



Universidade Federal do ABC

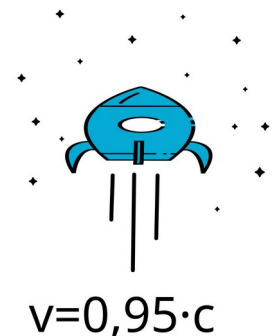
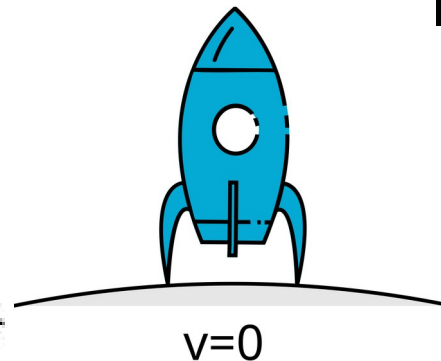
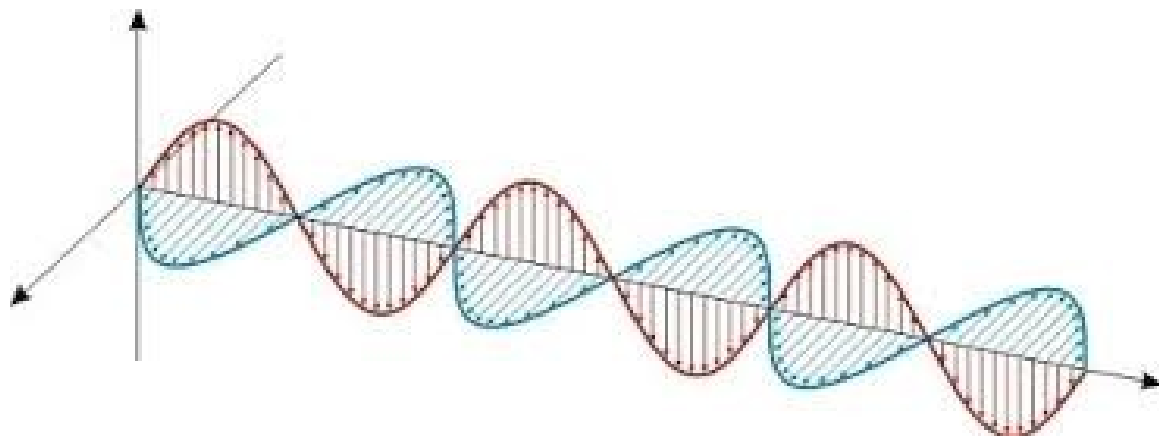
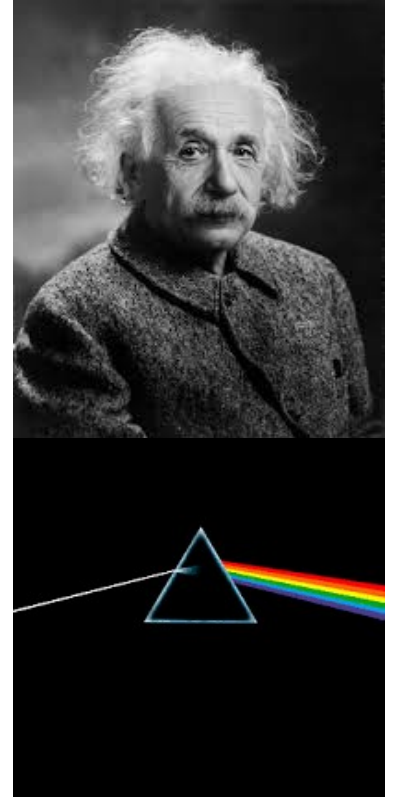
Ótica e Relatividade

04. Instrumentos Óticos Simples: Lentes

Prof. Pieter Westera

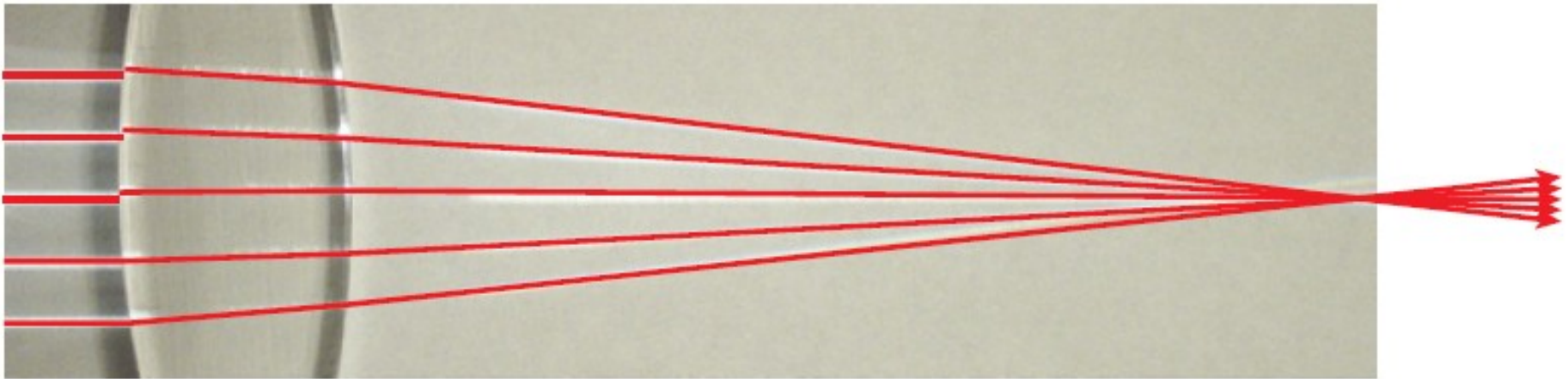
pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/OtRel.html>



Lentes Delgadas

Lentes



Enquanto espelhos se baseiam na reflexão, **lentes** se usam da **refração**.

A lente consiste de **material** (por exemplo vidro) com **índice refratário diferente** que o **meio**, por aquele a luz propaga **antes** e **depois** de passar pela lente (i.e. ar). Assim, a luz é **refratada entrando** e **saindo** da lente.

Lentes Delgadas

Alqumas Geometrias Possíveis de Lentes



Convergente
(biconvexa)



Divergente
(bicôncava)



Menisco
convergente
(côncavo-
convexa*)



Menisco
divergente
(convexo-
côncava*)



Plana
convergente
(plano-
convexa*)



Plana
divergente
(plano-
côncava*)

*O primeiro nome da lente é definido pela face de maior curvatura.

Lentes Delgadas

Calculando a Distância Focal (lente biconvexa)
=> Determinação da Equação da Lente

Igual como para os espelhos vamos supor:

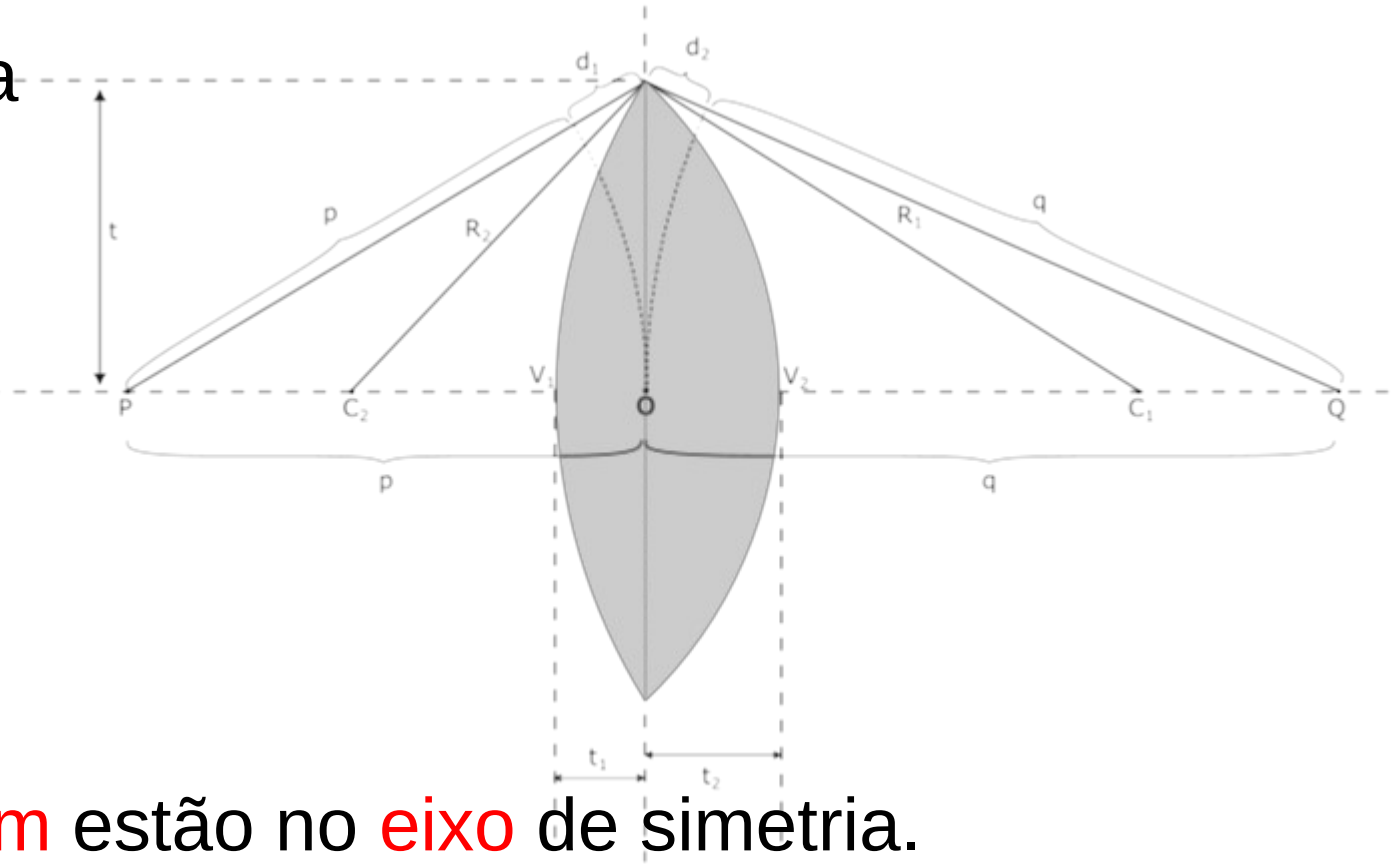
As **superfícies curvas**

são partes pequenas de superfícies

esféricas.

Objeto e imagem estão no **eixo** de simetria.

E a lente é **delgada**, i.e., sua **espessura** é **muito menor** que as demais **grandezas** consideradas no problema.



Lentes Delgadas

Determinação da Equação da Lente

Dando nomes:

Distância

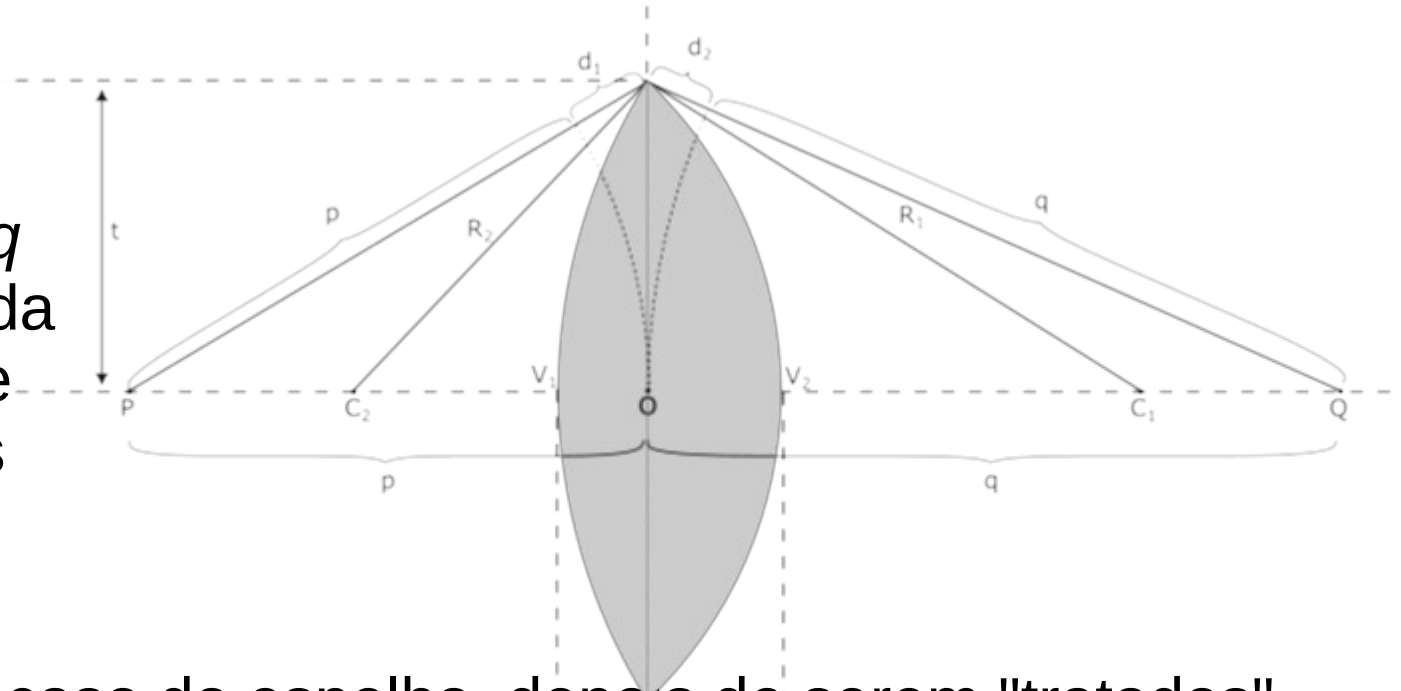
objeto-lente: p

" lente-imagem: q

raio de curvatura da
primeira superfície

atravessada pelos
raios de luz R_1

" 2ª " : R_2



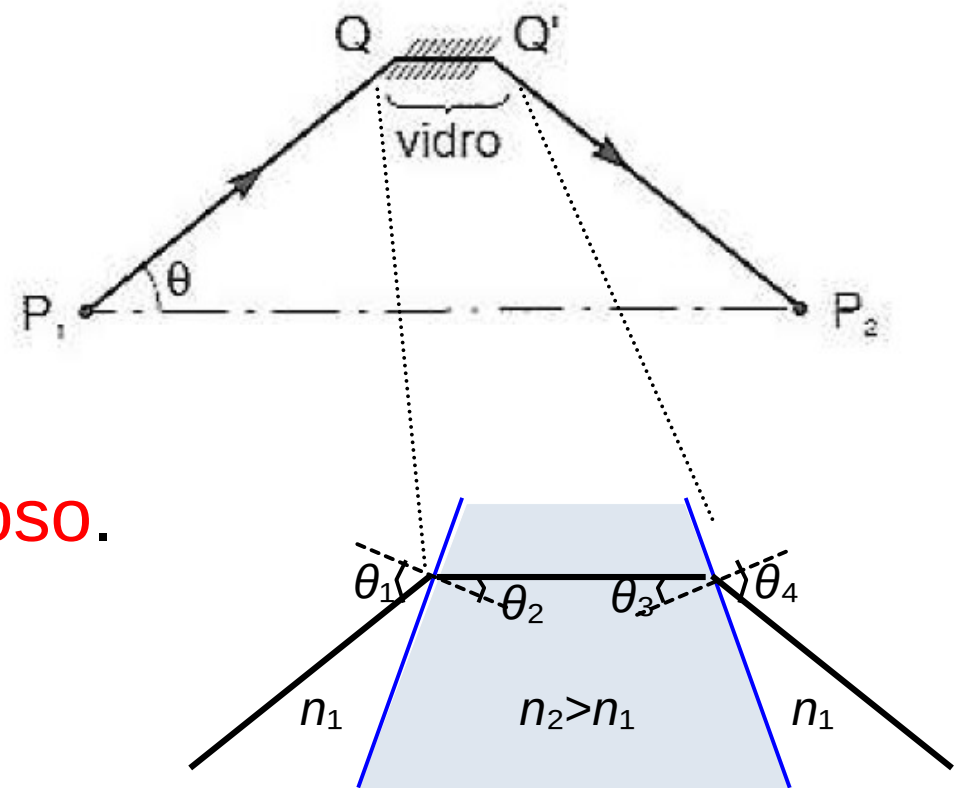
!!! Ao contrário do caso do espelho, depois de serem "tratados" pelo elemento óptico, os raios saem do lado oposto que o objeto, e definimos q , R_1 e R_2 como positivos deste lado (aqui a direita, tal que $q > 0$, $R_1 > 0$ e $R_2 < 0$), mas p como positivo do lado "de entrada" (aqui a esquerda; Obviamente, p é sempre positiva).

Lentes Delgadas

Determinação da Equação da Lente

Poderíamos proceder de forma similar ao que fizemos pros espelhos: aplicar a **lei da refração** para **cada interface**, 2 vezes para cada raio, e calcular, onde os raios de luz cruzam o eixo.

Dá certo, mas é muito **trabalhoso**.



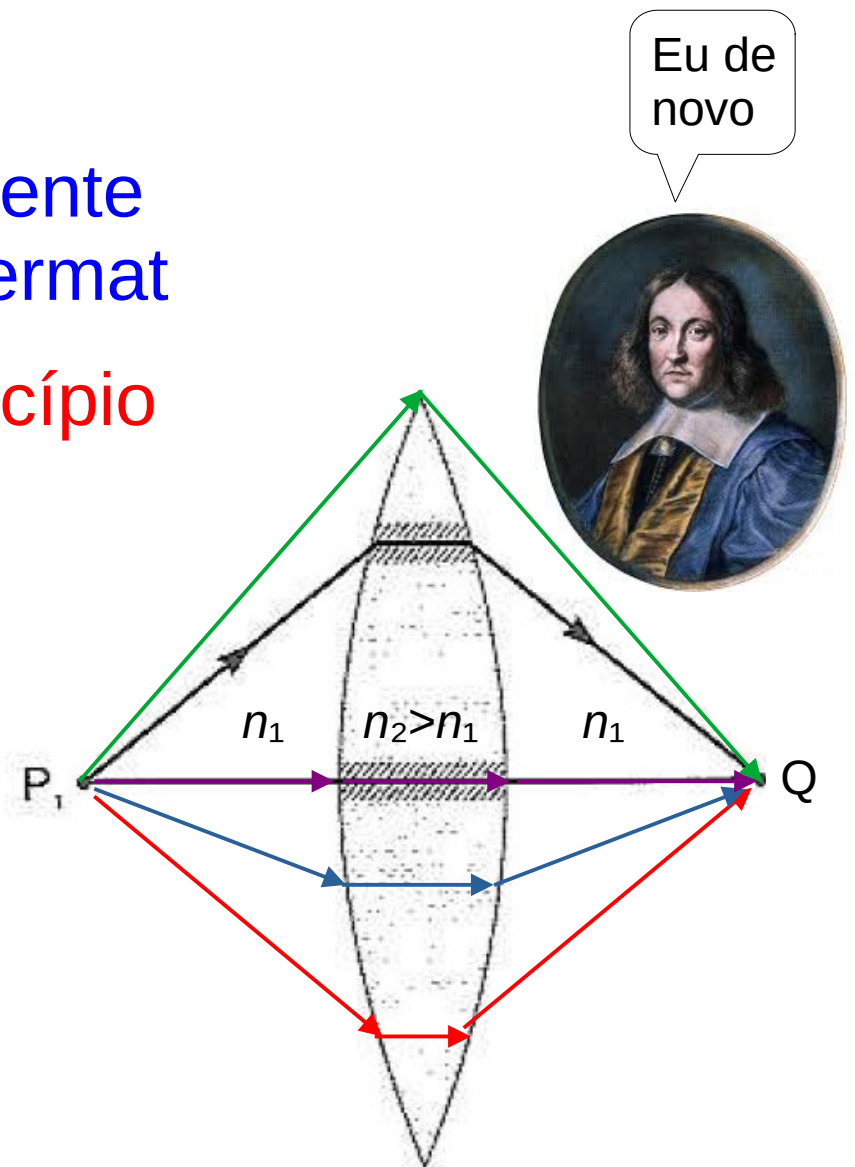
Lentes Delgadas

Determinação da Equação da Lente Abordagem pelo Princípio de Fermat

Em lugar disso usaremos o **princípio de Fermat** para achar a relação $p-R_1-R_2-q$.

Neste caso, o princípio de Fermat afirma que, para ter uma imagem bem **focalizada**, **todos os raios** de P_1 a Q devem percorrer o **mesmo caminho ótico** (Senão apenas o(s) mais curto(s) se realizaria(m)).

Dois raios, cujos caminhos óticos são fáceis de calcular são o **que segue o eixo** e o que **passa pela borda** da lente.



Lentes Delgadas

Determinação da Equação da Lente Abordagem pelo Princípio de Fermat

Aqui são os
caminhos
PAQ e POQ.

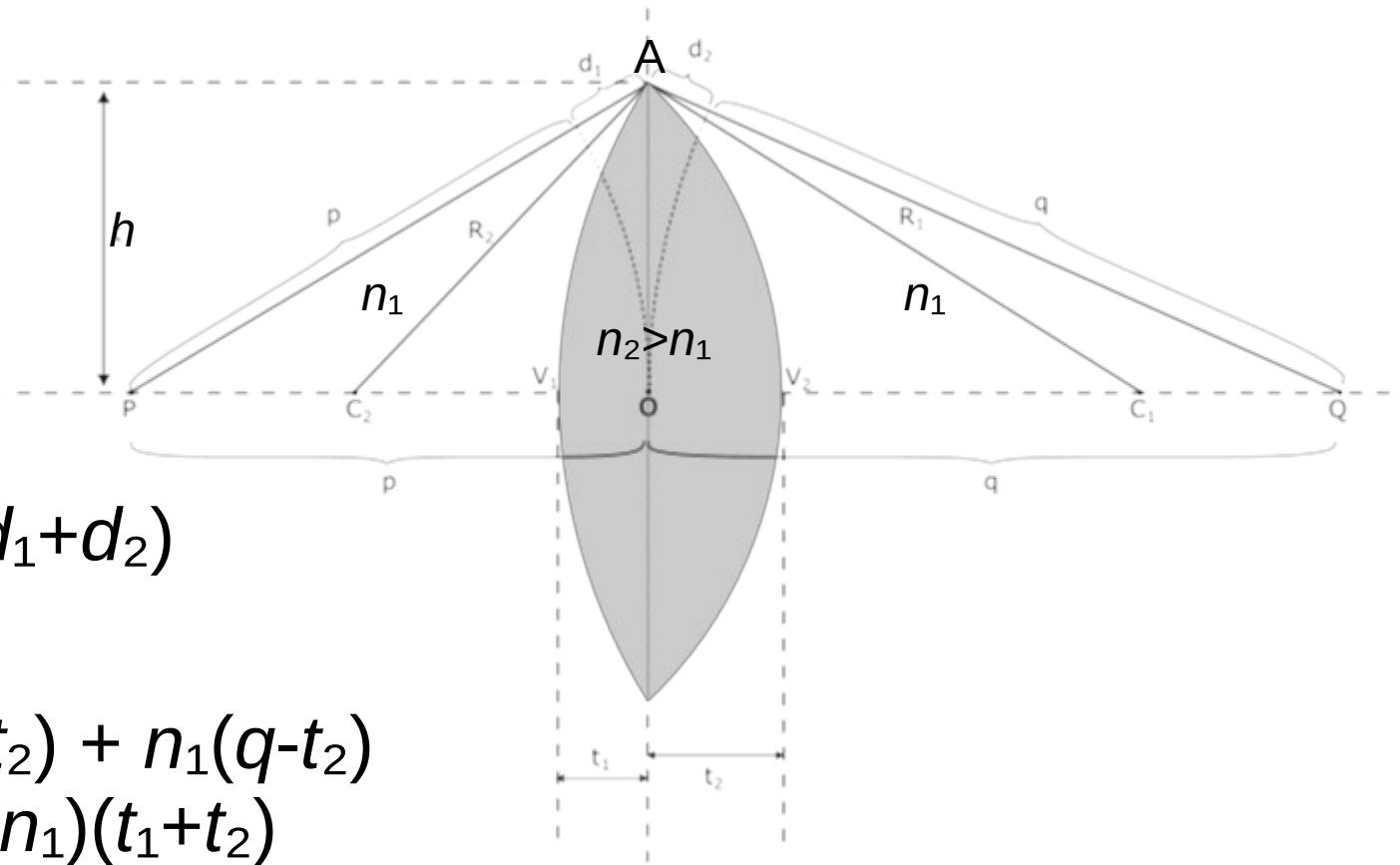
c.o. de PAQ:

$$n_1(p+d_1+d_2+q) \\ = n_1(p+q) + n_1(d_1+d_2)$$

de POQ:

$$n_1(p-t_1) + n_2(t_1+t_2) + n_1(q-t_2) \\ = n_1(p+q) + (n_2-n_1)(t_1+t_2)$$

Se os dois têm o mesmo c.o.: $n_1(d_1+d_2) = (n_2-n_1)(t_1+t_2)$



Lentes Delgadas

Determinação da Equação da Lente Abordagem pelo Princípio de Fermat

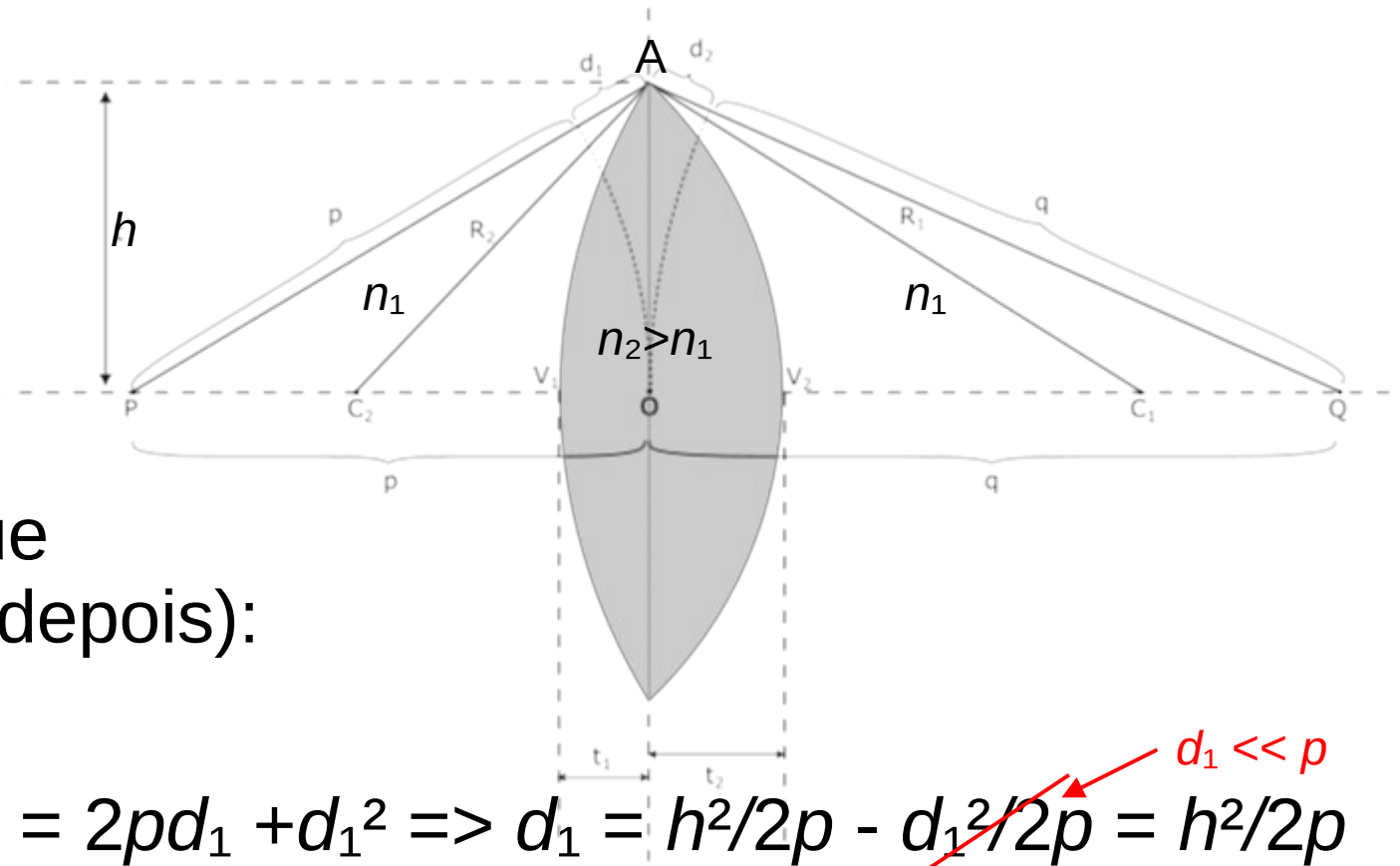
$$n_1(d_1+d_2) = (n_2-n_1)(t_1+t_2)$$

precisamos
de d_1 , d_2 , t_1 e t_2
em função de
 R_1 e R_2 (e h , que
será eliminado depois):

ΔAOP :

$$h^2 = (p+d_1)^2 - p^2 = 2pd_1 + d_1^2 \Rightarrow d_1 = h^2/2p - \cancel{d_1^2/2p} = h^2/2p$$

analogicamente (ΔAOQ): $d_2 = h^2/2q$



$d_1 \ll p$

Lentes Delgadas

Determinação da Equação da Lente Abordagem pelo Princípio de Fermat

$$n_1(d_1+d_2) = (n_2-n_1)(t_1+t_2) \quad (1),$$

$$d_1 = h^2/2p \quad (2),$$

$$d_2 = h^2/2q \quad (3)$$

ΔAOC_1 :

$$h^2 = R_1^2 - (R_1-t_1)^2 = 2R_1t_1 - t_1^2$$

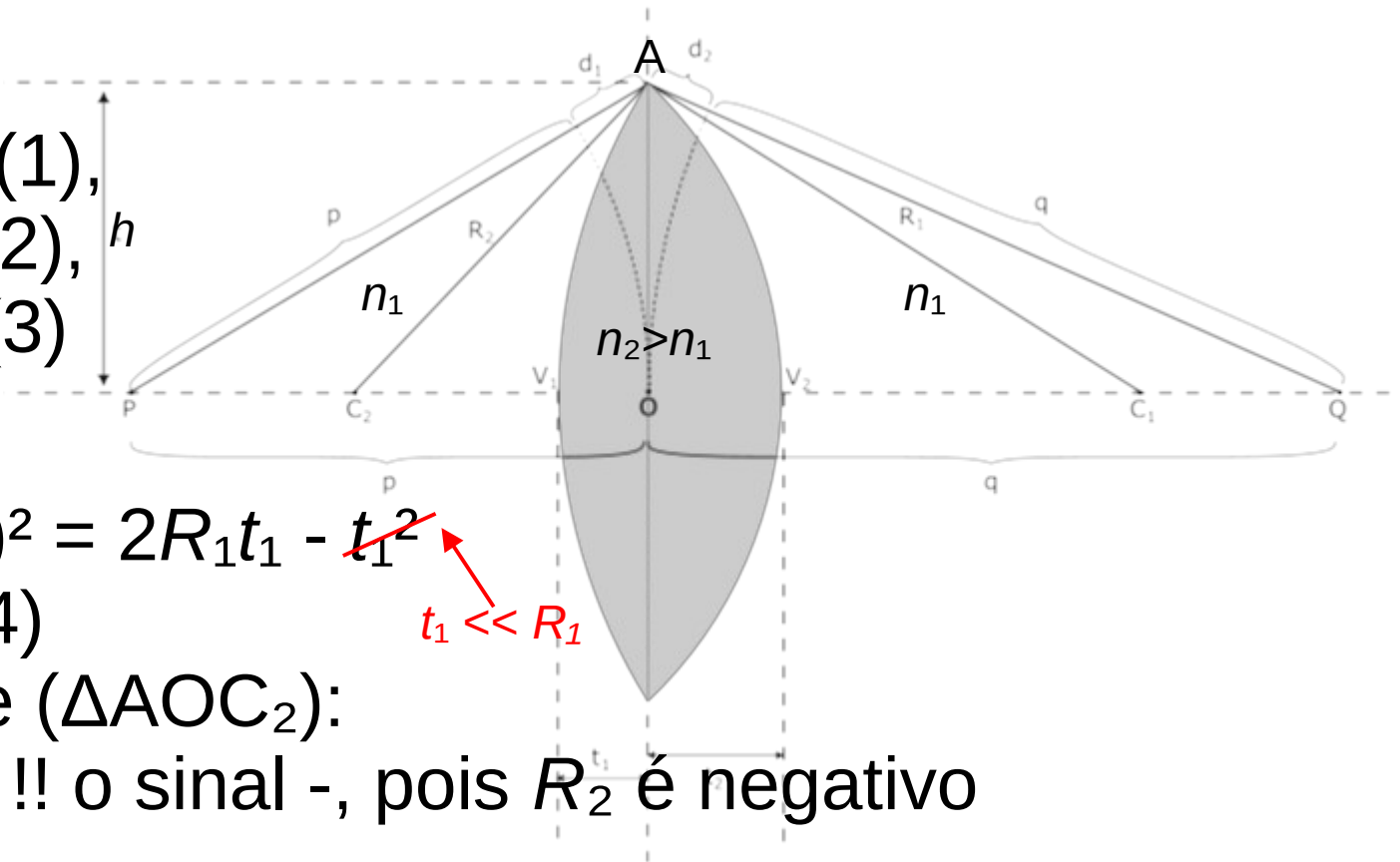
$$\Rightarrow t_1 = h^2/2R_1 \quad (4)$$

analogicamente (ΔAOC_2):

$$t_2 = -h^2/2R_2 \quad (5) \quad !! \text{ o sinal } -, \text{ pois } R_2 \text{ é negativo}$$

Substituindo (2) a (5) em (1):

$$n_1 \cdot \cancel{h^2/2} \cdot (1/q+1/p) = (n_2-n_1) \cdot \cancel{h^2/2} \cdot (1/R_1-1/R_2)$$



Lentes Delgadas

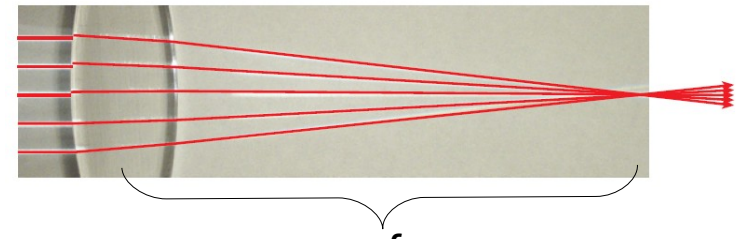
Determinação da Equação da Lente Abordagem pelo Princípio de Fermat

$$n_1 \cdot (1/q + 1/p) = (n_2 - n_1) \cdot (1/R_1 - 1/R_2)$$

Dividindo por n_1 e lembrando que $n_{12} = n_2/n_1$ obtemos a **equação das lentes delgadas**:

$$1/q + 1/p = (n_{12} - 1) \cdot (1/R_1 - 1/R_2) = 1/f,$$

onde f é a **distância focal** da lente.



f é **positiva**, caso o **foco** fica do **lado oposto** do **objeto**, caso para lentes **convergentes**, a **imagem** fica **real**, e **negativa** para lentes **divergentes** (foco do lado do **objeto**, imagem **virtual**; => jájá).

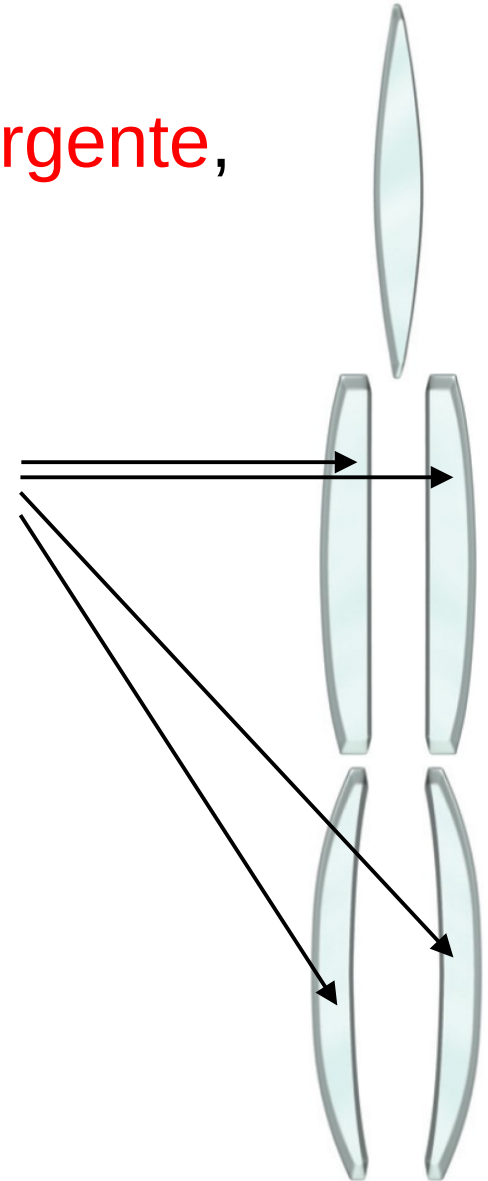
Para lentes no **vácuo** ou no **ar**: $n_1 = 1 \Rightarrow n_{12} = n_2$

Lentes Delgadas

Lentes Convergentes

Obviamente, uma lente **biconvexa** é **convergente**, já que, para esta,
 $R_1 > 0$ e $R_2 < 0 \Rightarrow (1/R_1 - 1/R_2) > 0$.

Não é difícil ver, que para lentes destas formas (basicamente lentes que são **mais grossas** no **meio** do que nas **bordas**)
 $(1/R_1 - 1/R_2)$ também é > 0 .
(Bom exercício para casa)
 \Rightarrow Elas também são **convergentes**.



Lentes Delgadas

Lentes Convergentes

No caso de uma lente **convergente**,
trocando objeto e imagem:

$$p \rightarrow q, q \rightarrow p$$

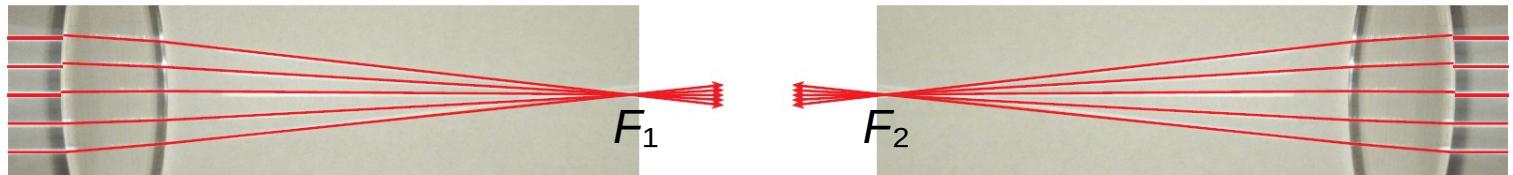
Os **raios de curvatura** das **superfícies** da lente **trocam de sinal**, mas elas também trocam de **papel**:

$$R_1 \rightarrow -R_2, R_2 \rightarrow -R_1$$

=> A **equação da lente** vira:

$$1/p + 1/q = (n_{12} - 1) \cdot (1/(-R_2) - 1/(-R_1)) = (n_{12} - 1) \cdot (1/R_1 - 1/R_2) = 1/f$$

A lente é **convergente** com a **mesma distância focal** dos **dois lados**.



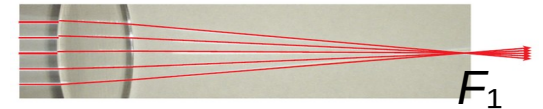
Lentes Delgadas

Lentes Convergentes

$$1/q + 1/p = 1/f: \Rightarrow q = (1/f - 1/p)^{-1} = pf/(p-f):$$

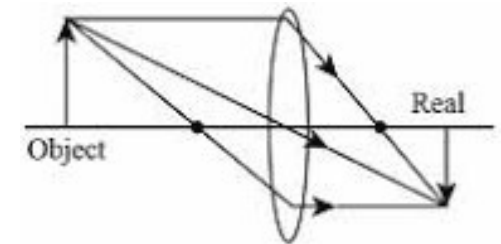
Conseguimos distinguir os seguintes casos:

$p = \infty$ (P "no infinito"): $q = f$, imagem em F_1

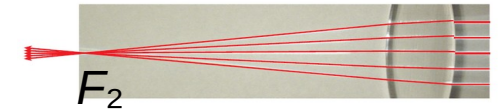


$f < p < \infty$ (P à esquerda de F_2)

$q > f$, imagem à direita de F_1

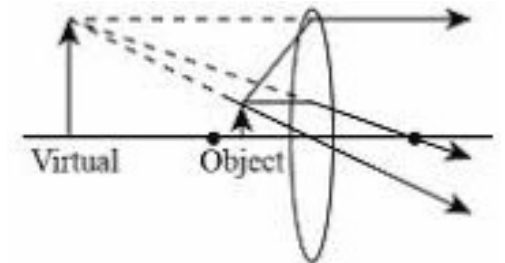


$p = f$ (P = F_2): $q = \infty$, imagem "no infinito"



$p < f$ (P entre F_2 e lente):

q negativo ($< -f$), imagem do mesmo lado da lente que P, i.e., virtual.



Lentes Delgadas

Lentes Convergentes

Igual como para espelhos, para lentes a **imagem** também pode sofrer uma **magnificação** ou **aumento lateral** em relação à dimensão do objeto.

Pela semelhança dos triângulos OPP' e OQQ' :

$$m := y'/y = -q/p.$$

Aqui também, m é **negativa**, caso a imagem é **invertida lateralmente**.

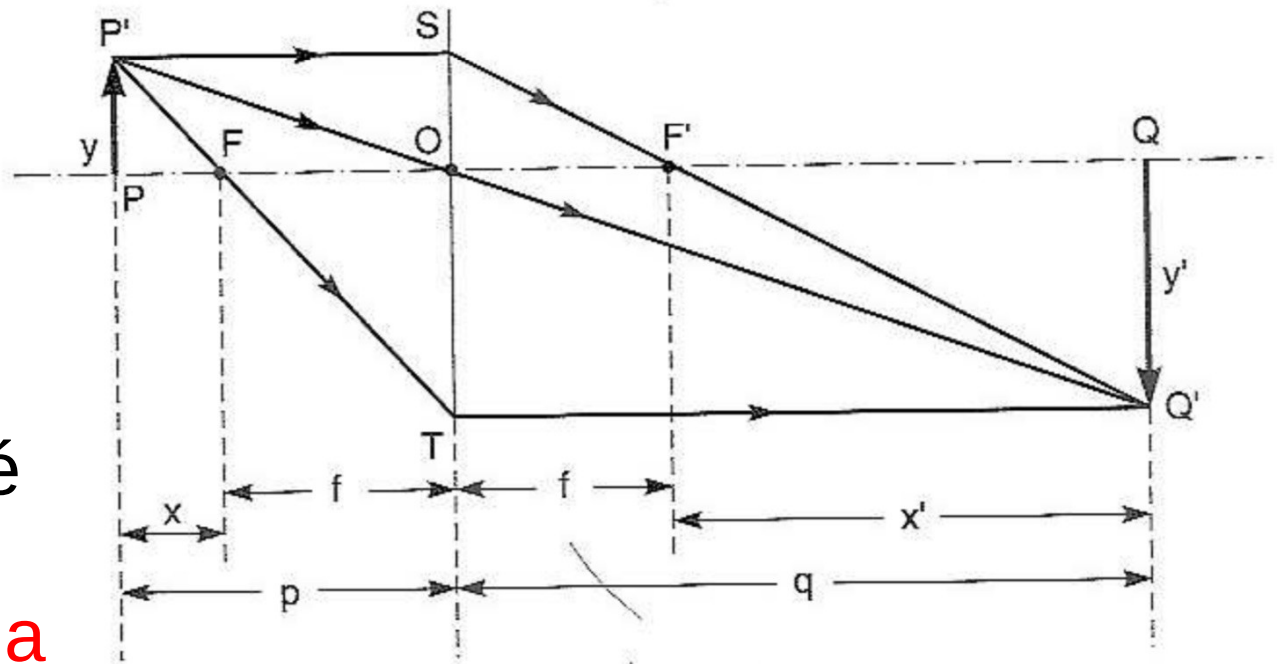


Fig. 2.36 Aumento lateral

Lentes Delgadas

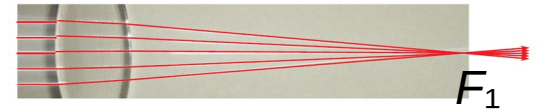
Lentes Convergentes

$$m = y'/y = -q/p = -f/(p-f):$$

Olhando pros **mesmos casos** que antes:

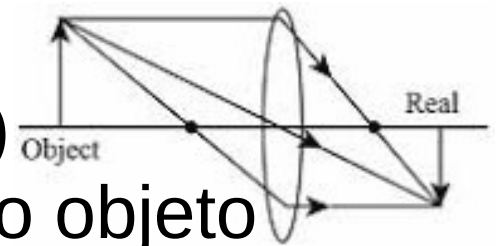
$p = \infty$ (objeto "no **infinito**"):

$m = 0$, imagem é F_1



$2f < p < \infty$ (objeto "muito à **esquerda** de F_2 ")

$-1 < m < 0$, imagem **invertida** e **menor** que o objeto



$p = 2f$ (a **2 vezes** a **distância focal** do espelho): $m = -1$,

imagem **invertida** e do **mesmo tamanho** que o objeto

$f < p < 2f$: $m < -1$, imagem **invertida** e **maior** que o objeto
(trocando na figura acima objeto e imagem)

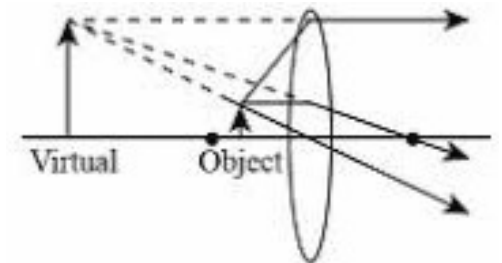
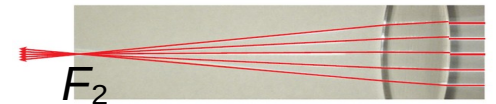
Lentes Delgadas

Lentes Convergentes

$$m = y'/y = -q/p = -f/(p-f):$$

$p = f$ (objeto no **foco**): $m = \pm\infty$,
magnificação "**infinita**" (olhando pra lente,
a imagem "enche" a lente inteira)

$p < f$ (P **entre foco** e **lente**):
 $m > 1$, imagem **virtual**, **direta**
(não invertida) e **maior** que o objeto



Lentes Delgadas

Lentes Convergentes: Resumo

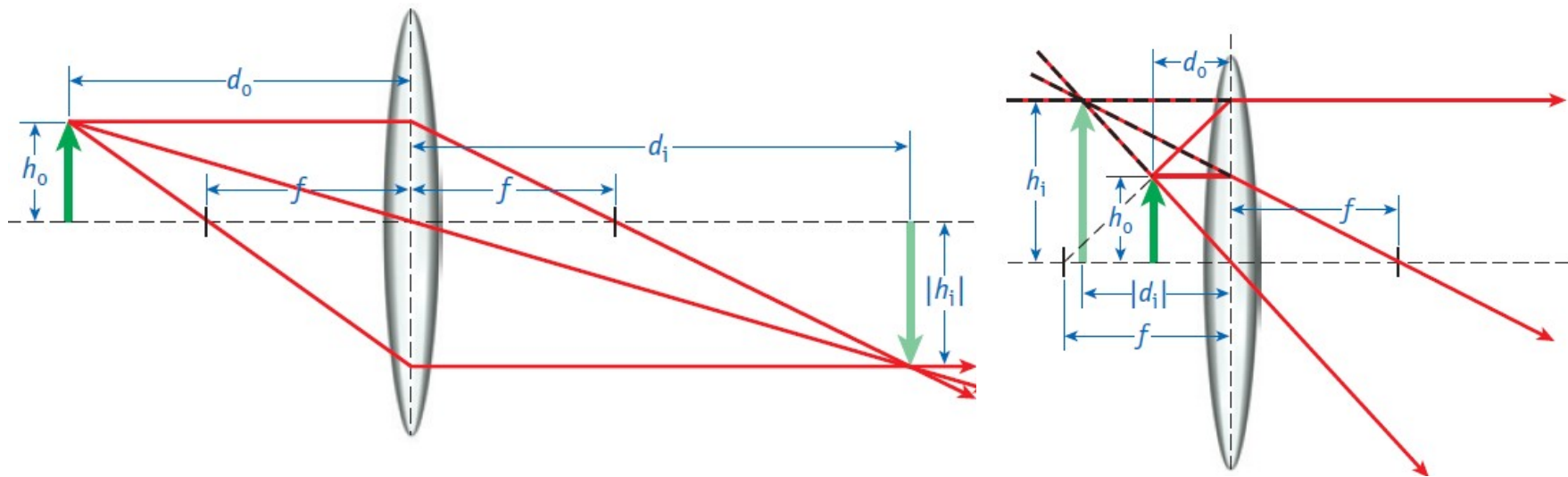


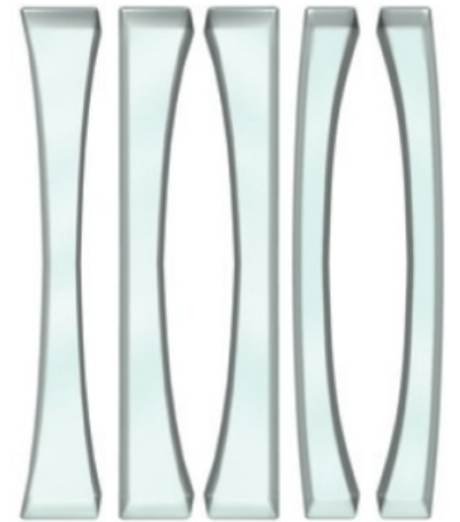
Tabela 2.1 Características da imagem para lentes convergentes

Caso	Tipo da imagem	Orientação da imagem	Ampliação
$f < d_o < 2f$	Real	Invertida	Ampliada
$d_o = 2f$	Real	Invertida	Mesmo tamanho
$d_o > 2f$	Real	Invertida	Reduzida
$d_o = f$			Infinito
$d_o < f$	Virtual	Ereta	Ampliada
$d_o = \infty$	Real		"Nula"

Lentes Delgadas

Lentes Divergentes

Para lentes **divergentes** (mais grossas na borda), podemos usar as **mesmas fórmulas**, só que agora $(1/R_1 - 1/R_2) < 0$ (É um bom exercício conferir isto) $\Rightarrow f < 0$,
 $q = pf/(p-f) = -p|f|/(p+|f|) < 0$
 $m = |f|/(p+|f|)$ entre 0 e 1

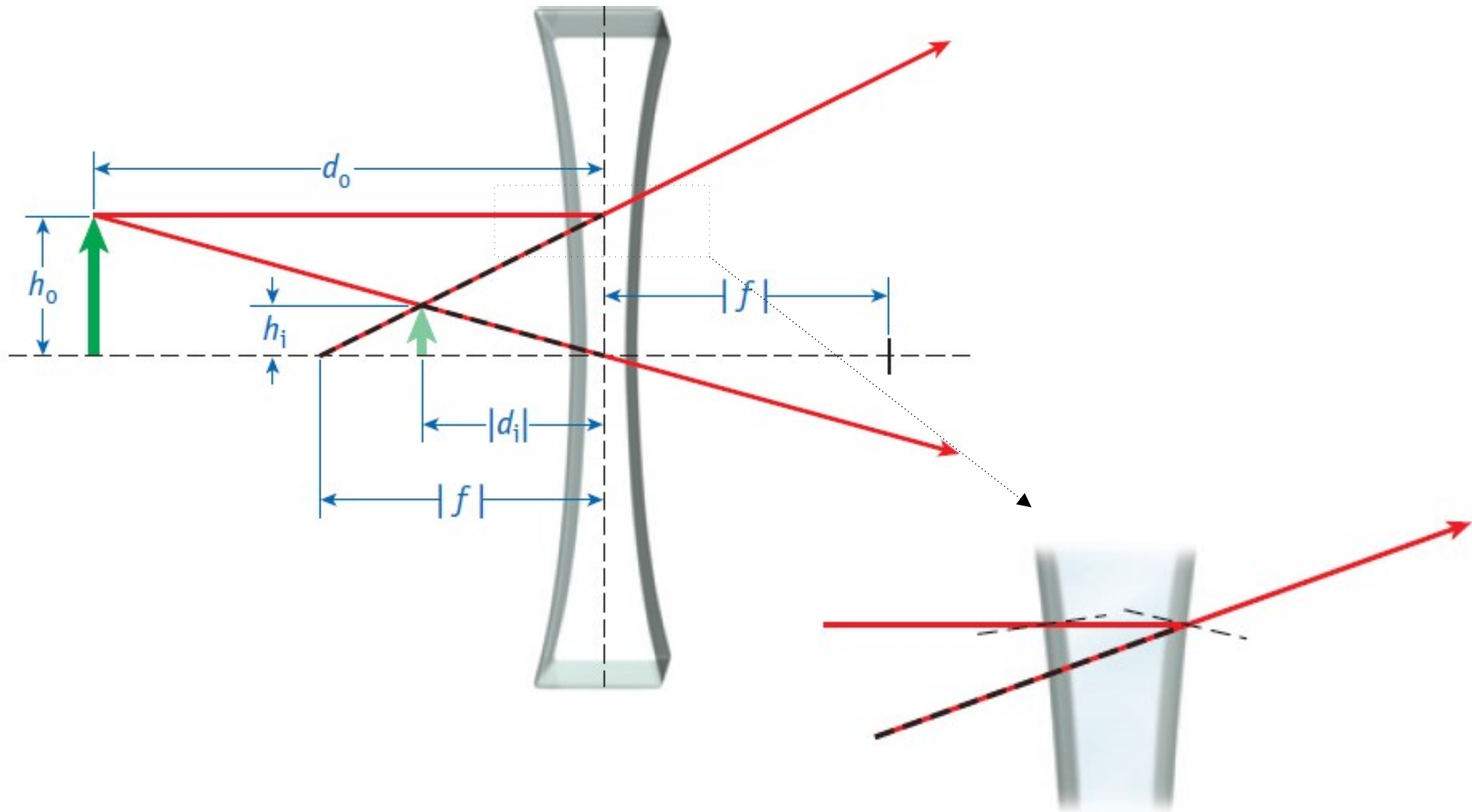


\Rightarrow **Foco** e **imagem** ficam do **mesmo lado** que o **objeto**, a imagem é **sempre virtual, direta e menor** que o objeto.



Lentes Delgadas

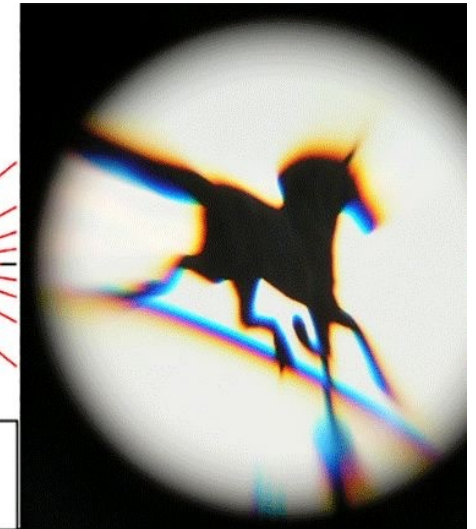
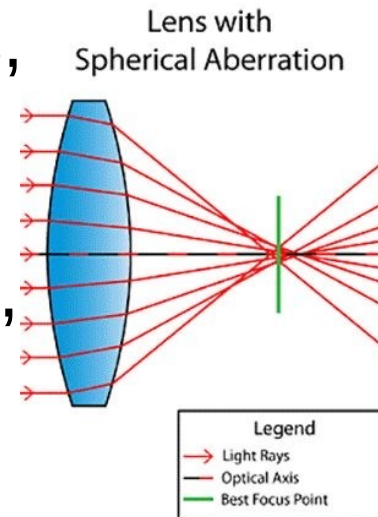
Lentes Divergentes



Lentes Delgadas

Aberrações

Igual como no caso de espelhos, a forma **esférica não focaliza** "perfeitamente" (i.e., raios paralelos em um ponto), ou seja, lentes com esta forma sofrem **aberração esférica**.



A forma perfeita é chamado **oval cartesiana** (o nome vem do matemático francês René Descartes, que as utilizou em óptica), mas para **lentes finas**, o **desvio é pequeno**, tal que na prática, lentes **frequentemente** têm **superfícies esféricas**.

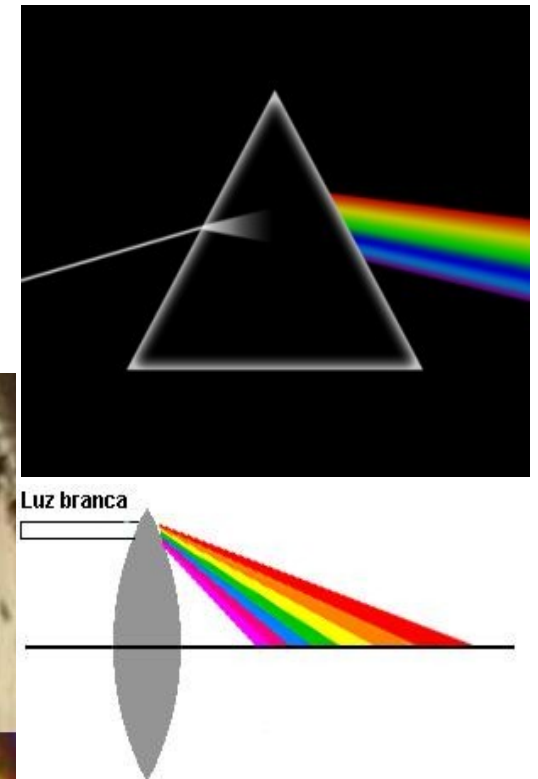


Lentes Delgadas

Aberrações

Além disso, ao **contrário** de em **espelhos**, em lentes, por se basearem na **refração** e **índices de refração** dependem do **comprimento de onda**, a posição do **foco** depende da **cor**.

=> **aberração cromática** que pode gerar efeitos indesejáveis, por exemplo em fotografia.



Lentes Delgadas

Exemplos

Uma **lente convergente** possui **distância focal** de 10 cm.

1) Um objeto é colocado a 30 cm da lente.
Descreva a imagem formada.

2) E se o objeto for colocado a 5 cm da lente?

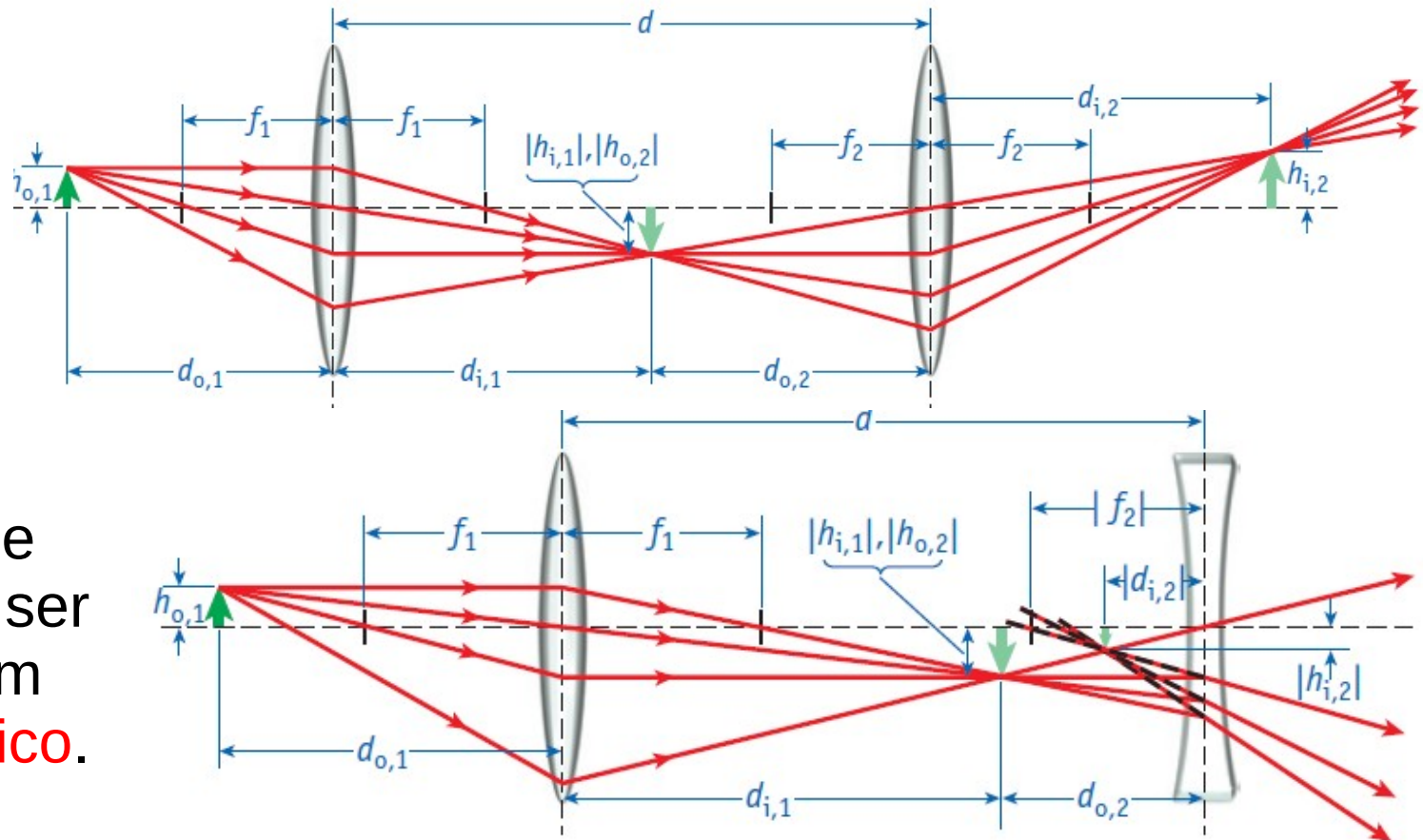
Lentes Delgadas

Sistemas compostos de lentes

Lentes podem ser **combinadas**, tal que a **imagem** formada pela **primeira lente** serve de **objeto** pra **próxima**.

O **aumento lateral** do conjunto será o **produto** dos **aumentos individuais** (incl. sinal).

Um conjunto de lentes já pode ser considerado um **instrumento óptico**.



Lentes Delgadas

Exemplo

Considere **duas lentes convergentes**, de comprimentos focais 10 cm e 20 cm, separadas por 20 cm. Um objeto é colocado a 30 cm da primeira lente. Descreva a **imagem final**.

Instrumentos Óticos

O que são instrumentos óticos?

Um **instrumento ótico** é um **dispositivo** que utiliza a **luz** (seja manipulando-a, controlando-a ou processando-a) para **melhorar** a **visualização** de objetos ou para **gerar** e **analisar imagens**. Em geral, são **compostos** de combinações de **espelhos** e **lentes**.

Instrumentos Óticos

O que são instrumentos óticos?

Alguns instrumentos óticos:

Óculos: Corrigem problemas de visão, como miopia e hipermetropia.

Lupa: Amplia objetos pequenos.

Microscópio: Permite a observação de objetos muito pequenos, como células e microrganismos.

Telescópio: Utilizado para observar objetos distantes no espaço, como planetas e estrelas.

Máquina fotográfica: Captura e armazena imagens.

Projektor: Projeta imagens ampliadas em uma tela.

Instrumentos Óticos

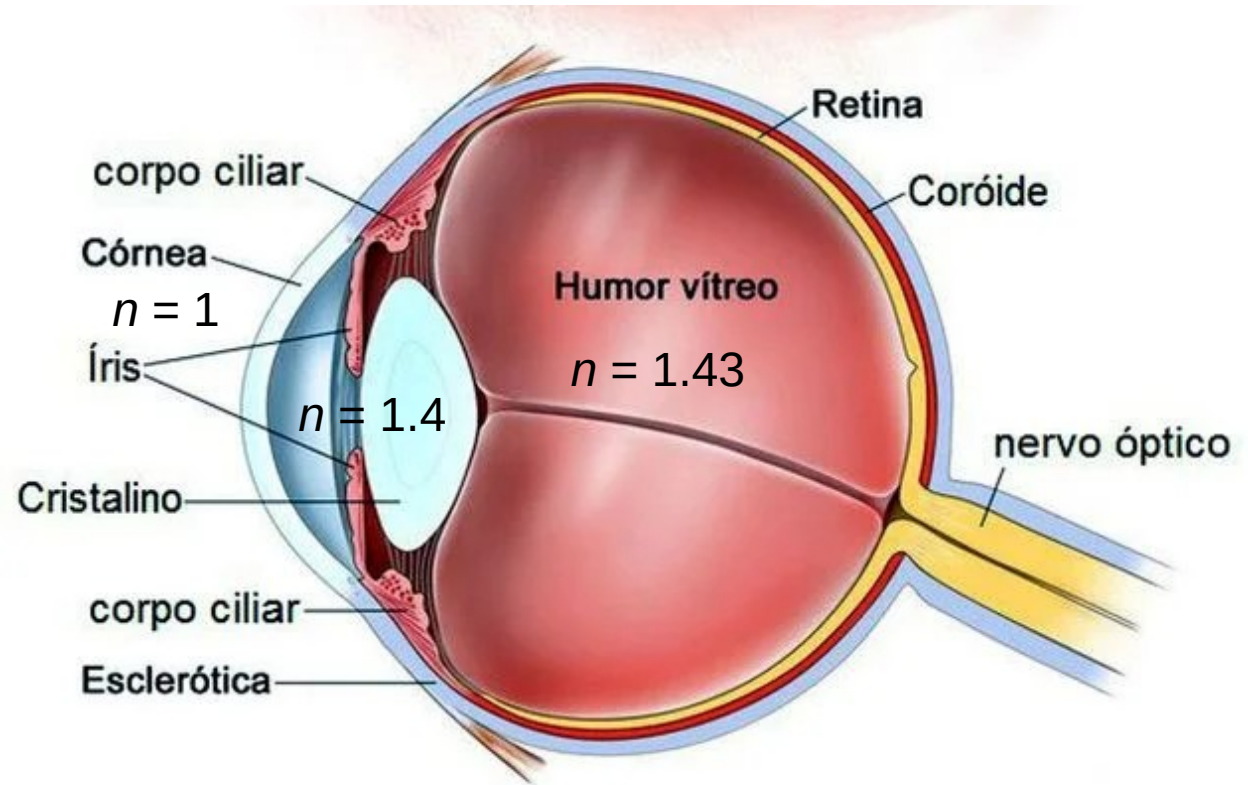
O Olho Humano

Córnea: lente de **foco fixo**

Cristalino: lente **deformável** (pelos músculos ciliares)
=> **acomodação** do olho

Íris: **músculo** que consegue regular a **abertura** da pupila

Retina: **tecido nervoso** sensível à luz



Instrumentos Óticos

O Olho Humano

Para os sistema de lentes córnea-cristalino vale:

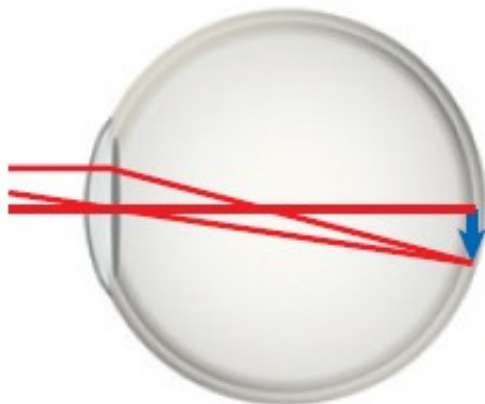
$$1/p + 1/q = 1/f$$

Já que q é dada (distância lentes-retina), **ajustando** o **foco**, conseguimos **variar** a **distância** naquela encheremos **nitidamente** (p).

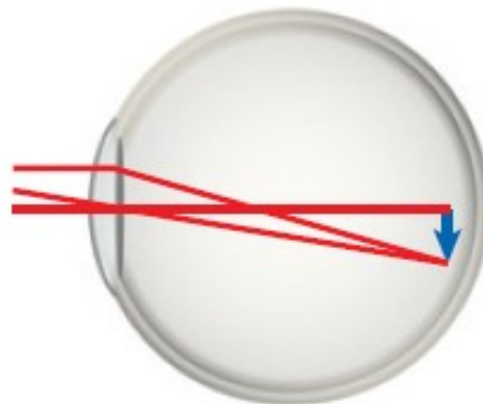
O olho consegue **ajustar** o seu **foco** para objetos localizados entre **dois extremos**, chamados de **ponto próximo** (10 cm para crianças, 40 cm para adultos de 40 anos) e **ponto distante** (idealmente " ∞ ").

Instrumentos Óticos

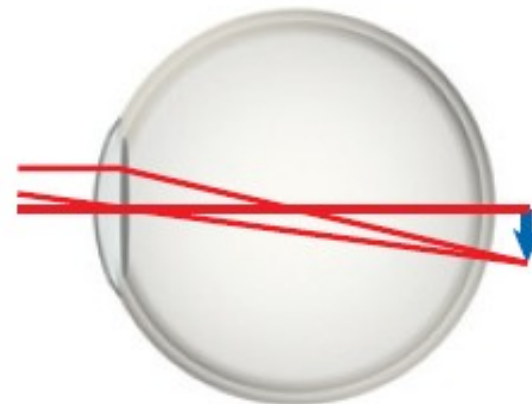
Problemas de visão mais comuns



normal

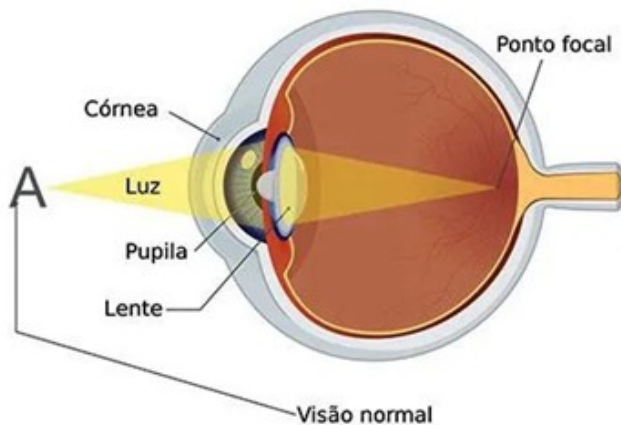


miopia: O ponto distante é próximo demais

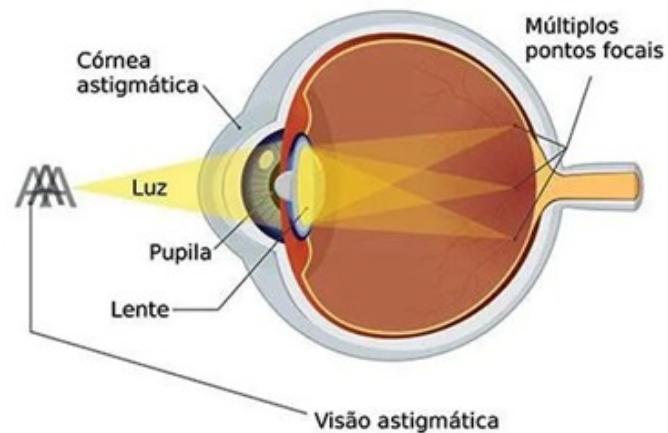


hipermetropia: O ponto próximo é longe demais

Olho normal



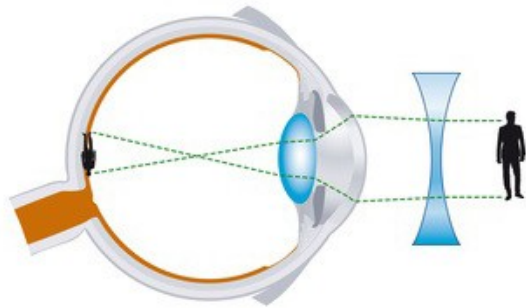
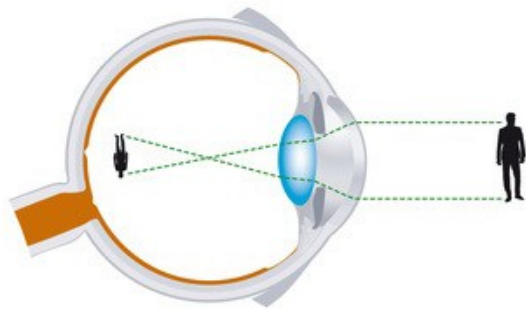
Olho astigmático



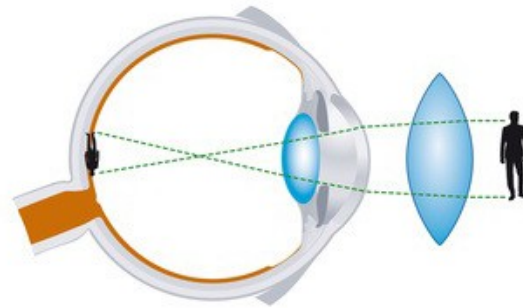
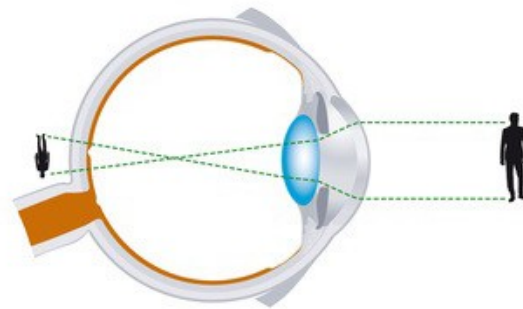
astigmatismo

Instrumentos Óticos

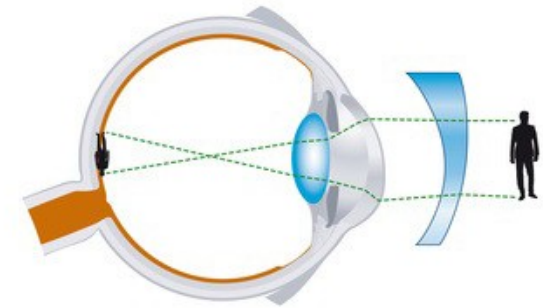
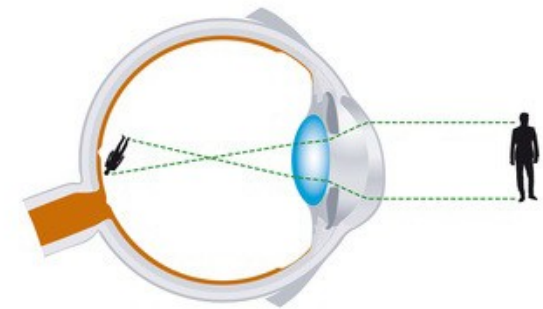
Lentes Corritivas



Miopia



Hipermetropia



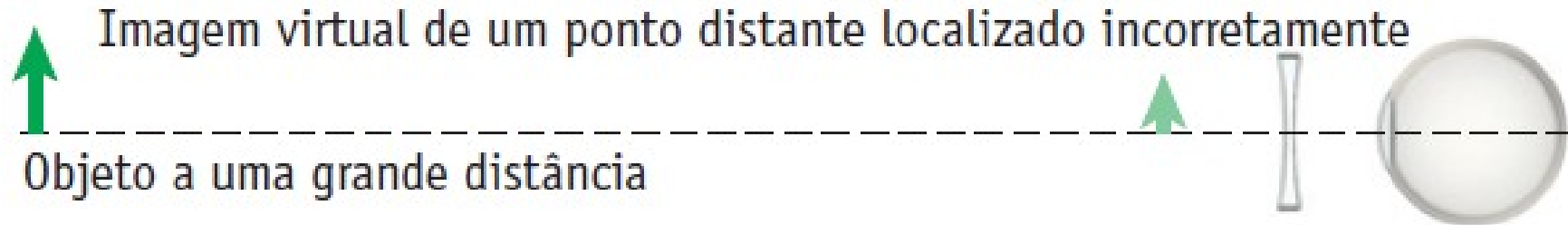
Astigmatismo

A **potência** ("grau") de uma **lente** é o **inverso** da **distância focal**: $D = 1/f$, unidade $[D] = \text{m}^{-1} = \text{D}$ ou dpt (dioptria)

Instrumentos Óticos

Como isso funciona?

Para miopia



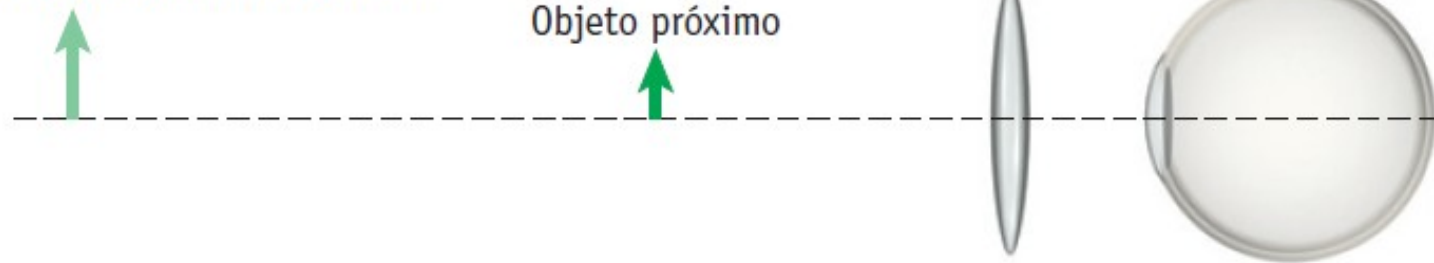
O trabalho da lente é **gerar** uma **imagem virtual** do objeto no **ponto distante** do **olho**, que está muito mais próximo do que deveria...

Instrumentos Óticos

Como isso funciona?

Para hipermetropia

Imagem virtual no ponto próximo incorreto



A lente gera uma **imagem virtual** do objeto no **ponto próximo** do olho, que está muito mais distante do que deveria...

Instrumentos Óticos

Exemplos

Uma pessoa com **miopia**, tal que o **ponto distante** está localizado a 50 cm.

Qual a **dioptria** da **lente corretiva** a ser utilizada?

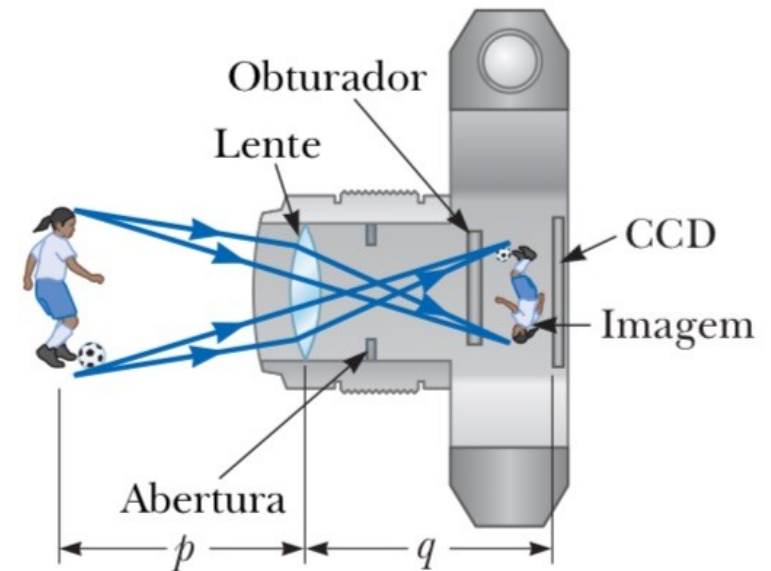
Uma pessoa que tem uma lente para **miopia** com "1,50 graus". Qual a **distância focal** da lente?

Qual o **ponto distante** do **olho**?

Instrumentos Óticos

Câmara Fotográfica

Funciona **similar** ao **olho**, com a função da **retina** sendo realizada por uma **película** com uma **substância** que reage **quimicamente à luz**, ou um **detector eletrônico**, i.e. um CCD (do inglês *Charge-Coupled Device*)



O papel da **lente deformável** é feito por um **sistema** complexo de **lentes** (tipicamente móveis ao longo do eixo), que também consegue **reduzir aberrações**.

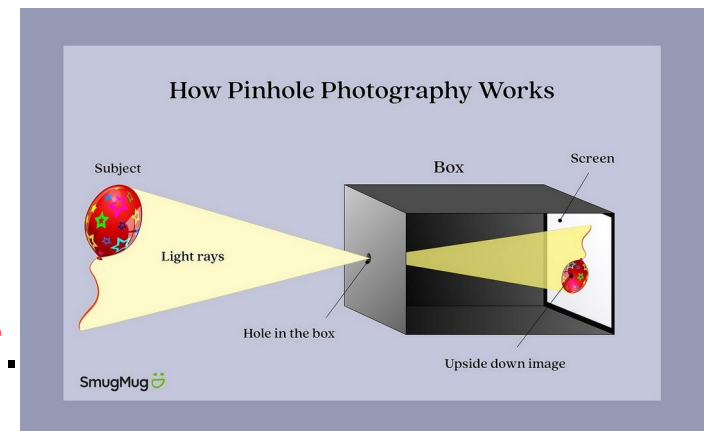
Instrumentos Óticos

Câmara Fotográfica

A câmara também consegue **variar** a **abertura** (pupila) usando o **diafragma** (a **Íris** da câmara).

Com a abertura bem **aberta**, só objetos numa **pequena faixa** de **distâncias** são **focados** nitidamente, mas **não** é preciso de um **tempo** de **exposição longo**.

Enquanto com uma **abertura pequena** como numa **câmara obscura**, objetos a **qualquer distância** são representados nitidamente na imagem, mas o **tempo** de **exposição** precisa ser **maior**.



O tempo de exposição é regulado pelo **obturador**.

Instrumentos Óticos

Câmara Fotográfica

Fotógrafos trabalham com o chamado **número f**, definido como $n_f = f/D$ (sem unidades), onde f é a **distância focal** do sistema de lentes, e D , o **diâmetro de abertura**.

O número f também é chamado **velocidade da lente** e se escreve $n_f = 4 \Rightarrow "f/4"$, $n_f = 16 \Rightarrow "f/16"$, etc.

Um n_f **baixo** (i.e. $f/4$) significa uma **pequena faixa** de **distâncias bem focadas**, mas **não** é preciso de um **tempo de exposição longo**, e é chamado de **configuração "rápida"**, e um n_f **baixo** (i.e. $f/32$) significa **qualquer distância** é bem focada, mas é preciso de um **tempo de exposição longo**. Isto é uma configuração **"lenta"**.

Lentes com valores baixos de f (como 1.4 ou 1.8) são caras, porque exigem um conjunto sofisticado de lentes para reduzir as aberrações.

Instrumentos Óticos

Câmera Fotográfica



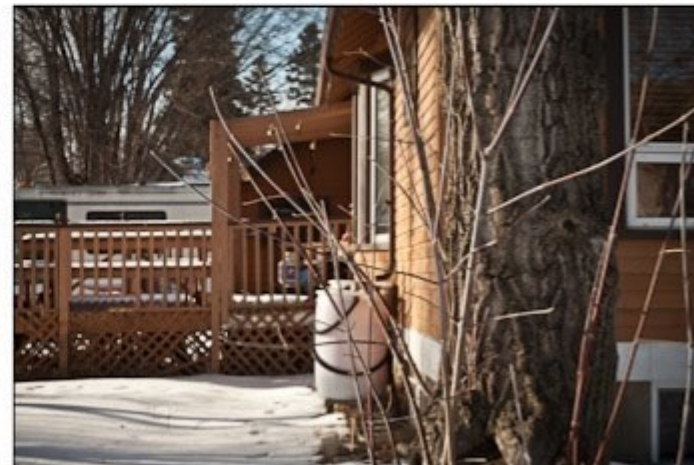
1/2500 sec at f / 1.8



1/500 sec at f / 4.0



1/125 sec at f / 8.0



1/60 sec at f / 22

Instrumentos Óticos

Lupa (ou lente de aumento)

Sem lente, consegue-se
ver um objeto

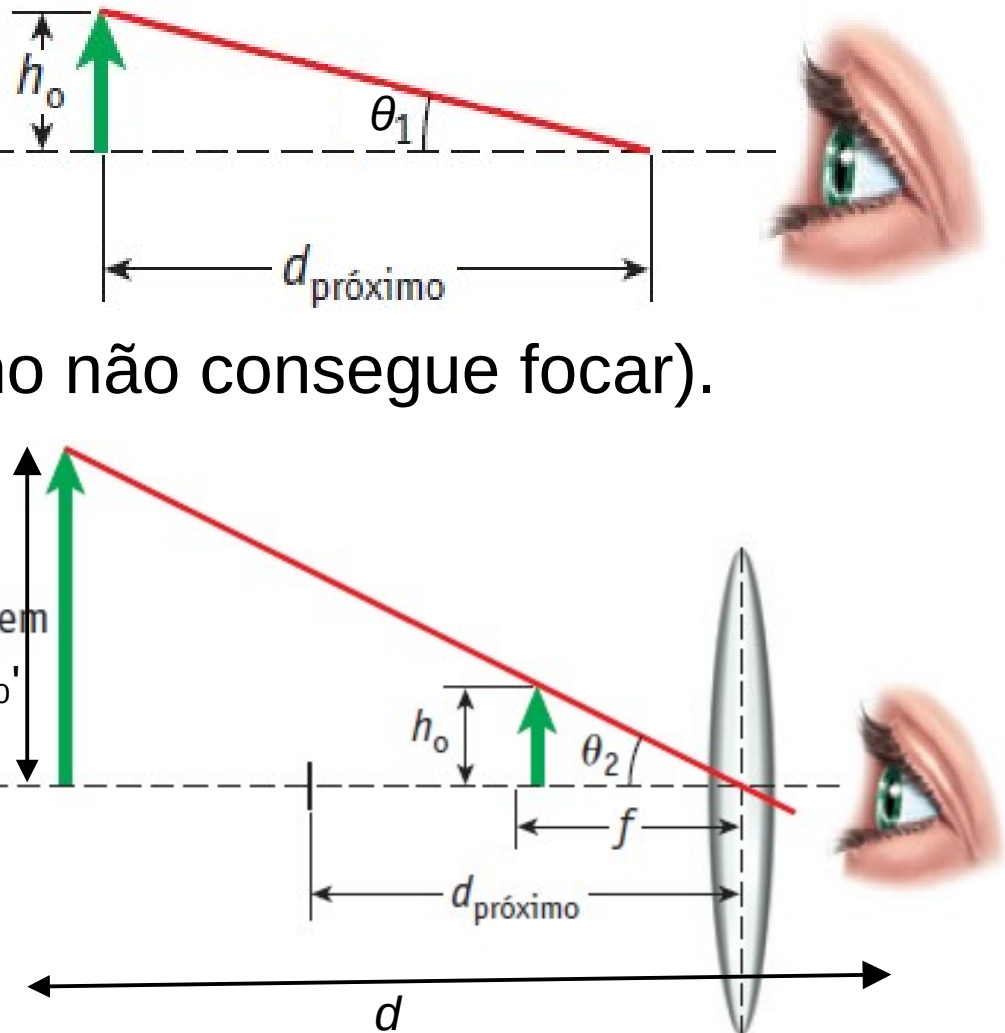
com **tamanho angular**

$$\theta \sim h_o/d_{\text{próximo}}$$

(Aproximando-se mais, o olho não consegue focar).

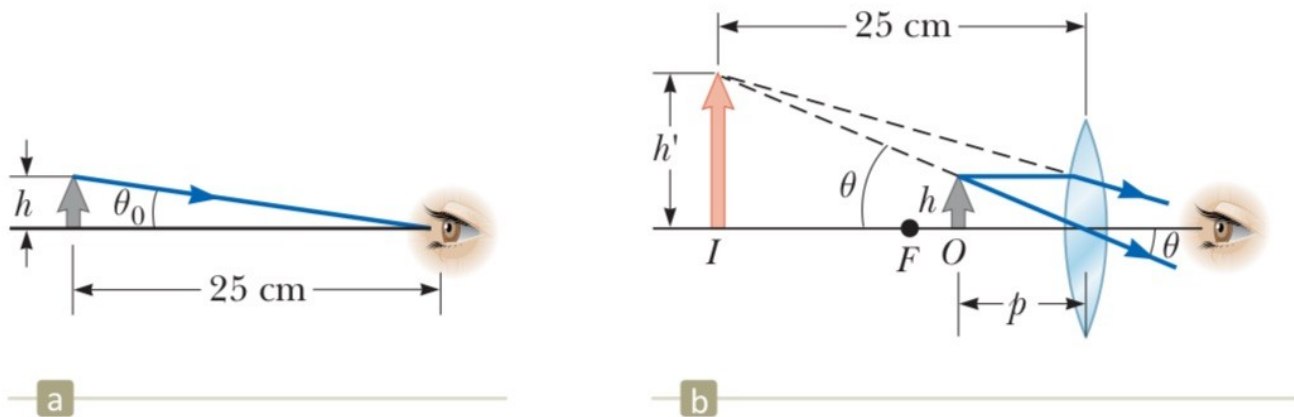
Com **lupa**, dá para criar
uma **imagem maior**

(já que o aumento lateral
é muito grande para
objetos perto do foco)
àquela podemos nos
aproximar e vê-la com
tamanho angular h_o'/d .



Instrumentos Óticos

Lupa: Estimativa do fator de magnificação



$$\theta_0 = h/d_p$$

Figura 2.38 (a) Um objeto colocado no ponto próximo do olho ($p = 25$ cm) forma um ângulo $\theta_0 \approx h/25$ cm com o olho. (b) Um objeto colocado próximo ao ponto focal de uma lente convergente produz uma imagem ampliada que forma um ângulo $\theta \approx h'/25$ cm com o olho.

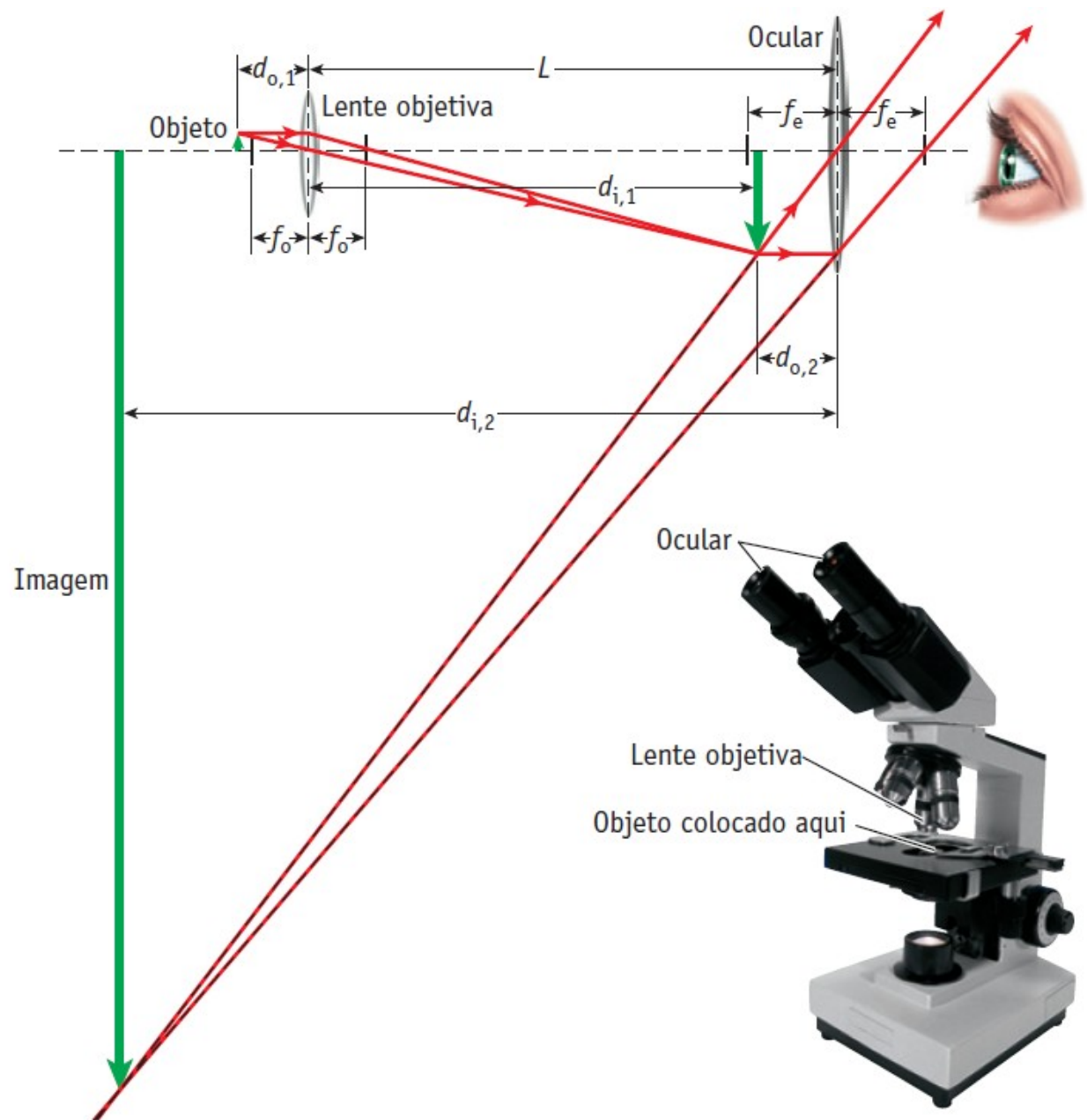
A **ampliação** será **máxima**, se a **imagem** fica no **ponto próximo** d_p do olho, com o olho **muito próximo** da **lente**
 $\Rightarrow q \sim -d_p \Rightarrow p = f \cdot d_p / (f + d_p)$, $m = (f + d_p) / f \Rightarrow h' = (f + d_p) h / f$
 $\Rightarrow \theta = h' / d_p \Rightarrow m_{\max} = \theta / \theta_0 = h' / h = (f + d_p) / f$,

no caso de $d_p = 25$ cm e $f = 10$ cm: $m_{\max} = 3.5$

Instrumentos Óticos

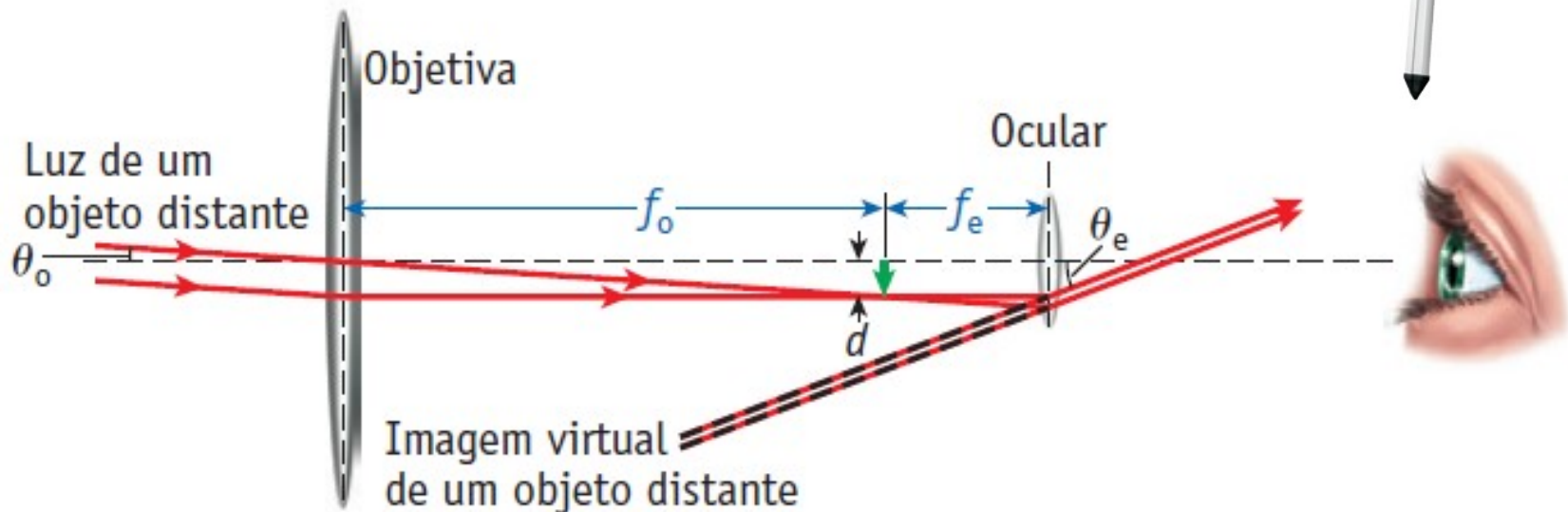
Microscópio

No **microscópio**, um sistema de lentes consegue criar uma **imagem** muito **ampliada** de um **objeto** muito **pequeno** (de novo, colocando a imagem "intermediária" perto do **foco** da **lente ocular**).



Telescópios

Imagea objetos "infinitamente" **distantes** para uma imagem no **finito** e de **volta** pro "infinito", tal que a **imagem final** aparece com um **tamanho angular maior** que o **objeto original**.



Telescópios

Um telescópio capta radiação no seu **coletor**:

- **lente**,
- **espelho**
- ou algo mais inusitado, p. e. uma bacia de água ou gelo (no caso de um telescópio de neutrinos)

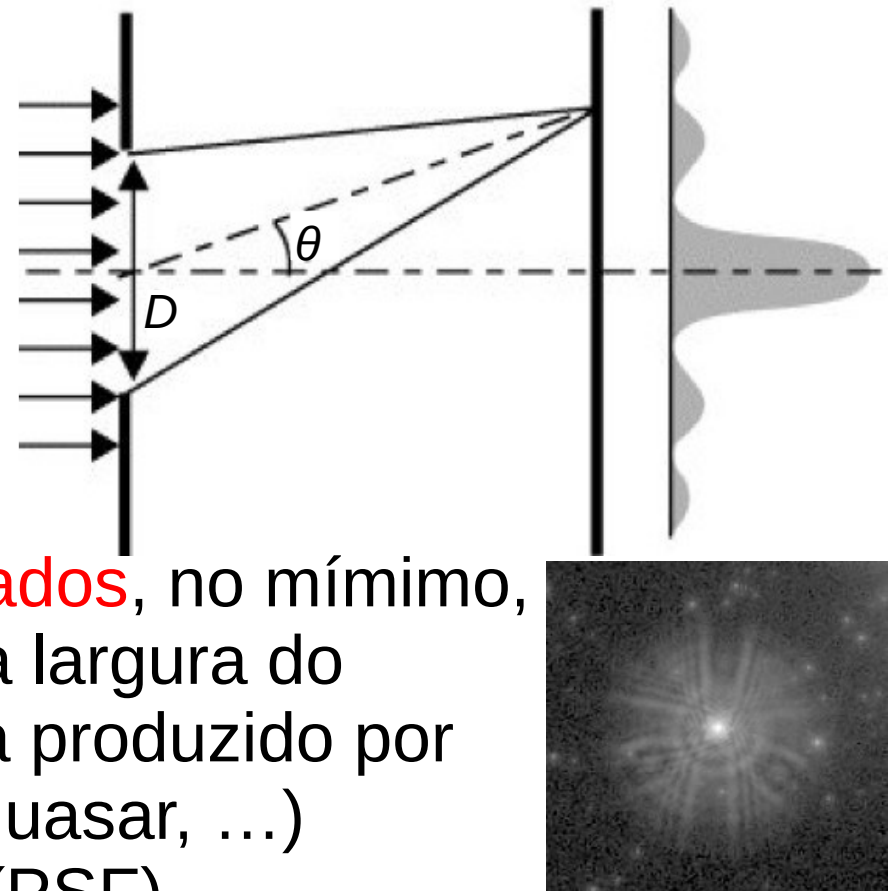
Quanto **maior** é o **coletor**, mais alta será a **sensibilidade**.

Telescópios

Outra grandeza que determina a qualidade de um telescópio é seu poder de **resolução angular**, **espectral** ou **temporal**.

Um fator que **limita** a **resolução angular** é o **espalhamento de Rayleigh**, **interferência** da luz vindo de partes diferentes do **coletor**.

Para poderem ser distinguidos, dois objetos têm que estar **separados**, no mínimo, por um **ângulo** que corresponde à largura do 1º pico do padrão de interferência produzido por uma fonte "pontiforme" (estrela, quasar, ...) chamado *Point Spread Function* (PSF).



Telescópios

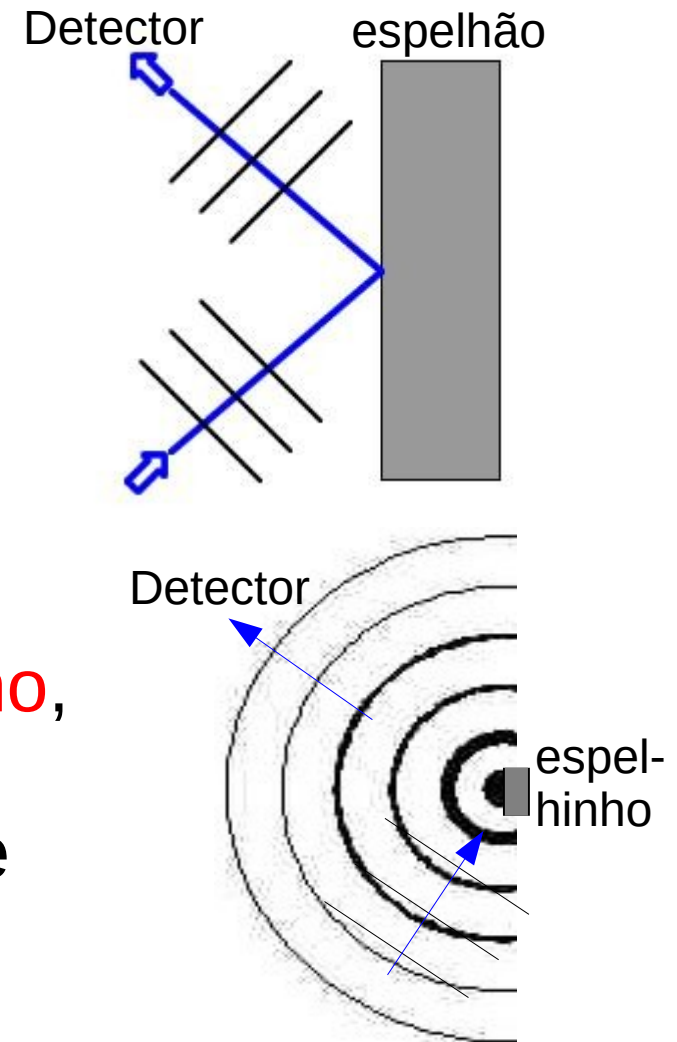
Argumento qualitativo:

Se o **espelho** (ou lente) é muito **grande comparado** ao **comprimento de onda** da radiação (óptico: $\lambda \approx 500 \text{ nm}$), a **onda refletida** é **plana**, e dá para determinar, de onde a onda incidente veio => **alta resolução**

Se o **espelho** (ou lente) é muito **pequeno**, a onda refletida é esférica e perde-se a informação, de onde a onda incidente veio => **baixa resolução**

=> Quanto **maior** o **espelho**, tanto **melhor** a **resolução**.

=> bons telescópios são **grandes**.



Telescópios

A **separação angular mínima** que pode ser **resolvida** é:

critério de Rayleigh: $\theta_{\min} = 1.22 \cdot \lambda / D$,

onde D é o **diâmetro** do **coletor** e λ , o comprimento de onda da luz observada.

=> aulas sobre a ótica ondulatória

Telescópios Refratores (Lunetas)

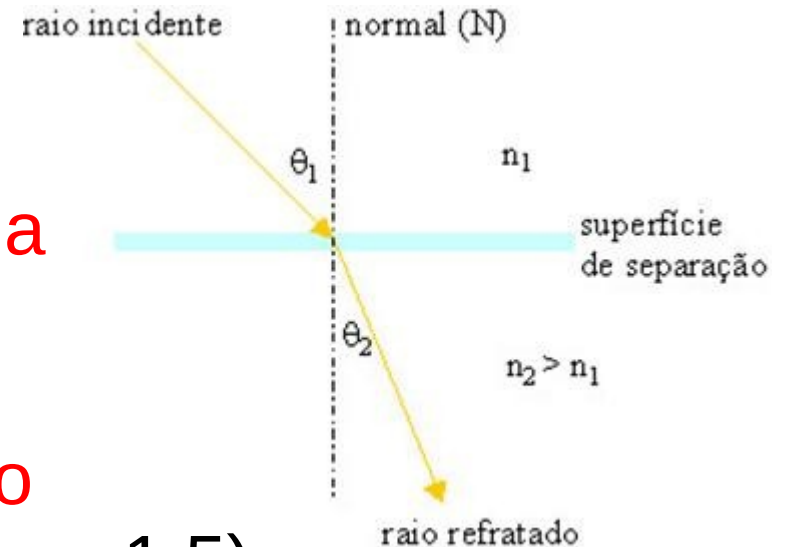
São **telescópios** que funcionam com **lentes**.

Os **primeiros telescópios** (incl. aquele de Galileu) eram telescópios refratores.

Quando **luz** passa por uma **lente**, ela é **defletida** na **entrada** e na **saída** da lente seguindo a **Lei de Snel**:

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

n_1 e n_2 sendo os **índices de refração** dos dois meios ar ($n_1 \approx 1$) e vidro ($n_2 \approx 1.5$).

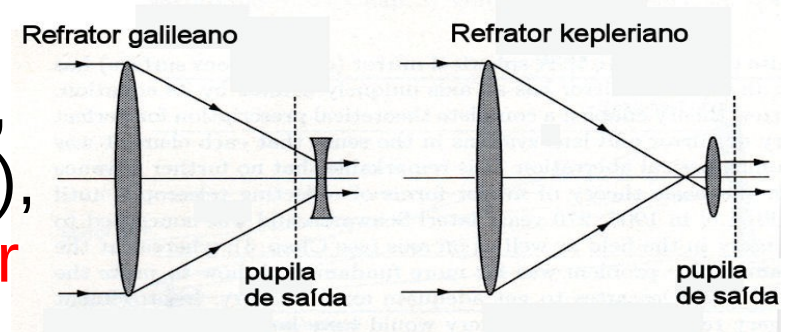
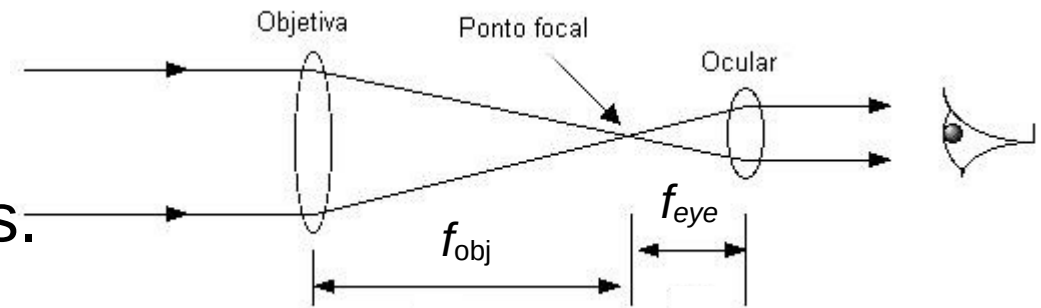
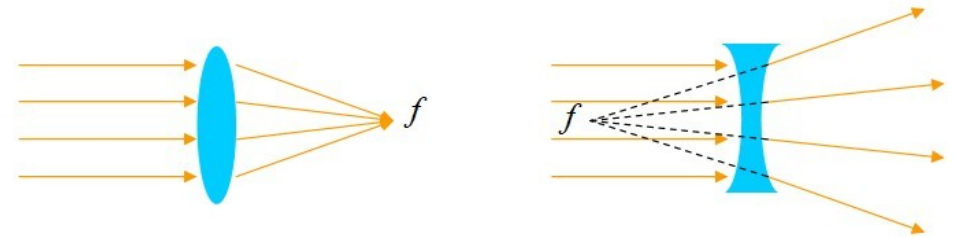


Telescópios Refratores (Lunetas)

Assim, raios **paralelos** são focados na direção em (lente convexa) ou vindo de (lente côncava) um ponto, o **foco** f .

A distância lente-foco é chamada **distância focal** (também denotada por f), negativa para lentes côncavas.

Colocando **duas lentes** (**objetiva** e **ocular**) na distância da **soma** das suas **distâncias focais**, (assim $p_1 = \infty \Rightarrow q_1 = f_1$, $p_2 = f_2 \Rightarrow q_2 = \infty$), obtém-se uma **magnificação angular** de $m = f_{obj}/f_{eye}$.



Existem **diferentes geometrias** de telescópios refratores.

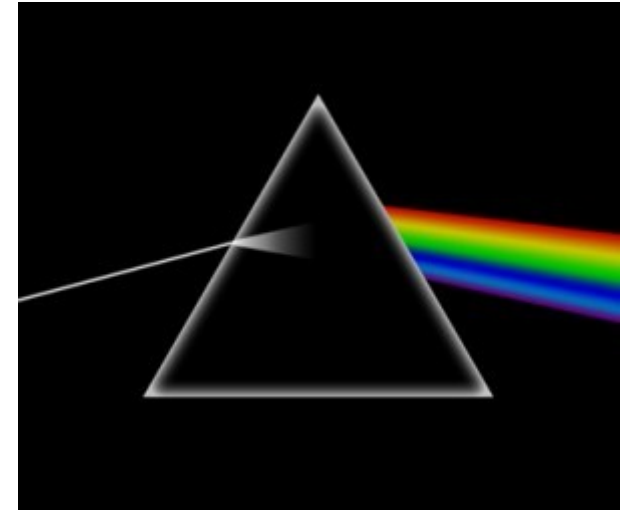
Telescópios Refratores (Lunetas)

Problema: os **índices de refração** dos materiais **dependem** do **comprimento de onda**.

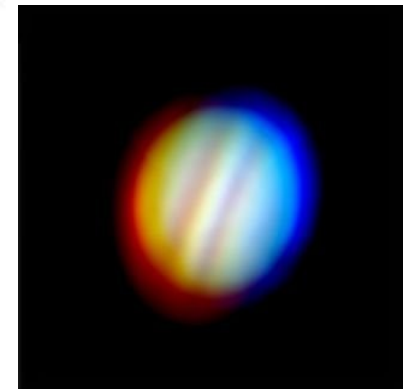
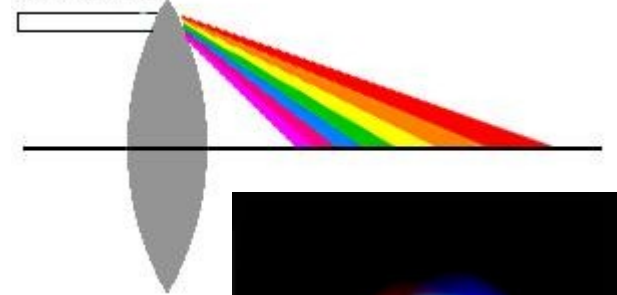
=> **Luz** de **cores diferentes** é **focada** em **pontos diferentes**, fenômeno chamado **aberração cromática**.

Para um dado arranjo de lentes, apenas uma cor é bem focada.

Outro problema: Lentes de mais de 1 m de diâmetro se deformam sob seu próprio peso.



Luz branca



Telescópios Refletores

=> Usar **espelhos**:

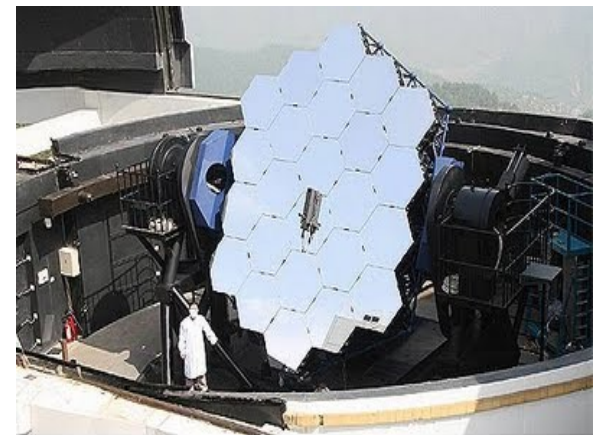
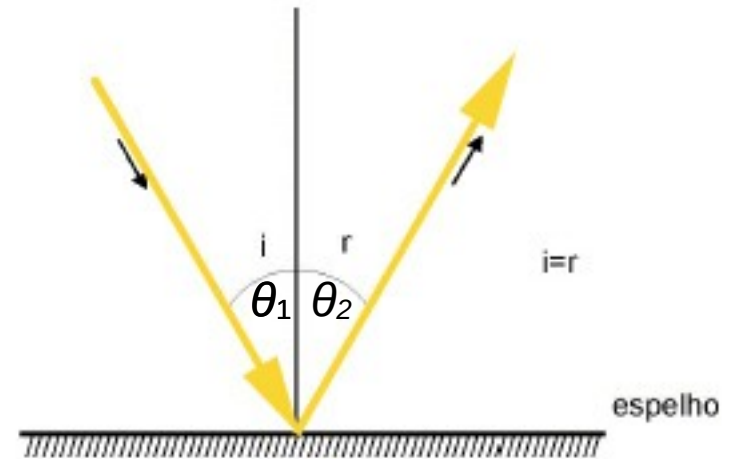
O **ângulo de reflexão não** depende de λ : $\theta_1 = \theta_2$

=> não causa aberração cromática,

e **espelhos** podem ser feitos **muito finos** e ser **segmentados**.

=> praticamente sem limites para o tamanho.

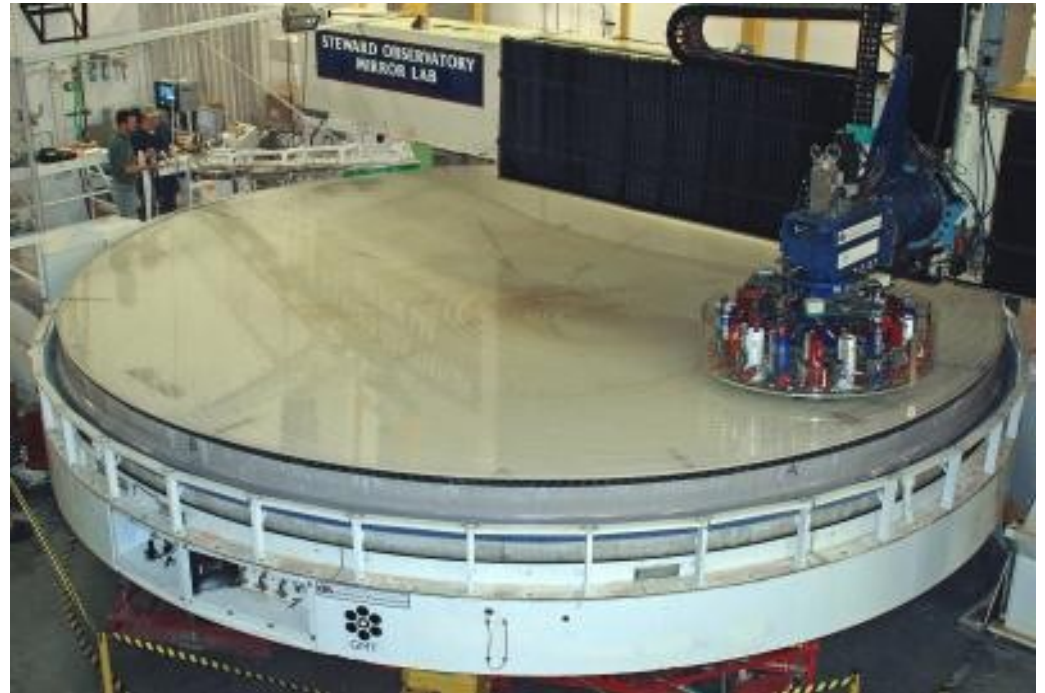
=> Os **telescópios** mais **modernos** são **refletores**.



Telescópios Refletores

O(s) espelho(s) tem que ser bem **polido(s)**:

Este espelho do telescópio em construção *Giant Magellan Telescope* (GMT) de 8.4 m de diâmetro, leva três anos a ser polido, até que a superfície está dentro de 25 nanômetros da forma perfeita.

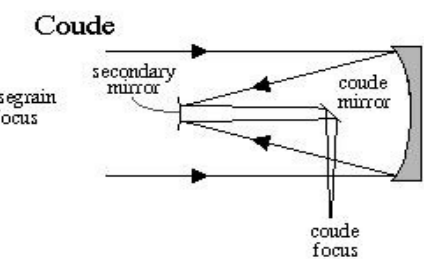
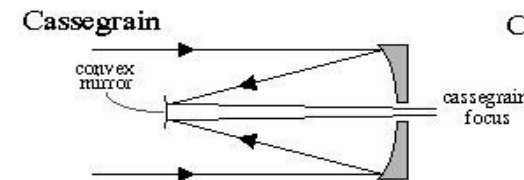
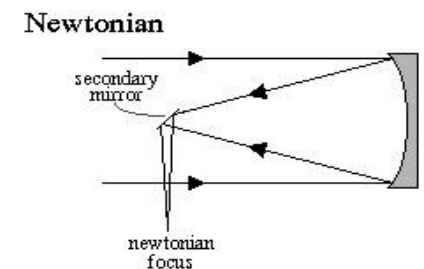
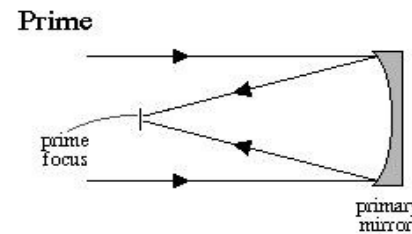
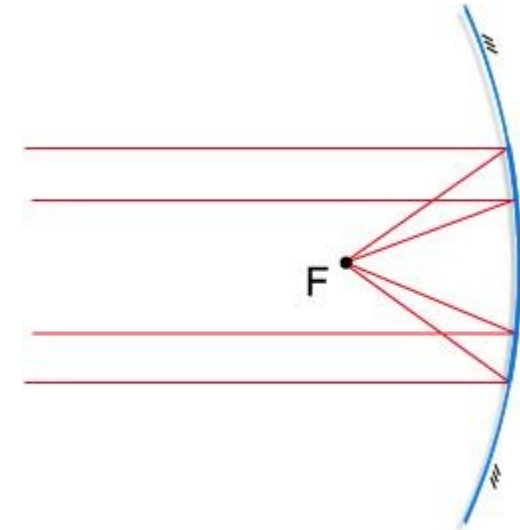


Telescópios Refletores

Espelhos **parabólicos** focam raios paralelos em um **ponto**.

=> O espelho **coletor**, ou **primário**, normalmente é parabólico.

Também existem **várias geometrias** de telescópios refletores, na maioria usando espelhos adicionais, os **espelhos secundários**.

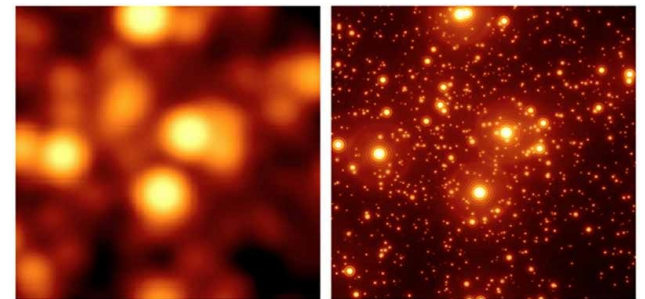
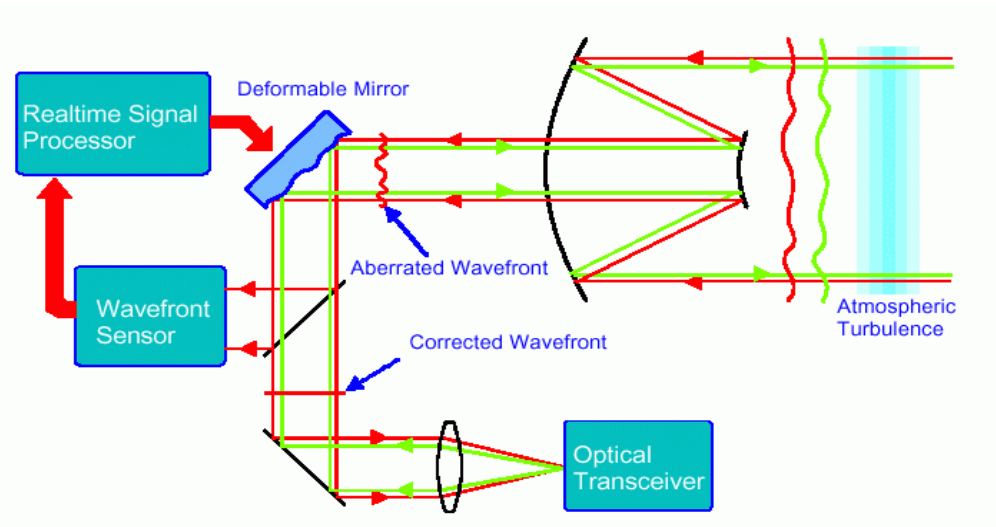


Telescópios Refletores

Outro problema: **Turbulências** na **atmosfera** **distorcem** as frentes de onda da luz.

Se chama a qualidade da imagem devido às condições atmosféricas de **Seeing**.

Solução: **Ótica adaptativa**:
A **deformação** do **espelho** secundário em **tempo real** para compensar a distorção.



Melhoras no seeing devido à ótica adaptativa

Telescópios Óticos

Maiores atuais:
espelhos primários da
ordem de **10 m** de
diâmetro.

Encontram se em lugares
altos, secos e politicamente
estáveis: Havaí,
Chile (deserto Atacama),
Ilhas Canárias, ...

Alguns são **múltiplos**

Trouxeram avanços em todas as áreas da astronomia.



Very Large Telescope (VLT), Chile:
4 telescópios de 8 m

Telescópios Óticos

No futuro (~2029-203?):
3 telescópios de ~30 m:

- *Giant Magellan Telescope*, GMT, Chile, 25.4 m,
7 espelhos

- *30 Meters telescope*, TMT
Havaí ou La Palma,
492 segmentos

- *European Enormously Large Telescope*, (E-)ELT, Chile,
39.3 m, 798 segmentos

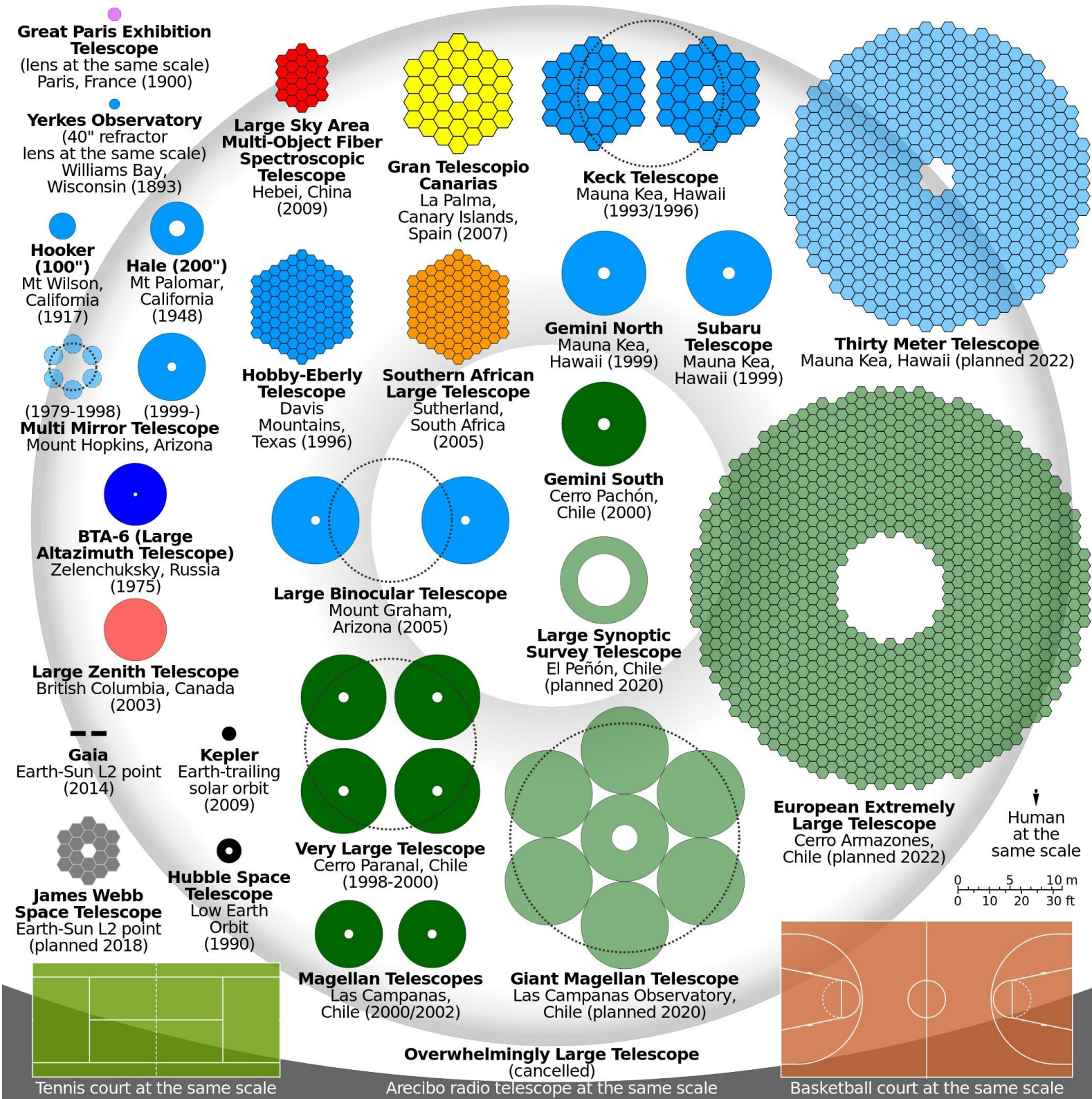
Investigação (entre outros): exoplanetas habitáveis,
as natureza e distribuição das Matéria e Energia Escura,
a primeira luz e as primeiras galáxias do Universo



E-ELT comparado com a Sagrada Família
(Interpretação artística)

Comparação dos tamanhos dos espelhos primários

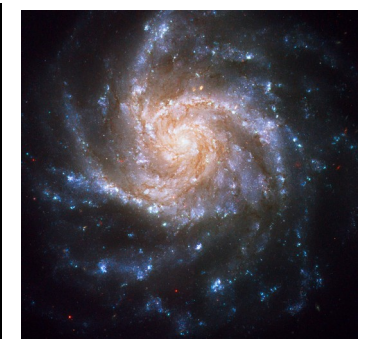
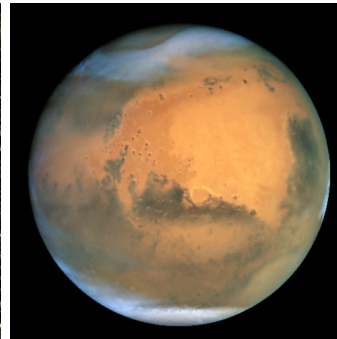
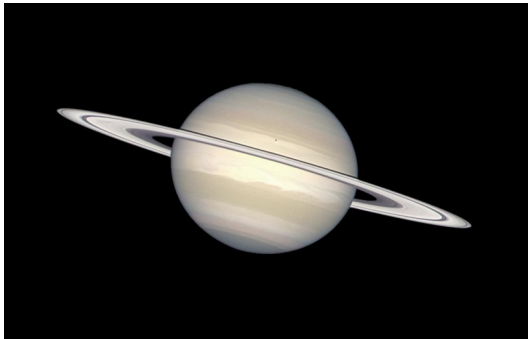
© Cmglee



Telescópios Espaciais

O *Hubble Space Telescope* (HST, NASA/ESA)

- Ótico, infravermelho e UV
- Espelho de 2.4 m
- Resolução no ótico: 0.05"
- Funcionando desde 1990 e desde 1993 com uma lente corrigindo um erro no espelho, última missão de manutenção em 2009



Telescópios Espaciais

O *Hubble Space Telescope*

- Ainda em operação graças ao sucesso enorme
- Já fez o seu 25^{imo} aniversário, e será aposentado quando os instrumentos falharem (2030-2040?)
- Avanços em cada área da astronomia, e imagens lindas



Telescópios Espaciais

James Webb Space Telescope (JWST), "Sucessor" do HST
(NASA, ESA, CSA)

- infravermelho (0.6-28.3 μm)
- espelho 6.5 m
- resolução ~ 0.1 arcsec
- lançado 2021
- tempo de vida 10 a 20 anos
- contribuições nos estudos das primeiras estrelas e galáxias, exoplanetas habitáveis, ...





Universidade Federal do ABC

Ótica e Relatividade

FIM PRA HOJE

