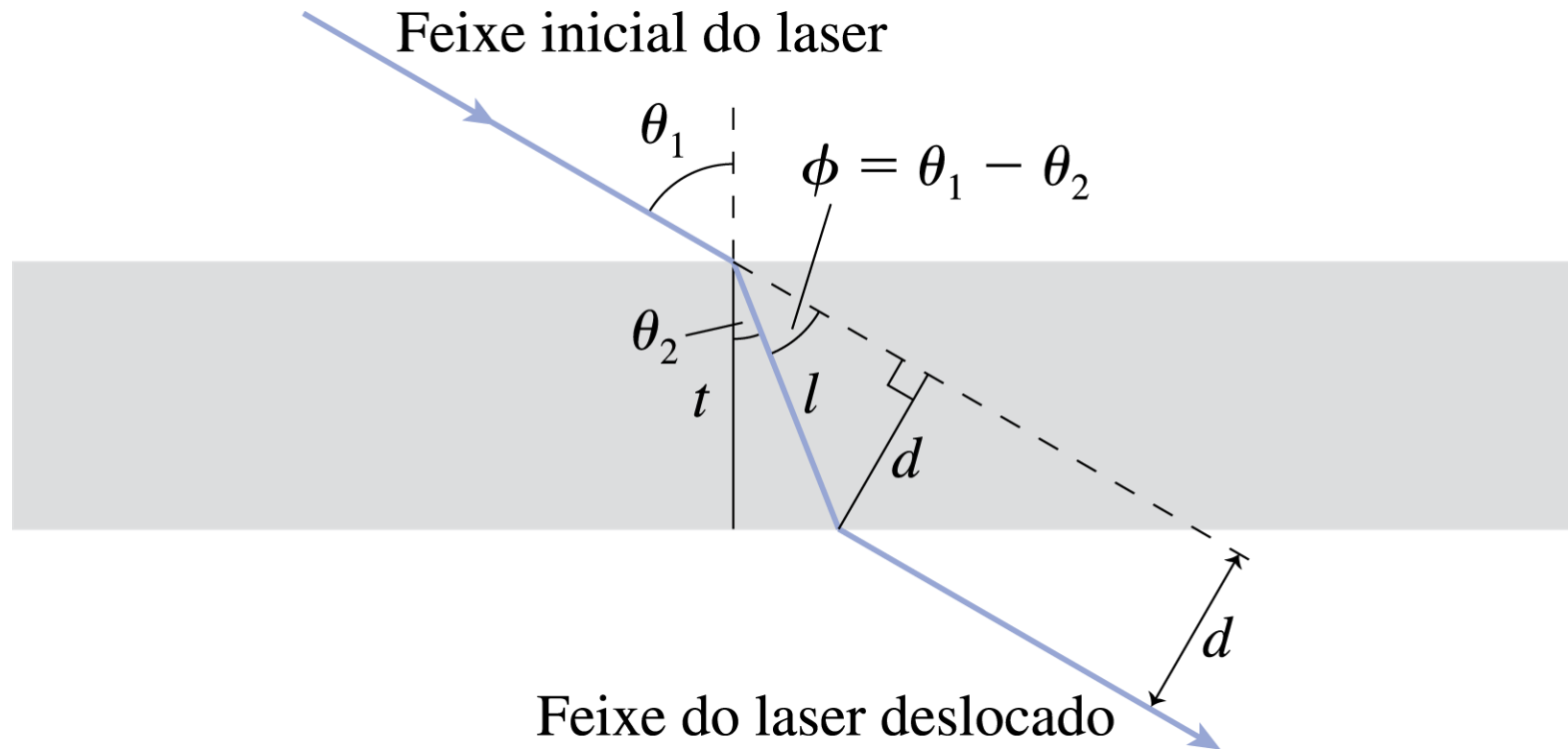


Os raios divergem a partir da imagem virtual em P' .

p/ angulos pequenos:

$$s' = \frac{n_2}{n_1} s$$

Refração por uma placa de lados paralelos



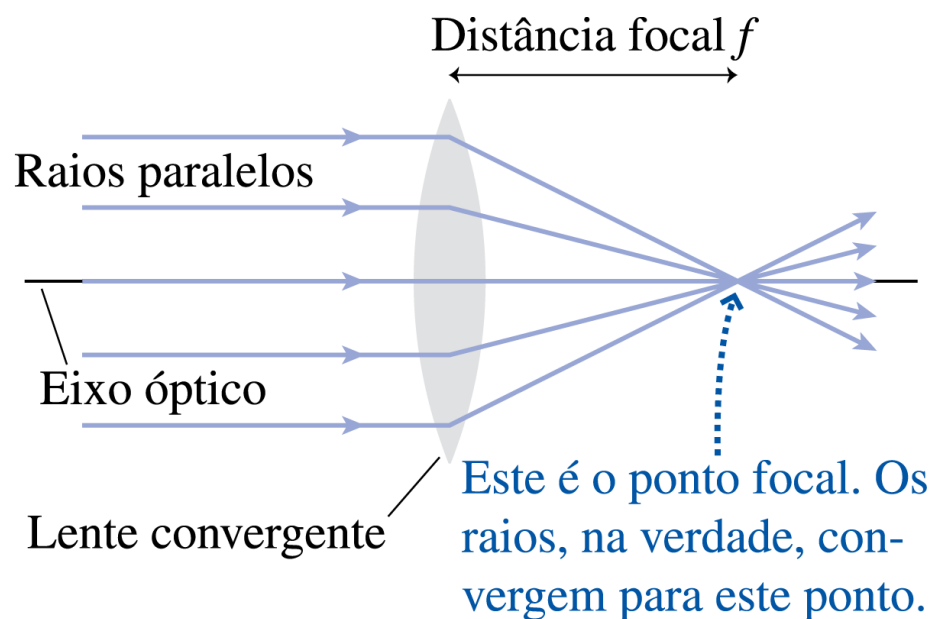
$$d = l \sin(\theta_1 - \theta_2) = t \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos(\theta_2)}$$

após atravessar, o feixe continua na mesma direção original, porém com um pequeno deslocamento lateral

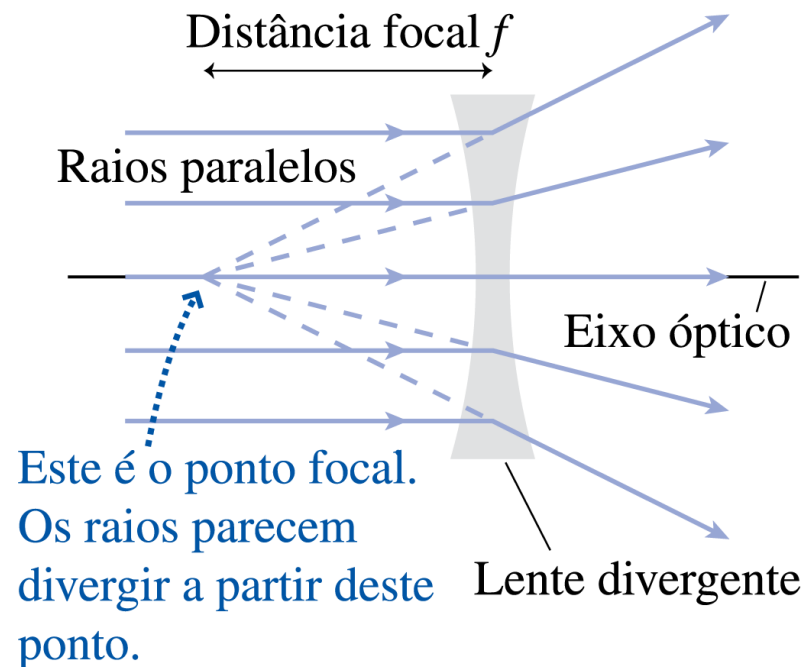
Formação de imagens através de lentes

Lente: um material transparente que usa a refração em superfícies curvas para a formação de imagens.

Lente 'convergente' (convexa)



Lente 'divergente' (côncava)



Formação de imagens através de lentes

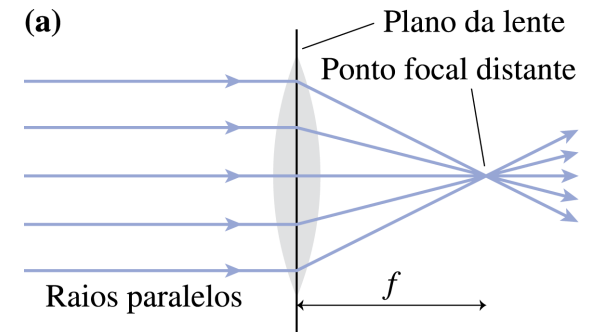
Análise: suposições simplificadoras

Assumimos:

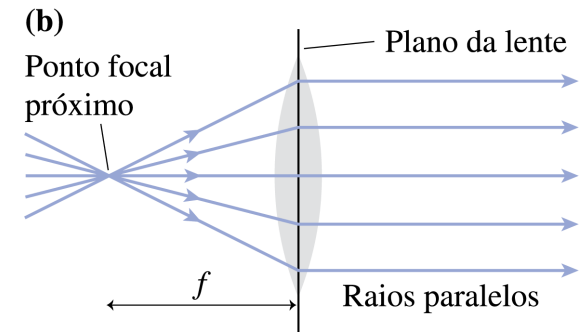
1. lentes finas, que podemos considerar **contidas em um plano**
2. que próximo ao centro da lente as suas faces são praticamente paralelas.

Consequencias:

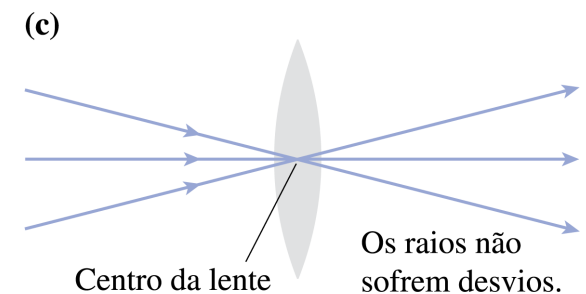
- refração ocorre apenas no plano da lente
- raios que passam pelo centro da lente seguem sem desvio de trajetória,



Qualquer raio paralelo ao eixo óptico é refratado em direção ao ponto focal do lado oposto da lente.



Qualquer raio que passe pelo ponto focal próximo emerge da lente paralelamente ao seu eixo óptico.

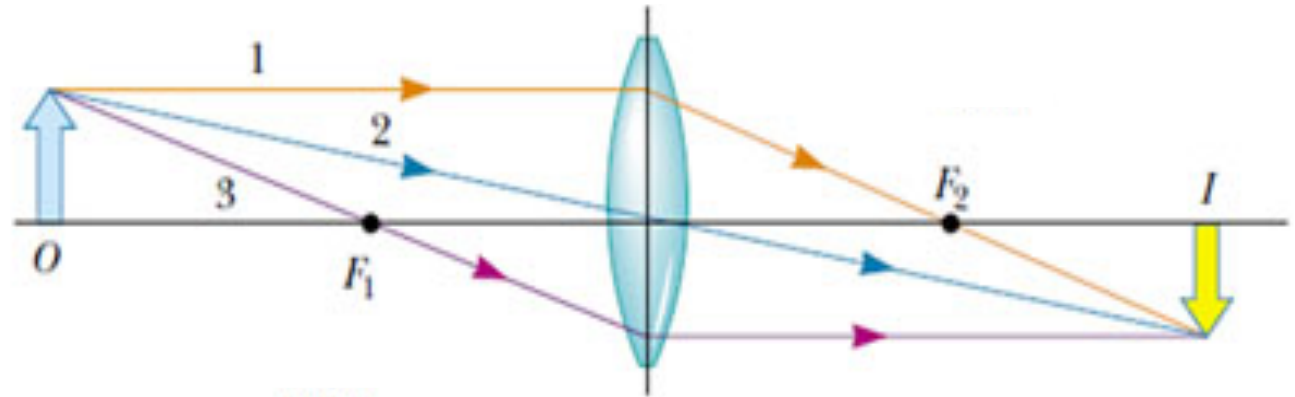


Qualquer raio dirigido para o centro da lente passa por ela em linha reta.

Formação de imagens através de lentes

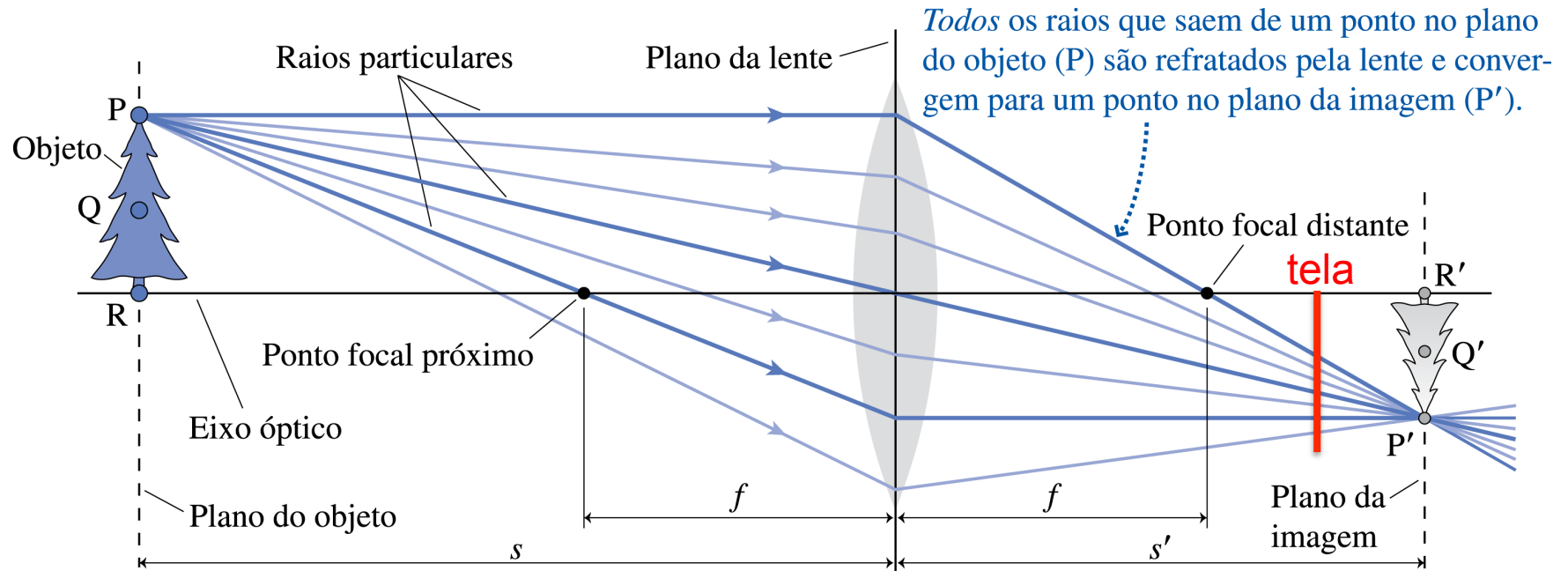
Método de traçado de raios

Para determinar graficamente como será a imagem produzida por uma lente convergente



1. Desenhe o eixo óptico com a lente centrada sobre ele
2. Desenhe um objeto vertical a uma distância s à esquerda da lente
3. A partir da ponta superior do objeto, trace os **três raios principais**:
 - a. um raio incidindo paralelo ao eixo óptico, o qual será refratado de modo a passar pelo foco distante (direito)
 - b. um raio que passa pelo centro da lente sem desvios
 - c. um raio que passa pelo foco próximo (esquerdo), o qual será refratado de modo a seguir paralelo ao eixo óptico
4. Esses três raios devem se cruzar em um ponto, o qual será a projeção da ponta do objeto no plano imagem

Teste Conceitual

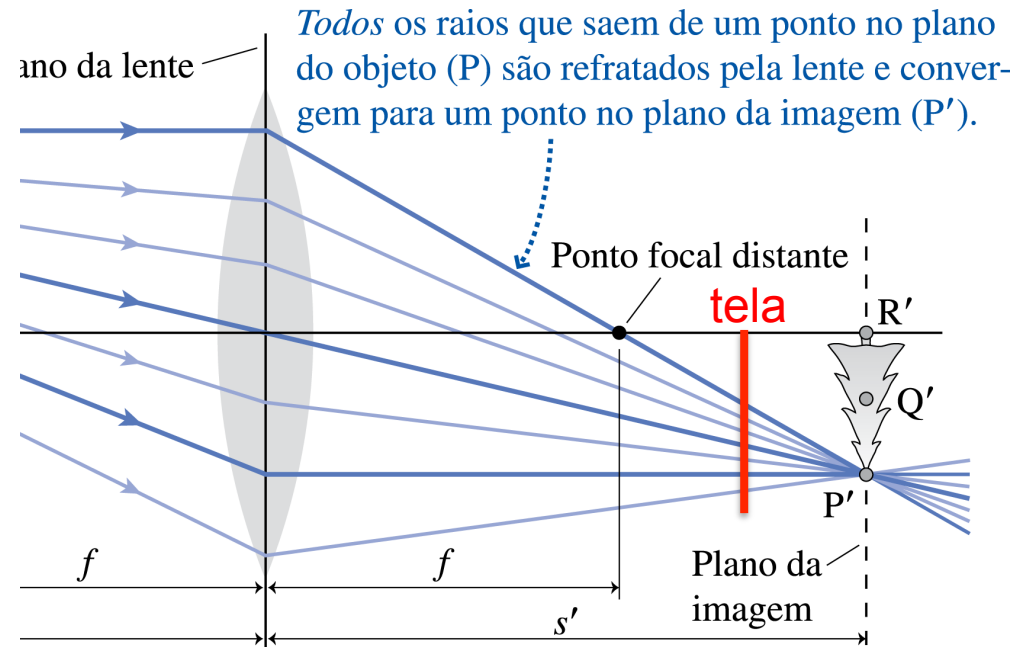
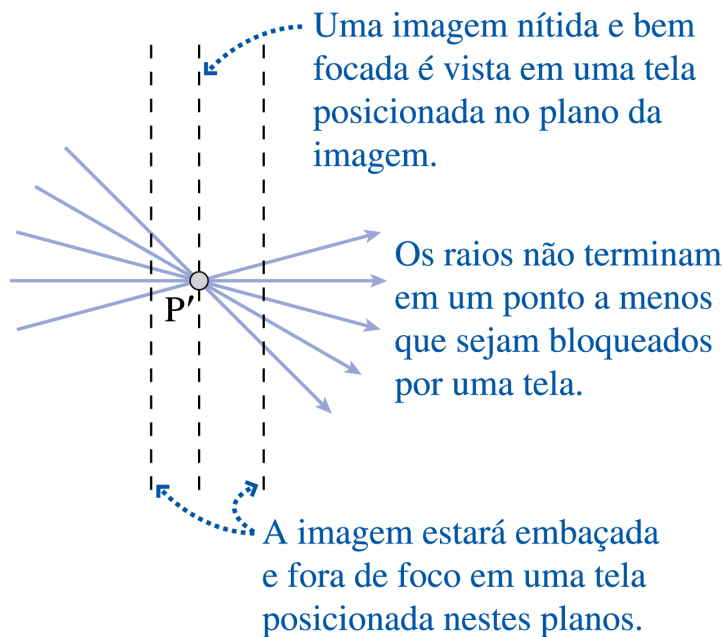


No exemplo acima, a imagem pode ser vista colocando-se uma tela localizada no plano que contém P', Q', R'.

E se mudarmos a posição da tela, por exemplo adiantando-a um pouco como na figura? O que vemos sobre a tela nesse caso?

- A) A mesma imagem, com o mesmo tamanho
- B) A mesma imagem, com tamanho menor
- C) A mesma imagem, com tamanho maior
- D) Um borrão fora de foco

Teste Conceitual

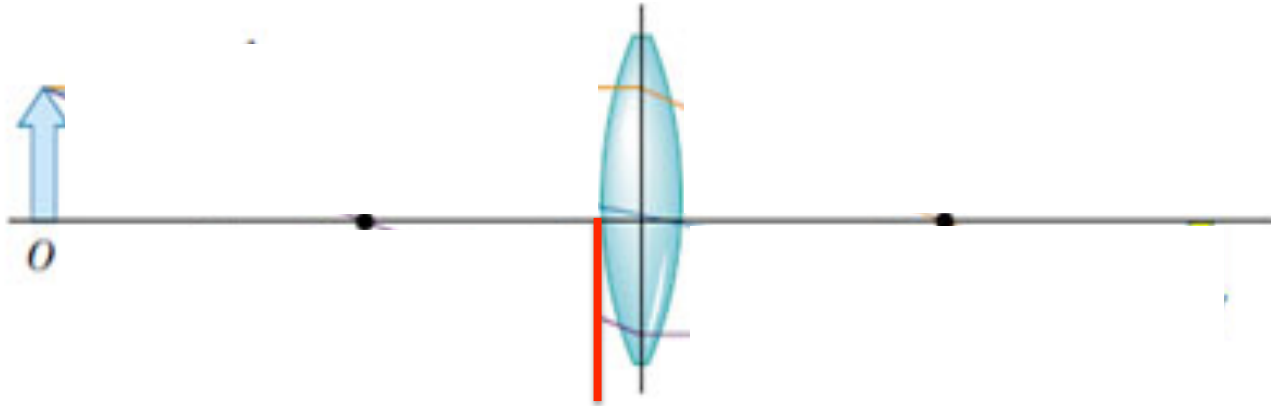


No exemplo acima, a imagem pode ser vista colocando-se uma tela localizada no plano que contém P' , Q' , R' .

E se mudarmos a posição da tela, por exemplo adiantando-a um pouco como na figura? O que vemos sobre a tela nesse caso?

- A) A mesma imagem, com o mesmo tamanho
- B) A mesma imagem, com tamanho menor
- C) A mesma imagem, com tamanho maior
- D) Um borrão fora de foco

Teste Conceitual

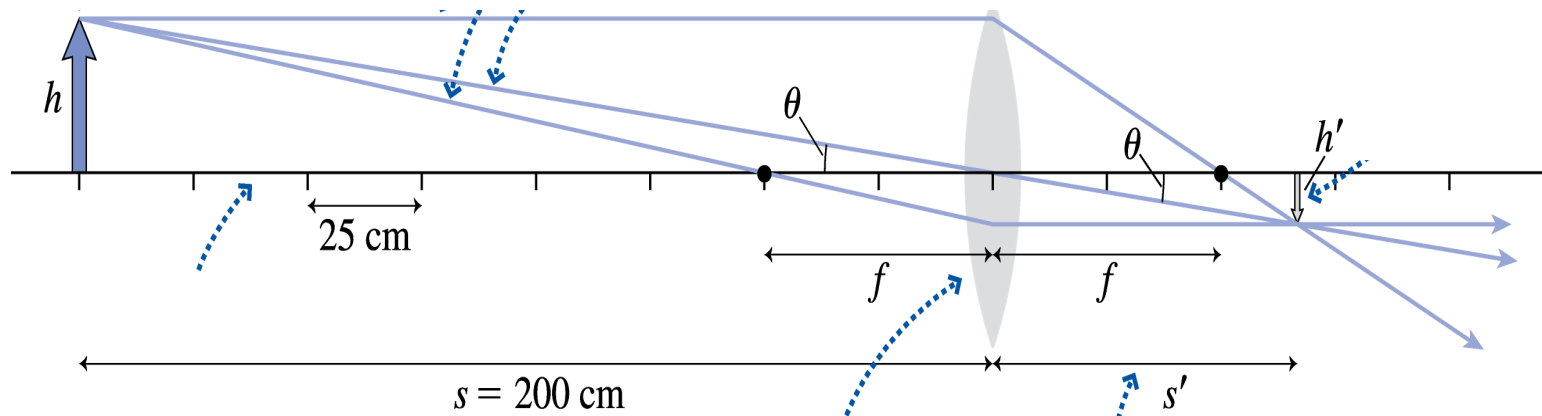


O que acontece com a imagem se tapamos a metade inferior da lente?

- A) Aparece apenas a metade de cima do objeto
- B) Aparece apenas a metade de baixo do objeto
- C) Aparece o objeto inteiro, mas com menos intensidade
- D) Aparece o objeto inteiro, mas fora de foco / borrado

Formação de imagens através de lentes

Método de traçado de raios



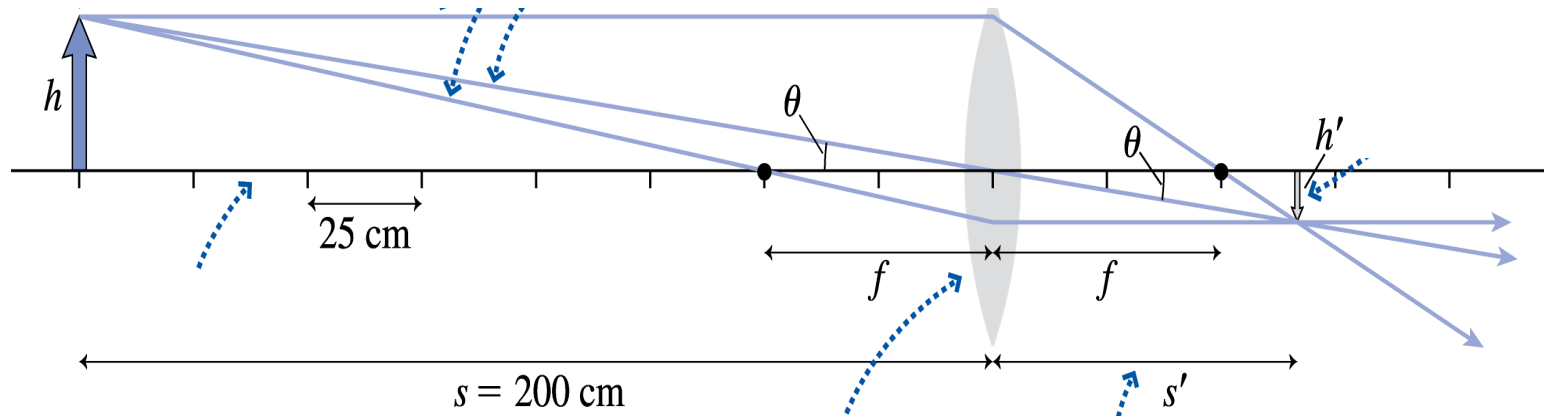
Por congruência: $h / s = h' / s'$ $\longrightarrow$ **$h / h' = s / s'$**

Def: aumento linear transversal: **$m = - s' / s$**

obs: convencionam-se $s' < 0$ se a imagem estiver do mesmo lado da lente que o objeto

Formação de imagens através de lentes

Método de traçado de raios



Teste Conceitual

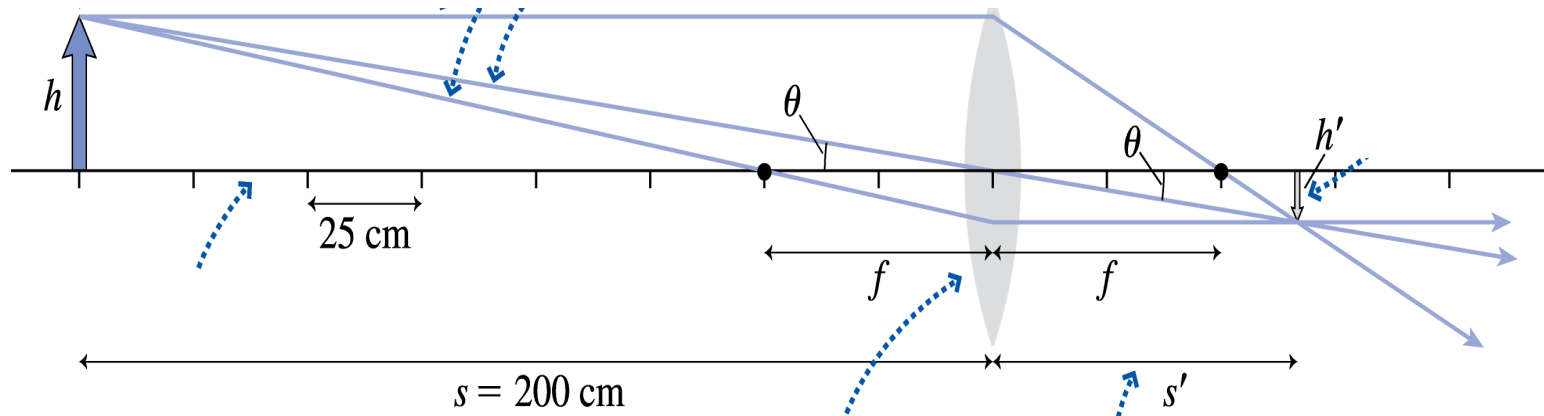
Neste caso podemos dizer que

- A) $0 < m < 1$
- B) $m > 1$
- C) $-1 < m < 0$
- D) $m < -1$

Def: aumento linear transversal: $m = -s' / s$

Formação de imagens através de lentes

Método de traçado de raios



Teste Conceitual

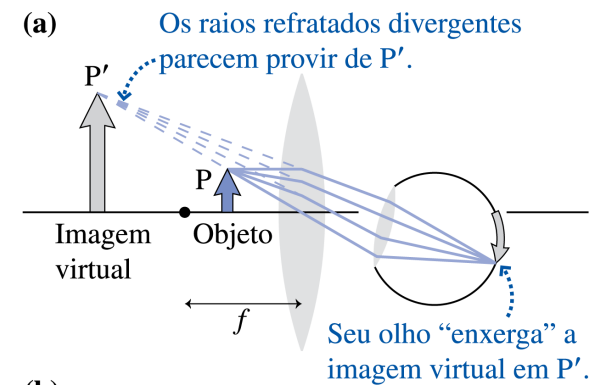
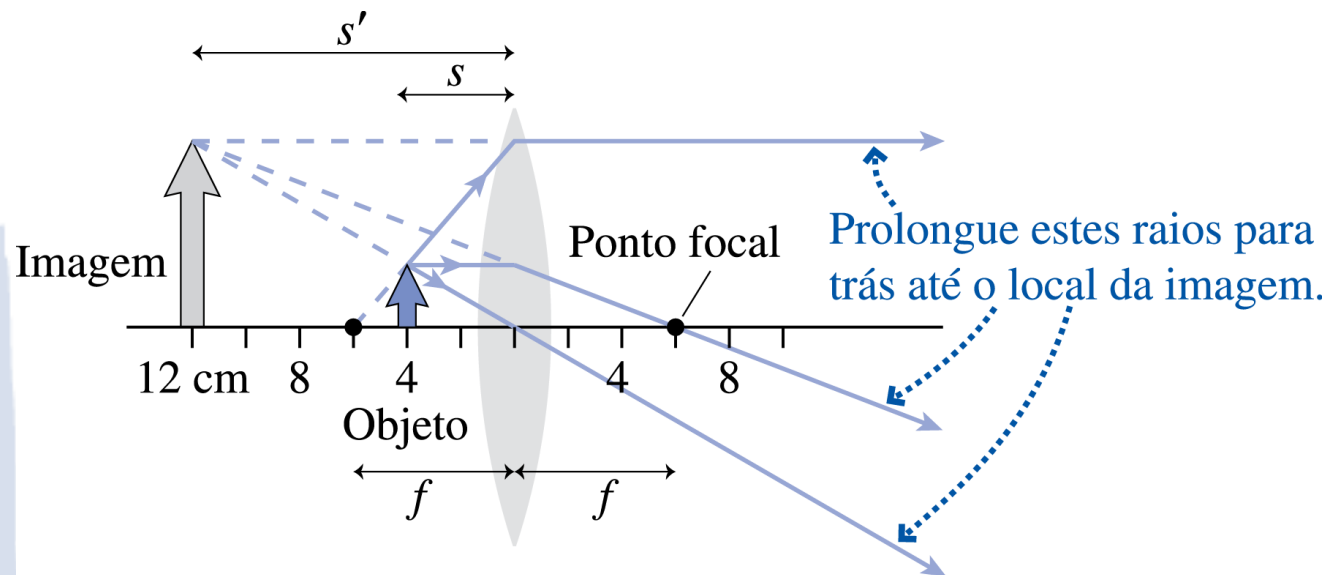
Neste caso podemos dizer que

- A) $0 < m < 1$
- B) $m > 1$
- C) $-1 < m < 0$
- D) $m < -1$

Def: aumento linear transversal: $m = -s' / s$

Formação de imagens através de lentes

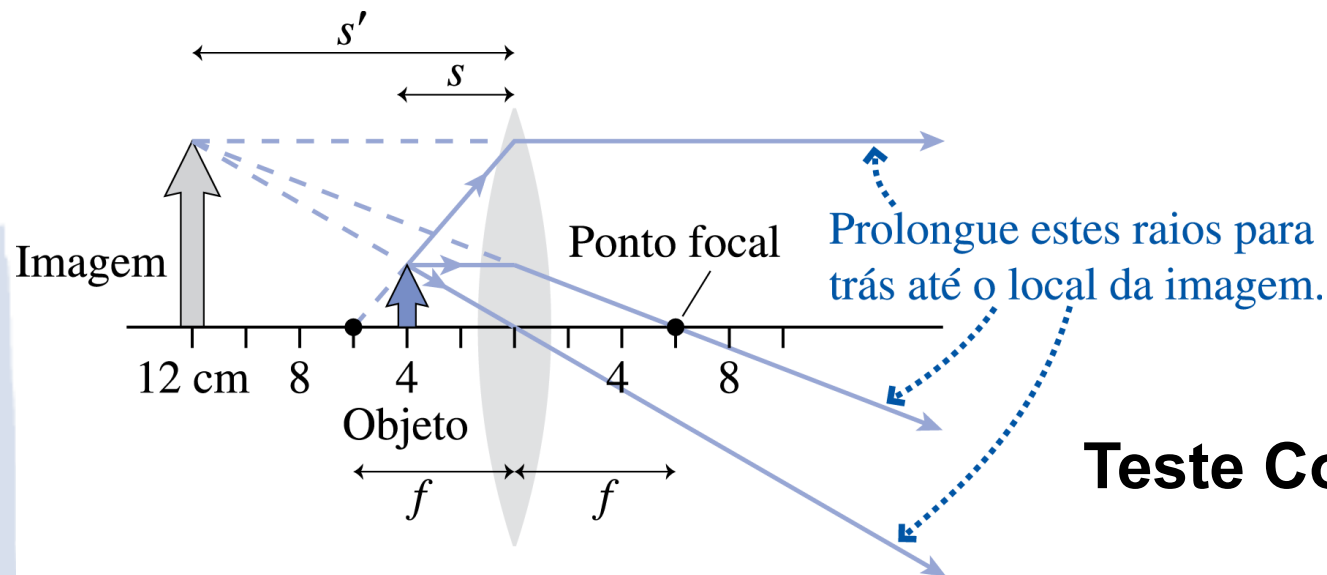
Imagens virtuais em lentes convergentes



- Ocorre se objeto entre o foco e a lente
- Neste caso raios vindos de um mesmo ponto P do objeto não se reencontram, mas se comportam **como se** divergissem a partir de uma posição P' (a "**imagem virtual**" de P), localizada **acima e atrás** do objeto real
- A imagem virtual do objeto é maior do que ele ($h' > h$)
- Obs: note que nesse caso os raios **divergem**, apesar da lente ser 'convergente'

Formação de imagens através de lentes

Imagens virtuais em lentes convergentes



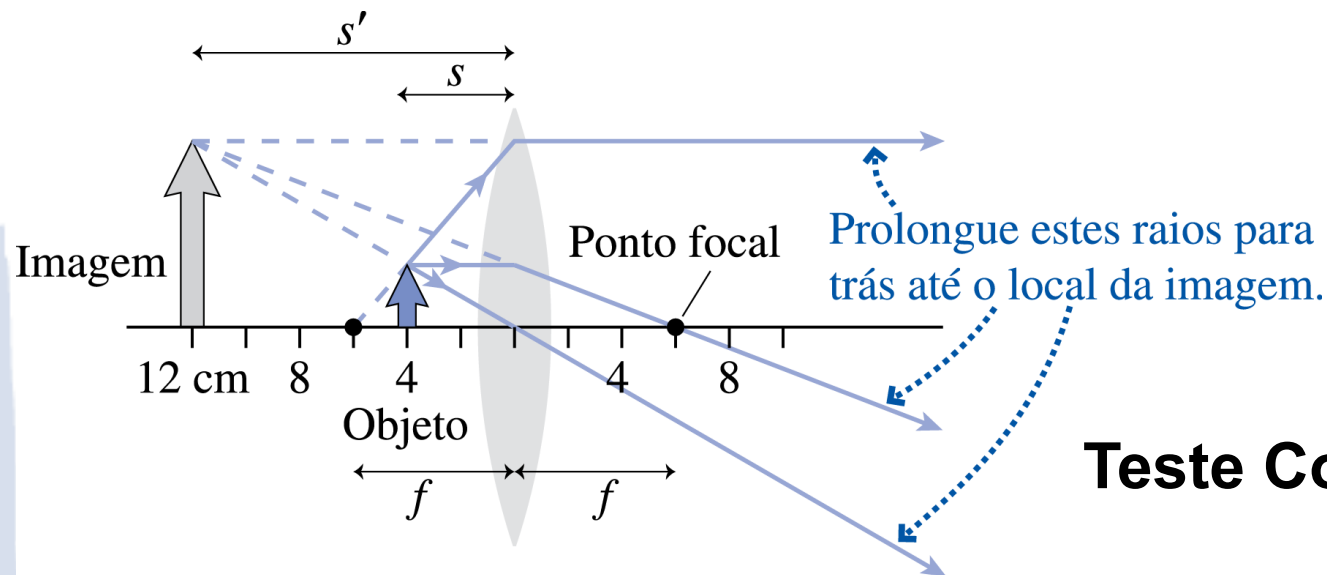
Teste Conceitual

Neste caso podemos dizer que

- A) $0 < m < 1$
- B) $m > 1$
- C) $-1 < m < 0$
- D) $m < -1$

Formação de imagens através de lentes

Imagens virtuais em lentes convergentes



Teste Conceitual

Neste caso podemos dizer que

A) $0 < m < 1$

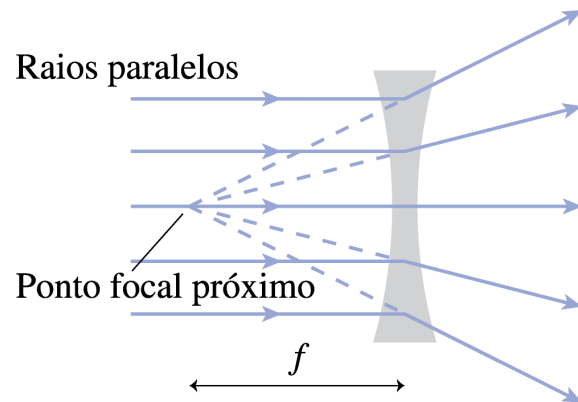
B) $m > 1$

C) $-1 < m < 0$

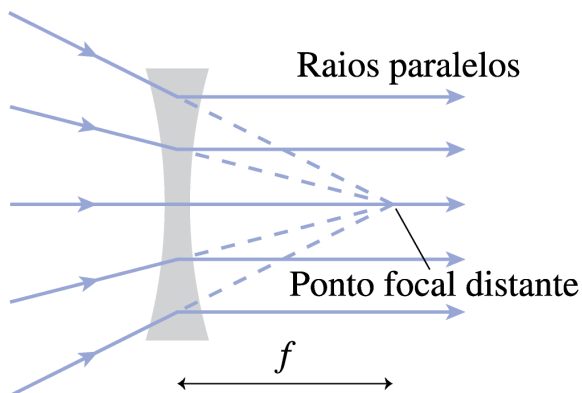
D) $m < -1$

Formação de imagens através de lentes

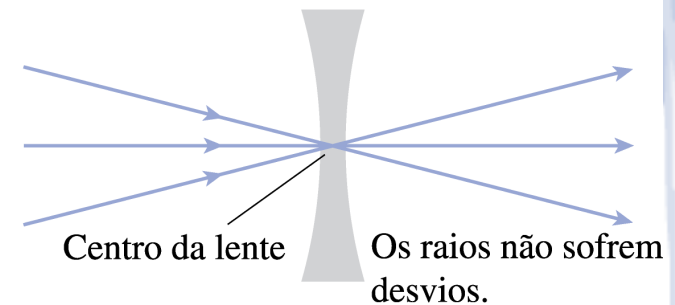
Imagens em lentes divergentes: método do traçado de raios



Qualquer raio inicialmente paralelo ao eixo óptico diverge ao longo de uma linha que passa pelo ponto focal próximo.



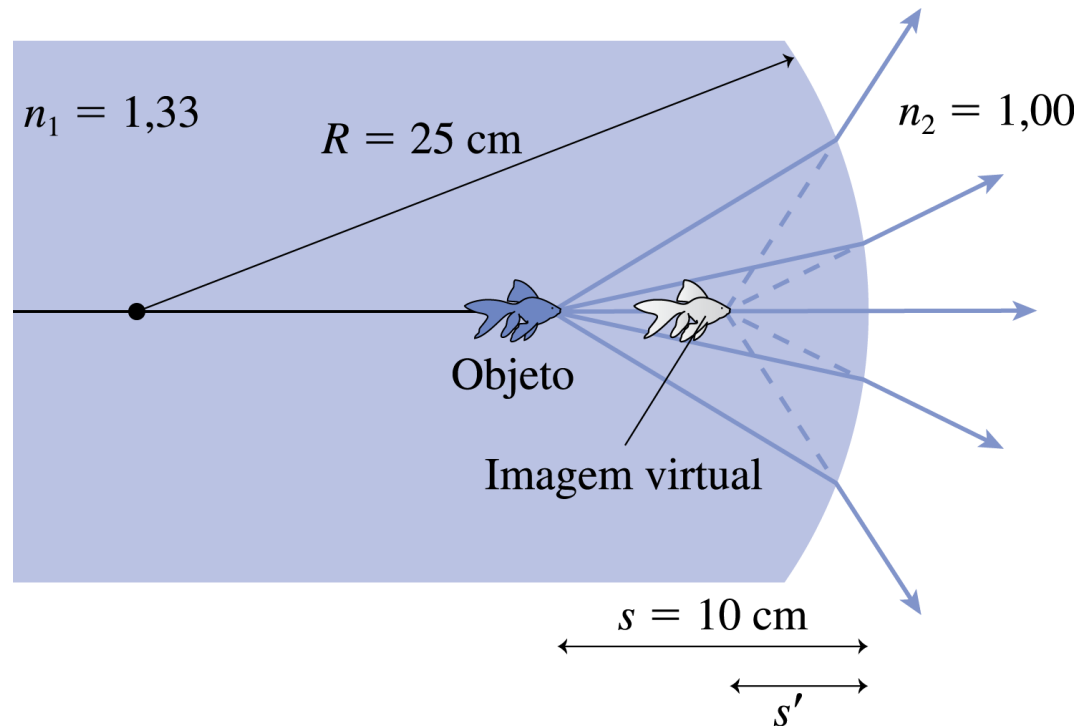
Qualquer raio direcionado ao longo de uma linha que passa pelo ponto focal distante emerge da lente paralelamente ao eixo óptico.



Qualquer raio dirigido ao centro da lente passa em linha reta.

Formação de imagens através de lentes

Imagens em lentes esféricas

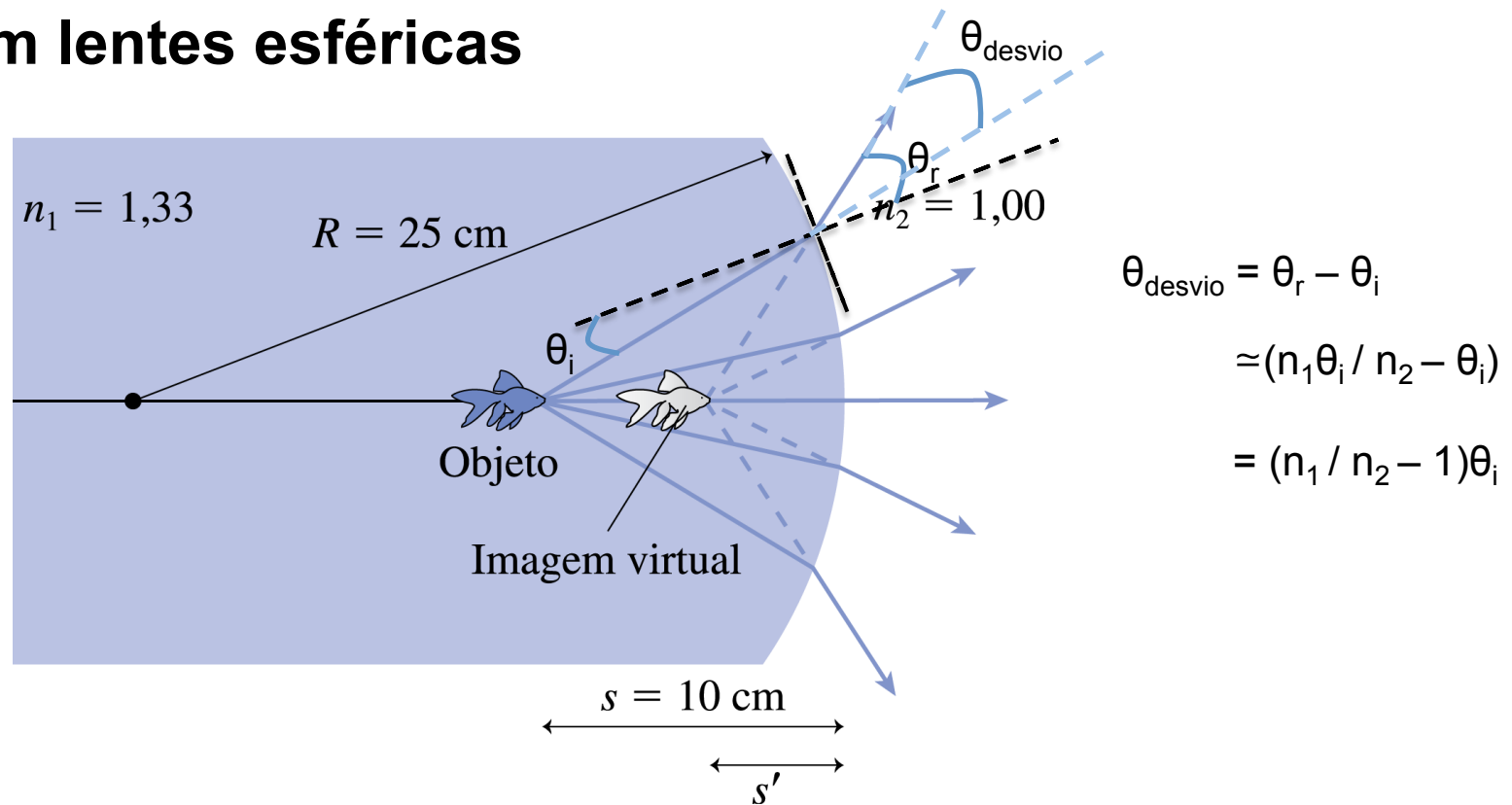


Compare esse caso com aquele que vimos anteriormente, onde a interface era plana. No caso atual, um observador externo verá a imagem virtual em um ponto

- A) Mais próximo a ele do que pareceria no caso da interface plana
- B) Mais distante dele do que pareceria no caso da interface plana
- C) Na mesma distância dele que pareceria no caso da interface plana

Formação de imagens através de lentes

Imagens em lentes esféricas

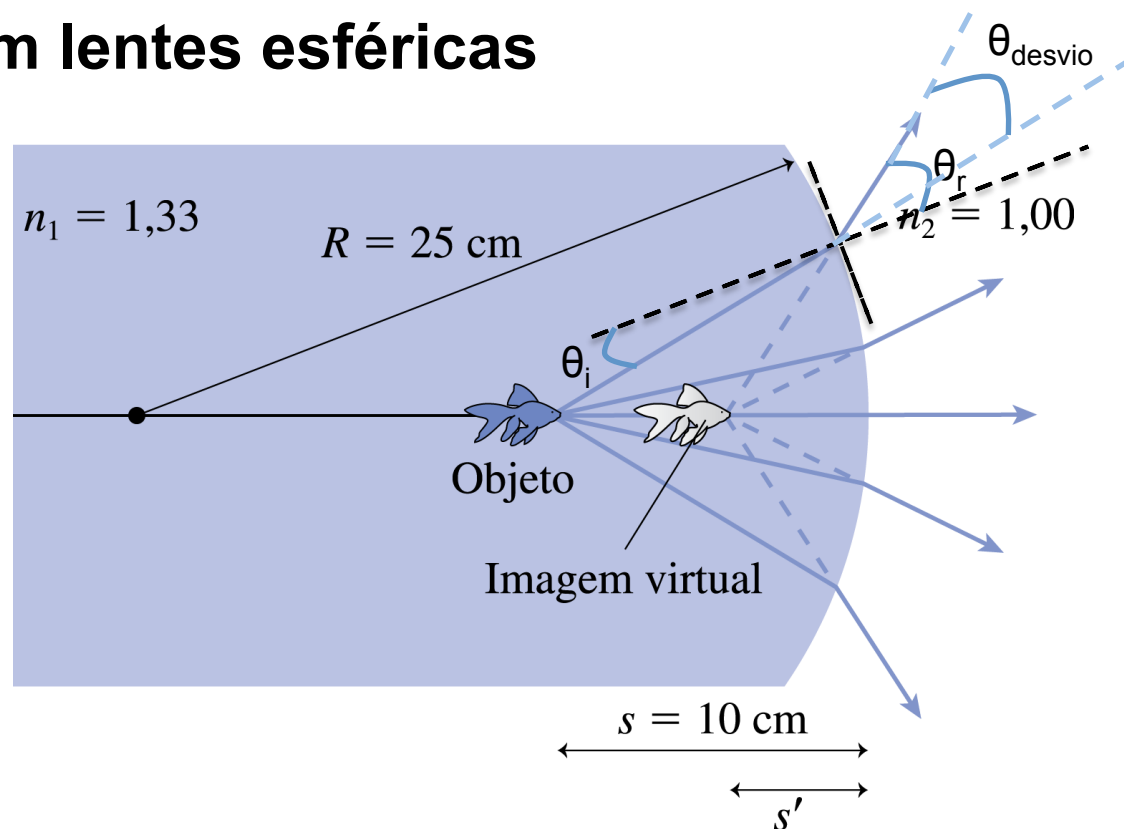


Compare esse caso com aquele que vimos anteriormente, onde a interface era plana. No caso atual, um observador externo verá a imagem virtual em um ponto

- A) Mais próximo a ele do que pareceria no caso da interface plana
- B) Mais distante dele do que pareceria no caso da interface plana
- C) Na mesma distância dele que pareceria no caso da interface plana

Formação de imagens através de lentes

Imagens em lentes esféricas



$$\begin{aligned}\theta_{\text{desvio}} &= \theta_r - \theta_i \\ &\approx (n_1 \theta_i / n_2 - \theta_i) \\ &= (n_1 / n_2 - 1) \theta_i\end{aligned}$$

Compare esse caso com aquele que vimos anteriormente, onde a interface era plana. No caso atual, um observador externo verá a imagem virtual em um ponto

A) Mais próximo a ele do que pareceria no caso da interface plana

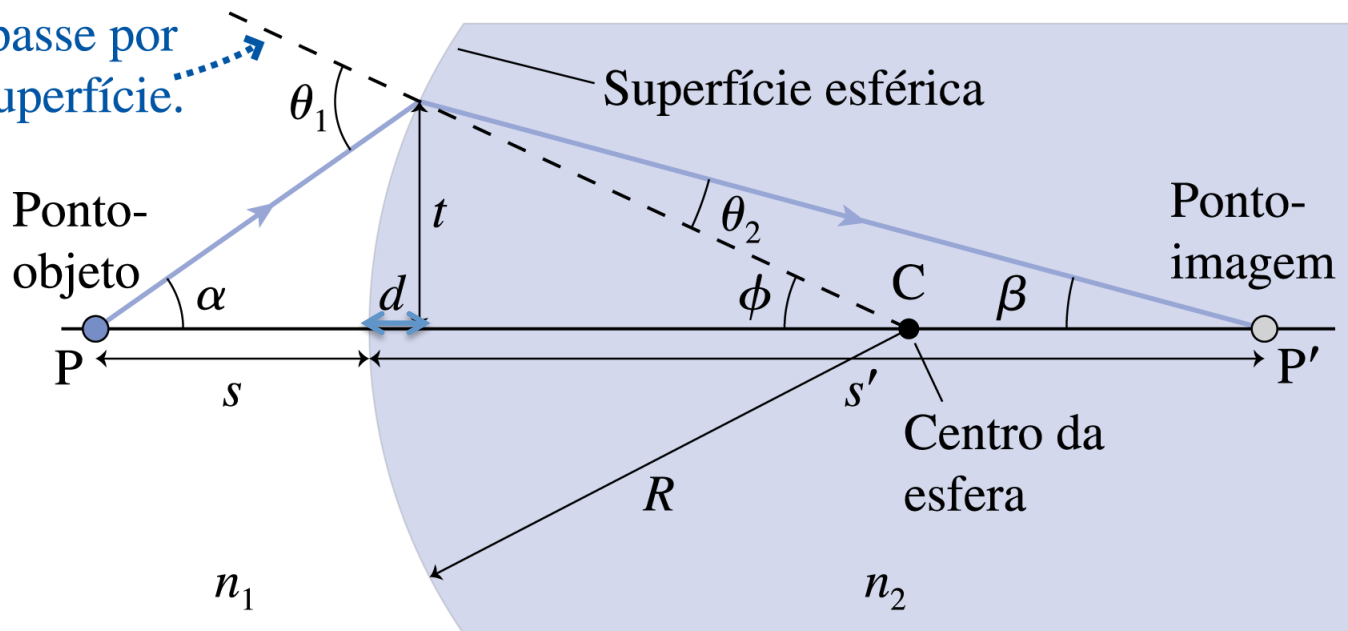
B) Mais distante dele do que pareceria no caso da interface plana (pois θ_i é menor

C) Na mesma distância dele que pareceria no caso da interface plana $\rightarrow \theta_{\text{desvio}}$ é menor)

Formação de imagens através de lentes

Imagens em lentes esféricas

Toda reta que passe por C é normal à superfície.



Para ângulos $\theta_{1,2}$ pequenos, é possível deduzir (v/l. livro / quadro)

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Obs: convenções de sinal

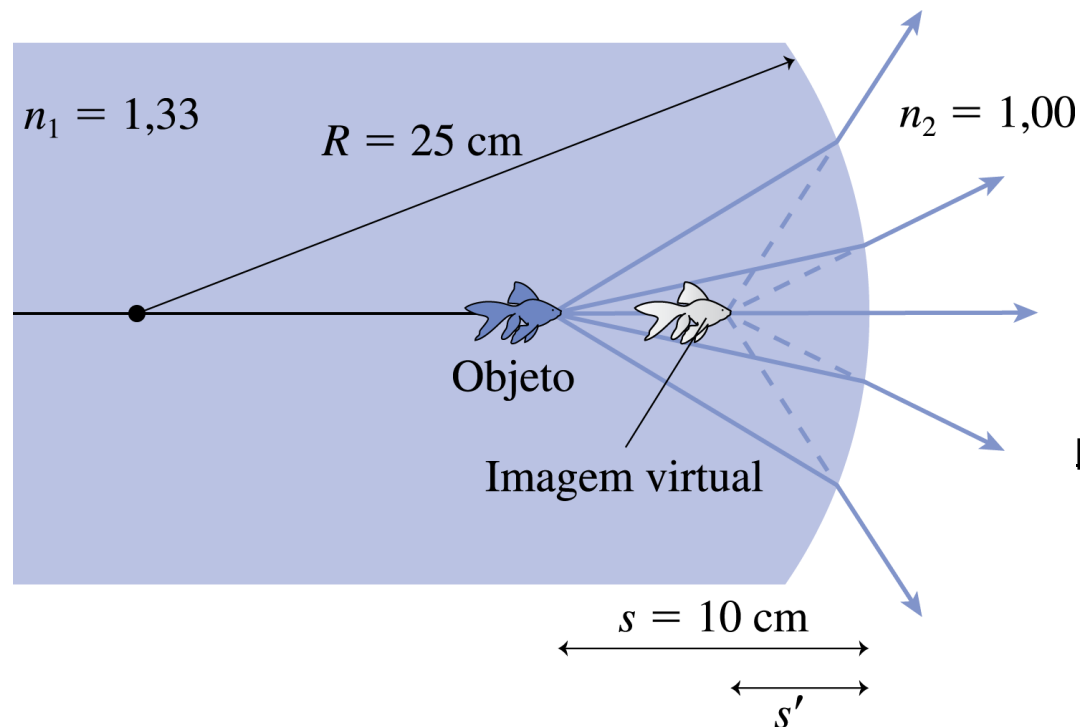
$R > 0$ se superfície convexa p/ objeto (como acima)
 < 0 " " côncava "

$s' > 0$ se imagem real, no lado oposto a P

$s' < 0$ se imagem virtual, no mesmo lado de P

Formação de imagens através de lentes

Conferindo exemplo anterior



$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$s' < 0$ pois a imagem é virtual, no mesmo lado de P

p/ superfície esférica: $R < 0$ pois superfície côncava p/ objeto

p/ superfície plana: $R \rightarrow \infty$

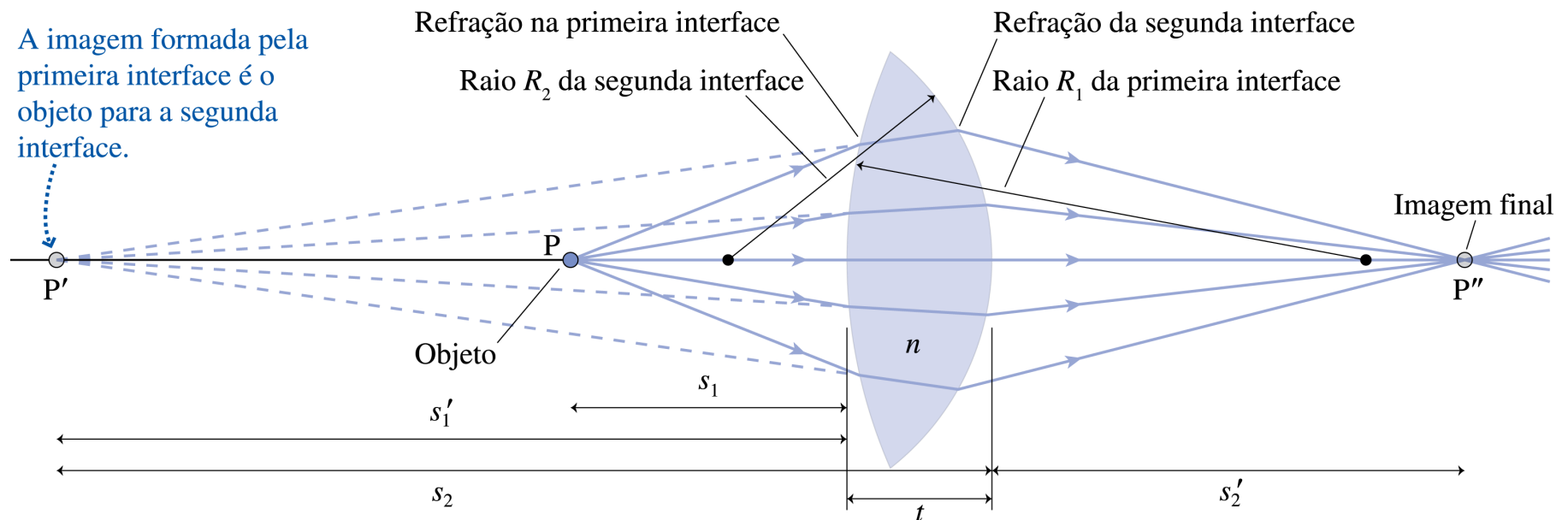
$$\frac{n_2}{s'_{esf}} = \frac{n_2}{s'_{plano}} + \frac{n_2 - n_1}{R} > 0, \text{ já que } R < 0 \text{ e } n_2 < n_1$$

Conclusão

s'_{esf} é mais negativo que s'_{plano}

Imagem com sup. esférica está 'mais para dentro' do que com sup. plana

Equações para lentes com 2 superfícies esféricas



lado esquerdo da lente

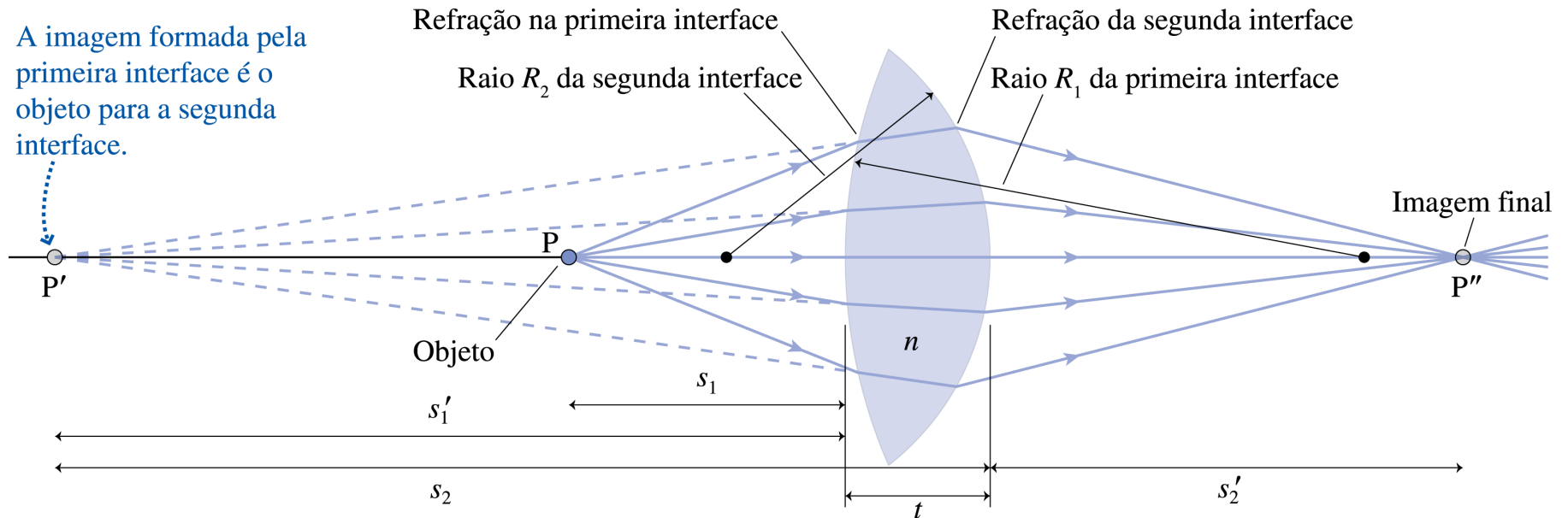
$$\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s_1'} = \frac{n - 1}{R_1}$$

lado direito da lente

$$\frac{n}{t - s_1'} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1 - n}{R_2}$$

lembrando que $s_1' < 0$

Distância focal da lente



Para lentes *finas* (“delgadas”), t é desprezível ($t \ll |s_1'|$). Redefinindo $s_1 = s$, $s_2' = s'$ vale

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

onde

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Fazendo $s \rightarrow \infty$ os raios incidentes são paralelos e $s' = f$. $\rightarrow$ Portanto f é de fato a distância focal!

Teste Conceitual

Uma lente convexa tem distância focal f . Um objeto é localizado entre f e $2f$ em relação a uma linha perpendicular ao centro da lente. A imagem formada é localizada em qual distância da lente?

- A) $2f$
- B) entre f e $2f$
- C) *mais distante que $2f$*
- D) entre a lente e f

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Teste Conceitual

Uma lente convexa tem distância focal f . Um objeto é localizado entre f e $2f$ em relação a uma linha perpendicular ao centro da lente. A imagem formada é localizada em qual distância da lente?

- A) $2f$
- B) entre f e $2f$
- C) *mais distante que $2f$*
- D) entre a lente e f

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Equações para lentes delgadas

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

onde

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

As mesmas equações valem para lentes esféricas delgadas de qualquer formato (ie, podendo cada lado ser côncavo ou convexo, com raios iguais ou diferentes), respeitando essas convenções de sinal:

TABELA 23.4 Convenção de sinal para lentes delgadas

	Positivo	Negativo
R_1, R_2	Convexo em relação ao objeto	Côncavo em relação ao objeto
f	Lente convergente, mais espessa no centro	Lente divergente, mais delgada no centro
s'	Imagem real, lado oposto ao do objeto	Imagem virtual, mesmo lado do objeto

Teste Conceitual

Uma lente é utilizada para a formação de uma imagem de um objeto que é colocado à sua frente.

- A) Se a imagem é real, ela deve ser invertida.
- B) Se a imagem é real, ela deve ser direita.
- C) Se a imagem é virtual, ela deve ser invertida.
- D) Se a imagem é virtual, a lente tem que ser divergente.

Teste Conceitual

Uma lente é utilizada para a formação de uma imagem de um objeto que é colocado à sua frente.

- A) Se a imagem é real, ela deve ser invertida.
- B) Se a imagem é real, ela deve ser direita.
- C) Se a imagem é virtual, ela deve ser invertida.
- D) Se a imagem é virtual, a lente tem que ser divergente.