

Cap. 1 Ótica Geométrica

Natureza da Luz:

- Luz como Onda
- Reflexão – Refração
- Lei de Snell
- Prismas – Dispersão

Natureza da Luz

Luz como Onda

A Luz é um ingrediente fundamental para a vida na Terra (fotossíntese).

A Luz tem carácter ondulatório (explica a interferência e difração) e corpuscular (explica reflexão e refração).

A Luz constitui parte do espectro eletromagnético. Propaga-se, com velocidade $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, no vácuo.

Energia da radiação (fotão) : **$E = hf$**

h (Constante de Planck) = $6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

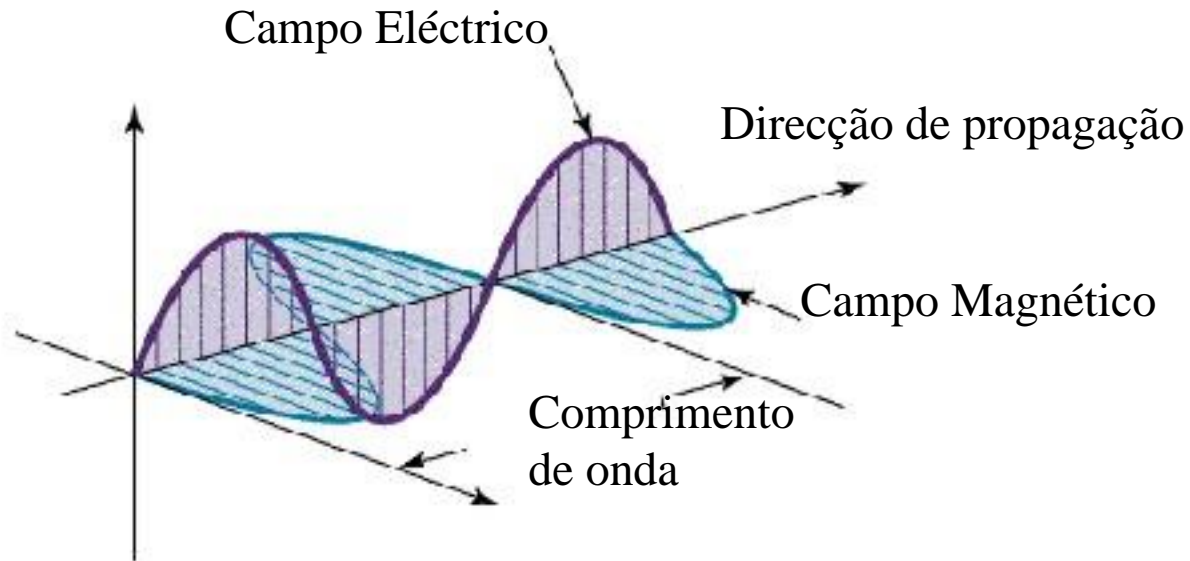
f = frequência

Natureza da Luz

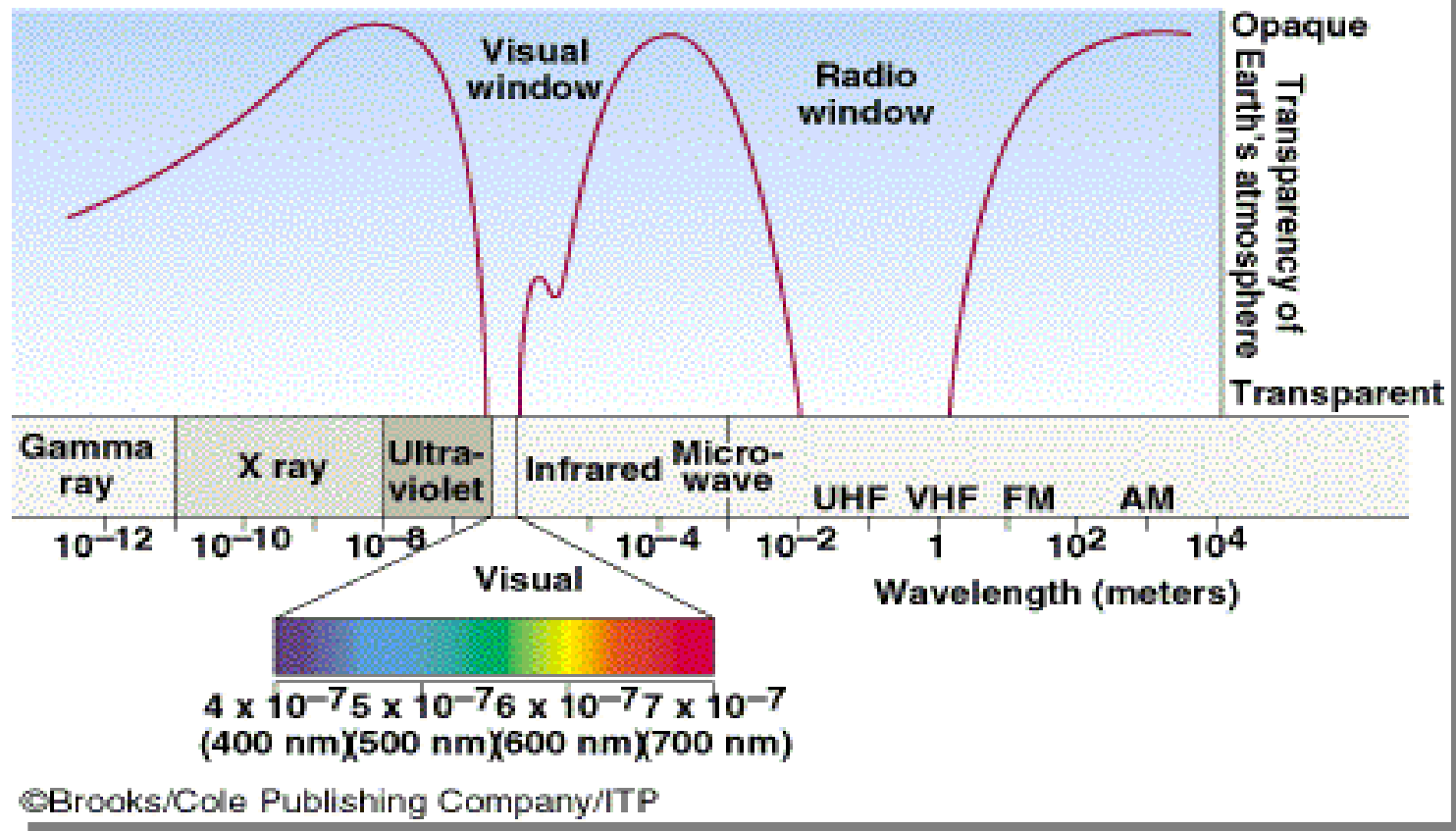
A Luz é uma Onda Electromagnética

A luz propaga-se a uma velocidade

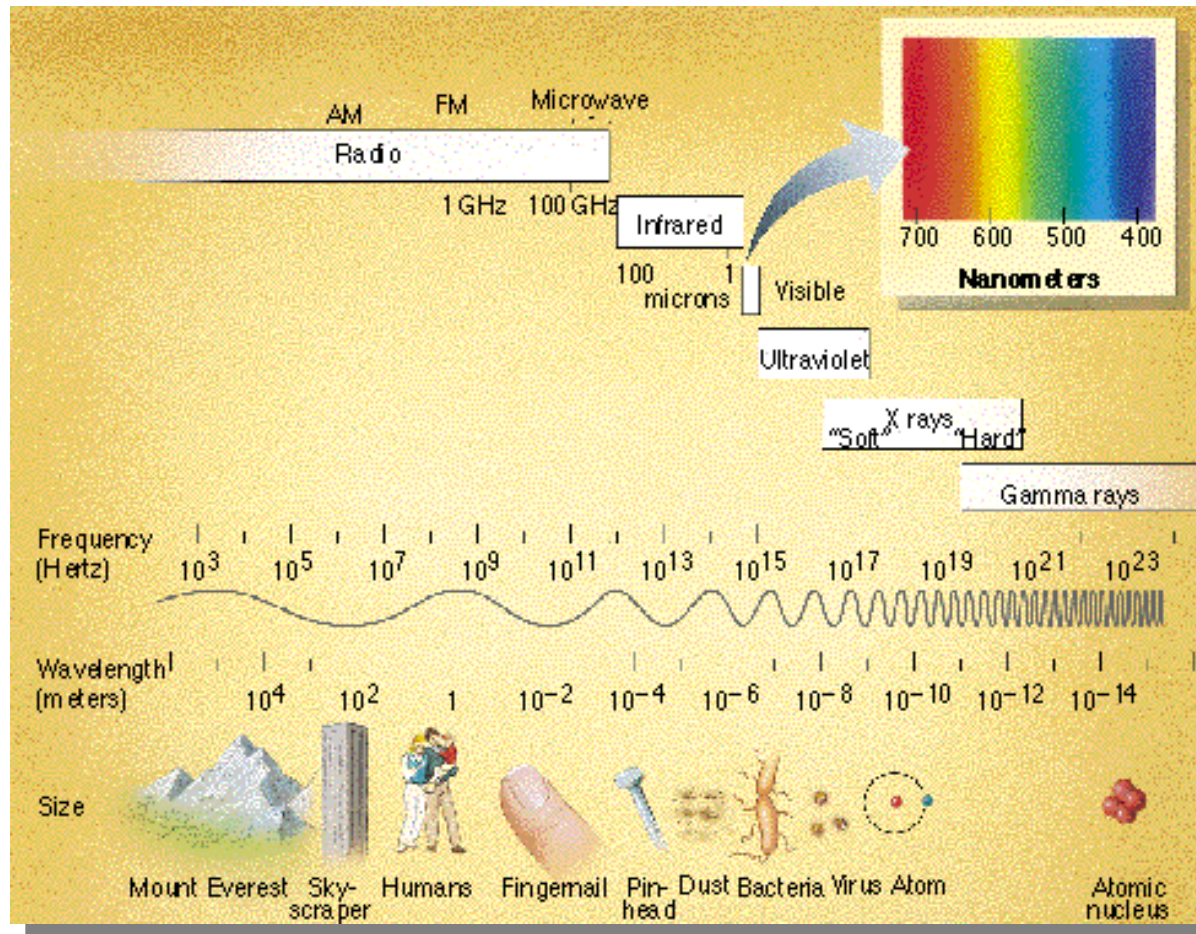
$$c = \lambda f \quad (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$$



Espetro Eletromagnético



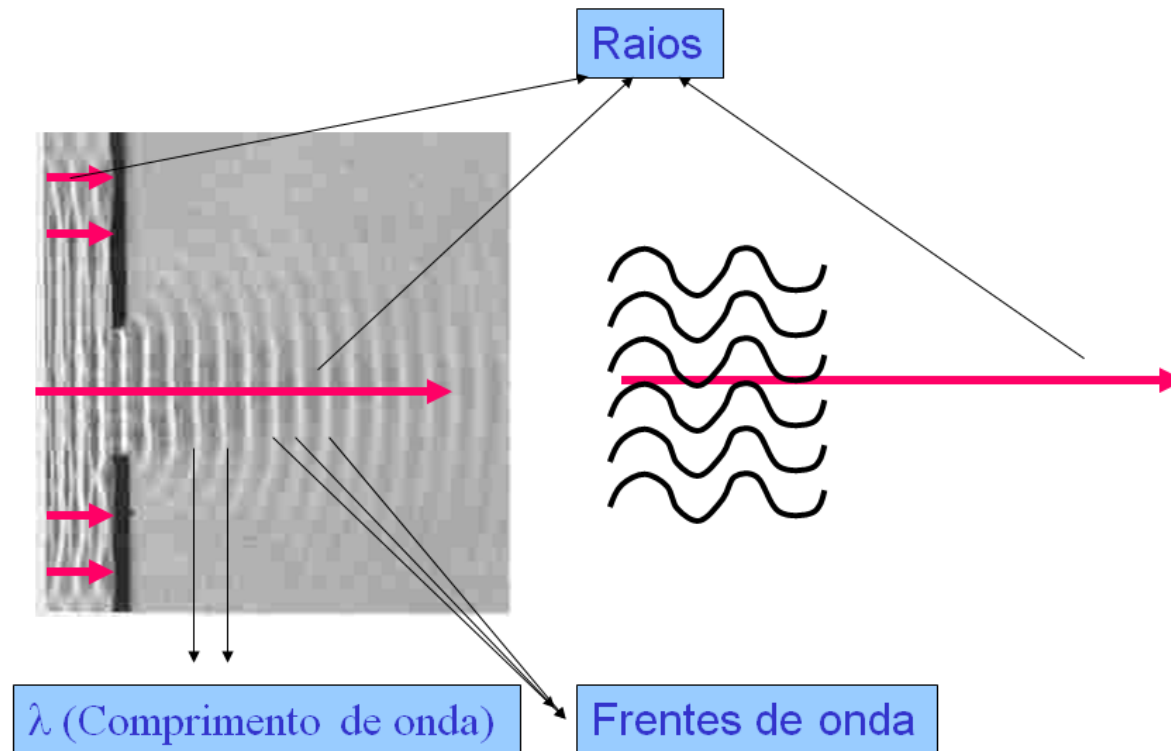
Espetro Eletromagnético



Interação da luz com a matéria

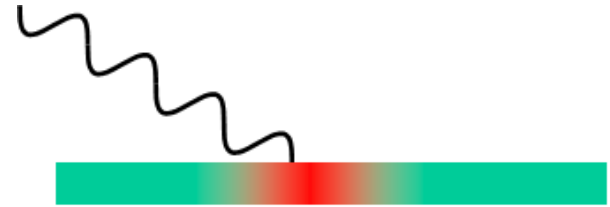
Conceito de Raios-Frente de Onda

Em ótica geométrica é conveniente representar a luz por raios, que indicam a direção e o sentido de propagação da onda.

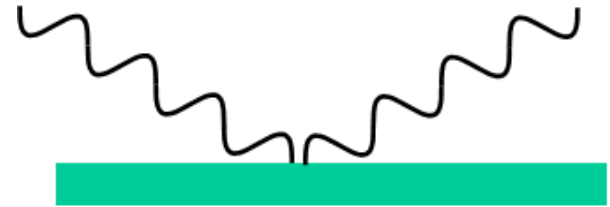


Interação da luz com a matéria

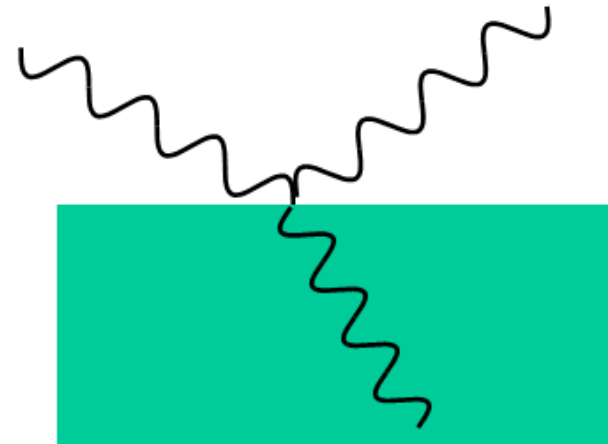
Absorvida



refletida



Refratada

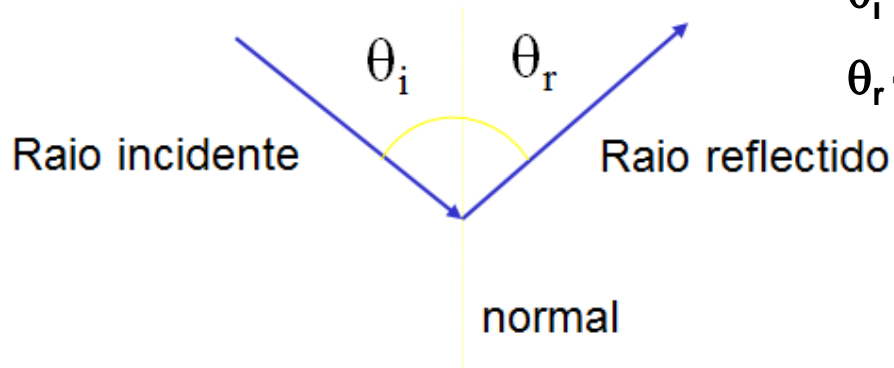


Válido para comprimentos de onda \ll
relativamente ao tamanho do objeto

Interação da luz com a matéria

Reflexão da Luz

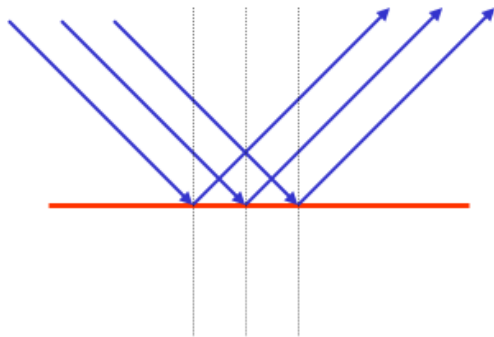
$$\theta_i = \theta_r$$



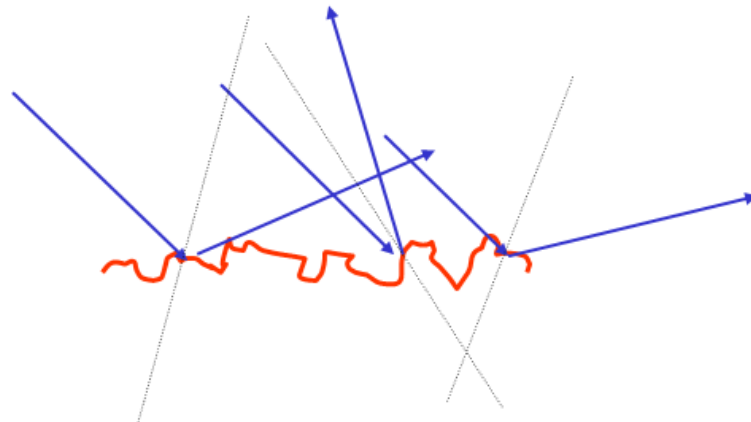
θ_i – ângulo de incidência

θ_r – ângulo de reflexão

Reflexão especular



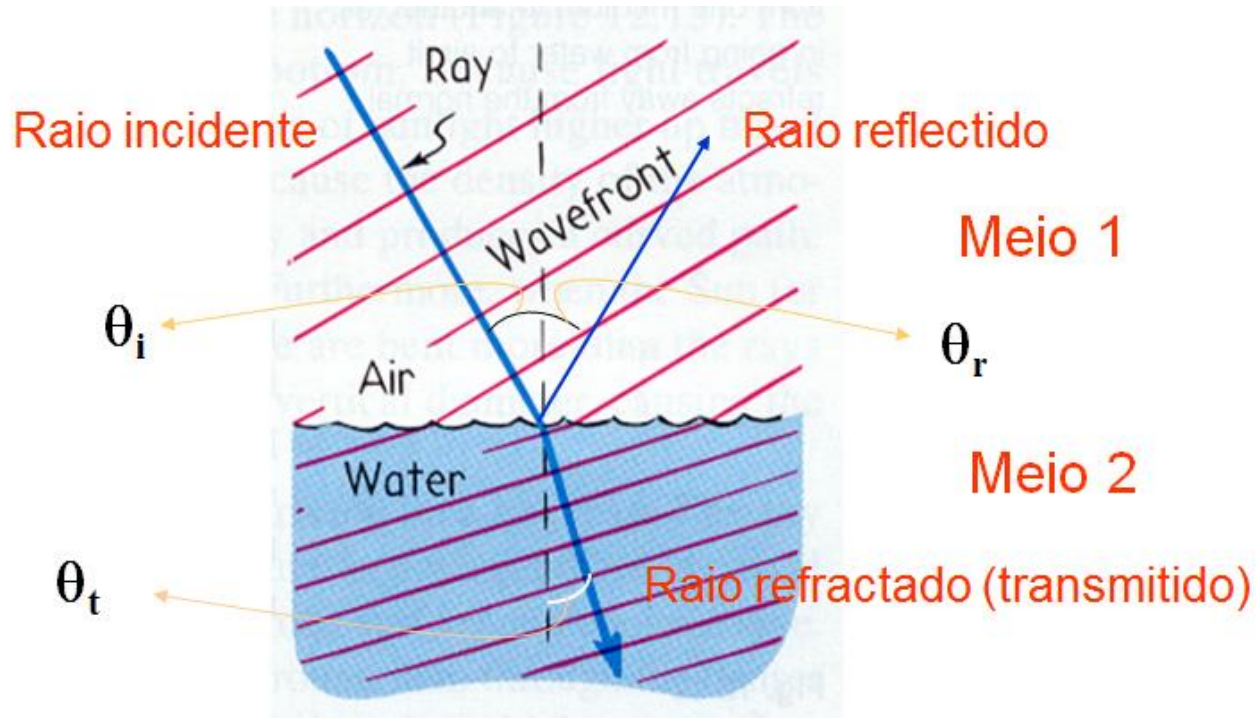
Reflexão difusa



Interação da luz com a matéria

Quando a luz passa de um meio para outro:

- A sua velocidade altera-se
- Os raios transmitidos são desviados : Refratados



Interação da luz com a matéria

Índice de Refração

O ângulo de refração depende das propriedades dos dois meios e do ângulo de incidência:

$$\text{sen}(\theta_t) = \frac{v_2}{v_1} \text{sen}(\theta_i)$$

Num meio a luz propaga-se com uma velocidade inferior a “c”

O **Índice de refração** dum meio é a razão entre as velocidades da luz no vazio e no meio

$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

$$v_i = \frac{c}{n_i} \Rightarrow \text{sen}(\theta_t) = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}(\theta_i)$$

Interação da luz com a matéria

Substância	Índice de refração	
Diamante	2.419	{ Sólidos a 20°C
Vidro	1.66	
Gelo	1.31	
Cloreto de Sódio	1.544	
Benzeno	1.501	{ Líquidos a 20°C
Álcool etílico	1.361	
Glicerina	1.473	
Água	1.333	
Ar	1.000293	{ Gases a 0°C e 1 atm
Dióxido de Carbono	1.00045	

Refração

Lei de Snell

$$n_2 \sin(\theta_t) = n_1 \sin(\theta_i)$$

Para qualquer onda:

$$v_i = \lambda_i f$$

e

$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

logo

$$v_1 n_1 = v_2 n_2 \Rightarrow \lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

Importante:

- Como as ondas mecânicas, a frequência da luz é constante.
- Só muda o comprimento de onda e a velocidade.

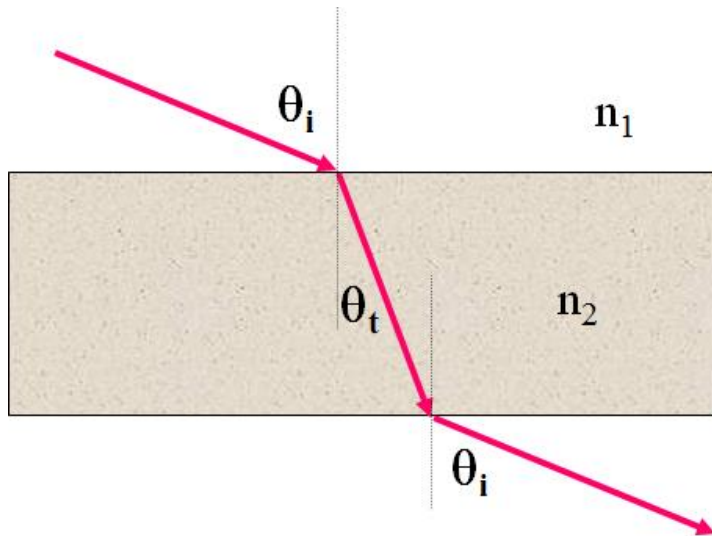
Refração

Consequência da Lei de Snell:

Quando a luz passa de um meio de índice de refração n_1 para um meio de índice de refração n_2 os raios refratados

aproximam-se da normal se:

$$\begin{aligned} \sin(\theta_t) &= \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_i) \\ n_2 > n_1 &\Rightarrow \theta_t < \theta_i \end{aligned}$$



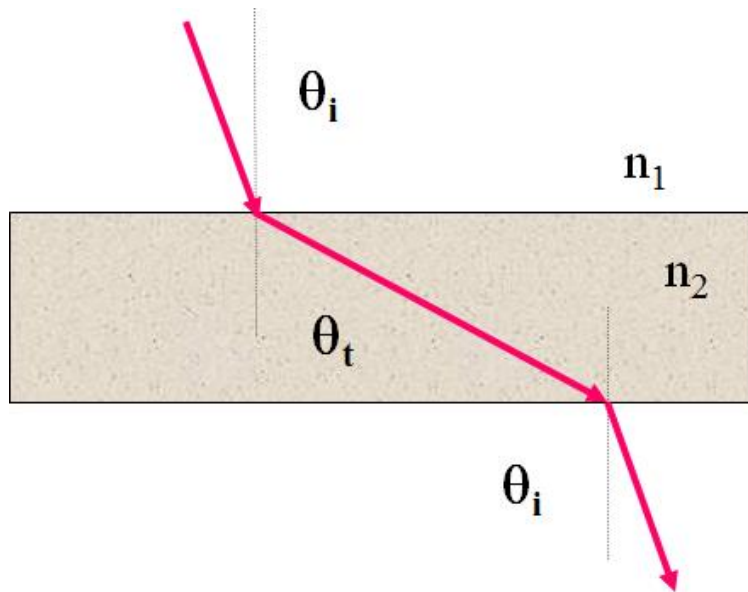
Refração

Quando a luz passa de um meio de índice de refração n_1 para um meio de índice de refração n_2 os raios refratados

afastam-se da normal se:

$$\text{sen}(\theta_t) = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}(\theta_i)$$

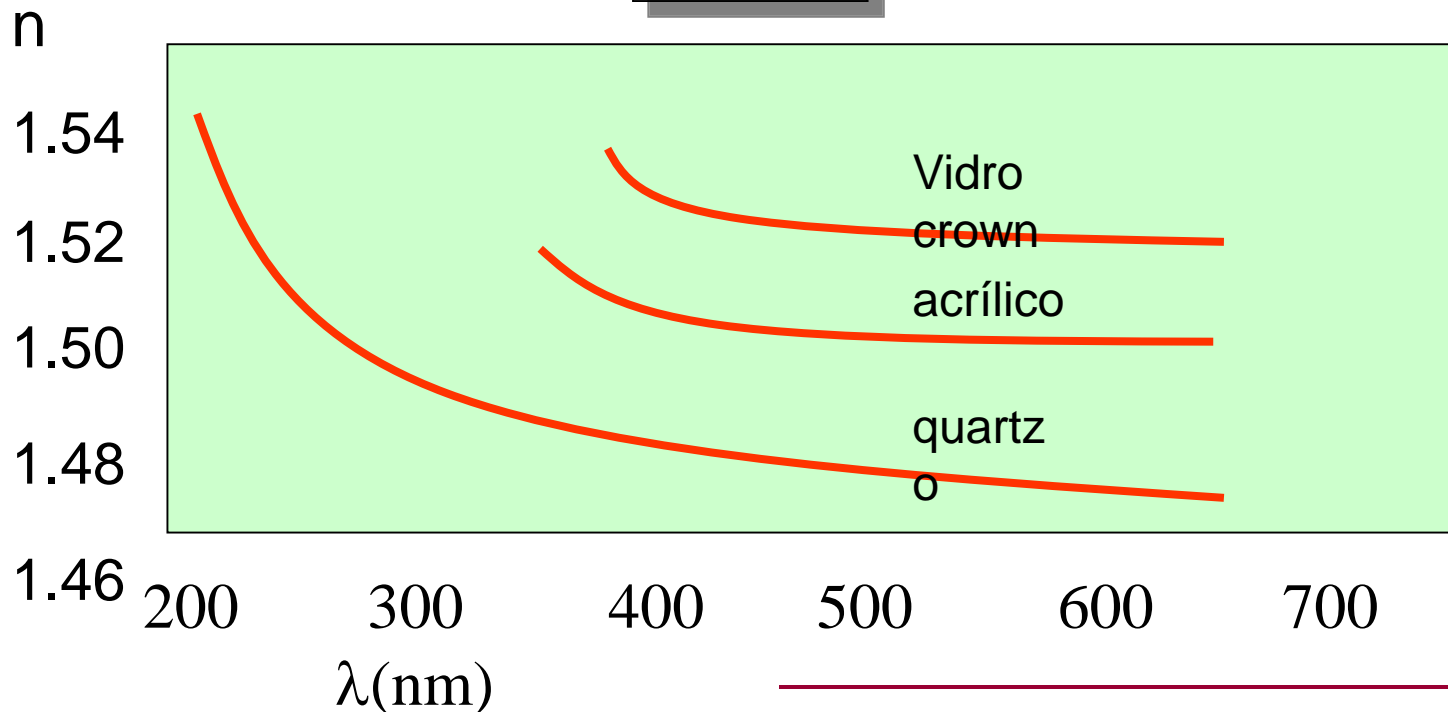
$$n_2 < n_1 \Rightarrow \theta_t > \theta_i$$



Índice de Refração

Para uma determinada substância, o índice de refração é função inversa do comprimento de onda.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\lambda f}$$

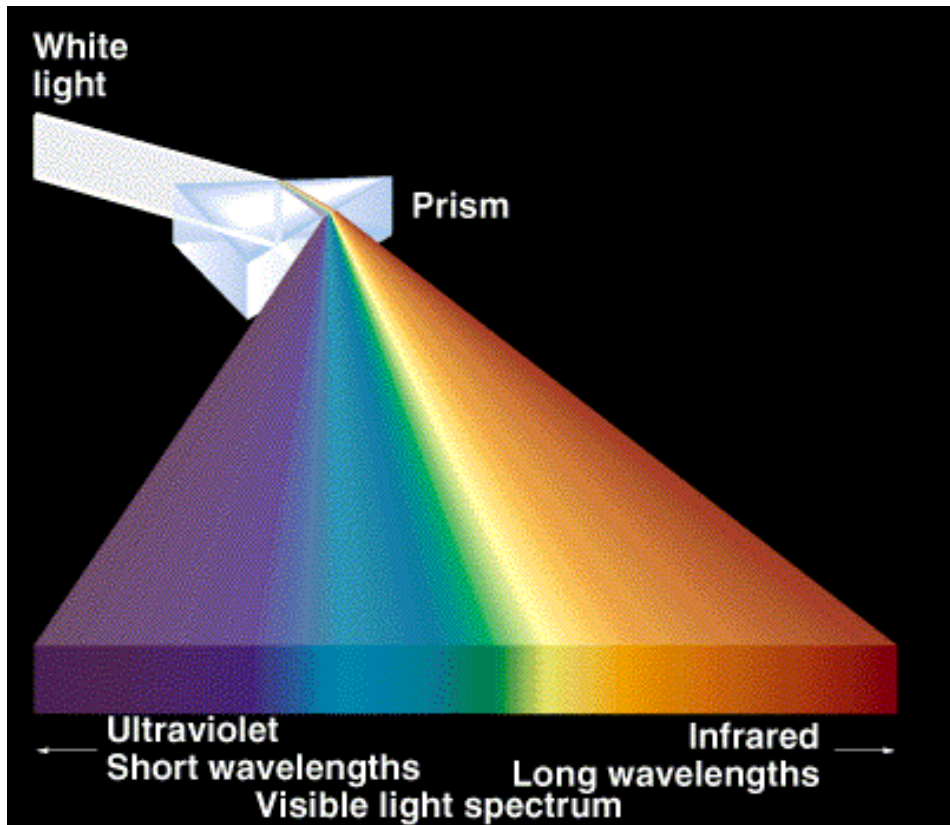


Dispersão da luz

Prismas

Por isso os prismas decompõem a Luz Branca:

Dispersão



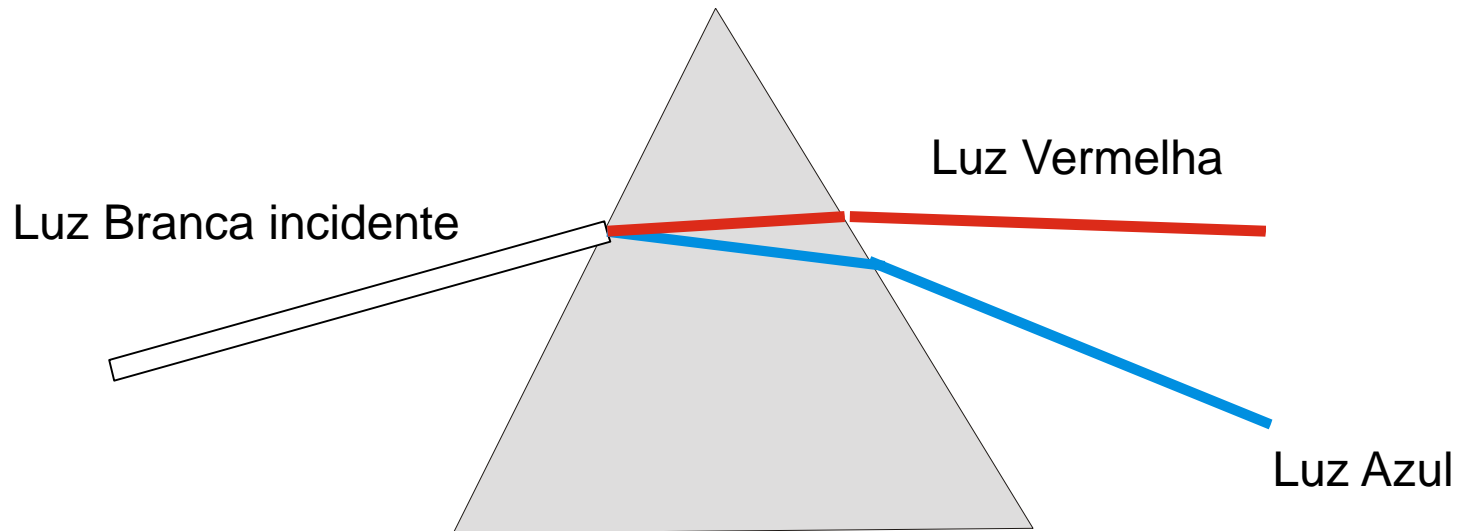
©Brooks/Cole Publishing Company/ITP

Dispersão da luz

Prismas-Dispersão

A Luz Vermelha que tem um comprimento de onda maior e menos desviada que a Luz Azul

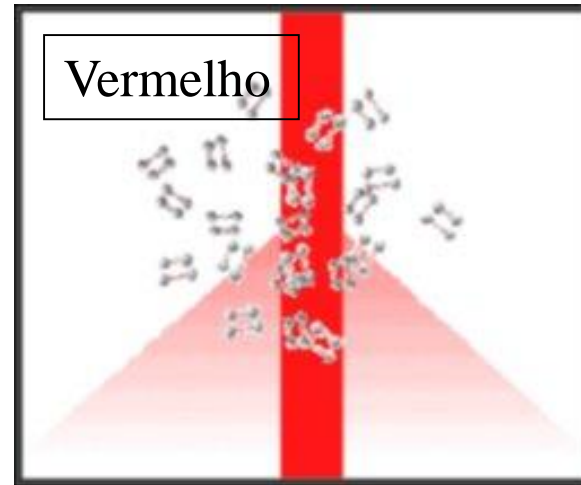
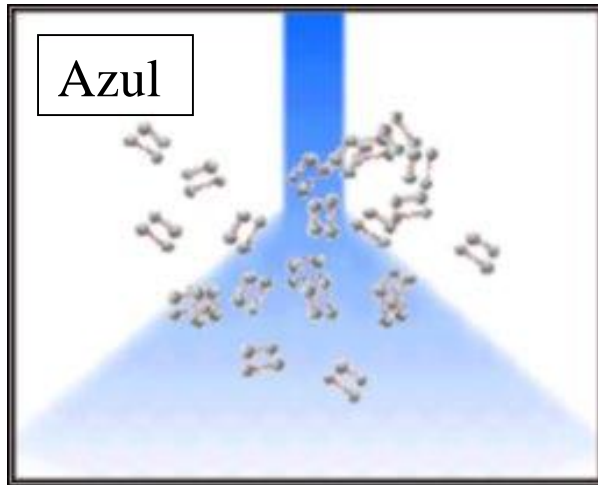
$$\lambda_{\text{verm.}} > \lambda_{\text{azul}} \Leftrightarrow n_{\text{verm.}} < n_{\text{azul}}$$



Dispersão da luz

O Azul do Céu

Devido às partículas da atmosfera a luz do sol é sofre uma **dispersão**, mas como vimos este **dispersão** é maior para os comprimentos de onda curtos, ou seja, para os azul comparados com os vermelhos.



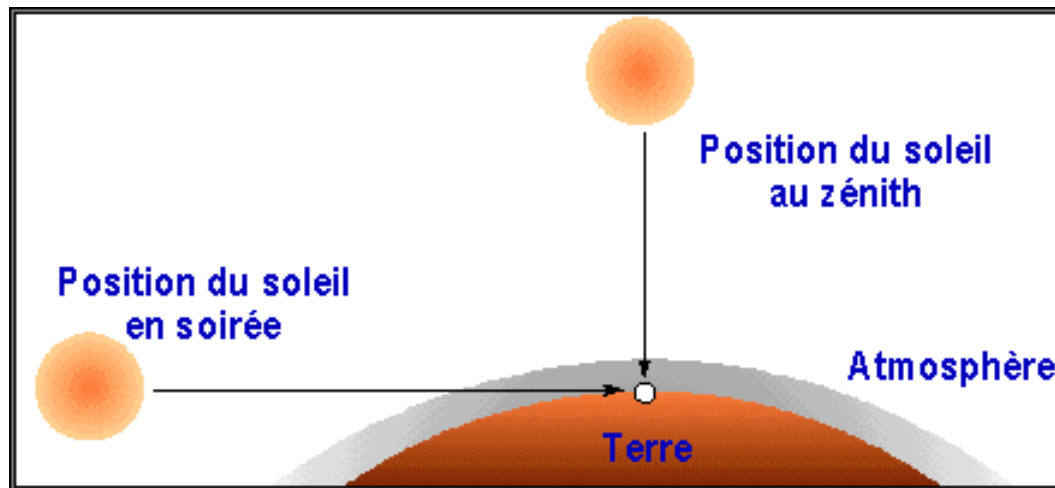
Perto do meio dia o céu é azul, enquanto a luz proveniente diretamente do sol (ou seja o sol), à qual falta a componente azul, é mais amarela.

Dispersão da luz

O Azul do Céu

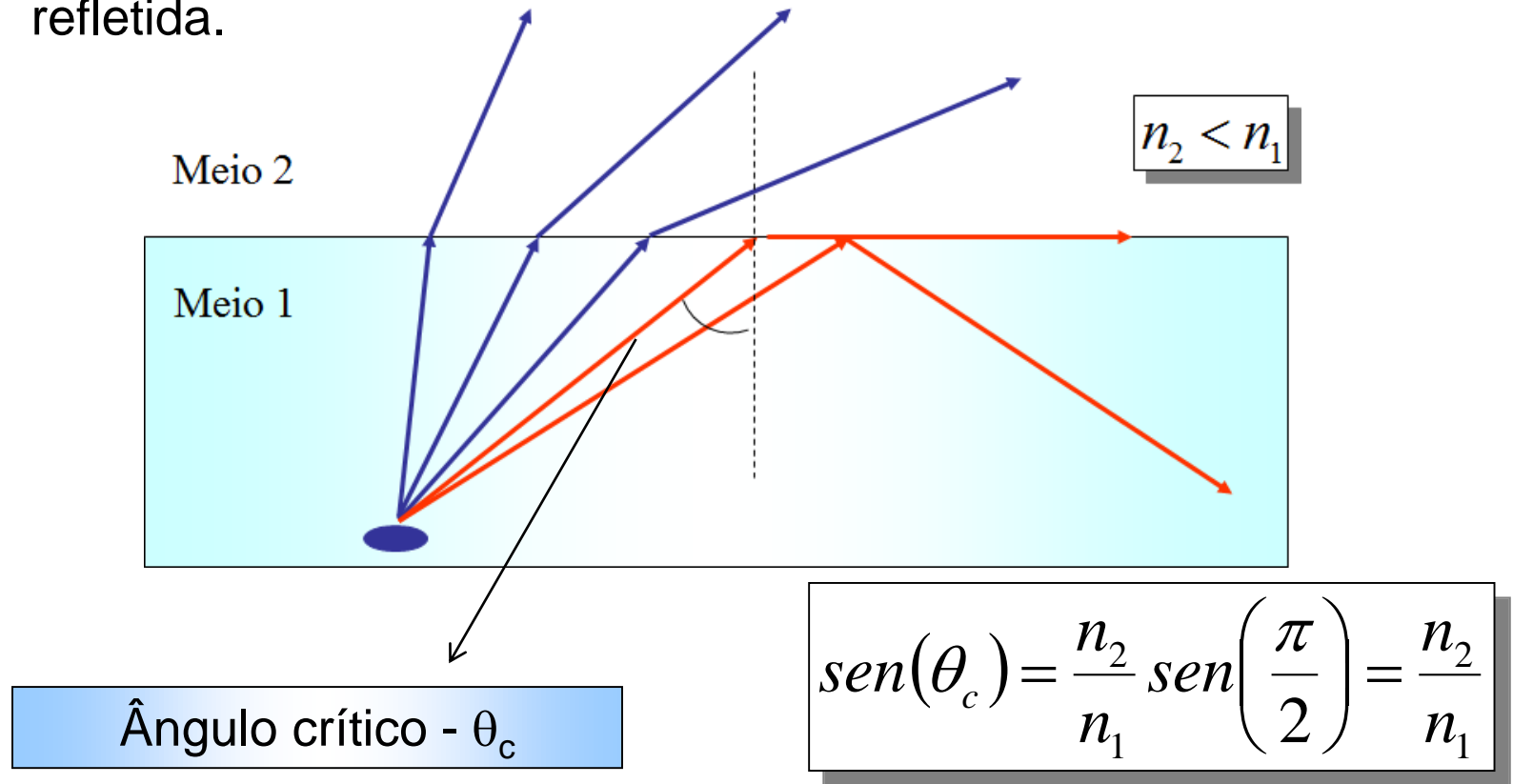
Ao fim do dia os raios de sol atravessam uma espessura de atmosfera maior que ao meio dia, a **dispersão** é mais importante. Esta espessura é suficiente para dispersar além do azul, o verde e uma parte do amarelo.

O céu é agora mais rose e o sol mais laranja.



Reflexão Interna Total

A **reflexão interna total** ocorre quando o ângulo de refração é superior a 90° , ou seja, não há transmissão de luz, toda a luz é refletida.



Ótica Geométrica

Convenções e Notações

p Distância do Objeto ao elemento ótico

q Distância do elemento Ótico à Imagem

h Altura do Objeto

h' Altura da Imagem

$m = h' / h$ Ampliação lateral

f Distância focal do elemento ótico.

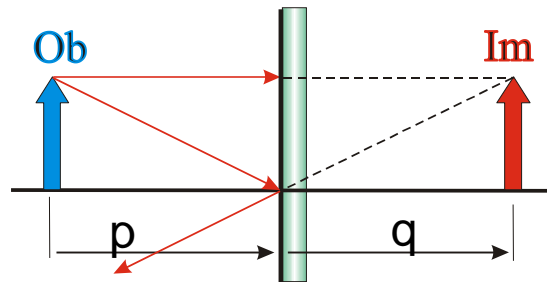
R Raio de curvatura da interface esférica.

Todas estas grandezas podem ser positivas ou negativas

Tipos de Espelho

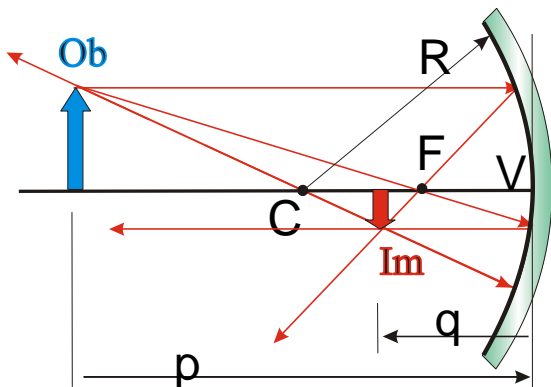
Plano

$$f = \frac{R}{2} = \infty \Rightarrow q = -p$$



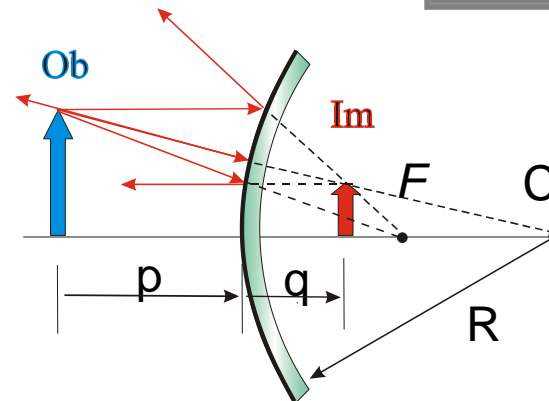
Côncavo

$$f = \frac{R}{2} > 0$$



Convexo

$$f = \frac{R}{2} < 0$$

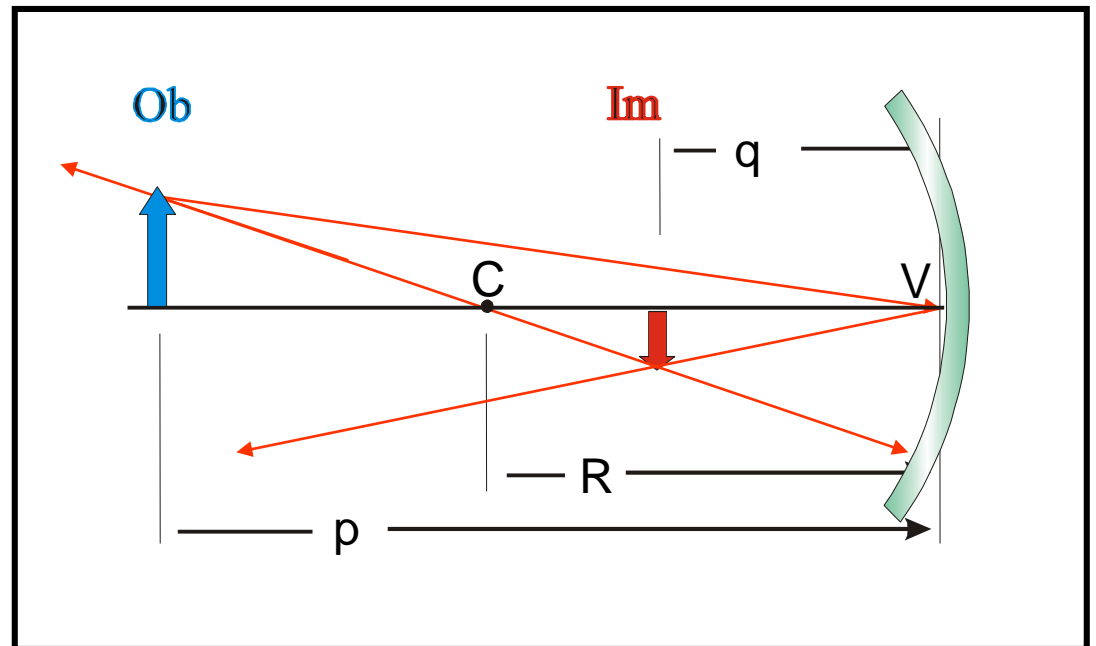


Imagens formadas por reflexão

Espelhos côncavos

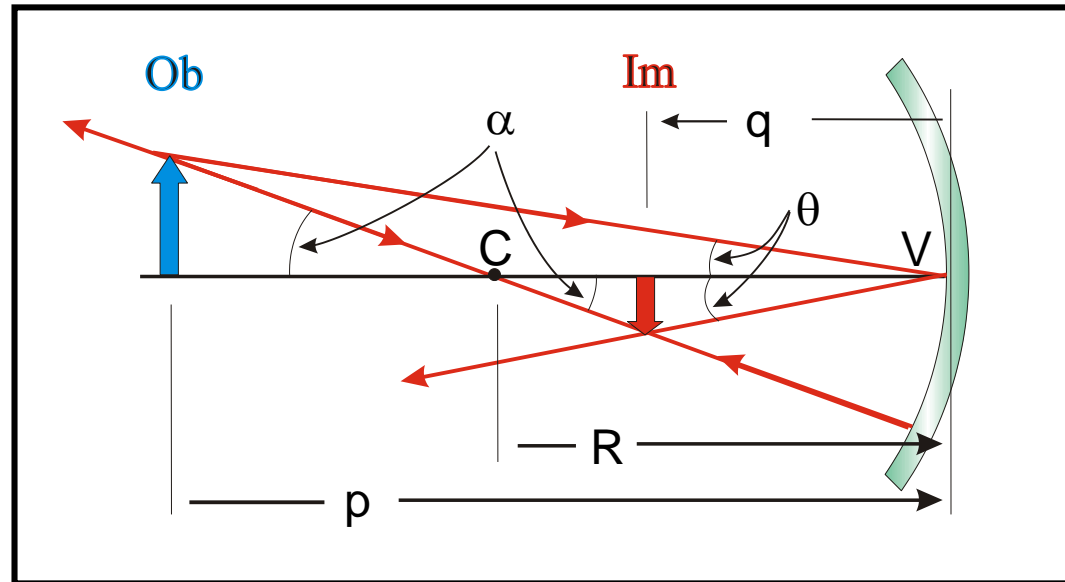
Para obter a imagem criada por um espelho esférico precisamos de dois raios:

- Um raio incide no espelho **no vértice V** e reflecte-se com o mesmo ângulo θ .
- O outro raio passa pelo **centro de curvatura, C**, incide perpendicularmente ao espelho e é reflectido sobre si próprio.



Imagens formadas por reflexão

Espelhos côncavos



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{p - R}$$

e

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{h'}{R - q}$$



$$\frac{h'}{h} = -\frac{R - q}{p - R}$$

mas

$$\frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$



$$\frac{h'}{h} = -\frac{R - q}{p - R} = -\frac{q}{p}$$

Espelhos côncavos

Equação dos espelhos

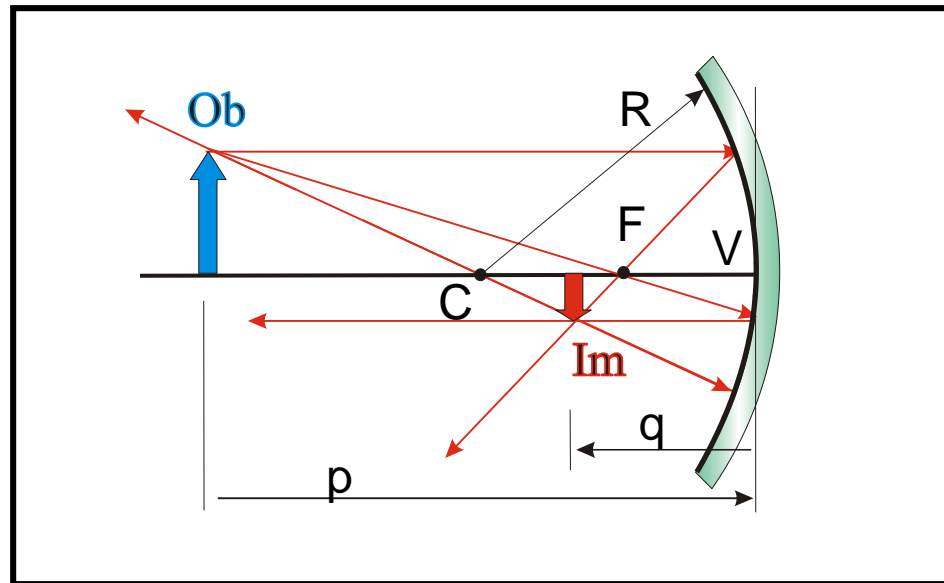


$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

Onde f é a **Distância focal** do espelho

O ponto F distante do espelho de f é o Foco

$$f = \frac{R}{2}$$

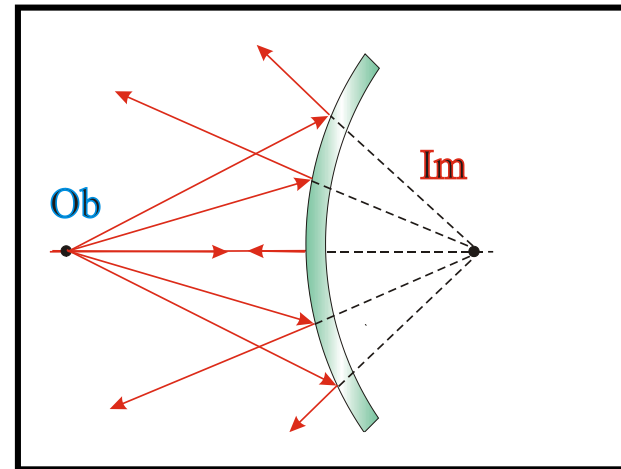
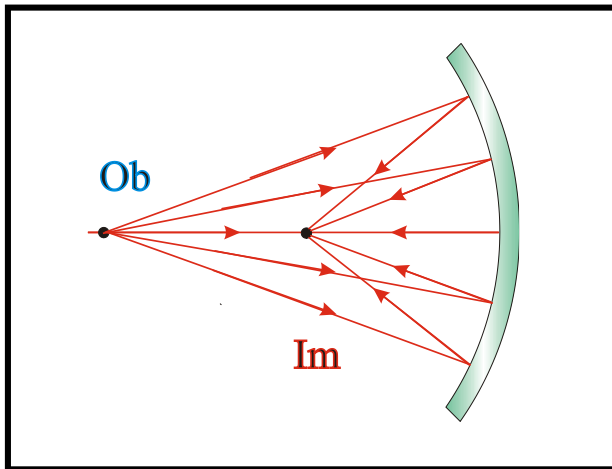


Ponto focal

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

A posição da imagem de um Objeto formada por reflexão não depende do raio incidente considerado.

Todos os raios considerados convergem no mesmo ponto !



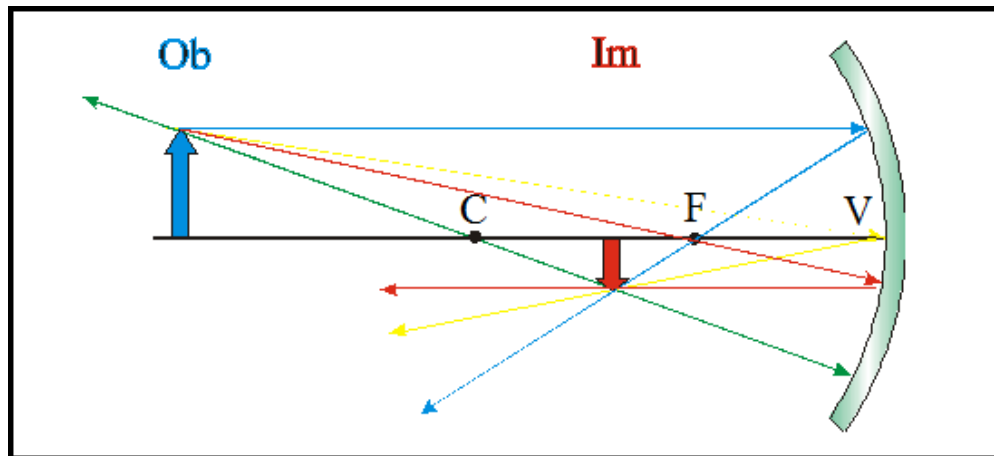
Construção de Imagens

Qualquer que seja o elemento Ótico, 2 raios são suficiente para construir a imagem.

Raios

- 1.Paralelo ao eixo Ótico e é refletido através do foco.
- 2.Passa pelo do foco e é refletido paralelamente ao eixo.
- 3.Passa pelo centro de curvatura e é refletido sobre si próprio.
- 4.Bate no vértice e é refletido simetricamente.

Ex:



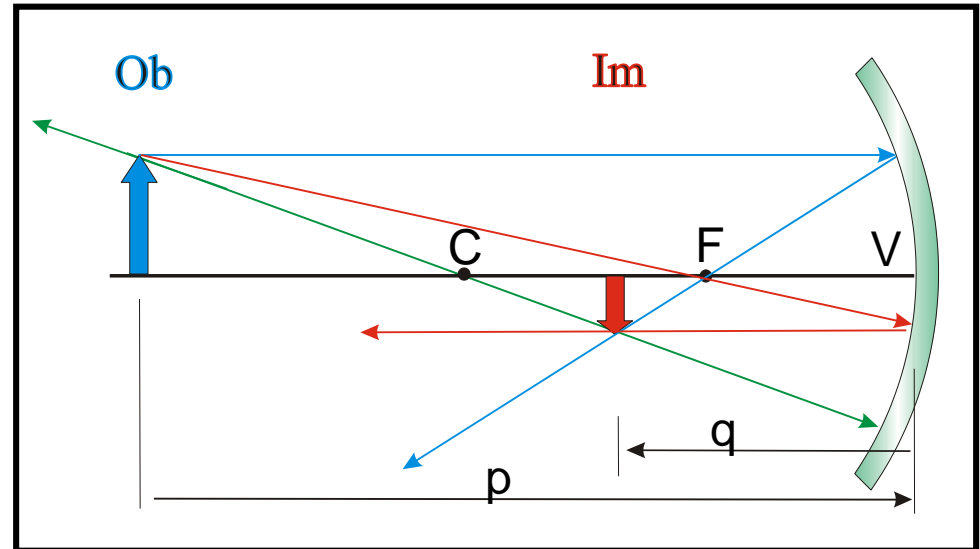
Espelhos côncavos

Objeto antes do Foco ($p > f$)

Imagem Real

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} < 0$$

$$p > 0 \text{ e } q > 0$$

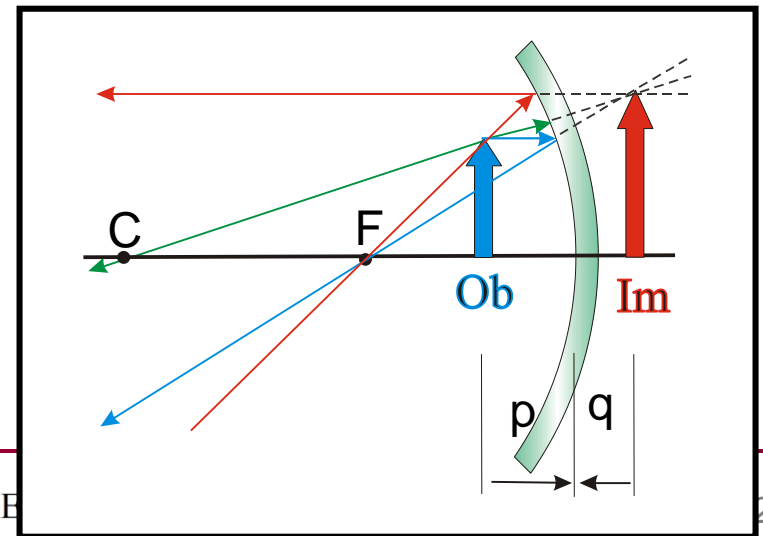


Objeto entre o Foco e o espelho ($p < f$)

Imagem Virtual

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Espelhos Convexos

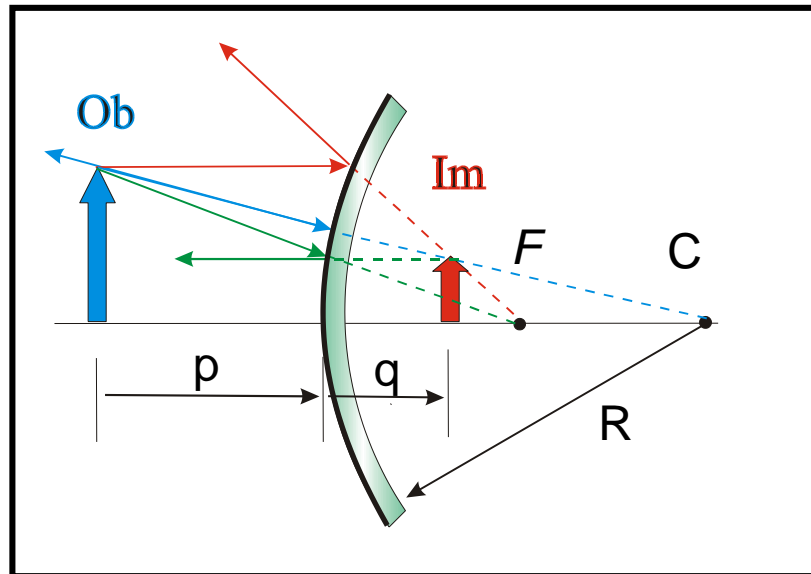
Qualquer que seja a posição de um Objeto Real criam uma Imagem virtual.

Mas!!! De um Objeto virtual criam uma Imagem real.

Imagens Virtuais

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Espelhos planos

Qualquer que seja a posição de um Objeto Real criam uma Imagem virtual.

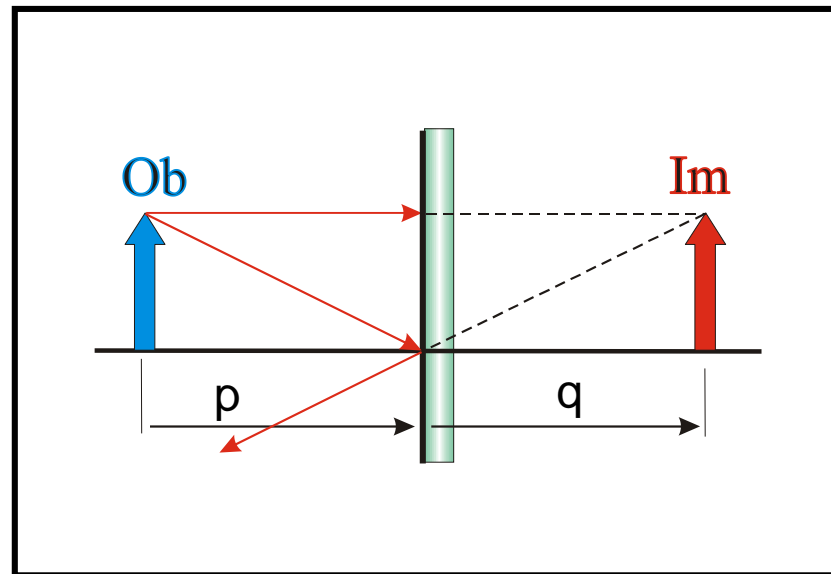
Mas!!!

De um Objeto virtual criam uma Imagem real.

Imagens Virtuais

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Conjunto de Espelhos

Vamos ver agora as imagens formadas por um conjunto de dois espelhos.

Conceitos iniciais (validos também para as lentes):

- Temos dois Objetos e duas imagens.
- O primeiro espelho cria do Objeto Ob_1 uma imagem Im_1 .
- Esta imagem torna-se o Objeto para o segundo espelho: $Im_1 = Ob_2$
- O segundo espelho forma então a segunda e última imagem, Im_2 .

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} = \frac{2}{R_1}$$

Formação da primeira imagem Im_1 pelo espelho 1.

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} = \frac{2}{R_2}$$

Formação da segunda imagem Im_2 pelo espelho 2 sendo o Objeto a imagem Im_1 .

Conjunto de Espelhos

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} = \frac{2}{R_1}$$

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} = \frac{2}{R_2}$$

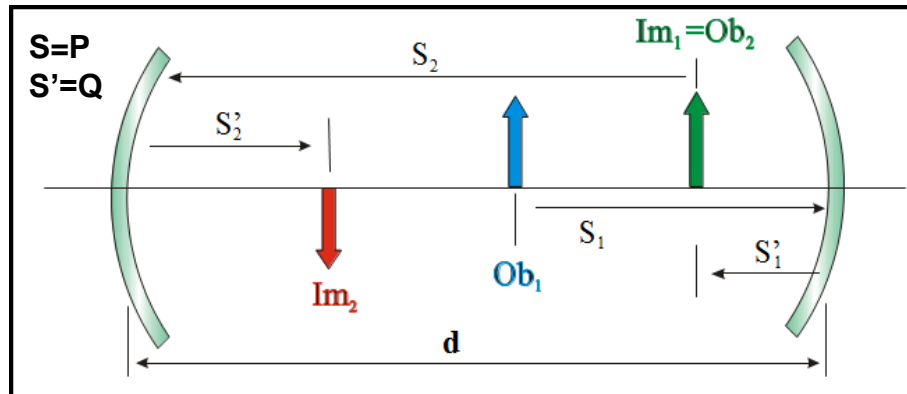
Equação de ligação

$$p_2 = d - q_1$$

**Equação válida sempre,
qualquer que sejam os
elementos Óticos.**

Ampliação lateral

$$m = m_1 \cdot m_2 = \left(-\frac{q_1}{p_1} \right) \cdot \left(-\frac{q_2}{p_2} \right) = \frac{h'}{h}$$



Imagens formadas por refração

Dois meios transparentes, índices de refração n_1 e n_2 :

$$n_2 > n_1$$

Superfície esférica de raio R (Interface entre os meios)

Aproximação de raios para-axiais, (θ pequenos, raios próximos do eixo Ótico)

$$\begin{cases} \text{sen } \theta \approx \theta \\ \text{tg } \theta \approx \theta \end{cases}$$

Aplicada à Lei de Snell:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$

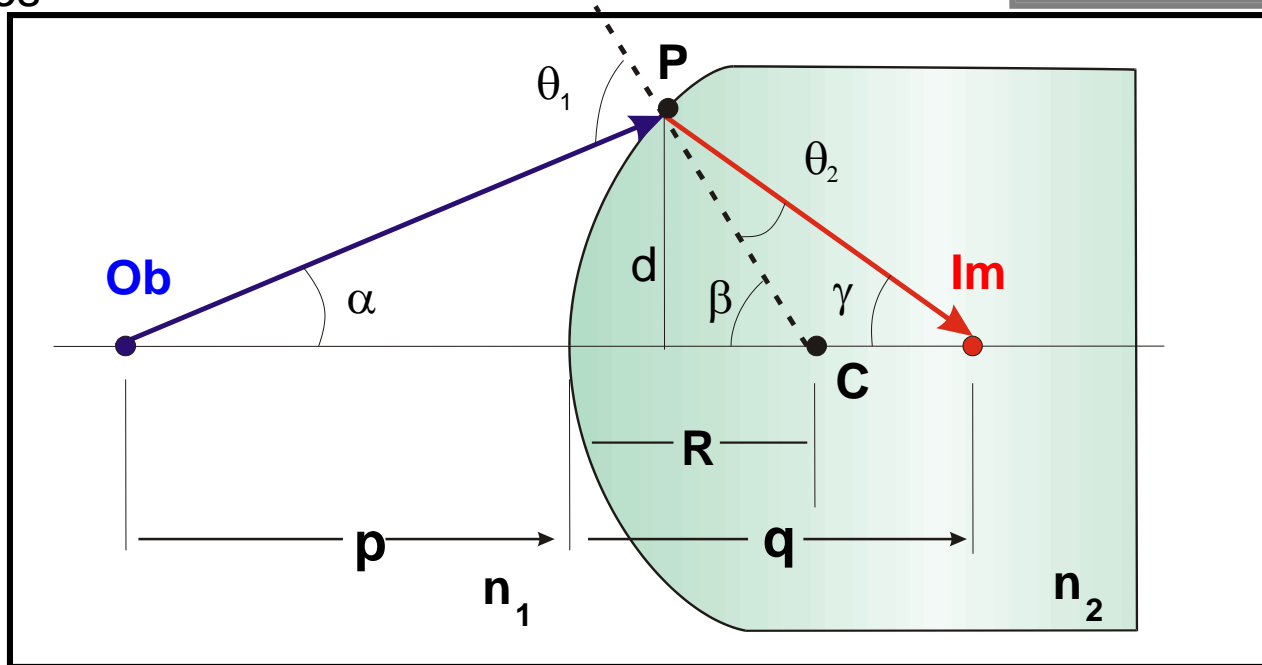


$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

Imagens formadas por refração

Aplicando aos triângulos OPC e PIC, a propriedade de o ângulo exterior a um triângulo ser igual a soma dos ângulos opostos

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$
$$\beta = \theta_2 + \gamma$$



$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$



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

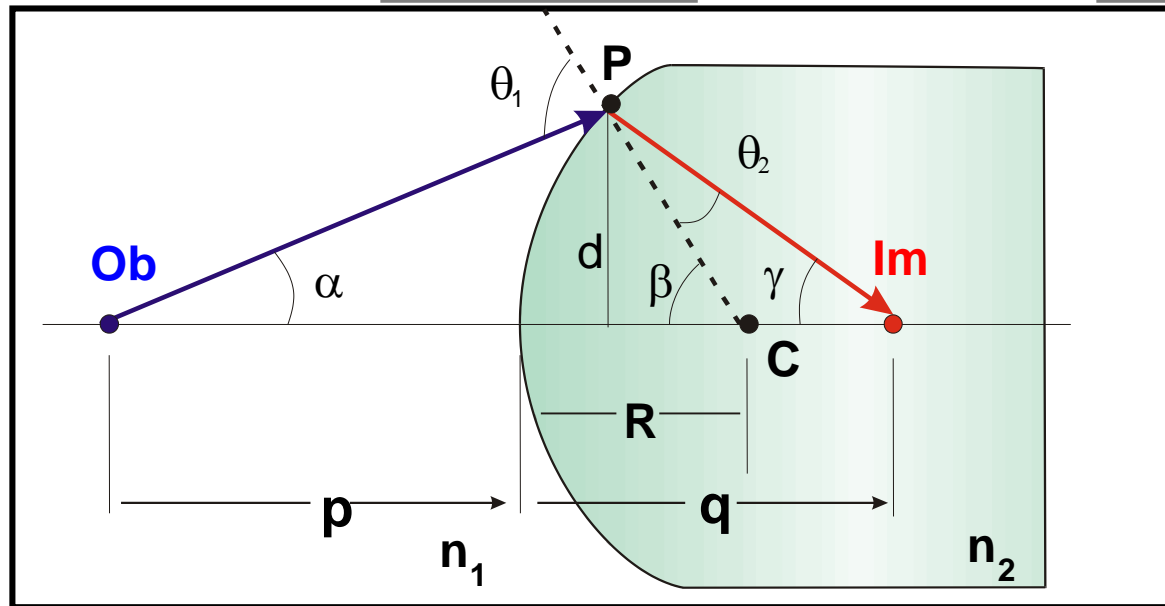
Imagens formadas por refração

Para ângulos pequenos.

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha \approx \frac{d}{p}$$

$$\operatorname{tg} \beta \approx \beta \approx \frac{d}{R}$$

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma \approx \frac{d}{q}$$



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



$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{(n_2 - n_1)}{R}$$

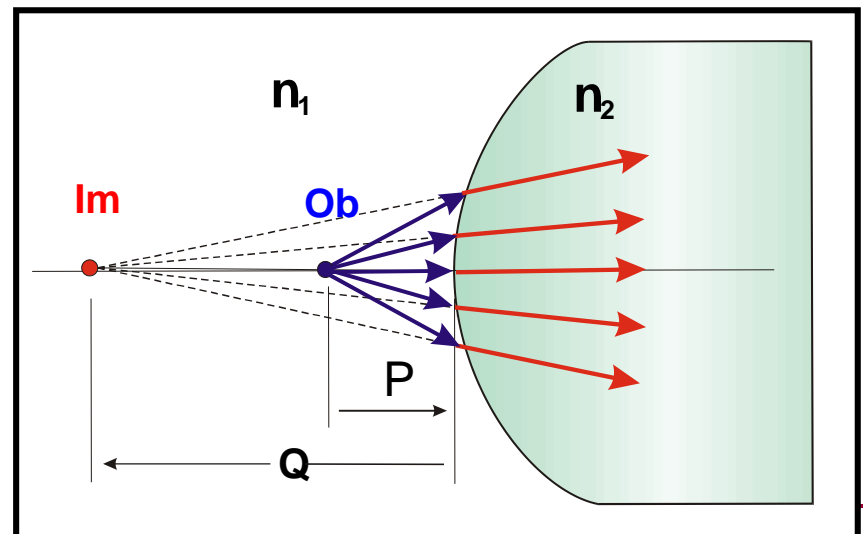
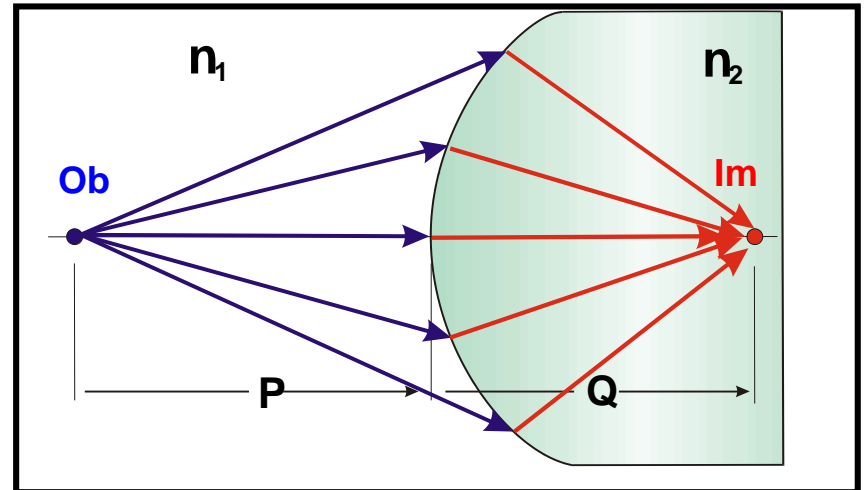
Equação das interfaces refratoras

Imagens formadas por refração

A posição da imagem de um objecto formada por refração (como no caso da reflexão) não depende do raio incidente considerado.

Todos os raios considerados convergem no mesmo ponto !

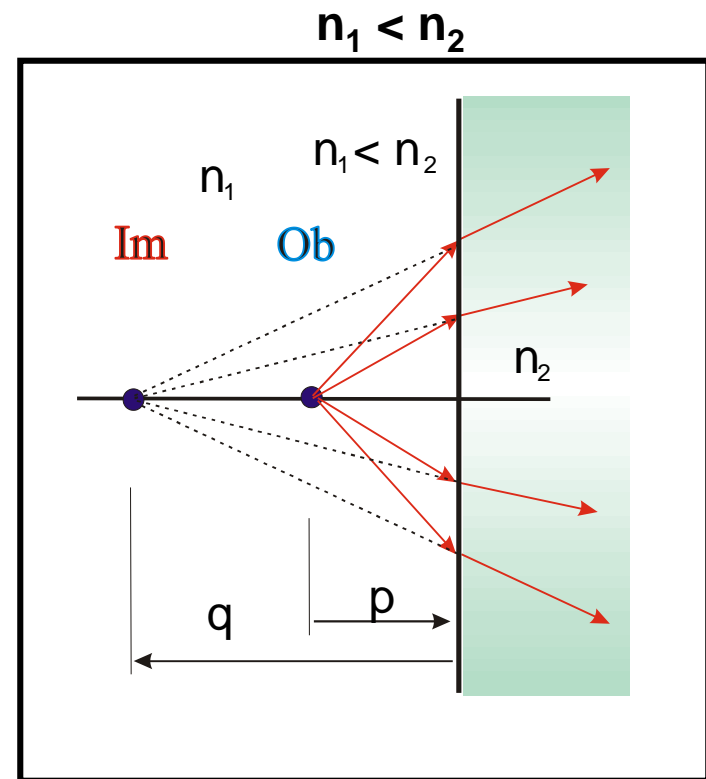
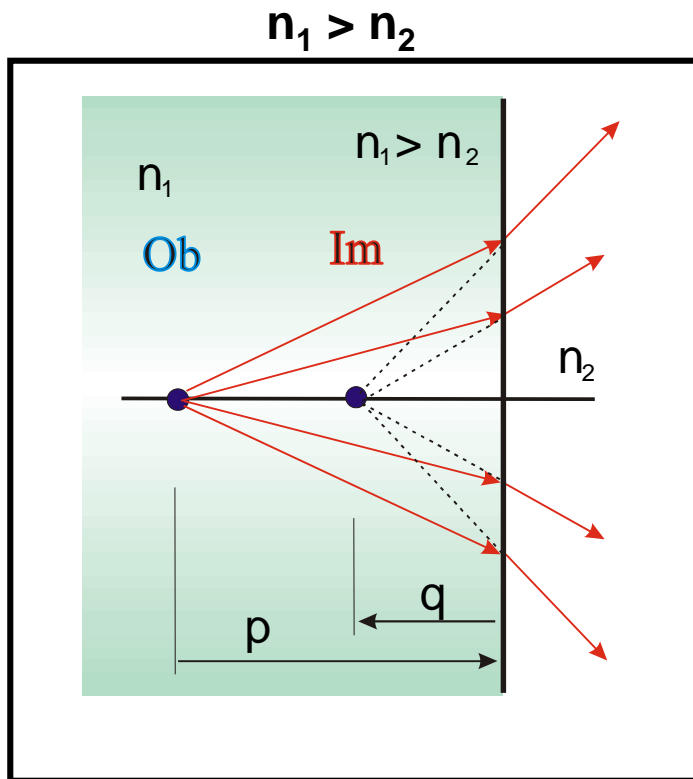
$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{(n_2 - n_1)}{R}$$



Imagens formadas por refração

Caso particular: Superfícies planas

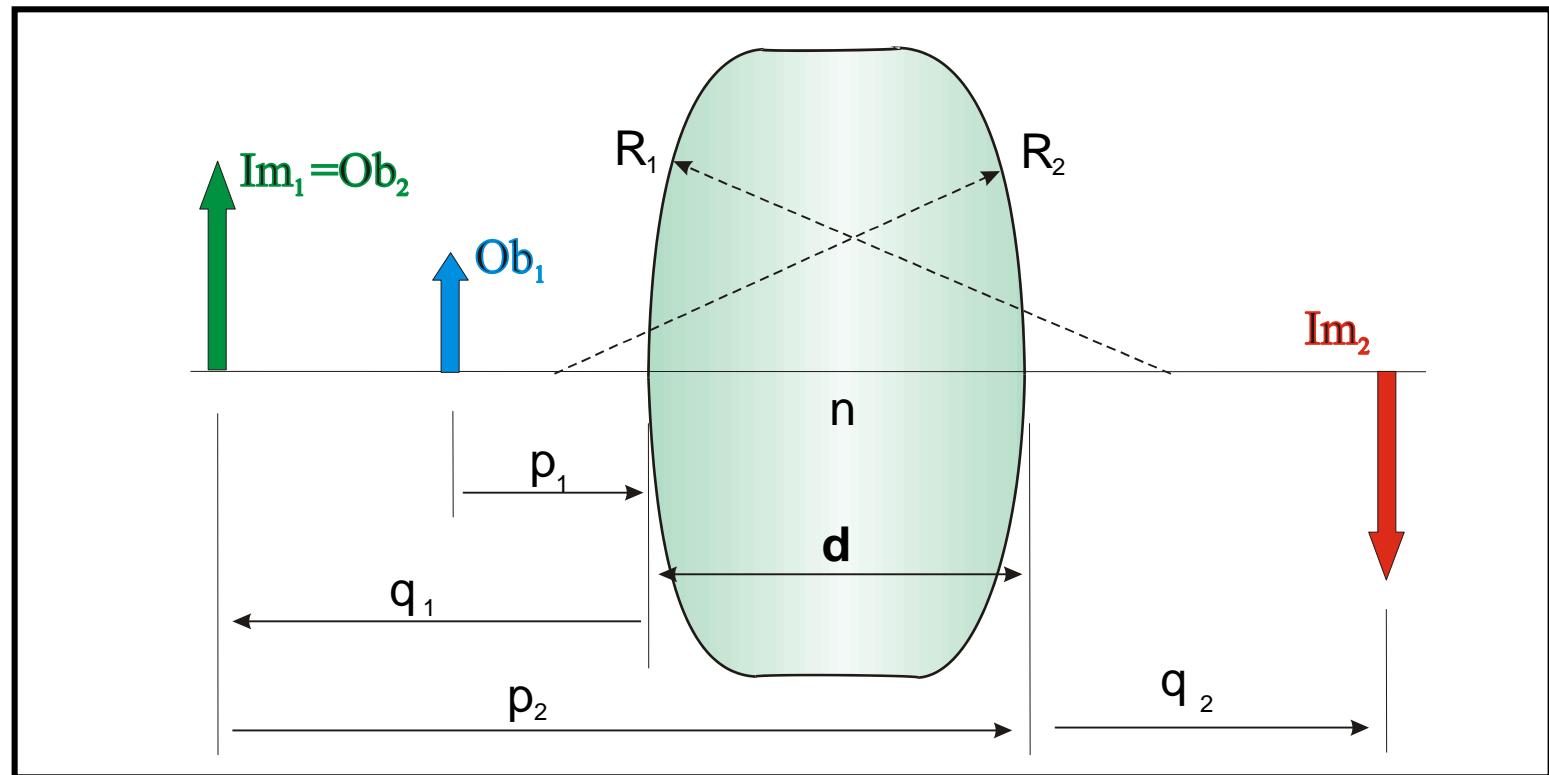
$$R = \infty \Rightarrow q = -p \frac{n_2}{n_1}$$



Imagens formadas por refração

Considera-se uma lente, de índice n , constituída de duas superfícies esféricas de raios R_1 e R_2 . O objeto está perto da lente.

A primeira interface produz a imagem Im_1 . Este imagem torna-se o objecto, Ob_2 , para a segunda interface, que assim produz a imagem Im_2



Imagens formadas por refração

Assim temos para a 1ª interface ($Ob_1 - Im_1$):

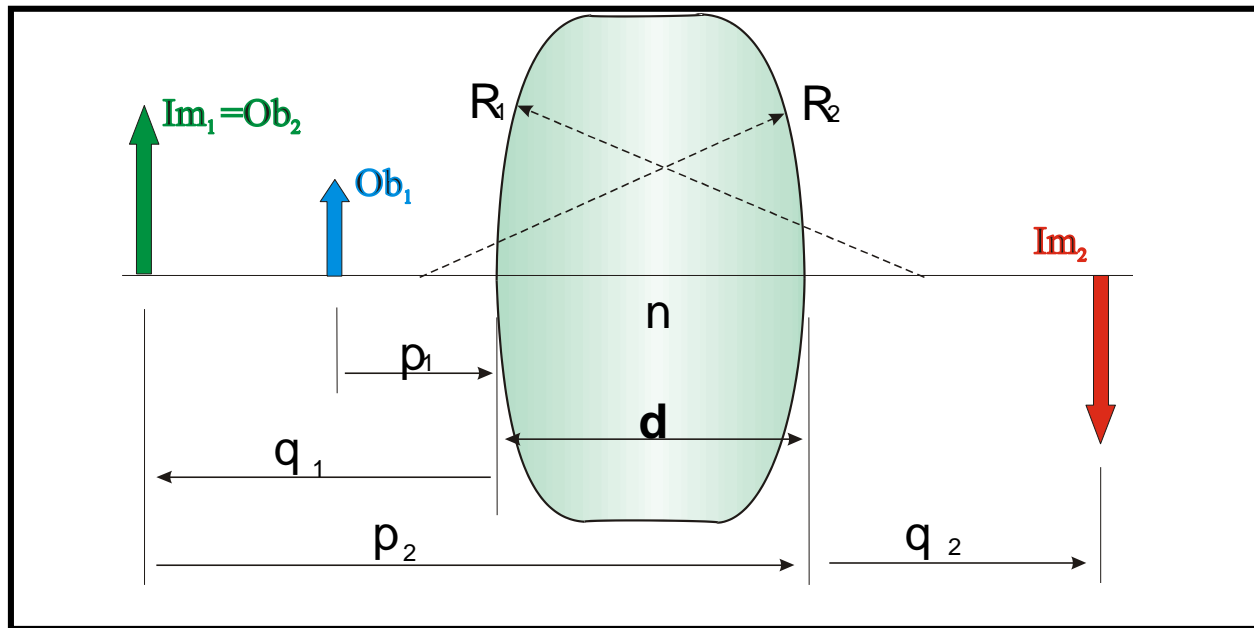
$$\frac{1}{p_1} + \frac{n}{q_1} = \frac{n-1}{R_1}$$

para a 2ª interface ($Ob_2 - Im_2$):

$$\frac{n}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1-n}{R_2}$$

Equação de ligação

$$p_2 = d - q_1$$



Lentes Finas

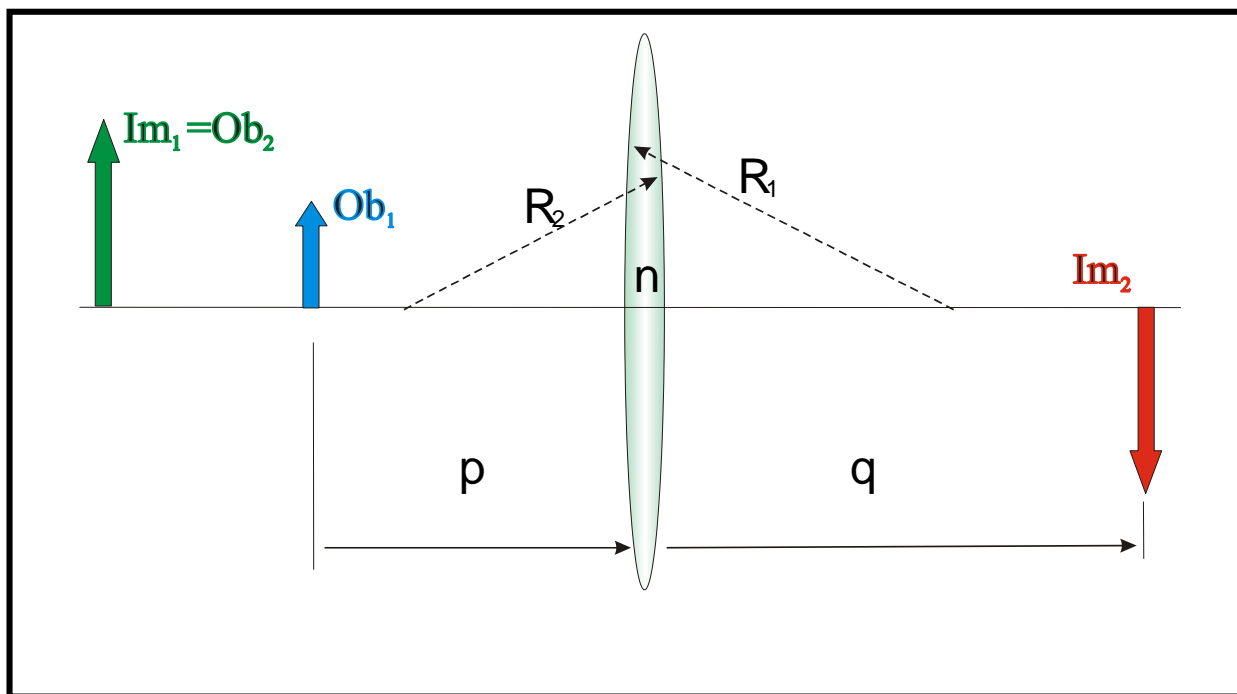
Na aproximação das Lentes Finas considera-se que $d \approx 0$:

$$p_2 = -q_1$$



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

Equação
dos fabricantes de Lentes

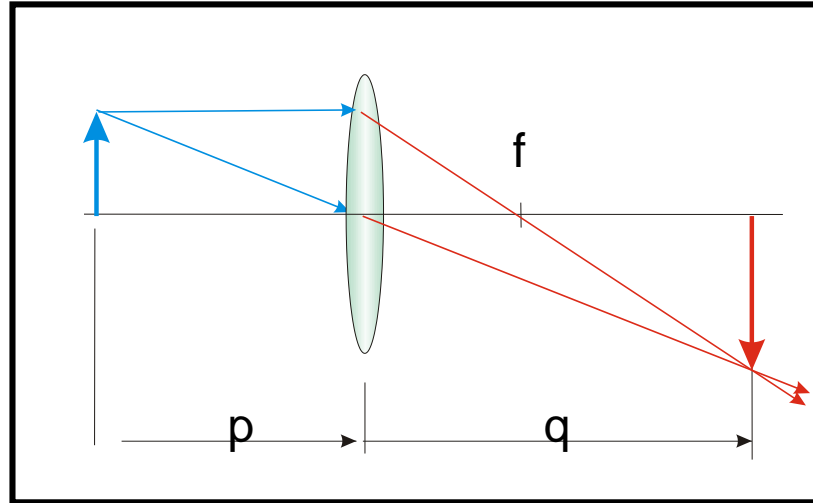


Lentes Finas

Lentes Convergentes



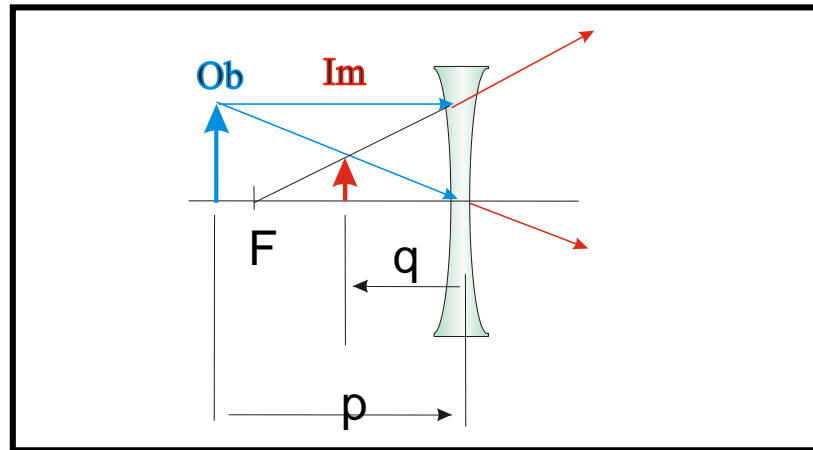
$$f > 0$$



Lentes Divergentes



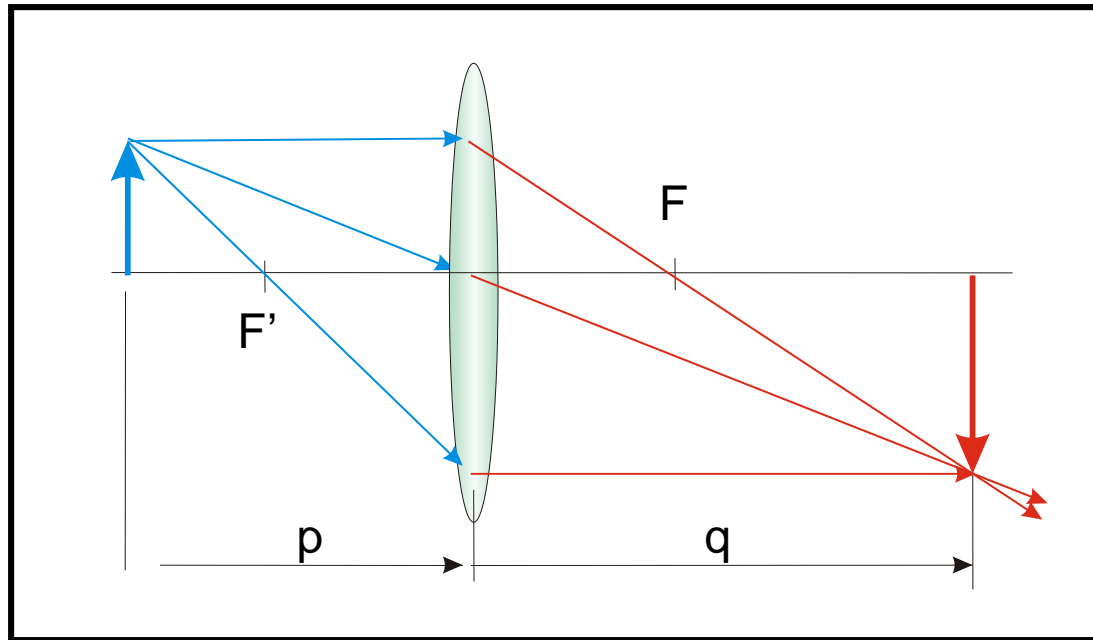
$$f < 0$$



Lentes Convergentes

- 1.Paralelo ao eixo ótico e é refratado através do foco, F .
- 2.Passar pelo foco F' e é refratado paralelamente ao eixo.
- 3.Passar pelo centro da lente e não é desviado.

Ex:



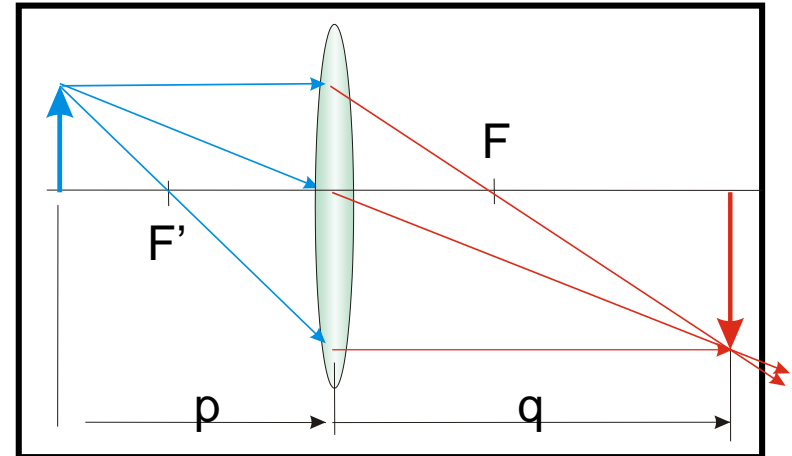
Lentes Convergentes

Objeto antes do foco, F' ($p > f$)

Imagem Real

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} < 0$$

$$p > 0 \text{ e } q > 0$$

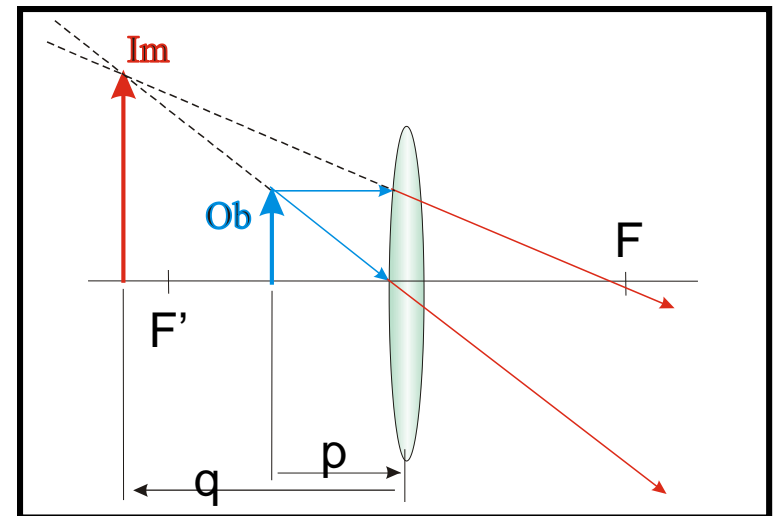


Objeto entre o foco, F' e a lente ($p < f$)

Imagem Virtual

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

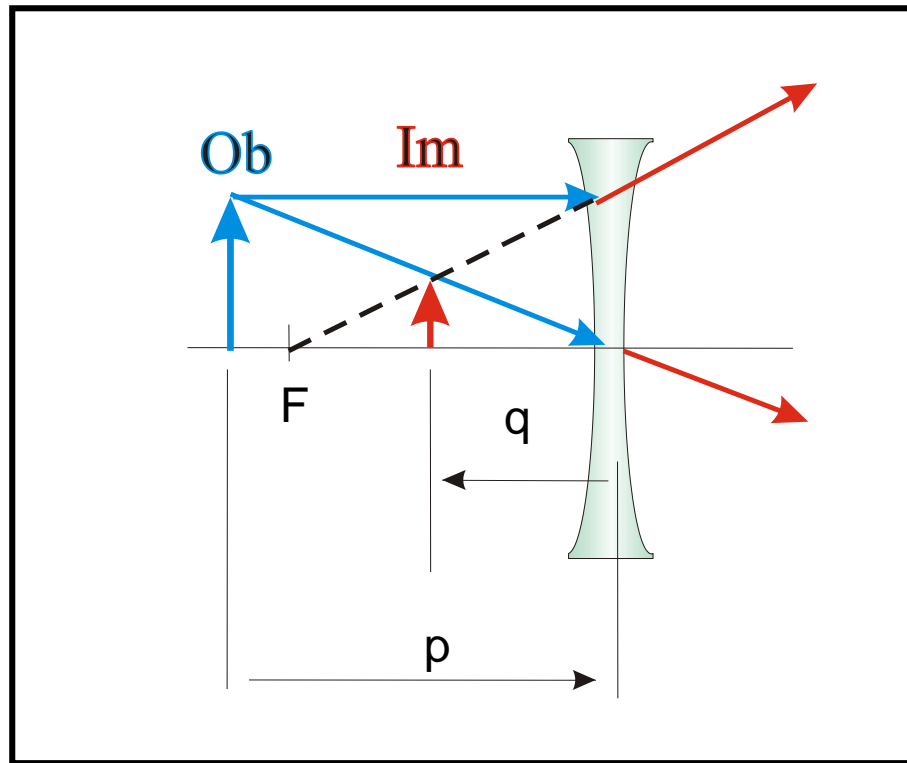
$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Lentes Divergentes

Qualquer que seja a posição de um Objeto Real criam uma Imagem virtual.

Mas!!! De um Objeto virtual criam uma Imagem real.



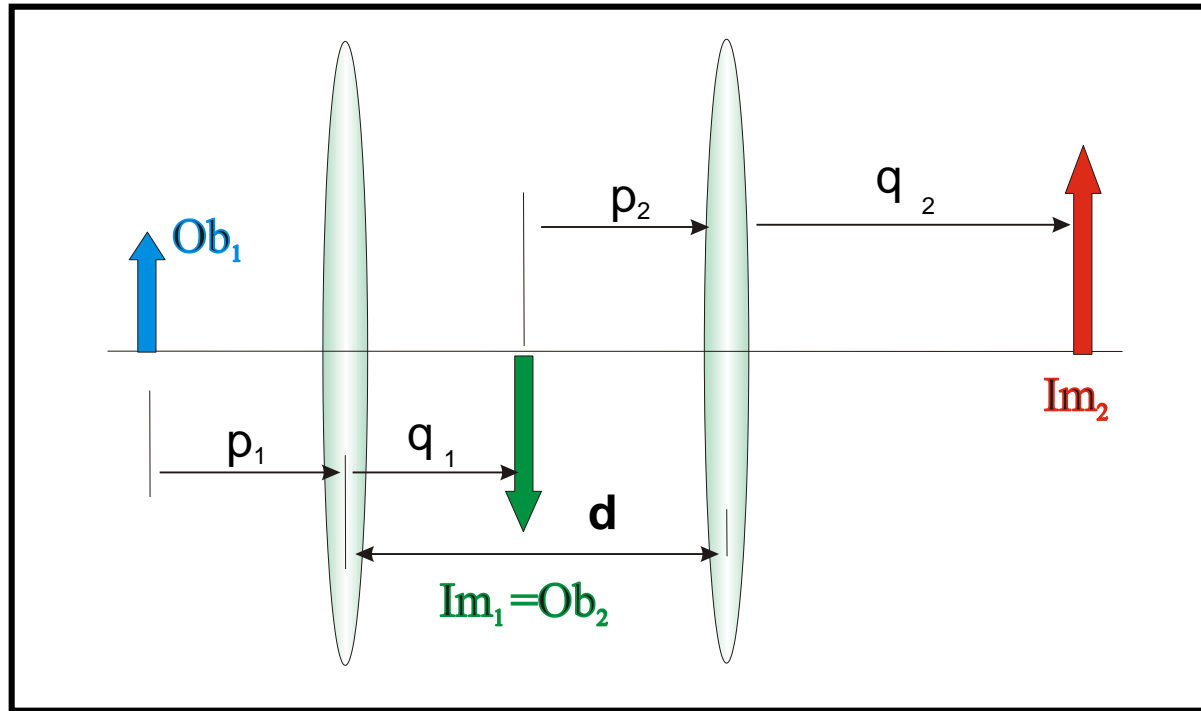
Conjunto de Lentes

A primeira lente cria do objeto Ob_1 uma imagem Im_1 que se torna o objeto da segunda lente $Im_1=Ob_2$.

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1}$$

$$p_2 = d - q_1$$

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2}$$



Conjunto de Lentes

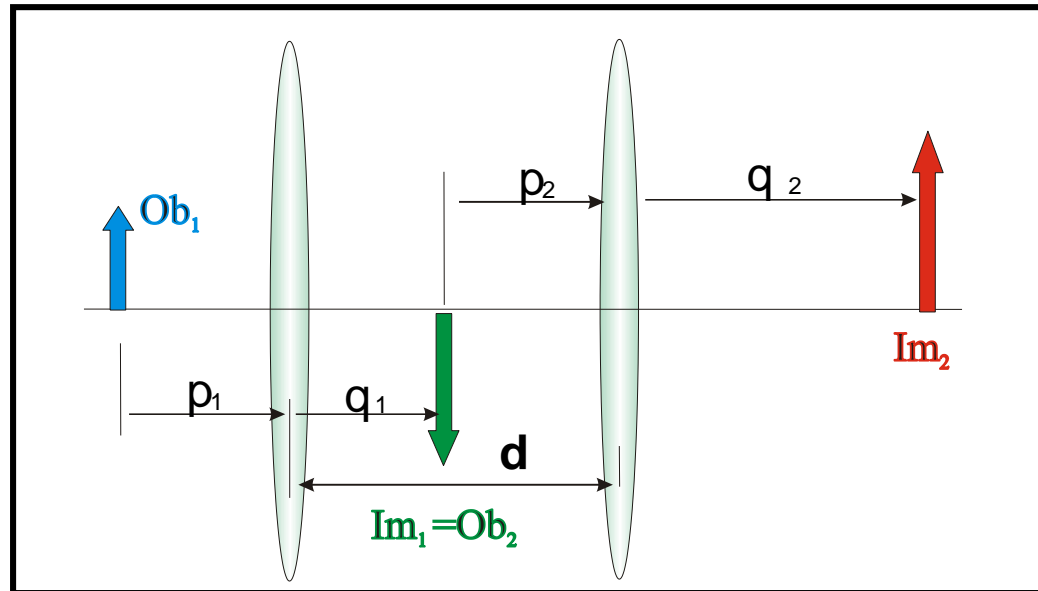
Equação de ligação

$$p_2 = d - q_1$$

Equação válida sempre qualquer que sejam os elementos óticos.

Ampliação lateral

$$m = m_1 \cdot m_2 = \left(-\frac{q_1}{p_1} \right) \cdot \left(-\frac{q_2}{p_2} \right) = \frac{h'}{h}$$

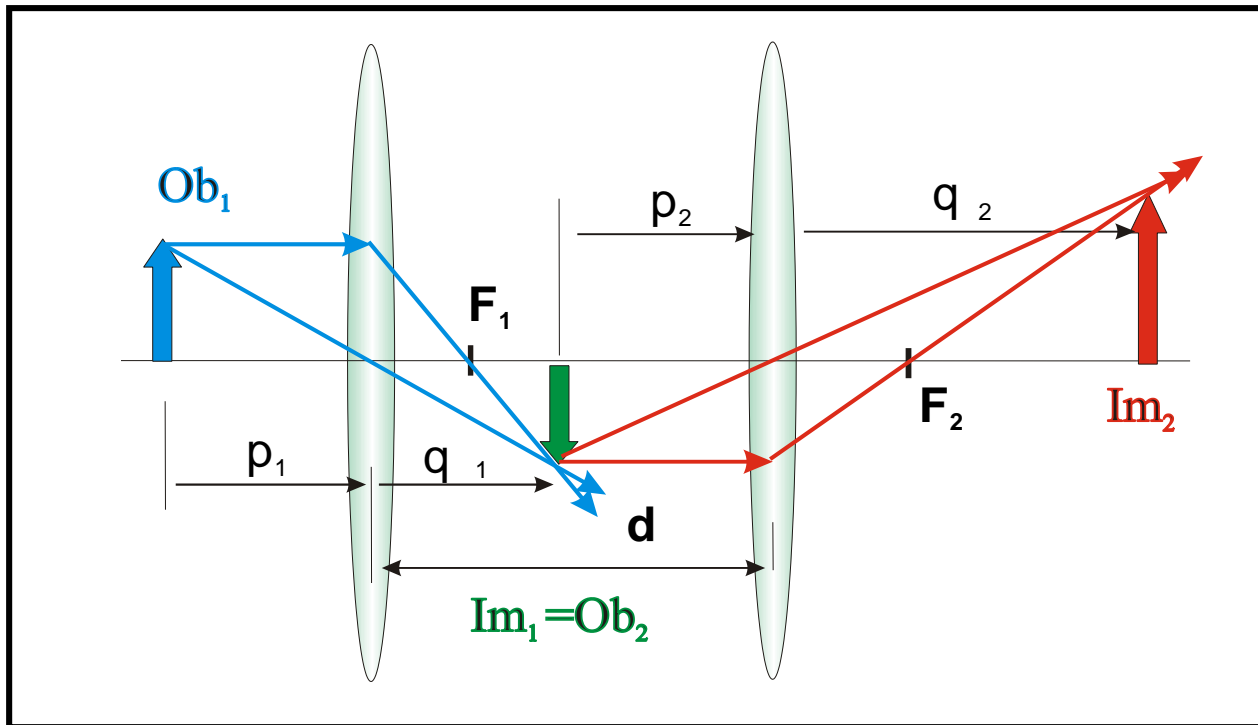


Conjunto de Lentes

I_1 real – Ob_2 real – I_2 real

p_1 e $q_1 > 0$

p_2 e $q_2 > 0$



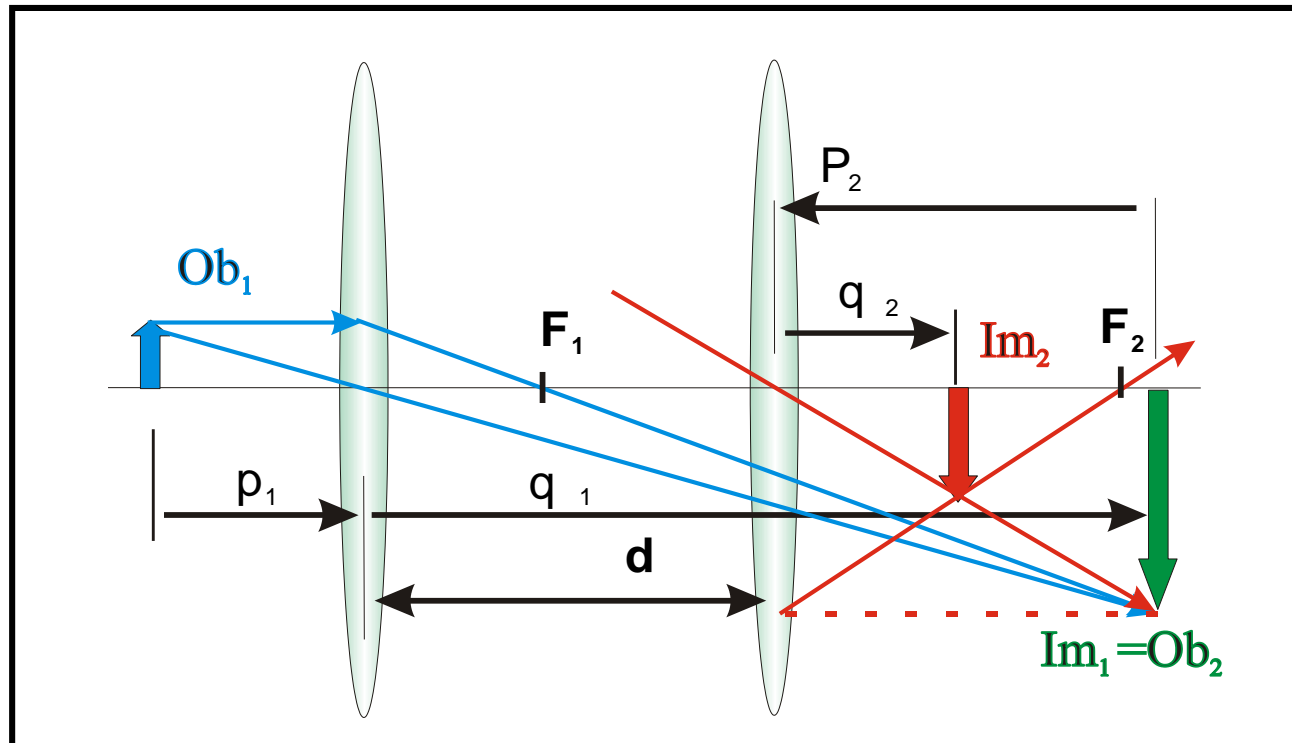
$m_1 < 0$; $m_2 < 0$; $m > 0$

Conjunto de Lentes

I_1 real – Ob_2 virtual – I_2 real

p_1 e $q_1 > 0$

$p_2 < 0$ e $q_2 > 0$



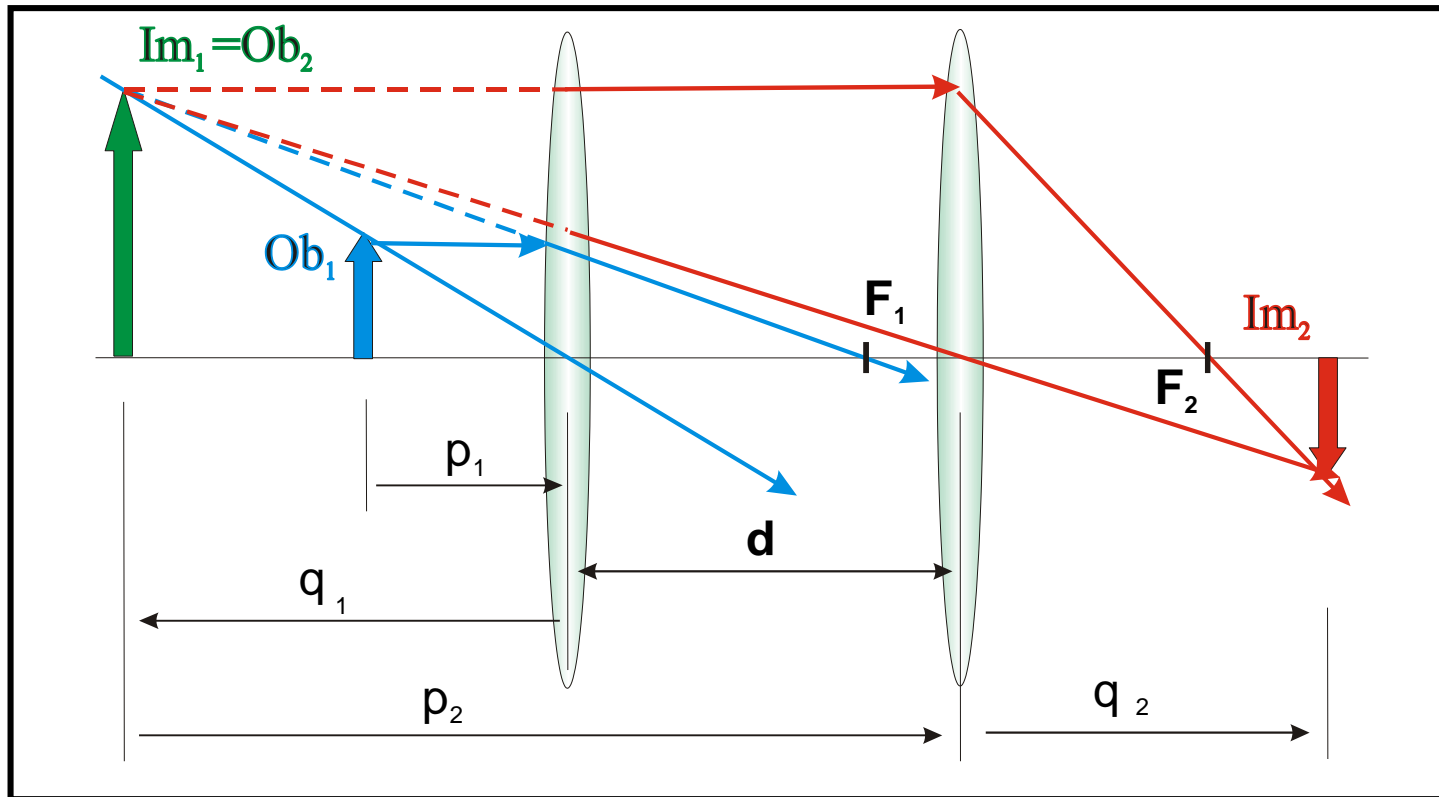
$m_1 < 0$; $m_2 > 0$; $m < 0$

Conjunto de Lentes

I_1 virtual – Ob_2 real – I_2 real

$p_1 > 0$ e $q_1 < 0$

p_2 e $q_2 > 0$



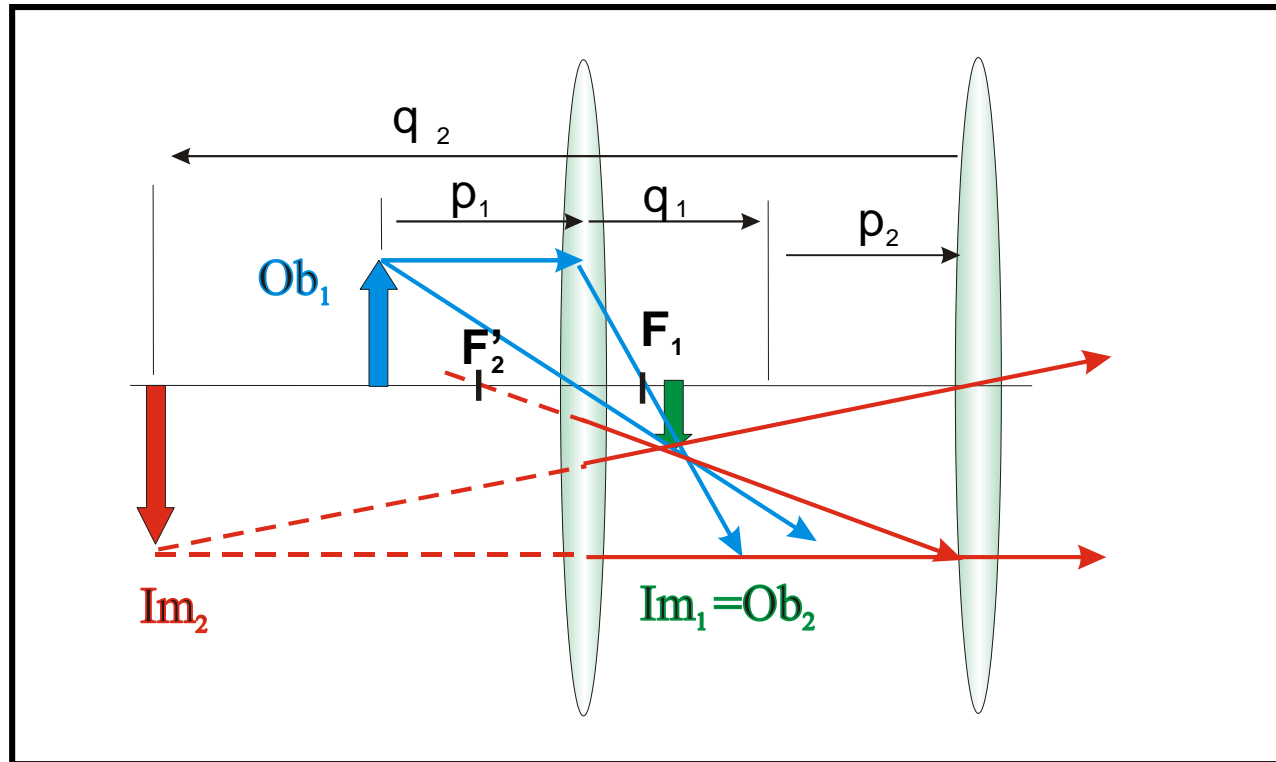
$m_1 > 0$; $m_2 < 0$; $m < 0$

Conjunto de Lentes

I_1 real – Ob_2 real – I_2 virtual

p_1 e $q_1 > 0$

$p_2 > 0$ e $q_2 < 0$



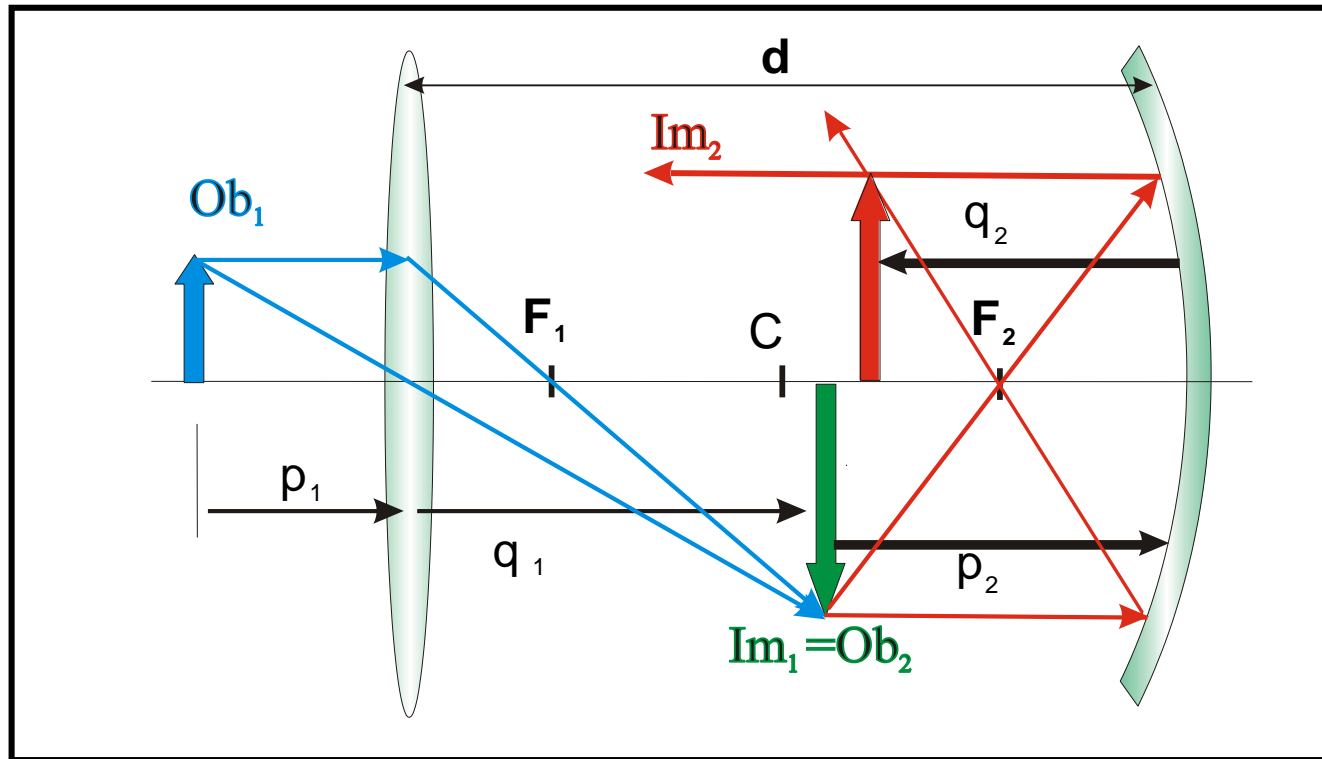
$m_1 < 0$; $m_2 > 0$; $m < 0$

Conjunto de Elementos Óticos

I_1 real – Ob_2 real – I_2 real

p_1 e $q_1 > 0$

p_2 e $q_2 > 0$



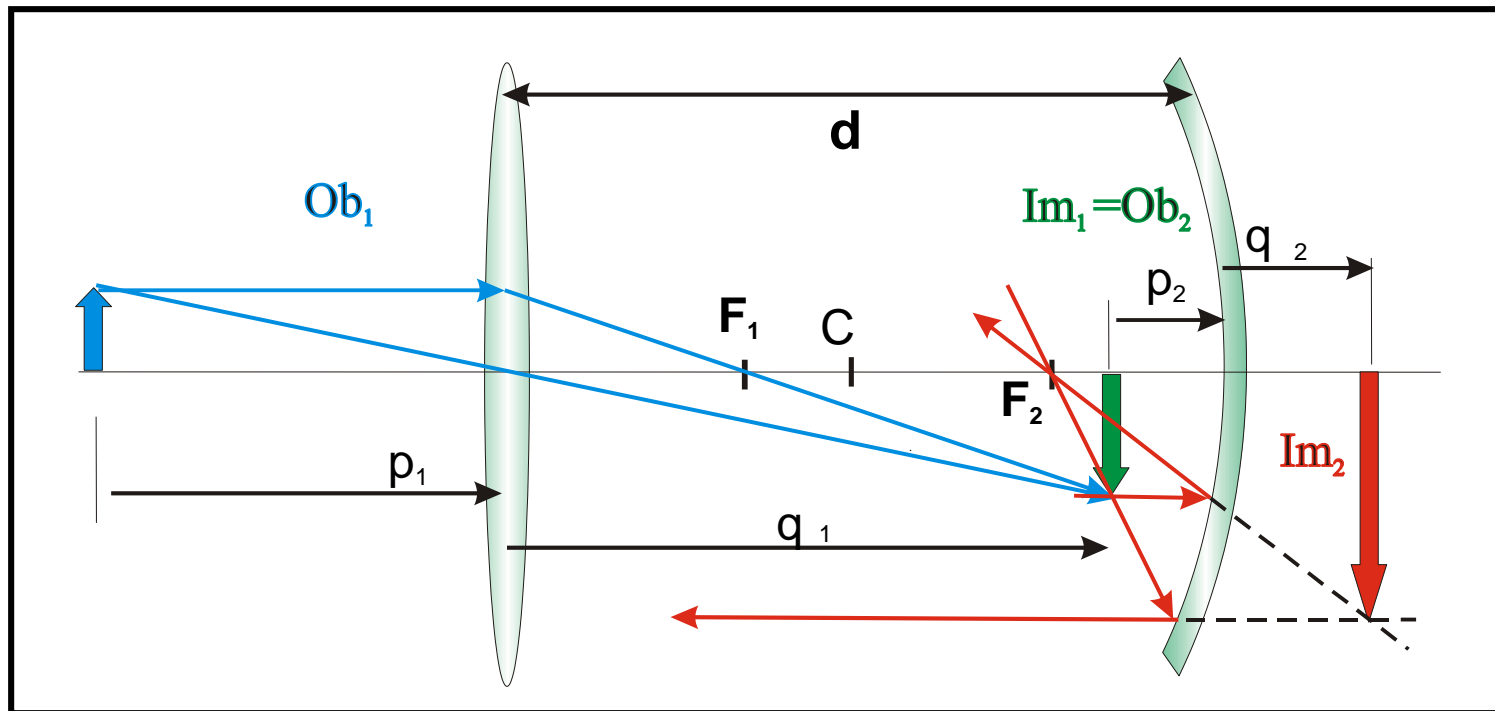
$m_1 < 0$; $m_2 < 0$; $m > 0$

Conjunto de Elementos Óticos

I_1 real – Ob_2 real – I_2 virtual

p_1 e $q_1 > 0$

$p_2 > 0$ e $q_2 < 0$



$m_1 < 0$; $m_2 > 0$; $m < 0$