

Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Propagação da luz

## Óptica geométrica

S. Mogo

Departamento de Física  
Universidade da Beira Interior

2020 / 21

# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Espectro electromagnético

## Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

## Reflexão

## Refracção

## Dispersão

## Refl. int. total

## Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

## Princ. Huygens

## Princ. Fermat

## Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

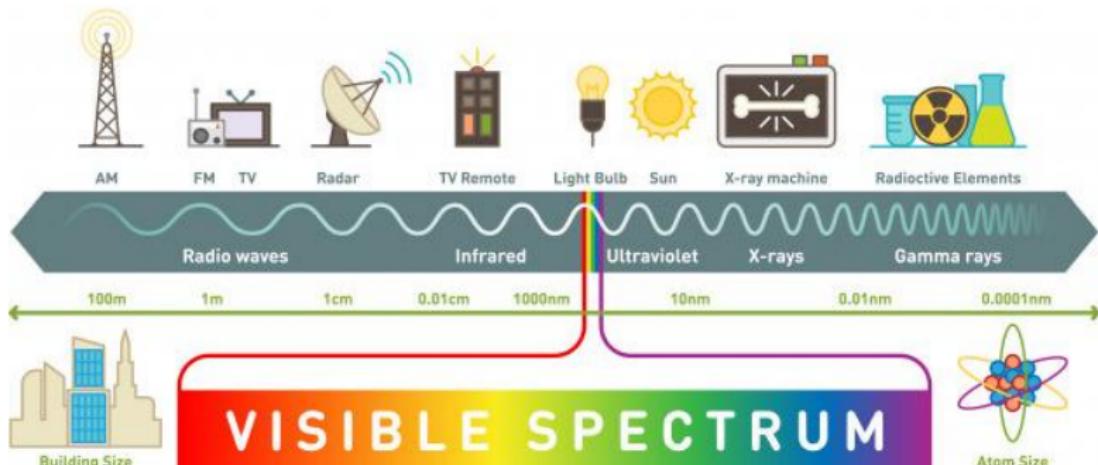
Reversibilidade

## Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações



[https://br.freepik.com/vetores-premium/diagrama-infografico-do-espectro-eletromagnetico\\_1674183.htm](https://br.freepik.com/vetores-premium/diagrama-infografico-do-espectro-eletromagnetico_1674183.htm)



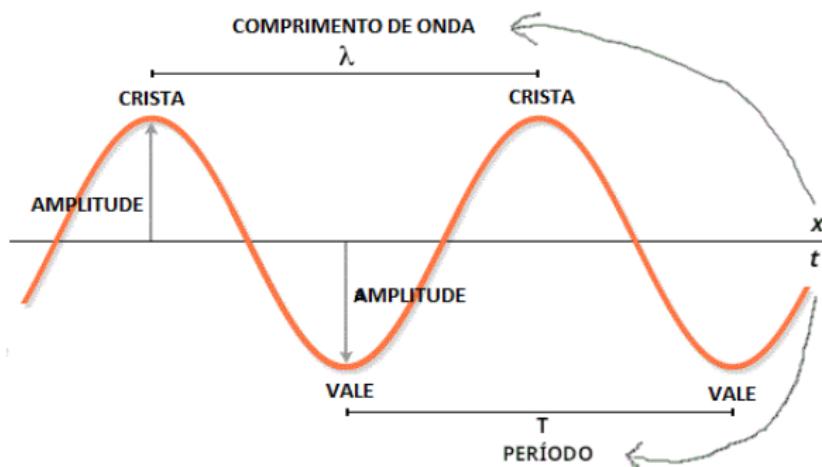
**Radiação visível (luz) → região do espectro electromagnético que tem a capacidade de excitar os fotoreceptores do olho humano, 380-700 nm.**

# Ondas electromagnéticas

A radiação electromagnética é descrita pelo seu comprimento de onda,  $\lambda$ :

$$\lambda = cT$$

onde  $c$  é a velocidade da luz e  $T = \frac{1}{\nu}$  é o período (tempo de 1 ciclo completo).  $\nu$  é a frequência da radiação.



# Ondas electromagnéticas

A radiação electromagnética é emitida em quantidades discretas de energia, denominadas **fotões** ou **quanta** de energia, cuja energia é determinada pela **equação de Plank**:

$$E = h\nu$$



# Ondas e raios de luz

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

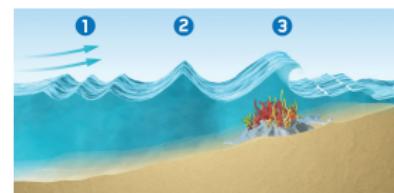
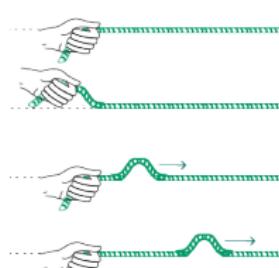
Miragens

Arco-íris

Outras formações

Muitos fenómenos físicos podem ser descritos matematicamente em termos de movimento ondulatório:

- impulso que percorre uma corda tensa;
- ondular do chá numa chávena;
- ondas do mar / marés;
- ...



<http://50consondefisica.blogspot.com/2015/09/ondas-e-suas-caracteristicas.html>  
<https://www.mainstreetlaunched.org/the-racial-wealth-gap/>  
<https://scienceworld.scholastic.com/issues/2017-18/051418/making-waves.html#10901>

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

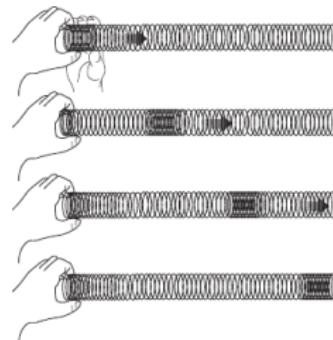
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

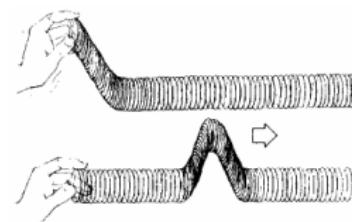
Miragens

Arco-íris

Outras formações



Onda longitudinal numa mola



Onda transversal numa mola

Hecht,E., Optics, 5th Edition, Pearson, 2016.

# Movimento ondulatório

- O aspecto essencial da propagação de uma onda é que esta consiste numa **perturbação do meio** através do qual a onda se propaga;
- a natureza da perturbação é (por agora) irrelevante:
  - deslocamento vertical da corda;
  - amplitude de um campo eléctrico ou magnético associado a uma onda electromagnética;
  - ...



<https://michelleleighwrites.files.wordpress.com/2014/12/music-notes.jpg>  
<https://www.cleanpng.com/png-megaphone-photography-royalty-free-1584242/download-png.html>

# Movimento ondulatório

## Função de onda

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

Sempre que há propagação, a perturbação pode ser expressa em função do espaço e do tempo:  $\psi(x, t)$ .



A forma mais geral da função de onda (a uma dimensão) é:

- $\psi(x, t) = f(x - vt)$ ;
- onde  $f$  representa uma função diferenciável;
- $t$ ,  $x$  e  $v$  representam tempo, direcção e velocidade de propagação.

# Movimento ondulatório

Frente de onda

A forma de onda mais simples, conhecida como **onda harmónica**, é aquela cujo perfil é uma curva **seno**:

- $\psi(x, t) = A \sin k(x - vt);$
- $\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t);$
- ...

Existem diferentes representações de onda harmónica porque existem várias grandezas que caracterizam o movimento.

- O argumento da função seno chama-se **fase da onda**;

(descreve em que posição/instante da curva vamos)



- num determinado instante, as superfícies constituídas pelos pontos de igual fase, são denominadas **frentes de onda**:

- planas;
- esféricas;
- cilíndricas;
- ...

# Ondas e raios de luz

## Frentes de onda

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

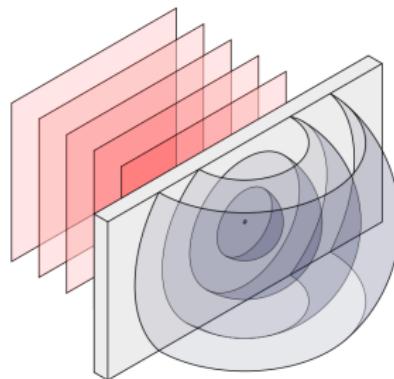
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

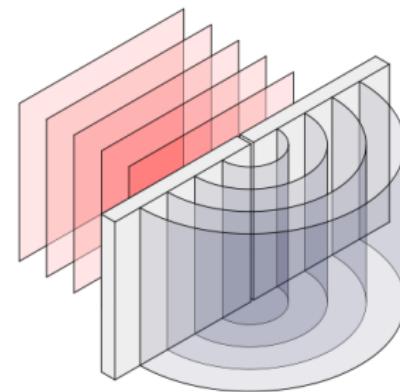
Miragens

Arco-íris

Outras formações



[http://www.wikiwand.com/en/Aberrations\\_of\\_the\\_eye](http://www.wikiwand.com/en/Aberrations_of_the_eye)



<https://physics.stackexchange.com/questions/71873/diffraction-and-waves>

# Óptica geométrica x Óptica física

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

Dependendo dos fenómenos ópticos que pretendemos estudar, podemos ou não, ter necessidade de trabalhar o carácter ondulatório da luz:

- $\lambda \ll d \rightarrow$  óptica geométrica;
- $\lambda \approx d \rightarrow$  óptica física;
- $\lambda \gg d \rightarrow$  óptica física.

# Óptica física

- Quando o carácter da luz não pode ser ignorado;
- temos necessidade de usar:
  - óptica ondulatória: interferência, difracção;
  - óptica electromagnética: polarização birefringência;
  - óptica quântica: níveis de energia, *quanta*, lasers, etc.

# Óptica geométrica

## Raios de luz

- Quando o c.d.o. é muito pequeno comparado com as dimensões dos elementos ópticos;
- a luz é entendida como viajando em linha recta a partir da fonte — **raio luminoso**.



**Raio luminoso** → é o percurso ao longo do qual a energia luminosa é transmitida de um ponto para outro num sistema óptico.

# Óptica geométrica

## Raios de luz

### Raio luminoso:

- construção muito útil mas irreal porque um feixe de luz não pode ser tão fino que se assemelhe a uma linha recta;
- os raios luminosos são perpendiculares às frentes de onda;
- quando um raio luminoso atravessa um sistema óptico formado por vários elementos, o **percurso óptico** é uma sequência de segmentos rectilíneos:
  - as descontinuidades nos segmentos ocorrem cada vez que a luz é refractada ou reflectida;
  - as leis da óptica geométrica descrevem a direcção dos raios após estas interacções com os elementos ópticos.

# Ondas e raios de luz

## Princípio de Malus-Dupin

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

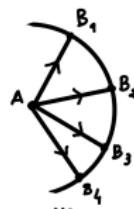
Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

A relação entre a **óptica geométrica** e a **óptica ondulatória** pode ser estabelecida através do **princípio de Malus-Dupin**.

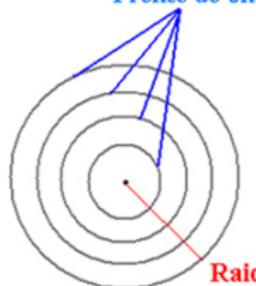


Se, sobre cada um dos raios que saem de um ponto emissor A, se considerarem percursos ópticos iguais a partir de A, os pontos  $B_i$  que limitam estes percursos, formam uma superfície perpendicular a todos os raios — frente de onda.

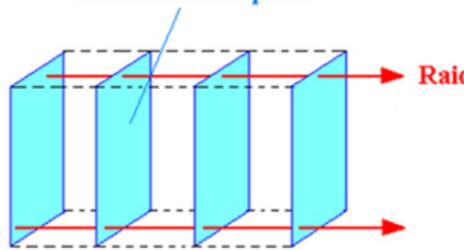
# Ondas e raios de luz

## Frentes de onda x Raios luminosos

Frente de onda



Frente de onda plana



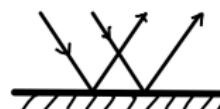
# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Reflexão

**Reflexão** → é uma mudança na direcção de uma frente de onda na fronteira entre dois meios tal que, a frente de onda regressa ao meio do qual é originária.

- **especular** → quando a fronteira entre os dois meios é lisa.



- **difusa** → quando a fronteira entre os dois meios é rugosa. (conserva a energia mas perde a imagem)



- **retroreflexão** → quando o feixe é reflectido paralelamente à sua direcção de incidência.



# Reflexão especular, difusa

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

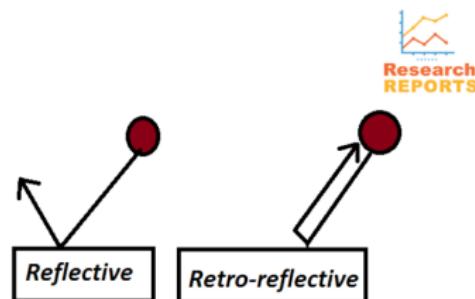
Miragens

Arco-íris

Outras formações

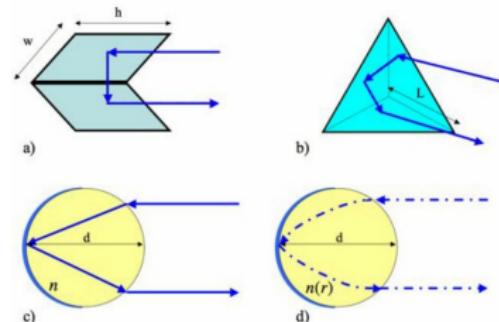


<https://www.explainthatstuff.com/howmirrorswork.html>

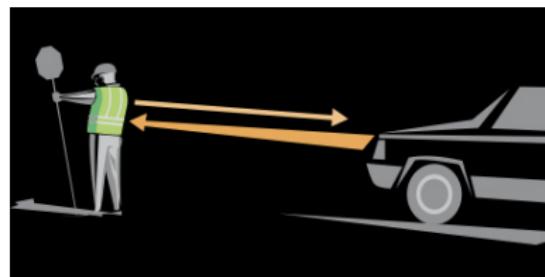


[www.researchreports.com](http://www.researchreports.com)

# Retroreflexão



[https://www.researchgate.net/publication/267025082\\_Frequency\\_Selective\\_Terahertz\\_Retroreflectors/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/267025082_Frequency_Selective_Terahertz_Retroreflectors/figures?lo=1)



[https://www.3m.com/3M/en\\_US/scotchlite-reflective-material-us/industries-active-lifestyle/active-lifestyle/how-retroreflection-works/](https://www.3m.com/3M/en_US/scotchlite-reflective-material-us/industries-active-lifestyle/active-lifestyle/how-retroreflection-works/)

# Lei da reflexão

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

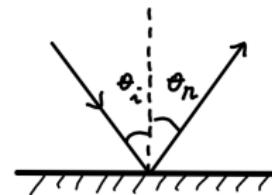
Arco-íris

Outras formações

## Lei da reflexão:

- O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.

$$\theta_i = \theta_r$$



# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

**Refracção** → é uma mudança na direcção de uma frente de onda que ocorre quando esta passa de um meio para outro alterando a sua velocidade.



Quando a luz passa de um meio para outro, a sua **velocidade** aumenta ou diminui devido às diferenças das estruturas atómicas das duas substâncias — a luz encontra os electrões que constituem o meio, os quais podem absorver ou redistribuir a luz.

# Refracção

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações



<https://www.pkphysicalscience.com/article/459/7/light-refraction> login?username=thealbert&password=library

# Índice de refracção

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

**Índice de refracção** → relação entre a velocidade da luz no vazio ( $3 \times 10^8$  m/s) e a velocidade da luz num meio.

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

Relação entre os índices de refracção nos meios de transmissão e de incidência:

$$n_{ti} = \frac{n_t}{n_i}$$

**O índice de refracção é uma característica do meio.**

# Índice de refracção como característica do material

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

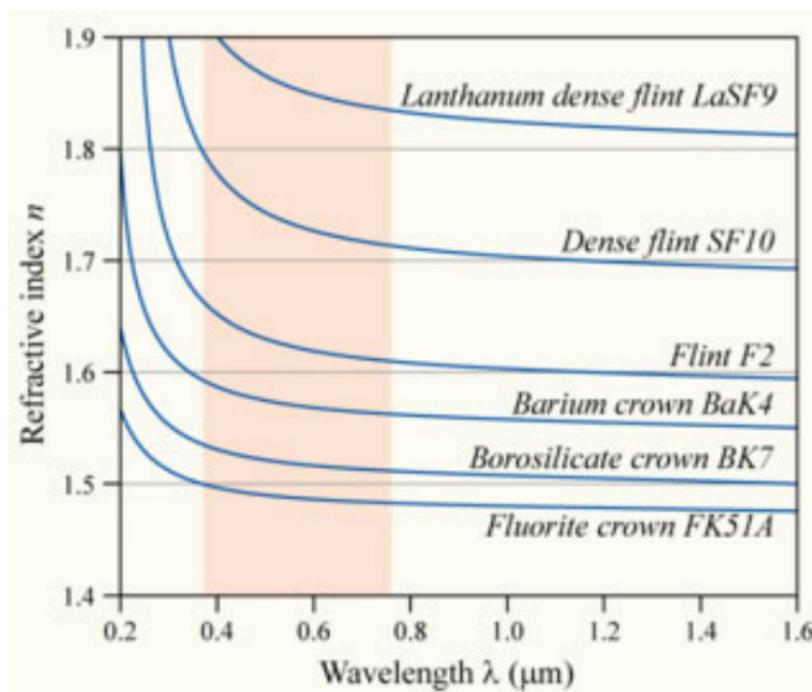
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações



# Lei de Snell (lei da refracção)

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

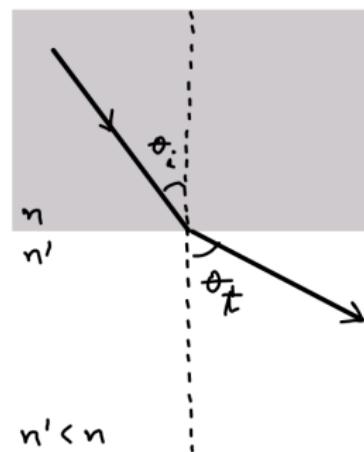
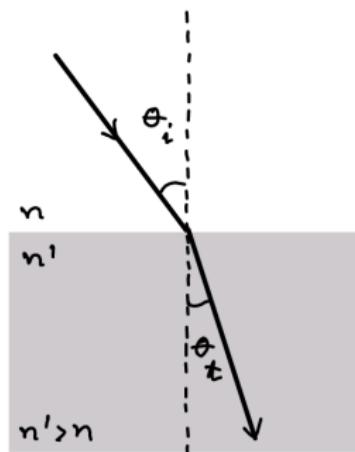
Arco-íris

Outras formações

## Lei de Snell:

- Descreve a relação entre os ângulos de incidência e de refracção quando a luz passa de um meio para outro.

$$n \sin \theta_i = n' \sin \theta_t$$



# Reflexão e refracção

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

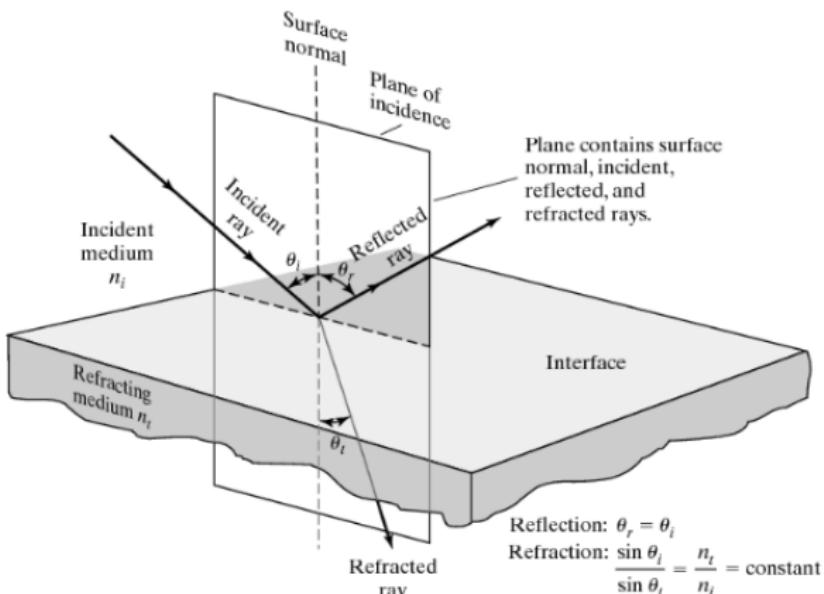
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações



Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.M., Pedrotti, L.S., Introduction to Optics, 3rd Edition, Cambridge University Press, 2017.

# Outline

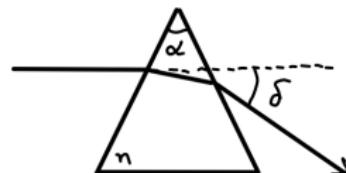
- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Dispersão

Dispersão → é uma mudança na velocidade de fase de uma onda que ocorre quando a luz passa de um meio para outro e depende do c.d.o. da onda.

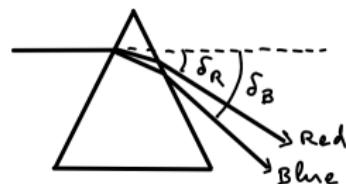


# Dispersão



Refracção num prisma:  $\delta = (n - 1)\alpha$

- $n = \frac{c}{\nu}$  e  $n$  varia com o c.d.o. da luz que atravessa o prisma;
- como todas as cores têm diferentes ângulos de desvio, a luz branca dispersa-se formando um **espectro**.



- Luz vermelha (800 nm) desvia-se menos;
- luz violeta (400 nm) desvia-se mais;
- outras cores, têm desvios intermédios.

$$E = h\nu$$

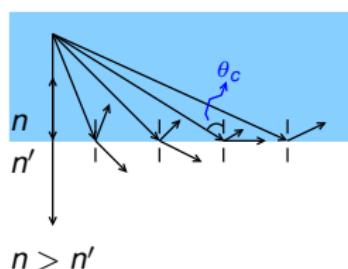
Como  $\nu_R < \nu_B \Rightarrow E_R < E_B$ .  
( $\lambda = cT = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$ )

# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 **Reflexão interna total**
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Reflexão interna total

Quando a luz atravessa a fronteira entre dois materiais com diferentes  $n$ , o feixe é parcialmente refratado e parcialmente reflectido.

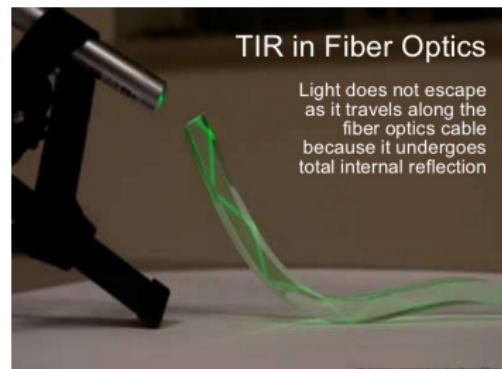
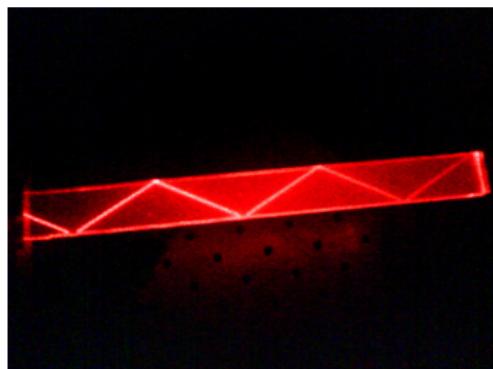


- No entanto, aumentando muito o ângulo de incidência (tornando-o mais próximo de ser paralelo à fronteira), atinge-se um **ângulo crítico** para o qual a luz é refractada ao longo da fronteira.

Se aumentar mais ainda o ângulo de incidência, o feixe passa a ser totalmente reflectido — **reflexão interna total**.

# Reflexão interna total

Quando um feixe de raios luminosos incide numa extremidade de uma **fibra óptica**, sofre sucessivas reflexões internas totais nas paredes internas da fibra, percorrendo-a toda até sair na outra extremidade.



# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Polarização da luz

(Tema a abordar na UC de Óptica Física)

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

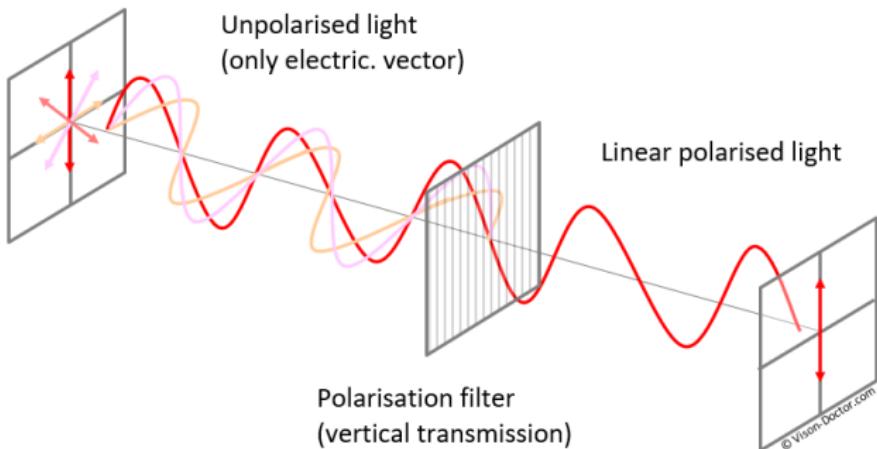
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

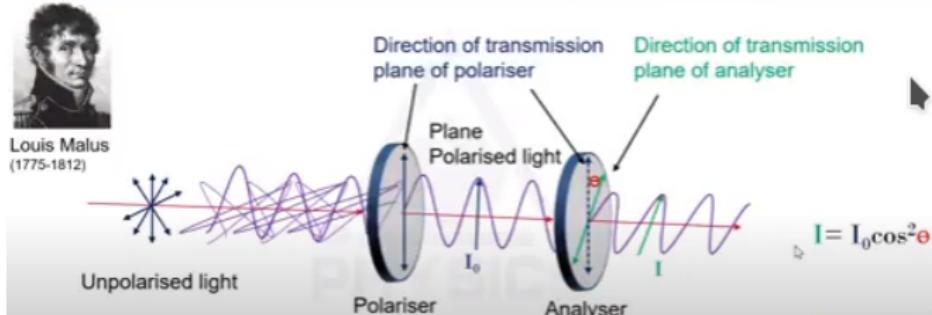


<https://pbuyvip.cf/ProductDetail.aspx?iid=132198203&pr=60.99>

**Luz polarizada** → é aquela para a qual apenas existe uma direcção de vibração do vector campo eléctrico.



Louis Malus  
(1775-1812)



[https://www.youtube.com/watch?v=IpZre\\_KIDM0](https://www.youtube.com/watch?v=IpZre_KIDM0)

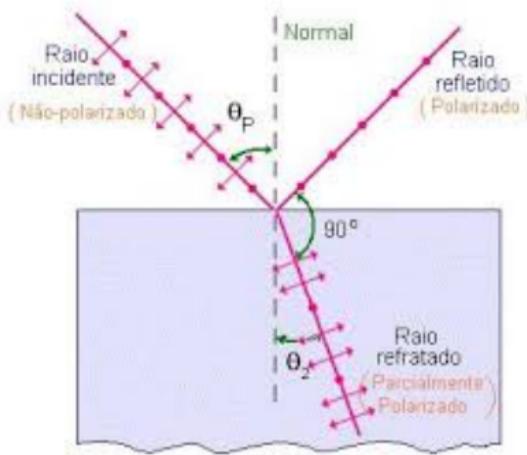
A intensidade da luz que sai do polarizador é proporcional ao quadrado do cosseno do ângulo entre a direcção de polarização e o polarizador:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

# Ângulo de Brewster

## Polarização por reflexão

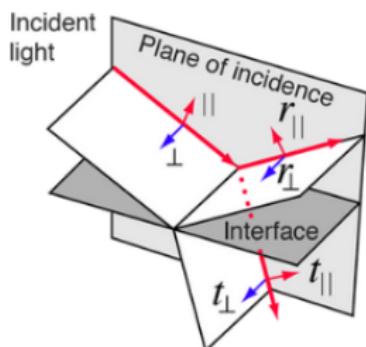
Ângulo de Brewster → ângulo particular de incidência para o qual os raios reflectido e refractado formam um ângulo de 90°.



[http://www.infis.ufu.br/infis\\_sys/pdf/TCC%20-%20Marcos%20Garcia%20-%20Final%201.pdf](http://www.infis.ufu.br/infis_sys/pdf/TCC%20-%20Marcos%20Garcia%20-%20Final%201.pdf)

Se a luz incidente for não polarizada, o feixe reflectido fica completamente polarizado.

# Equações de Fresnel



$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$t_{\parallel} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i + \theta_t)}$$

$$t_{\perp} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

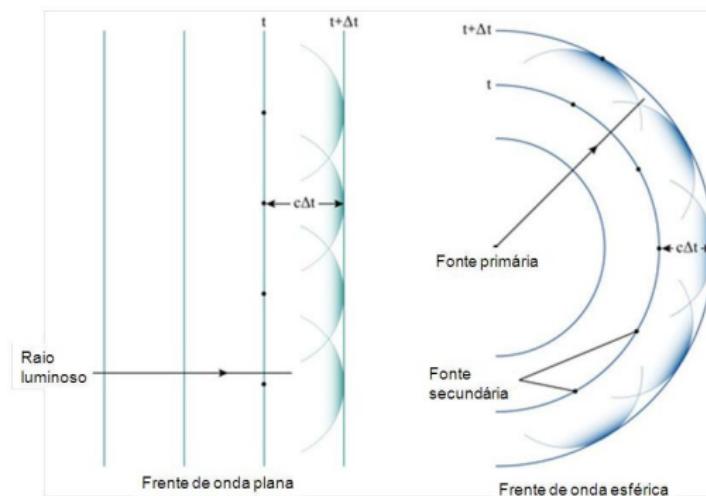
<https://www.electrical4u.com/fresnel-equations/>

# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Princípio de Huygens

**Princípio de Huygens:** cada ponto de uma frente de onda inicial pode ser considerado como uma fonte de ondas esféricas secundárias que se estendem em todas as direcções com a mesma velocidade, frequência e c.d.o. da frente de onda de que procedem.



# Princípio de Huygens

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

- Demonstração da lei da reflexão
- Demonstração da lei da refracção

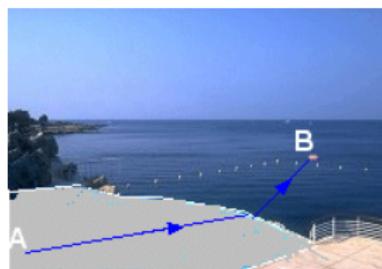
... partindo do princípio de Huygens!

# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Princípio de Fermat

**Princípio de Fermat:** quando a luz se propaga entre dois pontos, fá-lo através do percurso mais rápido possível.



- Estamos no ponto A, pessoa a afogar-se no ponto B;
- Caminho mais curto entre 2 pontos: linha recta AB;
- Mas... deslocamos-nos mais lentamente na água do que em terra;
- Caminho mais rápido entre 2 pontos: Princípio de Fermat.

# Princípio de Fermat

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

- Demonstração da lei da reflexão
  - Demonstração da lei da refracção
- ... partindo do princípio de Fermat!

Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Princípios da óptica geométrica

## Princípio de propagação retilínea

Num meio transparente, homogêneo e isotrópico, os raios de luz percorrem trajectórias rectilíneas.



Este princípio justifica que um raio de luz possa ser representado como um segmento de recta orientado.

# Princípios da óptica geométrica

## Princípio de independência

Quando os raios de luz se cruzam, seguem independentemente a sua trajectória, sem que nenhuma das suas características seja alterada (direcção, sentido,...).



Exemplo: cruzamento de holofotes em peças de teatro.

# Princípios da óptica geométrica

## Princípio da reversibilidade

Num meio transparente, homogéneo e isotrópico, a trajectória seguida por um raio de luz não se altera quando o sentido do seu percurso é invertido.



Ou seja, qualquer raio luminoso de um sistema óptico que sofra uma inversão no seu sentido de propagação, percorrerá o mesmo percurso, agora em sentido contrário.

Exemplo: se vemos alguém num espelho, certamente essa pessoa também nos verá.

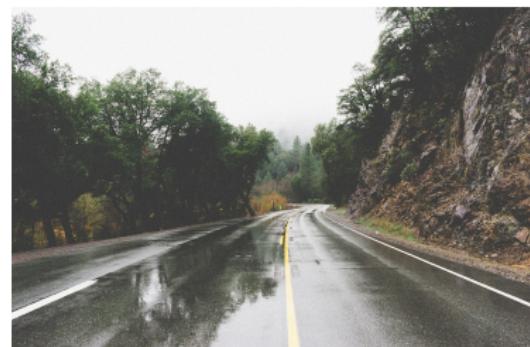
# Outline

- 1 Ondas e raios de luz  
Princípio de Malus-Dupin
- 2 Reflexão especular, difusa e retroreflexão
- 3 Refracção
- 4 Dispersão
- 5 Reflexão interna total
- 6 Polarização da luz  
Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel
- 7 Princípio de Huygens
- 8 Princípio de Fermat
- 9 Princípios da óptica geométrica  
Princípio de propagação retilínea  
Princípio de independência  
Princípio da reversibilidade
- 10 Óptica atmosférica  
Miragens  
Arco-íris  
Outras formações coloridas

# Óptica atmosférica

## Miragens

- As **miragens** são também chamadas **espelhismos**;
- ocorrem quando existe uma grande diferença de temperatura entre o ar próximo do solo e o ar mais afastado.

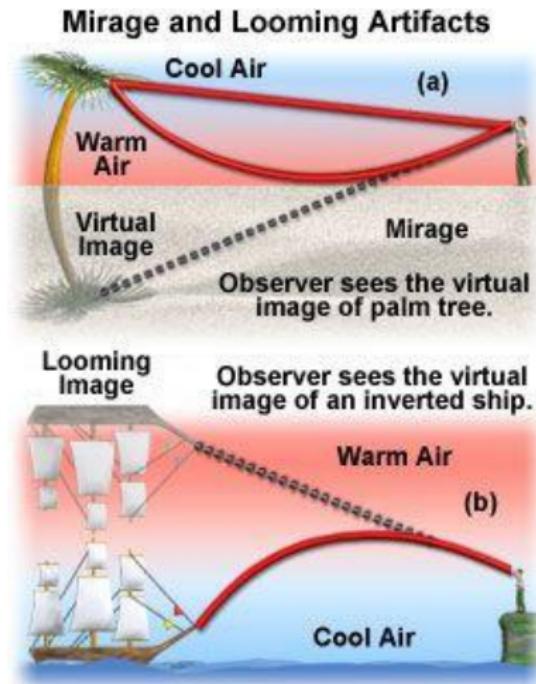


<https://www.nullarborroadhouse.com.au/the-beautiful-desert-mirage-of-the-nullarbor/>

<https://pixabay.com/de/photos/straße-pflanzen-nass-regen-144ndlich-2631249/>

# Óptica atmosférica

## Miragens

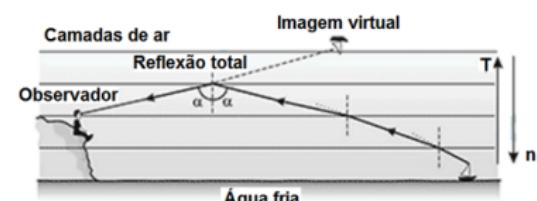
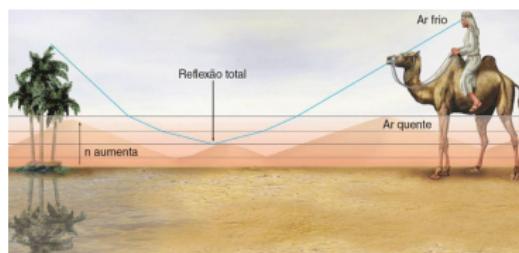


- Gera-se um **gradiente de temperatura** que produz um desvio por refracção dos raios luminosos e a sua posterior reflexão por reflexão interna total.

# Óptica atmosférica

## Miragens

- Forma-se uma imagem que pode ser inferior ou superior, dependendo de o ar mais quente se encontrar **mais próximo ou mais afastado** do solo.



Estradas asfaltadas,  
desertos, ...

Regiões polares, mar, ...

Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

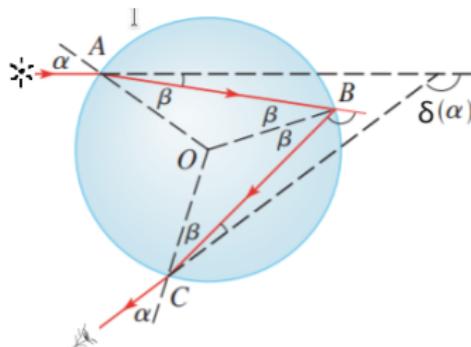
Outras formações

# Óptica atmosférica

## Arco-íris



<https://www.dicasecuriosidades.net/2017/03/quao-raros-sao-os-arco-iris-duplos.html>



# Óptica atmosférica

## Arco-íris

1 Ocorre refracção:

$$\begin{aligned} n_{\text{ar}} \sin \alpha &= n_{\text{gota}} \sin \beta \\ \Leftrightarrow \sin \alpha &= \frac{4}{3} \sin \beta; \end{aligned}$$

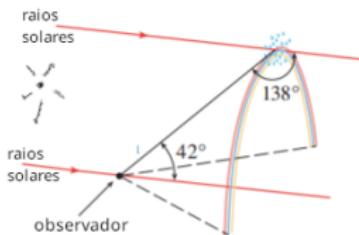
2 a maior parte da luz é reflectida em B;

3 alguma luz é reflectida em C mas outra parte é refractada e sai da gota;

4 ângulo do desvio:

$$\begin{aligned} \delta(\alpha) &= (\alpha - \beta) + (\pi - 2\beta) + (\alpha - \beta) \\ &= \pi + 2\alpha - 4\beta; \end{aligned}$$

5 o mínimo desvio ( $\delta'(\alpha) = 0$ ) é  
 $\delta = 138^\circ$  ocorre quando  
 $\alpha \cong 59,4^\circ$ .



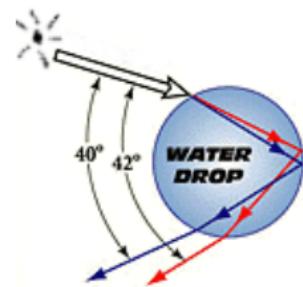
Stewart. Calculus. 8th edition.

# Óptica atmosférica

## Arco-íris

- O arco está centrado na sombra da cabeça do observador (no nadir);
- o ângulo de elevação do observador ao ponto mais alto do arco-íris é  $180^\circ - 138^\circ = 42^\circ \leftarrow$  **ângulo do arco-íris.**

- A luz branca sofre dispersão ao entrar na gota de água;
- ao contrário do que muita gente pensa, não existe reflexão interna total na 2a superfície da gota;
- mas a luz transmitida é muito menos do que a reflectida;
- a luz volta a ser refractada ao sair da gota e sai em vários ângulos,  $40^\circ - 138^\circ$ .



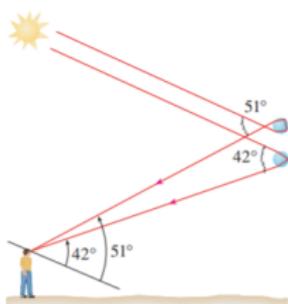
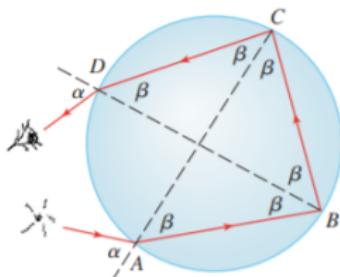
<https://www.optics4kids.org/what-is-optics/refraction/dispersion>

# Óptica atmosférica

## Arco-íris secundário

### Formação do arco-íris secundário:

- mais ténue e um pouco mais acima do  $1^\circ$ ;
- resulta de um raio refractado em A, que sofre duas reflexões dentro da gota, em B e C, e sai da gota em D;
- o ângulo de desvio neste caso é:  
$$\delta(\alpha) = 2\alpha - 6\beta + 2\pi;$$
- para  $n_{\text{gota}} = 4/3$ , o desvio mínimo ( $\delta'(\alpha) = 0$ ) é  $\delta(\alpha) \cong 129^\circ$ , logo, o ângulo do  $2^\circ$  arco-íris é  $\cong 51^\circ$ ;
- notar que o arco-íris secundário tem as cores pela ordem inversa.



# Óptica atmosférica

## Outras formações coloridas

- Os arco-íris são formados por refracção e reflexão da luz solar por gotas de chuva;
- quando os raios solares passam por cristais de gelo, formam **halos** ou **arcos circum-horizontais** (também chamados arco-íris de fogo);
- pequenas gotas de nuvens difractam a luz formando **glórias** e **coroas** ou, quando a nuvem é fina e as gotas são aproximadamente do mesmo tamanho, formam-se **núvens iridiscentes**.

# Óptica atmosférica

## Outras formações coloridas



# Óptica atmosférica

## Outras formações coloridas



Óptica  
geométrica  
S. Mogo

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea  
Independência  
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens  
Arco-íris

Outras formações

# Óptica atmosférica

Arco circum-zenital  
(Arco-íris invertido)



<http://maq2109.blogspot.com/2012/05/locuras-de-la-naturaleza-un-arco-iris.html>

Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Óptica atmosférica

Arco circum-horizontal  
(Arco-íris de fogo)



Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Óptica atmosférica

Halo 22°



2 OCT 2012 1 PM LOCAL, CANON 5DMKII, TOKINA 11-16MM@16  
©SHAHIRIN AHMAD@SHAHGAZER OBSERVATORY (SGO), SRI DAMANSARA, MALAYSIA  
www.flickronline.net - @fleus@SHAHGAZER

<https://www.universetoday.com/97675/astrophoto-spectacular-22-degree-sun-halo-over-kuala-lumpur/>

Óptica  
geométrica

S. Mogo

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Óptica atmosférica

## Parélio



<https://www.worldatlas.com/articles/what-is-a-sun-dog.html>

# Óptica atmosférica

## Nuvens iridescentes

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus

Ângulo de Brewster

Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retílinea

Independência

Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações



Óptica  
geométrica  
S. Mogo

Ondas / Raios  
Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refracção

Dispersão

Refl. int. total

Polarização

Lei de Malus  
Ângulo de Brewster  
Equações de Fresnel

Princ. Huygens

Princ. Fermat

Princ. ópt. geo.

Propagação retilínea  
Independência  
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

# Óptica atmosférica

## Corona à volta da Lua



<https://epod.usra.edu/blog/2014/02/coronas-around-the-moon.html>

# Óptica atmosférica

## Gloria



<https://tempojoaopessoa.jimdo.com/fen%C3%A4menos-%C3%B3pticos/g1%C3%B3ria/>