



**INSTITUTO DE FÍSICA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

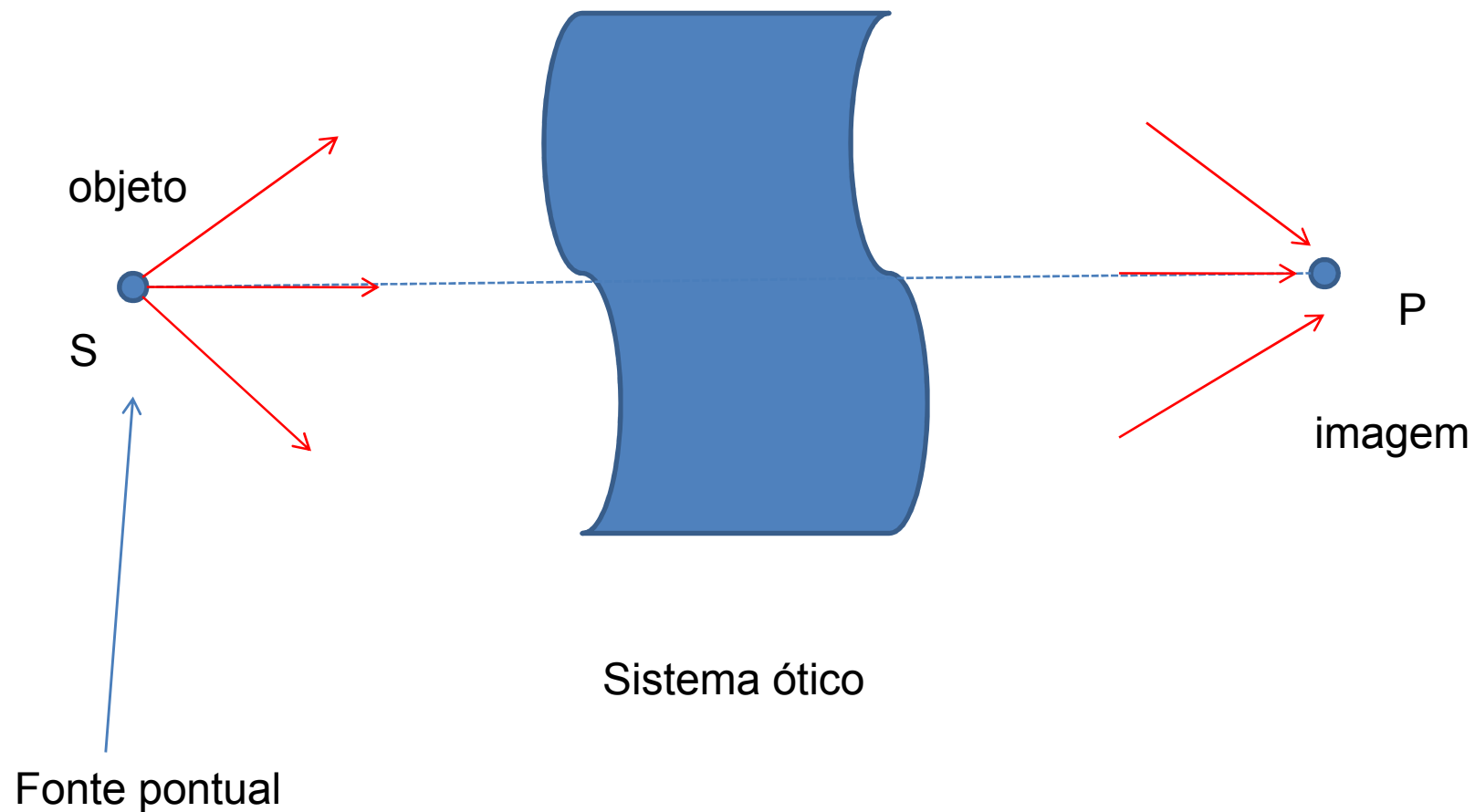
*Pós-Graduação*

*Mestrado Profissional em Ensino de Física*

## Aula 5

# Ótica geométrica

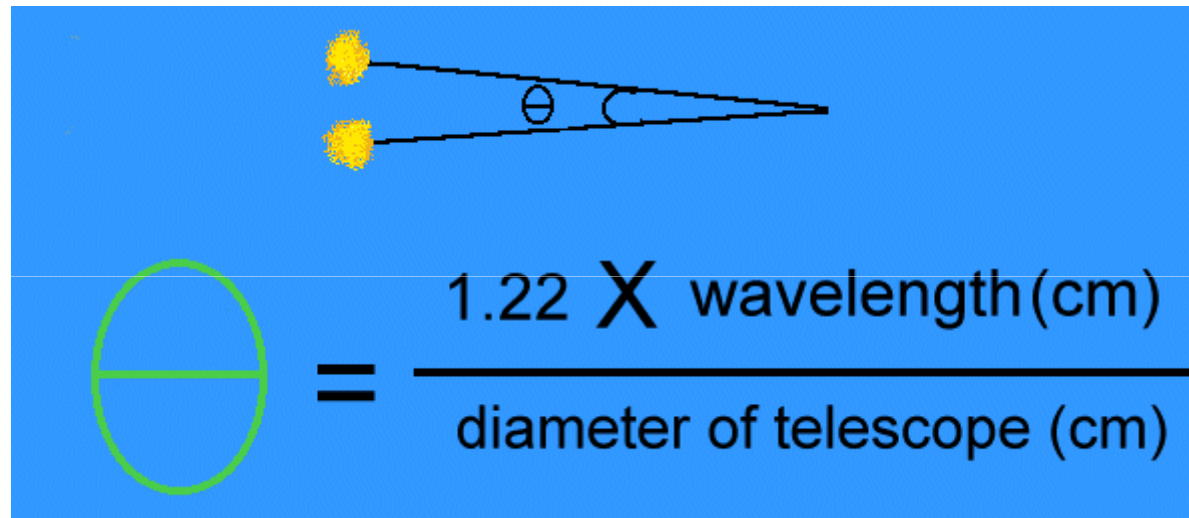
Referência: E. Hecht, óptica, Fundação Calouste Gulbekian, segunda edição portuguesa (2002);



Sempre que a cada feixe de raios que diverge a partir de S, corresponde a um feixe de raios que converge para P, o sistema ótica diz-se estigmático para os pontos S e P.

S e P constituem um par de pontos conjugados

Na prática, ocorre sempre um desvio inevitável da direção de propagação retilínea (difração). Num sistema ótico real o grau máximo de perfeição possível de atingir na formação de imagens é limitado por difração.

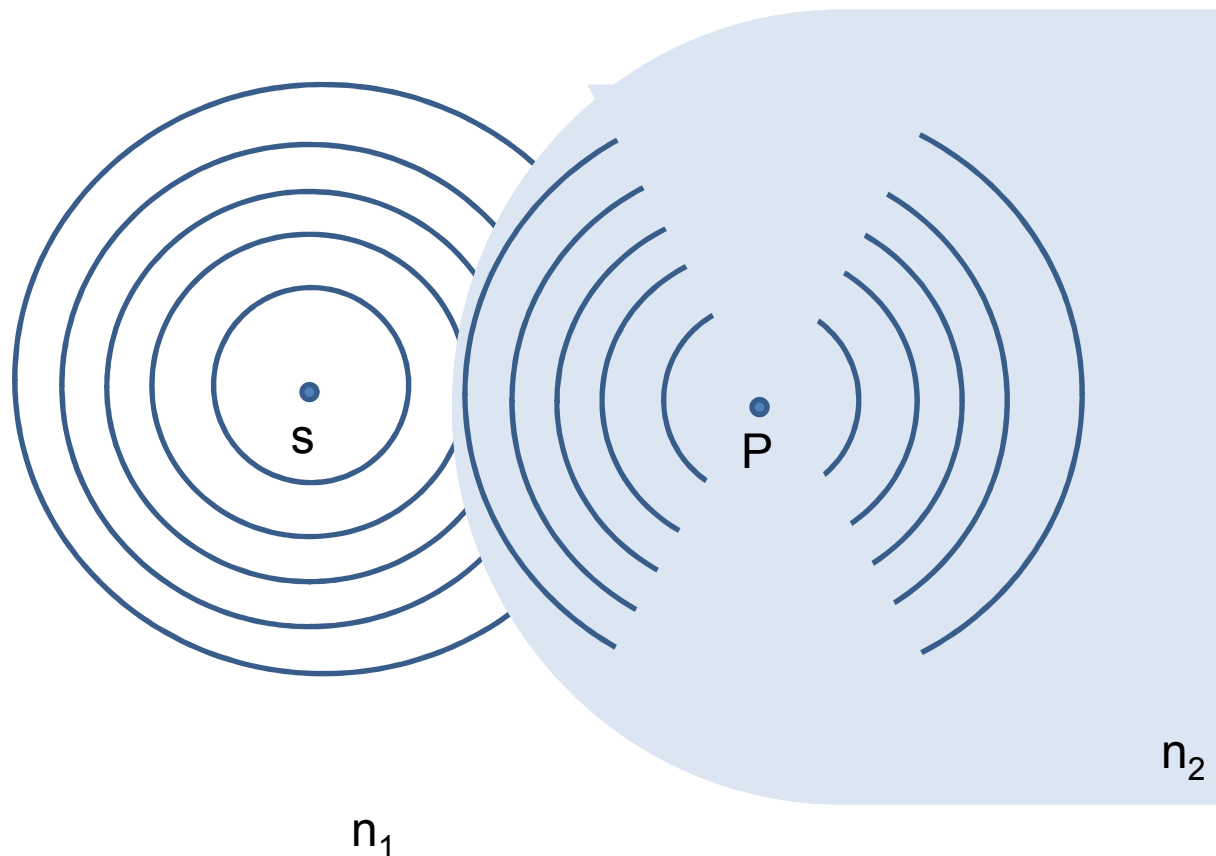


No limite teórico de  $\lambda \rightarrow 0$ , é possível recuperar a propagação retilínea da luz: é o domínio da **ótica geométrica**

# LENTEs

$$n_2 > n_1$$

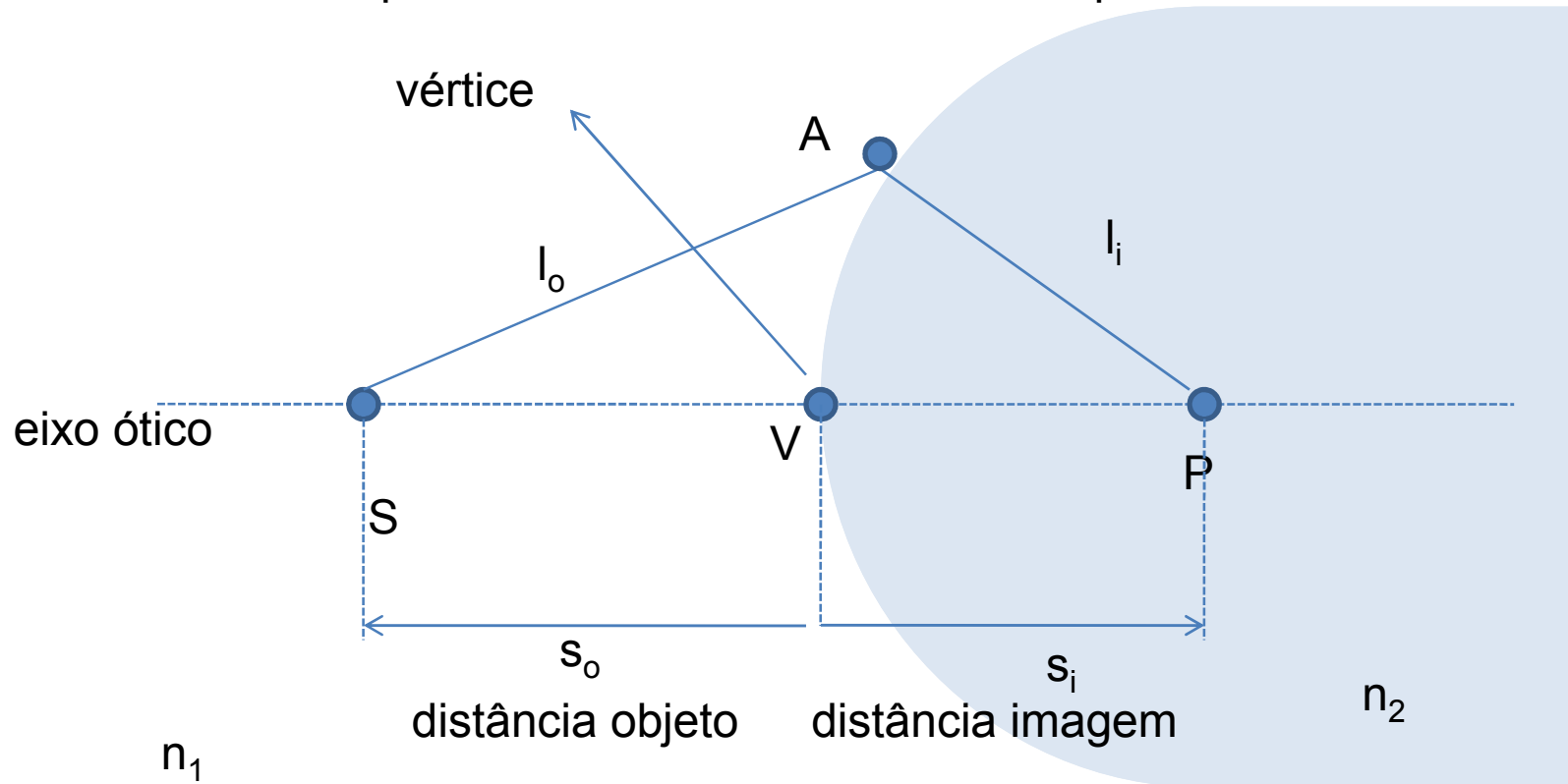
## REFRAÇÃO EM SUPERFÍCIES ESFÉRICAS



Qual é a forma da interface, de modo que a onda no segundo meio, convirja para  $P$ , formando uma imagem perfeita de  $S$  ?

O tempo que cada parte da frente de onda leva de S até P deve ser sempre o mesmo (Huygens, 1678)

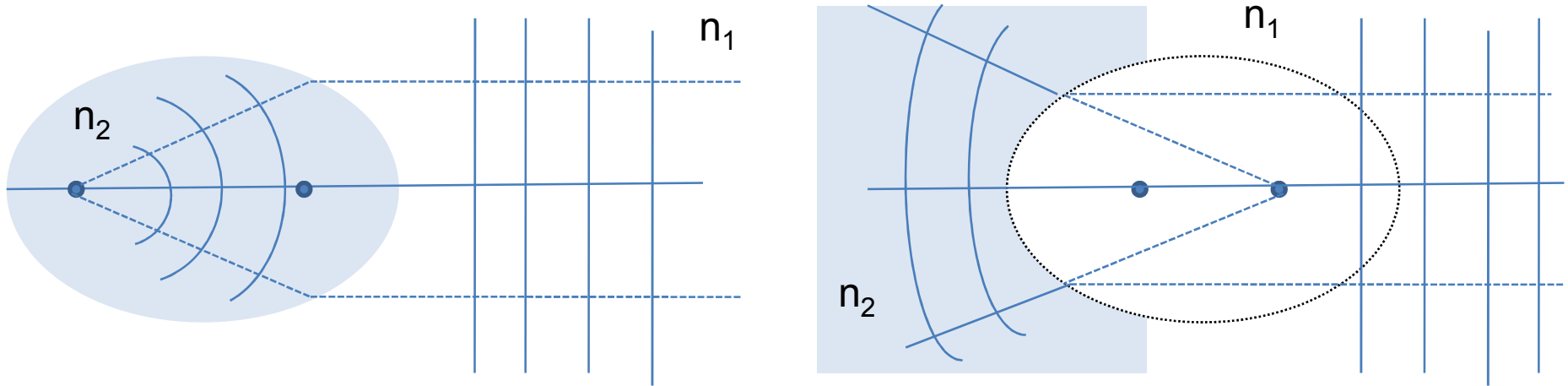
Princípio de Fermat: o percurso óptico medido sobre raios luminosos entre S e P defletidos em pontos A da interface é o mesmo para todos os raios.



$$l_o n_1 + l_i n_2 = s_o n_1 + s_i n_2 = \text{constante}$$

(equação oval de Descartes)

Para além da focalização de ondas esférica, as interfaces refringentes (dióptros), permitem efetuar outros tipos de manipulações a forma das frentes de onda.

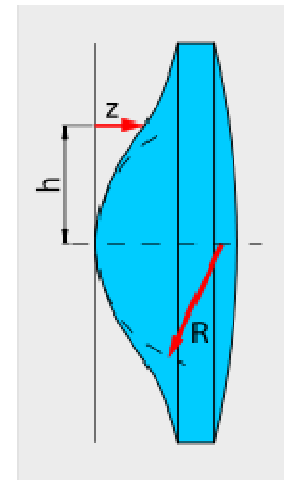


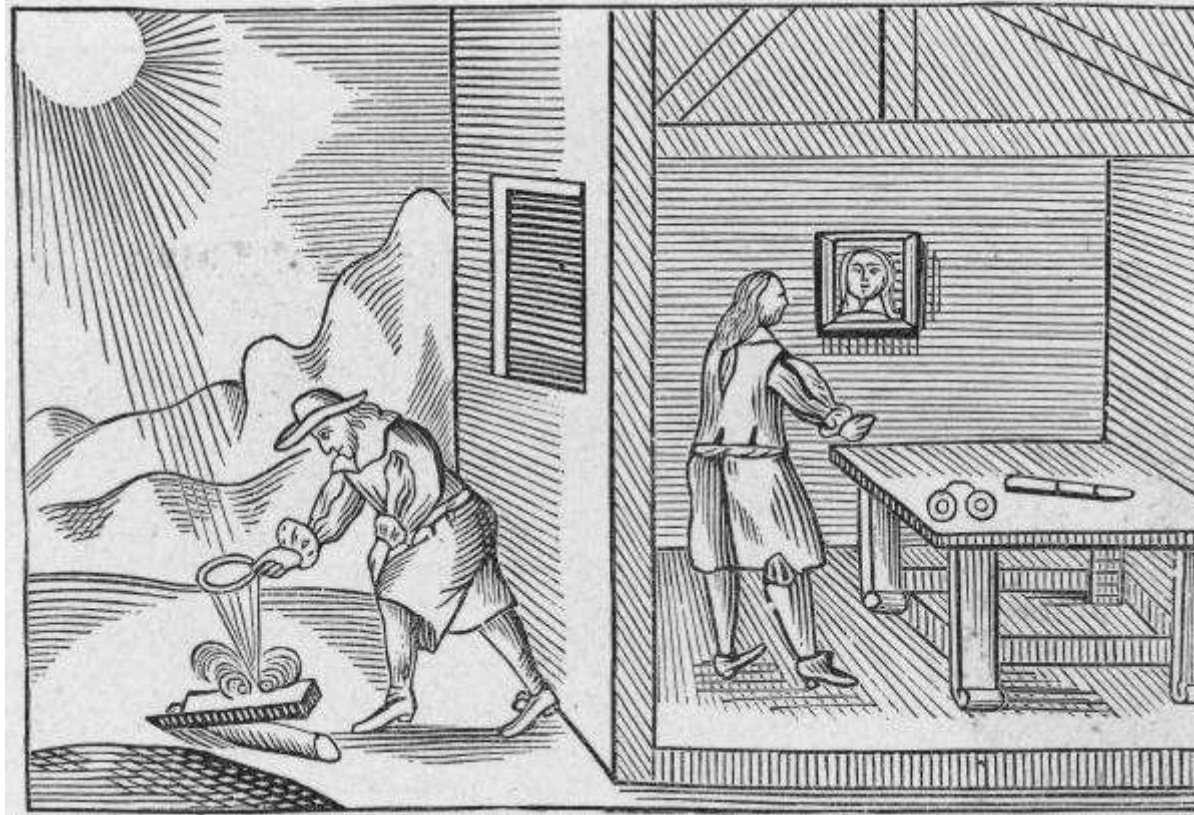
elipsóides

Todas estas considerações foram desenvolvidas por Descartes. Foi Kepler quem sugeriu em 1611 a utilização de seções cônicas para constituição de lentes e espelhos

$$n_2 > n_1$$

Elementos óticos com dioptrios que não são esféricos nem planos, são conhecidos como *asféricos*. Embora o seu funcionamento seja fácil de compreender e realizem muito bem certas funções, as lentes asféricas são bastante difíceis de produzir com precisão; todavia sempre que os custos o justificam as lentes asféricas são utilizadas.







## Lentes esféricas





Vantagens:

Mais fáceis de fabricar do que as lentes esféricas

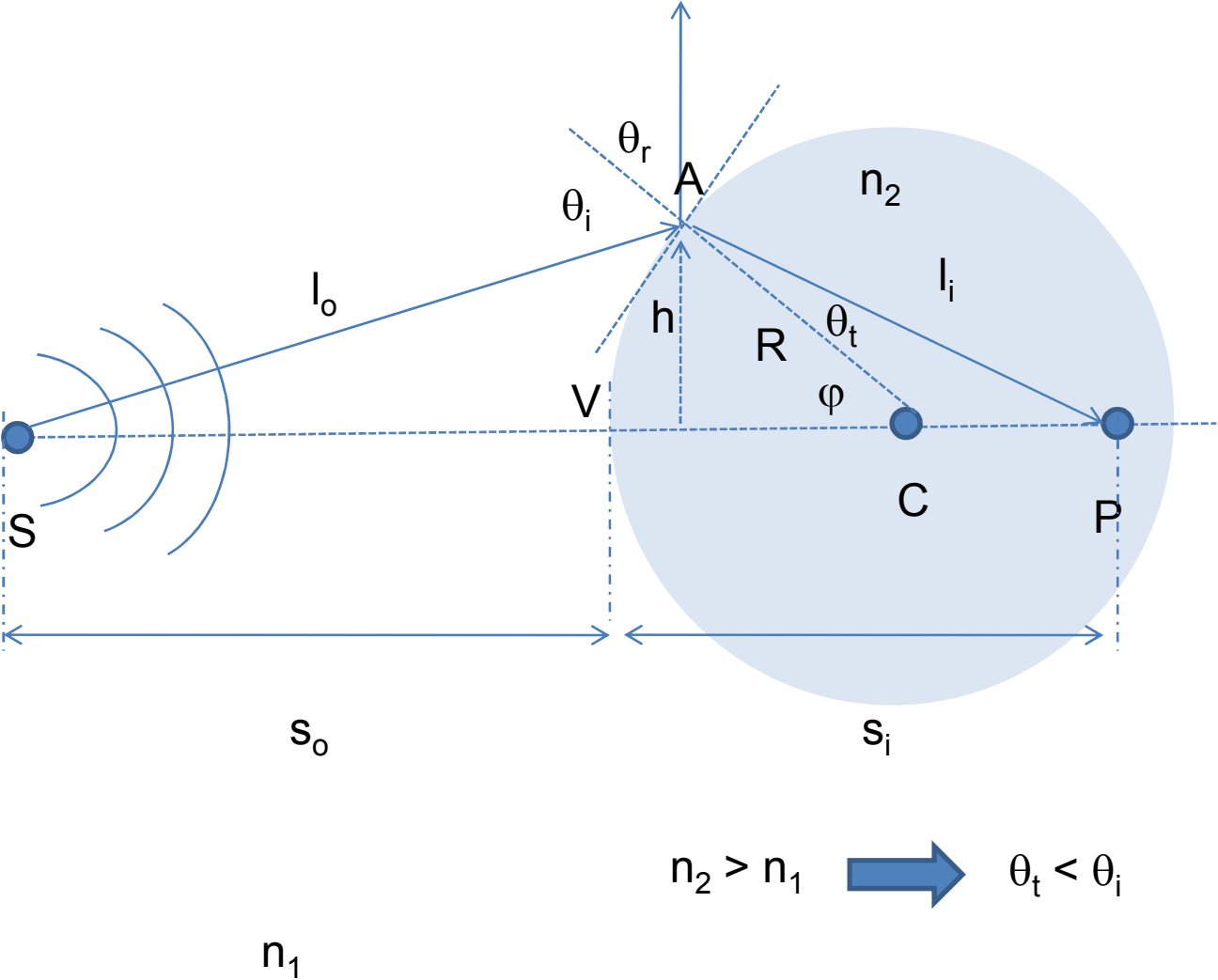


Custo!

Desvantagens:

As aberrações estão sempre presentes, mas já se consegue fabricar Lentes com aberrações controladas ao limite da difração.

Refração num dioptro esférico



## Convenção de sinais para dióptricos esféricos e lentes delgadas

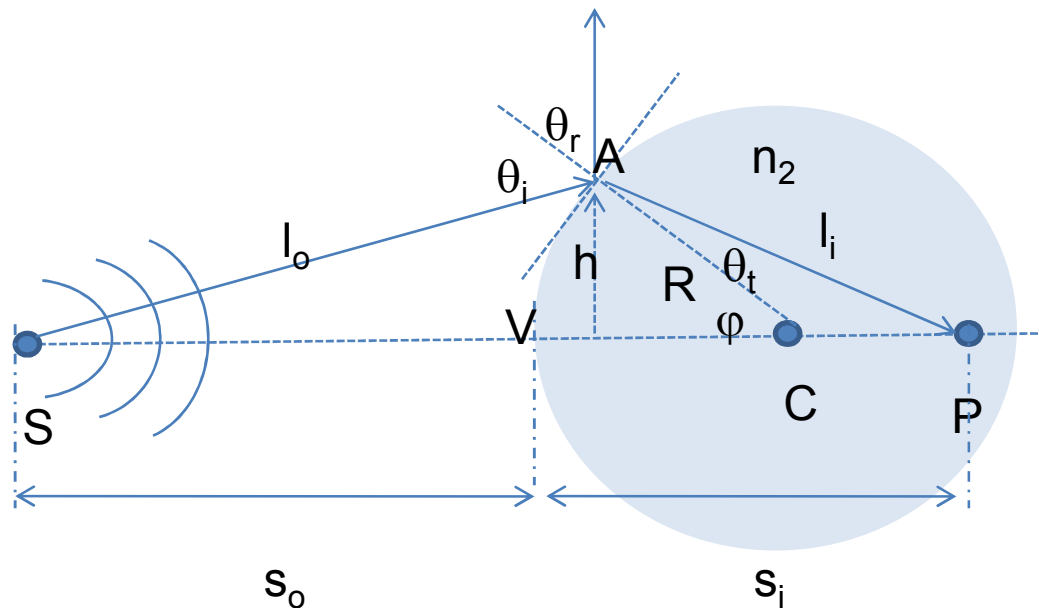
$s_o , f_o$	+ à esquerda de V
$x_o$	+ à esquerda de $F_o$
$s_i , f_i$	+ à direita de V
$x_i$	+ à direita de $F_o$
R	+ se C estiver à direita de V
$Y_o , Y_i$	+ acima do eixo óptico

(inclui grandezas ainda não referidas)

Lei dos co-senos aplicada aos triângulos SAC e ACP e na relação  $\cos\varphi = -\cos(\pi - \varphi)$

$$l_o = \sqrt{R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R)\cos\varphi}$$

$$l_i = \sqrt{R^2 + (s_i - R)^2 - 2R(s_i - R)\cos\varphi}$$



O percurso ótico (PO) é dado por:

$$PO = n_1 l_o + n_2 l_i$$

$$PO = n_1 \sqrt{R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \varphi} + n_2 \sqrt{R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R) \cos \varphi}$$

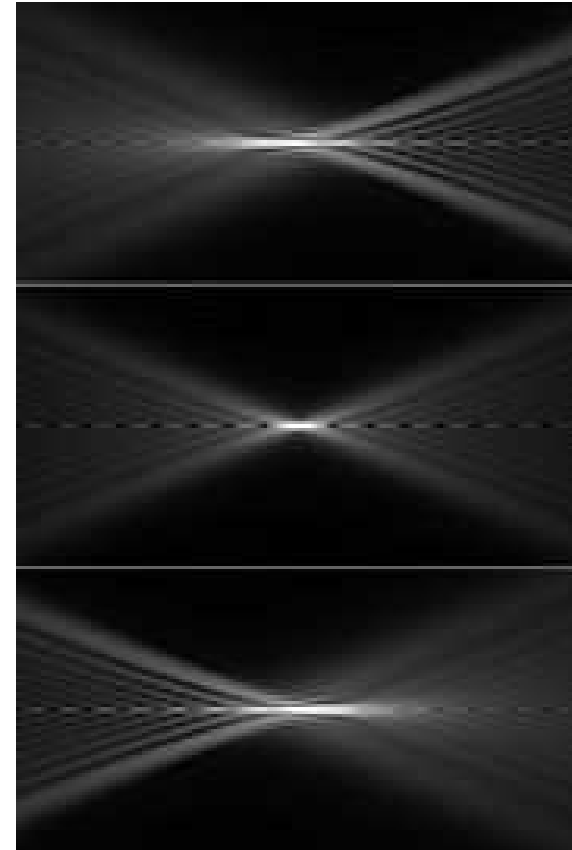
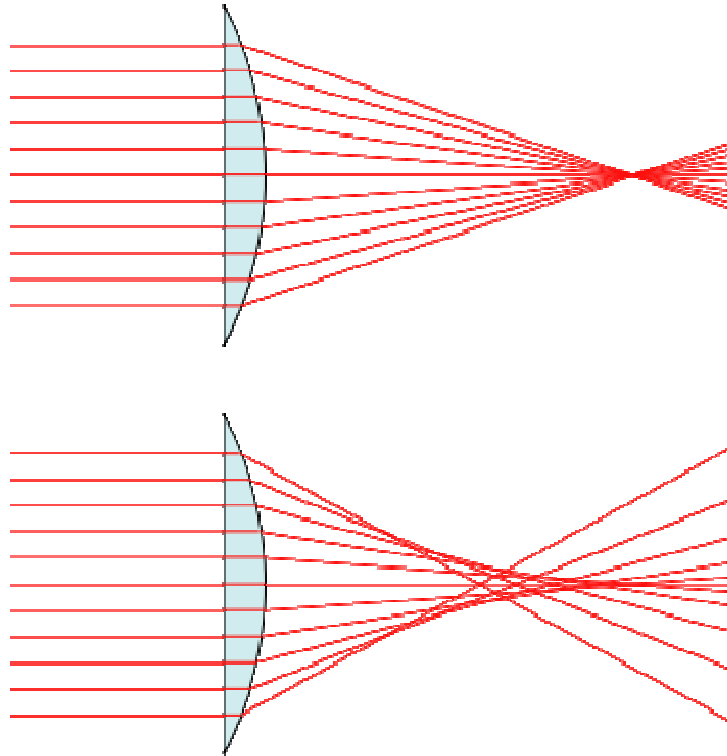
Quando o ponto A se desloca sobre o dióptrico (com  $R = \text{cte}$ ), o ângulo  $\varphi$  pode ser utilizado para parametrizar a posição de A, logo, fazendo  $d(PO)/d\varphi = 0$  (princípio de Fermat):

$$\frac{n_1 R(s_o + R) \sin \varphi}{2l_o} - \frac{n_2 R(s_i - R) \sin \varphi}{2l_i} = 0$$

E após rearranjo...

$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left( \frac{n_2 s_i}{l_i} - \frac{n_1 s_o}{l_o} \right)$$

Variando  $\varphi$ , o novo raio não intercepta o eixo óptico em P – aberração esférica



$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left( \frac{n_2 s_i}{l_i} - \frac{n_1 s_o}{l_o} \right)$$



Quando  $\varphi$  é pequeno,  $\cos\varphi \cong 1$  e  $\text{sen}\varphi \cong \varphi$ , logo

$$l_o = \sqrt{R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R)\cos\varphi} \approx s_o$$

$$l_i = \sqrt{R^2 + (s_i - R)^2 - 2R(s_i - R)\cos\varphi} \approx s_i$$

$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left( \frac{n_2 s_i}{l_i} - \frac{n_1 s_o}{l_o} \right)$$

Simplifica como:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \left( \frac{n_2 - n_1}{R} \right)$$

Esta aproximação de primeira ordem ( $\sin\varphi \cong \varphi$ ) delimita o domínio da ótica geométrica de primeira ordem ou paraxial.

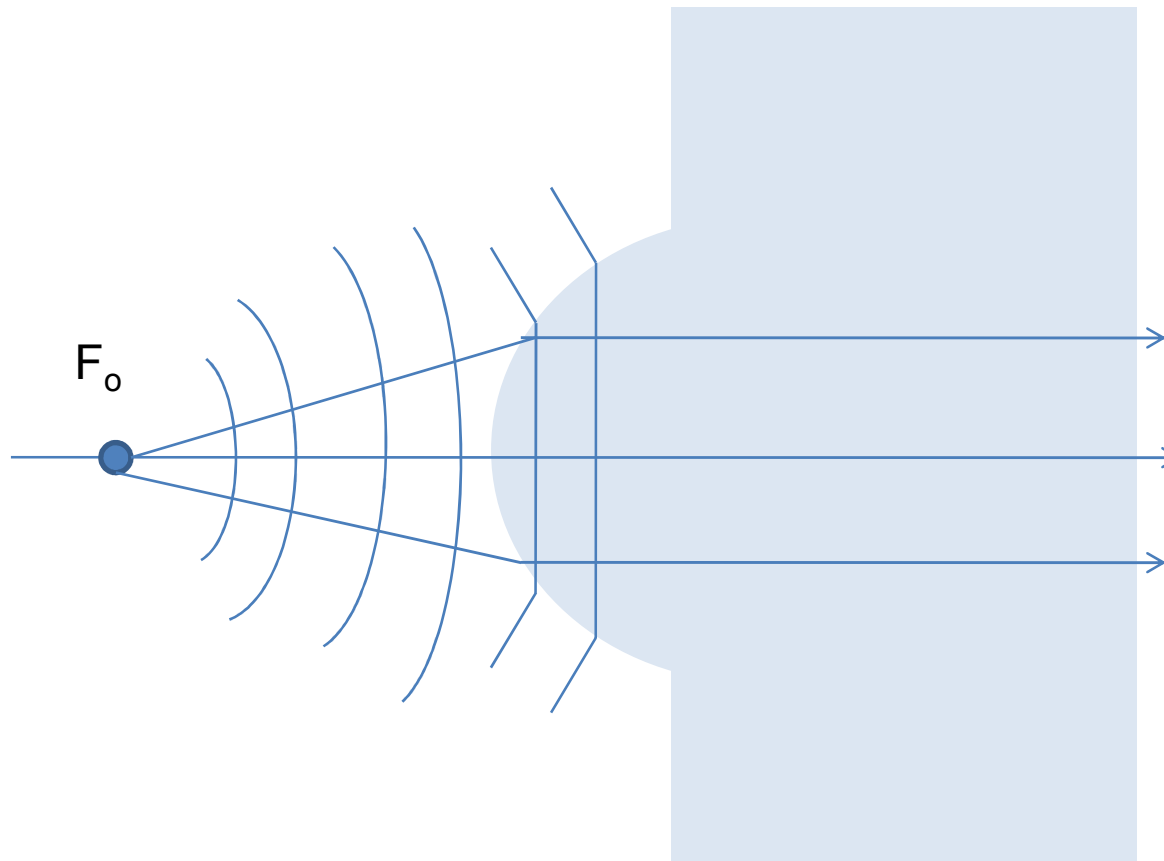
Os raios que se propagam muito próximos ao eixo ótico são designados de raios paraxiais.

A frente de onda emergente associada a estes raios paraxiais é essencialmente esférica e dá origem a uma imagem “perfeita” em P.

Em 1841, Gauss contruiu uma análise da formação de imagens nesta aproximação , e que é conhecida por ótica Gaussiana, paraxial ou de primeira ordem.

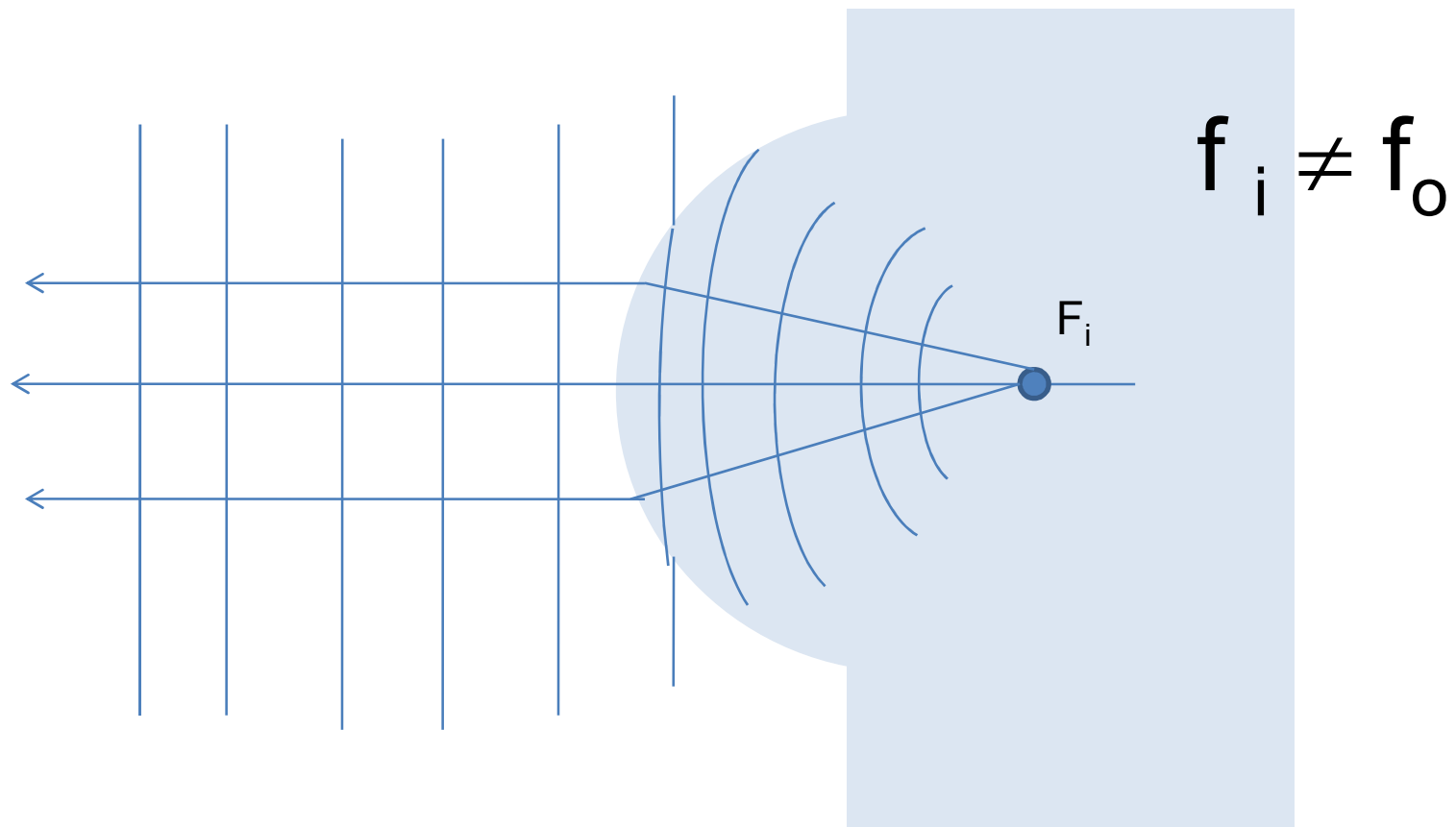
Se a imagem do ponto  $F_o$  se formar no infinito ( $s_i = \infty$ ) então:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{\infty} = \left( \frac{n_2 - n_1}{R} \right) \quad \Rightarrow \quad s_o = f_o = \frac{n_1}{n_2 - n_1} R \quad \text{Distância focal objeto}$$

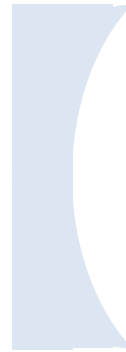
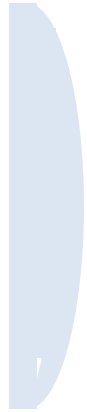


Se a imagem do ponto  $F_i$  se formar no infinito ( $s_o = \infty$ ) então:

$$\frac{n_1}{\infty} + \frac{n_2}{s_i} = \left( \frac{n_2 - n_1}{R} \right) \quad \xrightarrow{s_i = f_i} \quad f_i = \frac{n_2}{n_2 - n_1} R \quad \text{Distância focal imagem}$$



Lentes delgadas



Índice do meio

Índice da lente

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_l}{s_{i1}} = \left( \frac{n_l - n_m}{R_1} \right)$$

Posição do objeto

Posição da imagem

The diagram illustrates the lens equation for a spherical surface. It features the equation  $\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_l}{s_{i1}} = \left( \frac{n_l - n_m}{R_1} \right)$  centered on the page. Four blue arrows point from text labels to specific parts of the equation: 'Índice do meio' points to  $n_m$ , 'Índice da lente' points to  $n_l$ , 'Posição do objeto' points to  $s_{o1}$ , and 'Posição da imagem' points to  $s_{i1}$ .

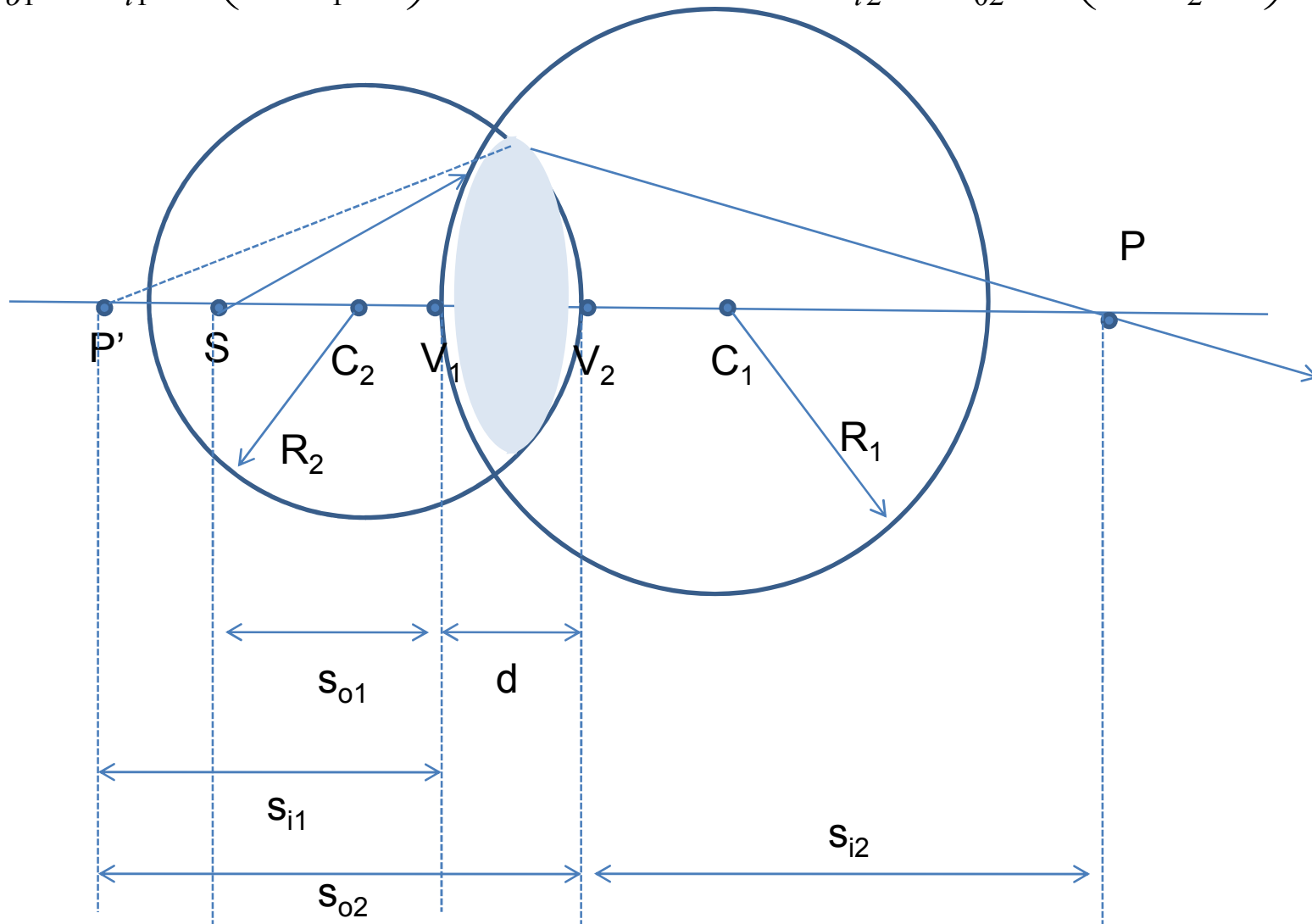
Se  $s_o < f_o$   $s_i$  torna-s negativo (virtual)

Primeiro dióptro

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_l}{s_{i1}} = \left( \frac{n_l - n_m}{R_1} \right)$$

Segundo dióptro

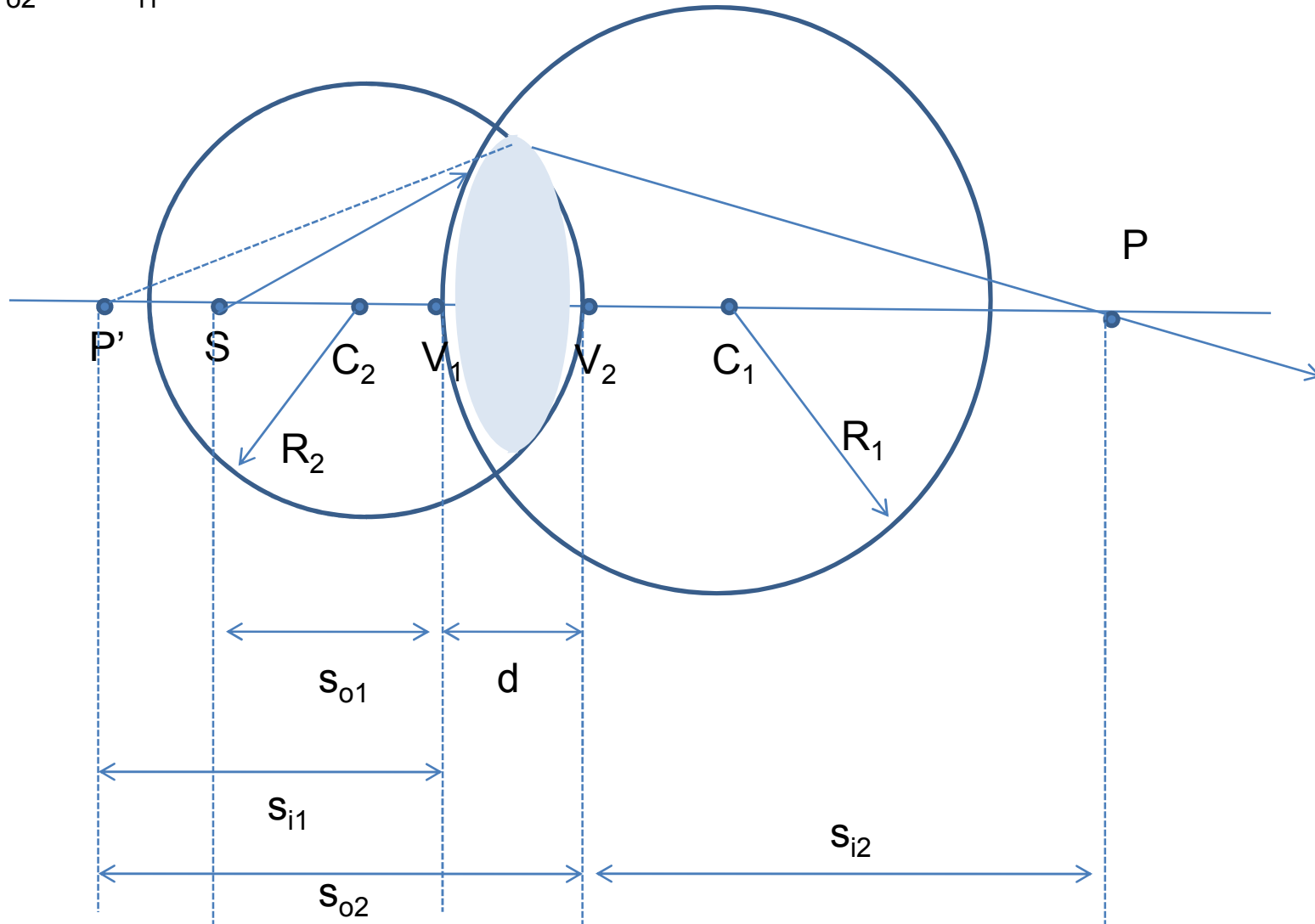
$$\frac{n_m}{s_{i2}} + \frac{n_l}{s_{o2}} = \left( \frac{n_m - n_l}{R_2} \right)$$



$$|s_{o2}| = |s_{i1}| + d$$

Pela convenção de sinais:

$$s_{o2} = -s_{i1} + d$$





Somando as equações para o primeiro e segundo dióptro:

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_m}{s_{i2}} = (n_l - n_m) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_l d}{(s_{i1} - d)s_{i1}}$$

Para lentes delgadas  $d \rightarrow 0$  e o último termo do segundo membro se anula.  
No ar,  $n_m \approx 1$ :

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Equação das lentes delgadas!

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

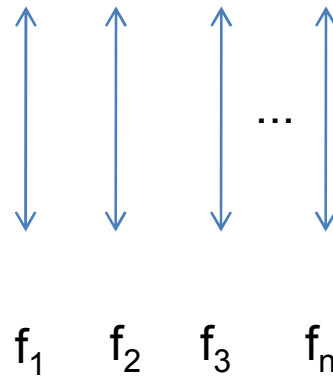
$$\lim_{s_o \rightarrow \infty} s_i = f_i \leftrightarrow \lim_{s_i \rightarrow \infty} s_o = f_o$$

$$f_i = f_o$$

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

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} \quad \leftarrow \text{Fórmula de Gauss}$$

## Associação de lentes delgadas



Distância focal efetiva para lentes em contacto ou coladas

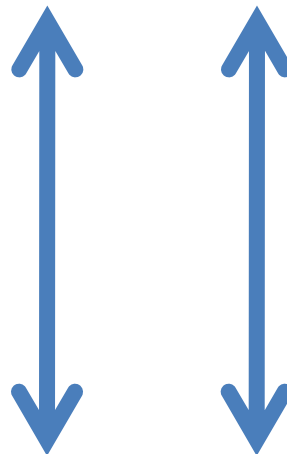
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \dots + \frac{1}{f_n}$$

Potência dióptrica

$$D = 1/f \rightarrow D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n$$

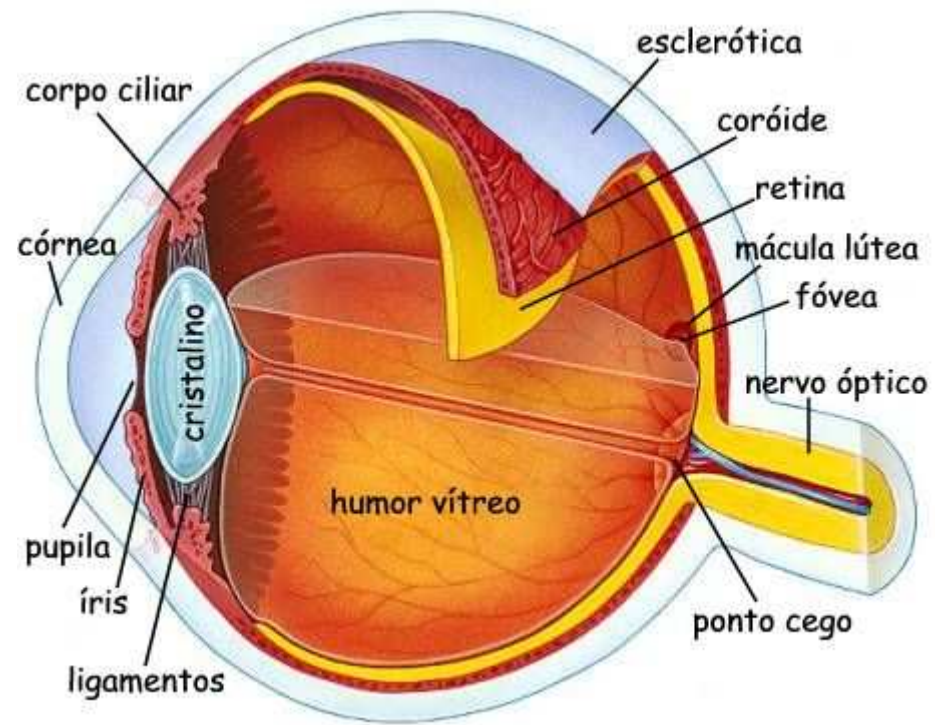
Quando fazemos um feixe de luz atravessar duas lentes consecutivas, temos uma associação de lentes que possui um foco efetivo dado por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$



d

## O olho humano



## Ametropias Oculares

(Ocular Ametopias)

Liliane Ventura e Jarbas C. C. Neto

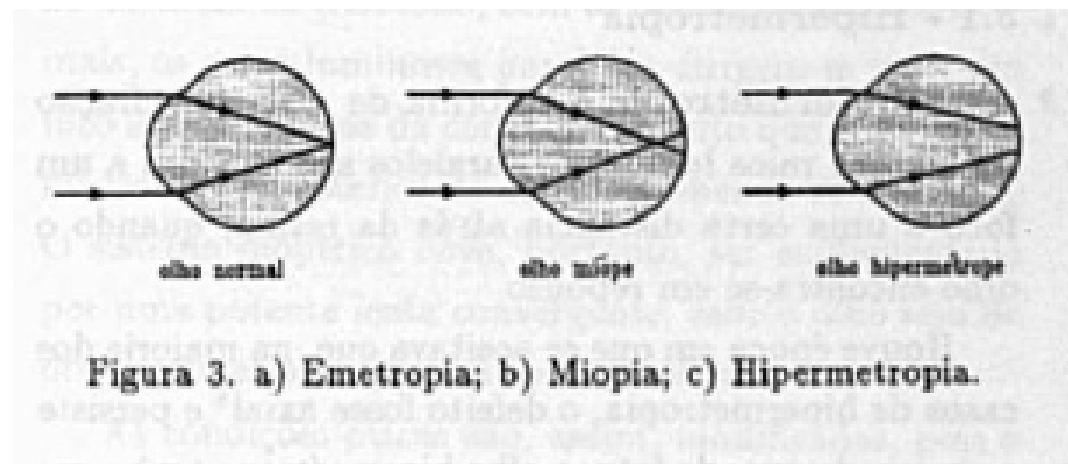
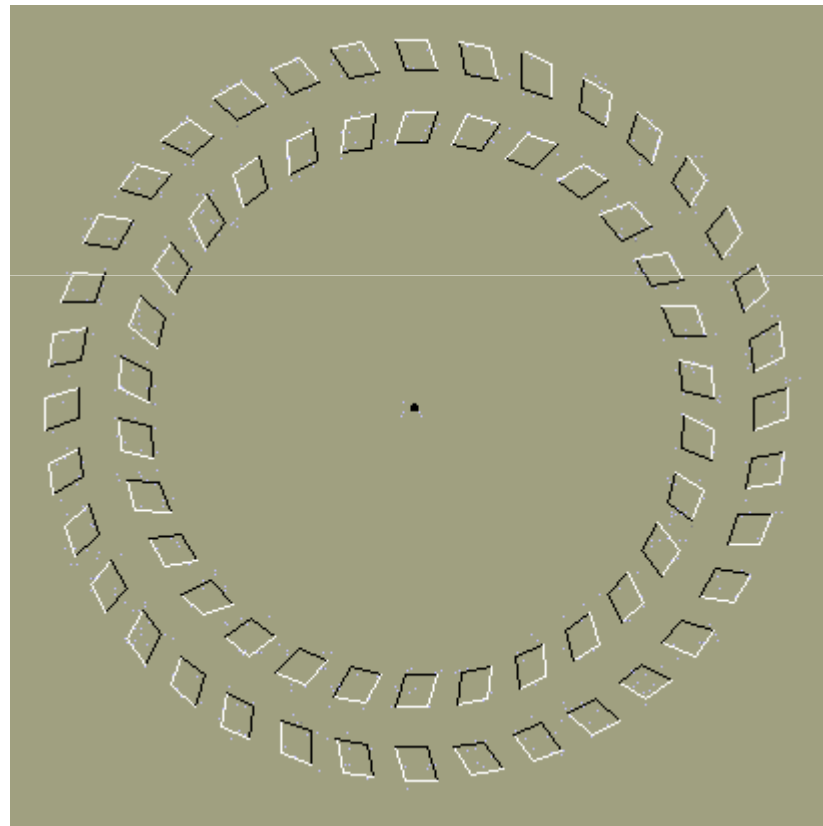


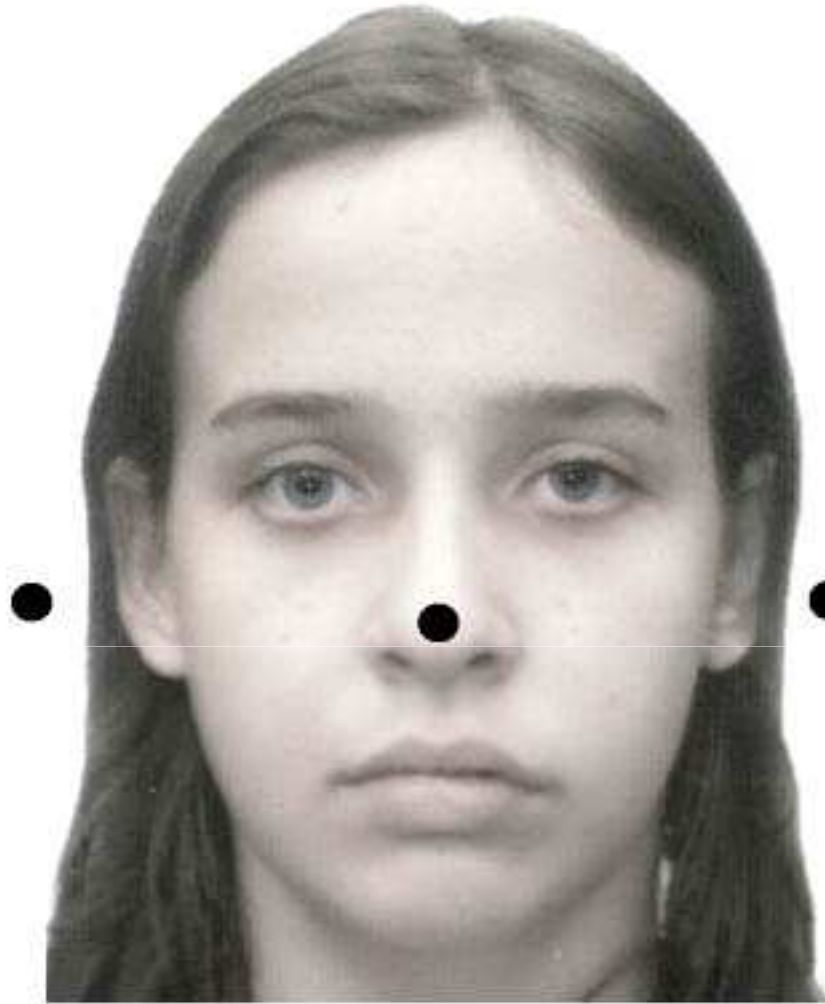
Figura 3. a) Emetropia; b) Miopia; c) Hipermetropia.

☞ O **astigmatismo**, por sua vez, é um defeito da visão geralmente devido à não esfericidade da superfície da córnea; o raio de curvatura dessa superfície não é o mesmo em todos os meridianos - assemelha-se a uma bola de futebol americano (elipsóide), onde os meridianos de maior e menor curvaturas estão a  $90^\circ$ . O astigmatismo faz com que seja impossível, por exemplo, focalizar simultaneamente as barras horizontais e verticais de uma janela.

A zona de junção do nervo ótico com o olho é insensível à luz pois não contém qualquer célula receptora; tem o nome de ponto cego.







SIMAS, Maria Lúcia de Bustamante;  
SANTOS, Natanael Antonio dos. O  
fenômeno de muitas-faces: investigações  
preliminares. **Psicol. Reflex. Crit.**, Porto  
Alegre, v. 18, n. 1, Apr. 2005 .

*Figura 1.* Exemplo de face-estímulo para investigação do fenômeno de muitas-faces no ponto cego. Para ver o fenômeno, feche o olho direito e focalize o ponto preto à direita da imagem. Varie a distância (no máximo a 30cm) e pare quando o ponto do nariz desaparecer. Mantenha a fixação e veja o efeito. Faça o oposto para observar com o olho esquerdo.

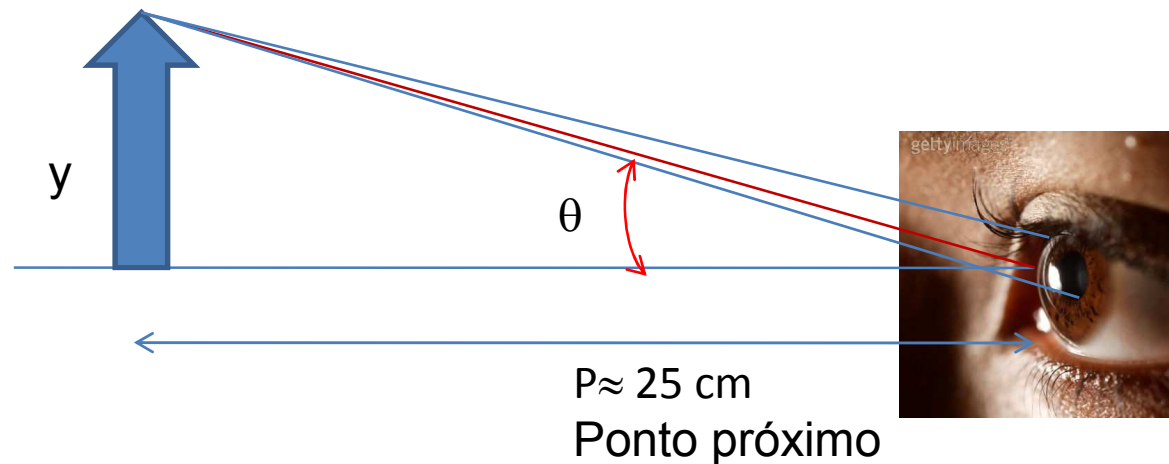
O ponto mais afastado para o qual é possível a visão distinta é chamado **ponto remoto**

A distância mínima de visão distinta é dada pelo **ponto próximo**.

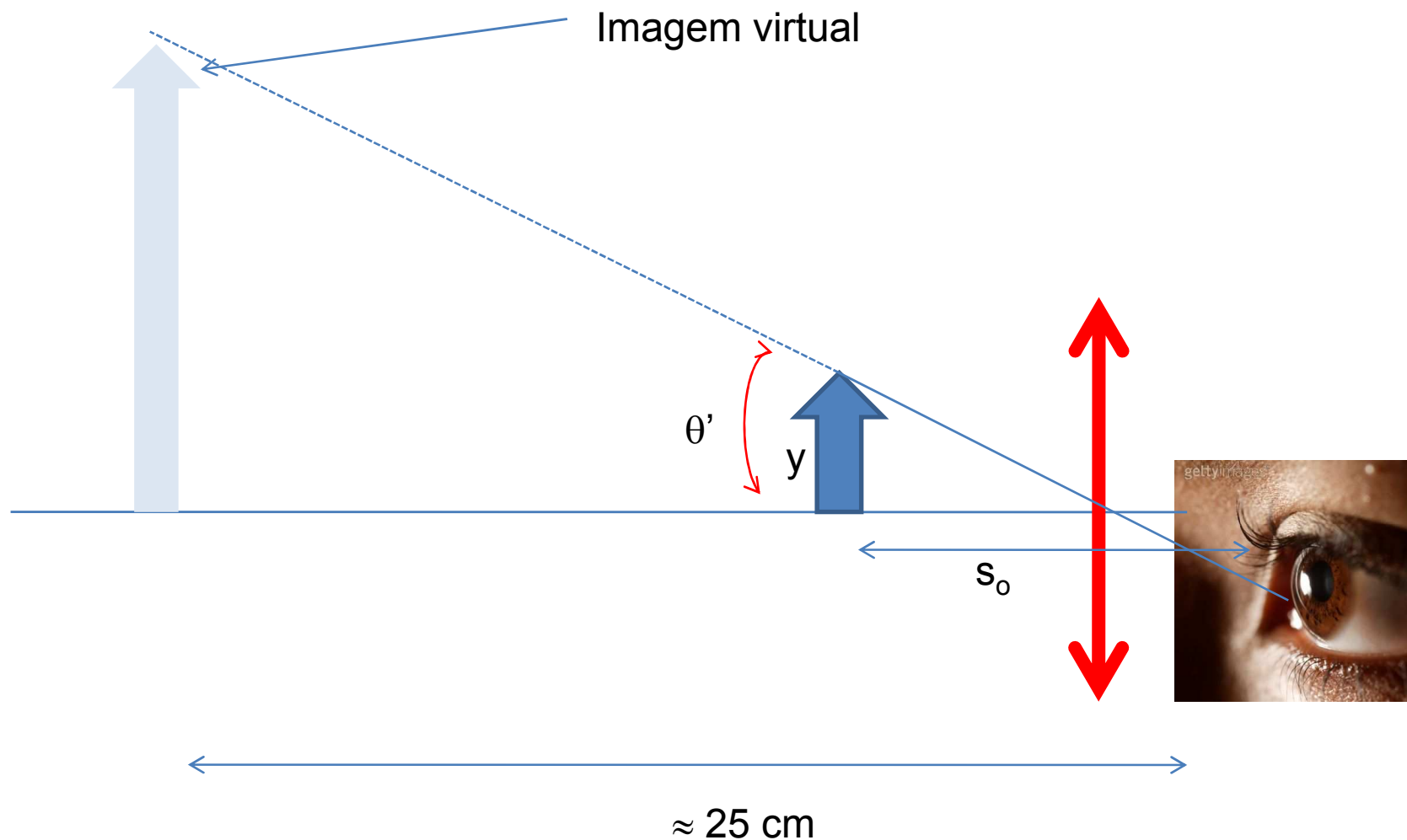
Idade (anos)	Ponto próximo (cm)
10	7
20	10
30	14
40	22
50	40
60	200

## A lupa, microscópio simples ou lente de aumento

O tamanho aparente de um objeto é determinado pelo tamanho de sua imagem na retina, o qual, por sua vez, a olho nú, depende do ângulo subtendido pelo objeto.



Quando se quer examinar detalhadamente um objeto diminuto, coloca-se o mesmo próximo ao olho, afim de que o ângulo subtendido seja o maior possível.



Colocando uma lente convergente em frente à vista, a acomodação pode ser aumentada; o objeto fica, então, situado aquém do ponto próximo, e subtende, portanto, um ângulo maior.

O aumento  $M$  da lupa (que não deve ser confundido com amplificação) é definido como a relação entre os ângulos  $\theta'$  e  $\theta$ :

$$\theta \approx y/25$$

$$\text{Usando } 1/s_o + 1/s_i = 1/f \quad s_i = -25 \text{ cm}$$

$$s_o = 25f/(25 + f)$$

$$\theta' \approx y/s_o$$

$$M = \theta' / \theta = (25/f) + 1$$

Se a imagem é formada no infinito ( $s_i = \infty$ ),  $s_o = f$

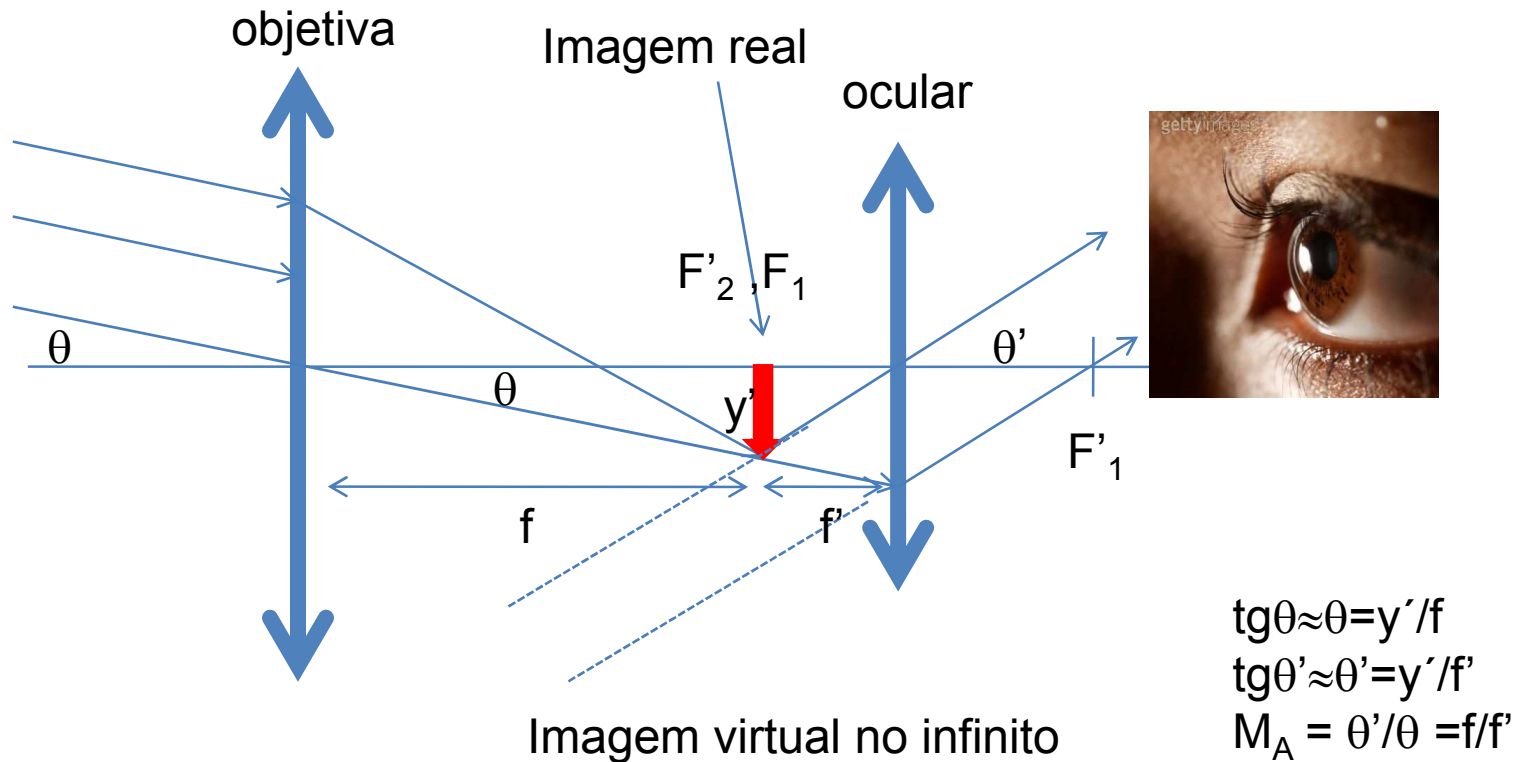
$$M = 25/f$$

## O telescópio

Não se sabe ao certo a quem se deve a invenção do telescópio- foi provavelmente inventado e reinventado várias vezes.

## O telescópio (luneta astronômica)

A luneta astronômica é usada na observação de objetos distantes, que são grandes mas nos parecem pequenos por estarem muito distantes de nós. Na sua forma mais simples é, como o microscópio, constituída por um tubo com uma lente em cada extremidade.



Na prática a posição da imagem intermediária é fixa e a focagem se faz por deslocamento da ocular

## Abordando o ensino de óptica através da construção de telescópios *(Optics teaching through telescope construction)*

Tamara O. Bernardes, Rafael R. Barbosa, Gustavo Iachel, Augusto Batagin Neto,  
Marco A.L. Pinheiro e Rosa M. Fernandes Scalvi<sup>1</sup>



Figura 8 - Foto da Lua obtida com o telescópio construído.

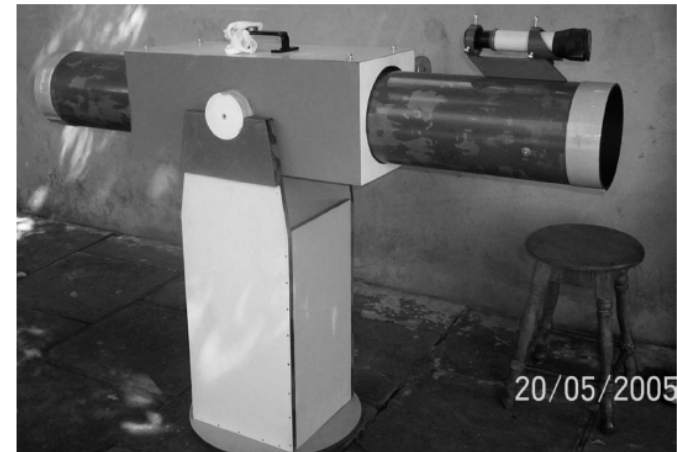


Figura 7 - Telescópio Newtoniano construído pelos alunos de Licenciatura em Física.