

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

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

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

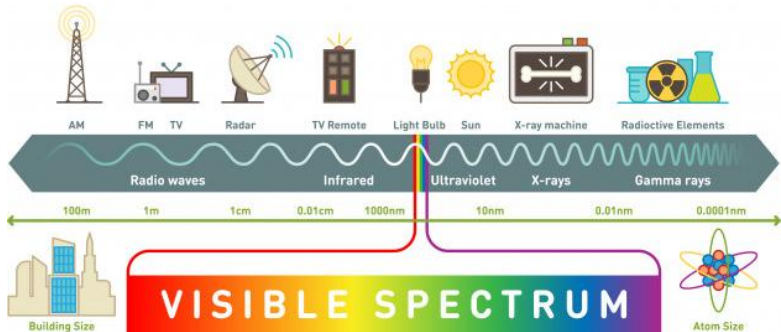
Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

Espectro electromagnético



https://br.freepik.com/vetores-premium/diagrama-infografico-do-espectro-eletromagnetico_1674183.htm



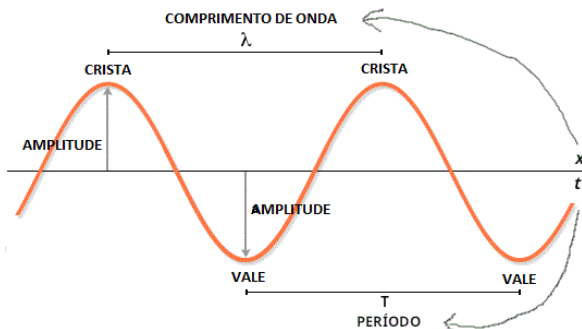
Radiação visível (luz) → região do espectro electromagnético que tem a capacidade de excitar os fotoreceptores do olho humano, 380-700 nm.

Ondas electromagnéticas

A radiação electromagnética é descrita pelo seu **comprimento de onda**, λ :

$$\lambda = cT$$

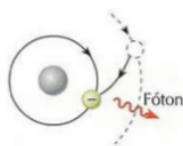
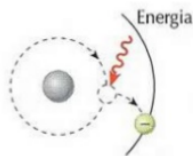
onde c é a velocidade da luz e $T = \frac{1}{\nu}$ é o **período** (tempo de 1 ciclo completo). ν é a **frequência** da radiação.



Ondas electromagnéticas

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

$$E = h\nu$$

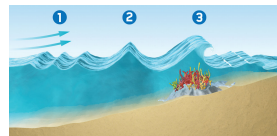
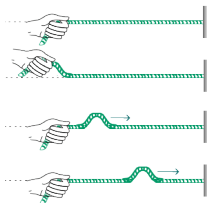


<https://www.slideshare.net/newtondasilva/aula-4-modelo-atmico-de-bohr>

Ondas e raios de luz

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://50tonsdefisica.blogspot.com/2015/09/ondas-e-suas-caracteristicas.html>
<https://www.mainstreetlaunch.org/the-racial-wealth-gap/>
<https://scienceworld.scholastic.com/issues/2017-18/051418/making-waves.html#1090L>

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.

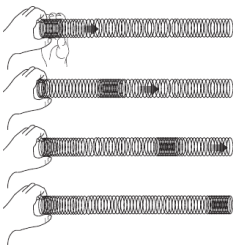
Miragens

Arco-íris

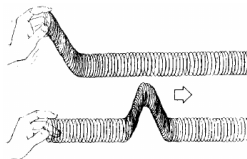
Outras formações

Ondas e raios de luz

Movimento ondulatório



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

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 / 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.

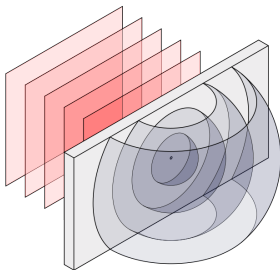
Miragens

Arco-íris

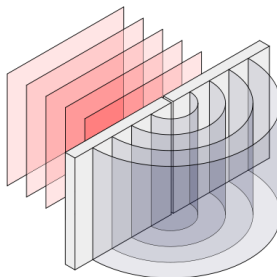
Outras formações

Ondas e raios de luz

Frentes de onda



http://www.wikiwand.com/en/Aberrations_of_the_eye



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

Óptica geométrica x Óptica física

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.

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 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

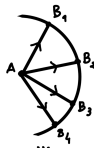
Raio luminoso:

- 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

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**.

Frentes de onda x Raios luminosos

Princ. Malus-Dupin

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

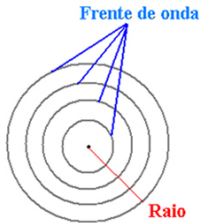
Reversibilidade

Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-iris

Outras formações



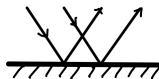
Outline

- 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

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)



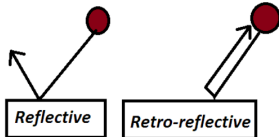
- **retroreflexão** → quando o feixe é reflectido paralelamente à sua direcção de incidência.



Reflexão especular, difusa

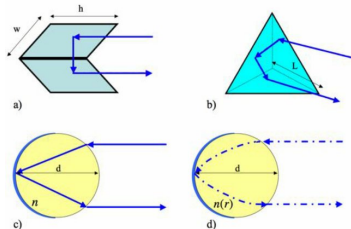


<https://www.explainthatstuff.com/howmirrorswork.html>

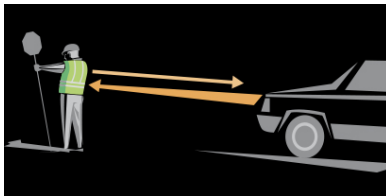


www.researchreports.com

Retroreflexão



https://www.researchgate.net/publication/267025082_Frequency_Selective_Terahertz_Retroreflectors/figures?lo=1

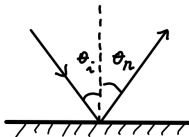


https://www.3m.com/3M/en_US/scotchlite-reflective-material-us/industries-active-lifestyle/active-lifestyle/how-retroreflection-works/

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

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.

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

Refracção



<https://www.pkphysicalscience.com/article/459/7/light-refractionlogin?username=thealbertaspasword-library>

Índice de refração

Índice de refração → relação entre a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s) e a velocidade da luz num meio.

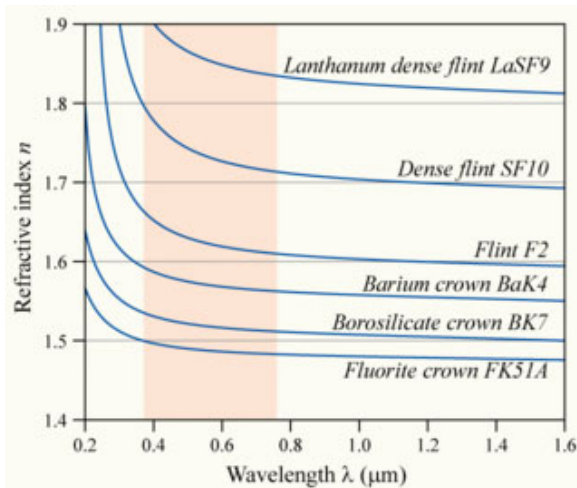
$$n = \frac{c}{v}$$

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

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

O índice de refração é uma característica do meio.

Índice de refração como característica do material



Lei de Snell (lei da refração)

Ondas / Raios

Princ. Malus-Dupin

Reflexão

Refração

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

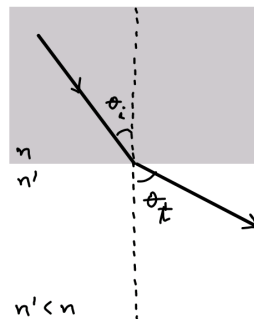
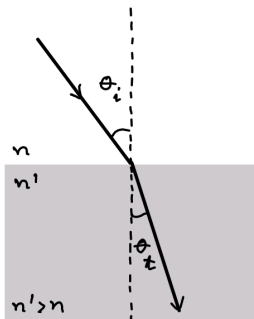
Arco-íris

Outras formações

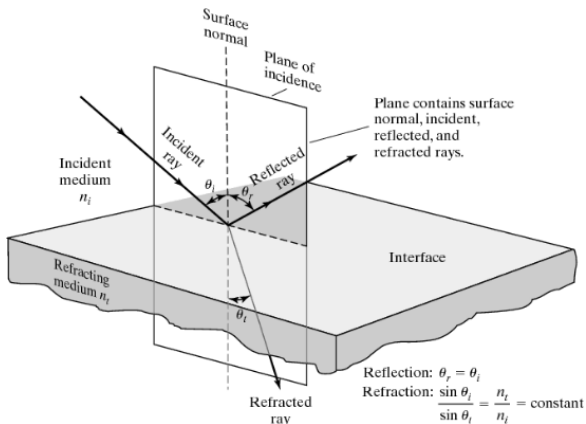
Lei de Snell:

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

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



Reflexão e refração

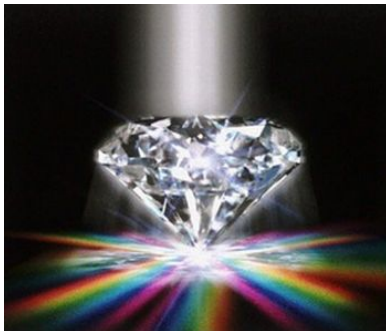


Outline

- 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

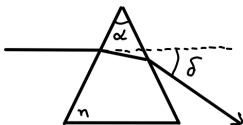
Dispersão

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.



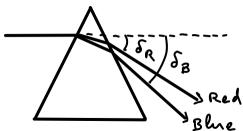
<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=33330>

Dispersão



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

- $n = \frac{c}{v} \wedge n$ 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.

$$E = h\nu$$

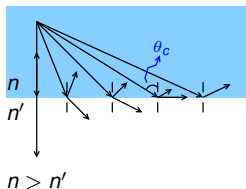
Como $\nu_R < \nu_B \Rightarrow E_R < E_B$.
 $(\lambda = cT = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda})$

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.

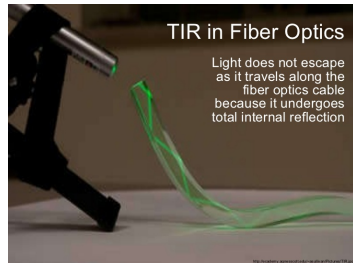
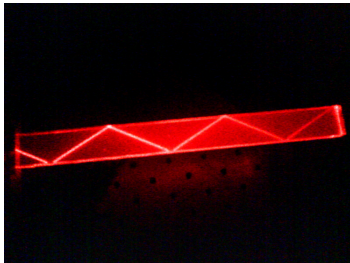


- No entanto, aumentando muito o ângulo de incidência (tornando-o mais próximo de ser paralelo à fronteira), atinge-se um **ângulo crítico** para o qual a luz é refractada ao longo da fronteira.

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.



<https://www.siyavula.com/read/science/grade-11/geometrical-optics/05-geometrical-optics-07>

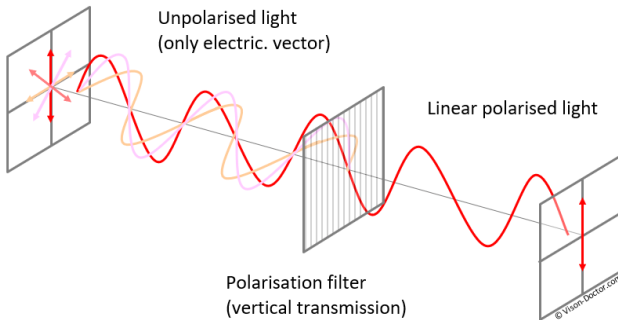
<https://www.slideshare.net/thelawofscience/total-internal-reflection-critical-angle>

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)



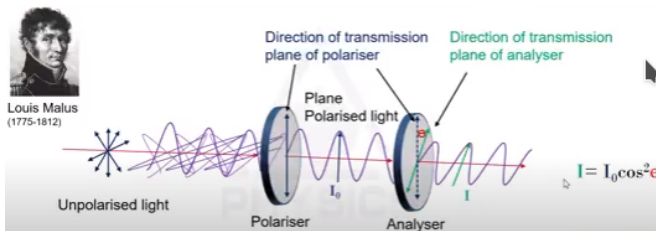
<https://pbuyvip.cf/ProductDetail.aspx?iid=132198203&pr=60.99>

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

Polarização da luz

Lei de Malus

Lei de Malus: se luz linearmente polarizada incidir sobre um polarizador, a intensidade da radiação que o atravessa diminui à medida que o ângulo θ aumenta.



https://www.youtube.com/watch?v=Lp2re_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:

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

Equações de Fresnel

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

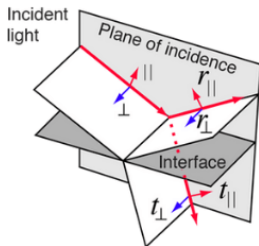
Ópt. atmosfer.

Miragens

Arco-íris

Outras formações

Equações de Fresnel → descrevem a reflexão e a refração da luz quando passa de um meio para outro.



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

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

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

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

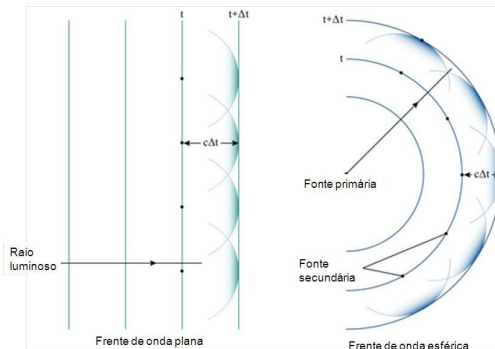
$$t_{\perp} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

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

- Demonstração da lei da reflexão
- Demonstração da lei da refração

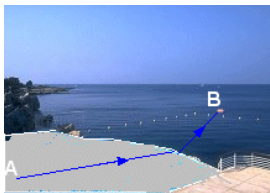
... partindo do princípio de Huygens!

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

- Demonstração da lei da reflexão
- Demonstração da lei da refração

... partindo do princípio de Fermat!

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 trajetórias retilíneas.



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, homogêneo 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.

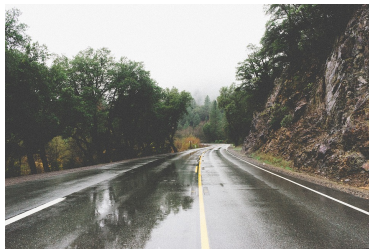
Outline

- 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 **espehismos**;
- ocorrem quando existe uma grande diferença de temperatura entre o ar próximo do solo e o ar mais afastado.

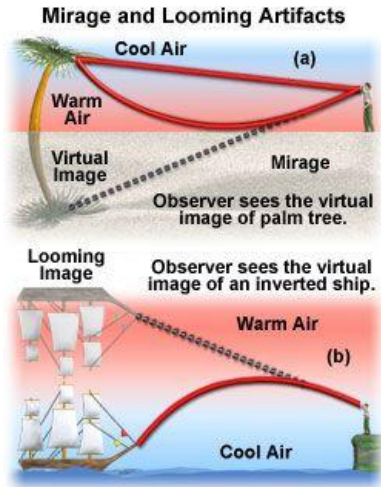


<https://www.nullarborroadhouse.com.au/the-beautiful-desert-mirage-of-the-nullarbor/>

<https://pixabay.com/de/photos/stra%C3%9Fen-pf%C3%BCtzen-nass-regen-1%C3%A4ndlich-2631249/>

Óptica atmosférica

Miragens

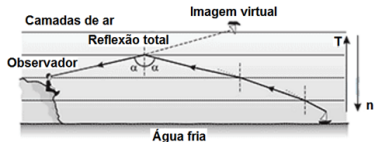
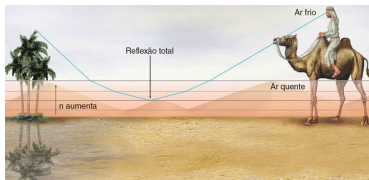


- Gera-se um **gradiente de temperatura** que produz um desvio por refração dos raios luminosos e a sua posterior reflexão por reflexão interna total.

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 atmosférica

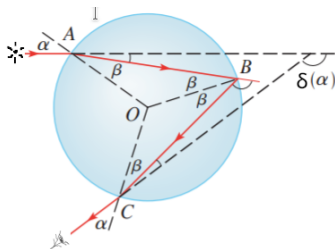
Arco-íris



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

Óptica atmosférica

Arco-íris



1 Ocorre refração:

$$n_{ar} \sin \alpha = n_{gota} \sin \beta$$

$$\Leftrightarrow \sin \alpha = \frac{4}{3} \sin \beta;$$

2 a maior parte da luz é refletida em B;

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

4 ângulo do desvio:

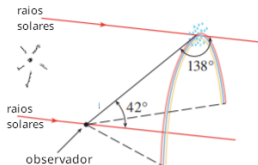
$$\delta(\alpha) = (\alpha - \beta) + (\pi - 2\beta) + (\alpha - \beta)$$

$$= \pi + 2\alpha - 4\beta;$$

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

Óptica atmosférica

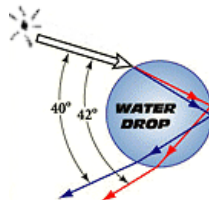
Arco-íris



Stewart. Calculus. 8th edition.

- 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 $180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$ ← **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° - 138° .



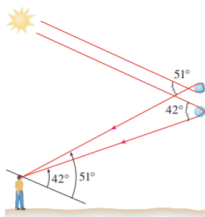
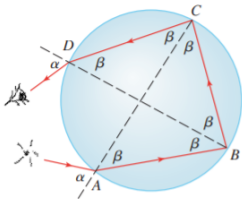
<https://www.optics4kids.org/what-is-optics/refraction/dispersion>

Óptica atmosférica

Arco-íris secundário

Formação do arco-íris secundário:

- mais tênue e um pouco mais acima do 1º;
- 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 2º arco-íris é $\cong 51^\circ$;
- notar que o arco-íris secundário tem as cores pela ordem inversa.



Stewart. Calculus. 8th edition.

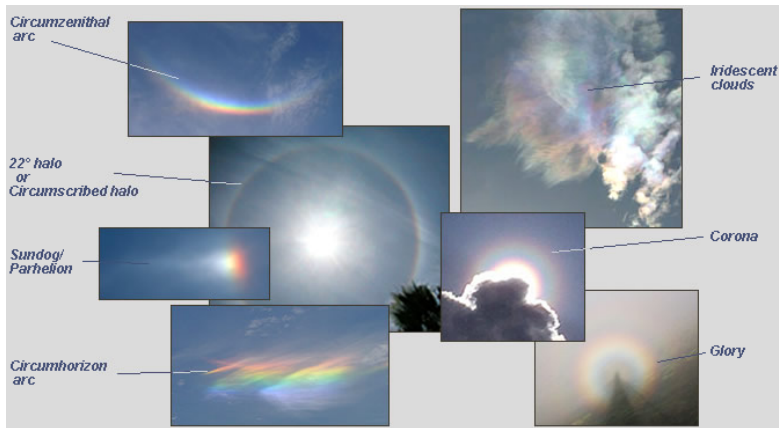
Óptica atmosférica

Outras formações coloridas

- Os arco-íris são formados por refração 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 atmosférica

Arco circum-zenital
(Arco-íris invertido)



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

Óptica atmosférica

Arco circum-horizontal (Arco-íris de fogo)



<https://www.contapraeu.com.br/curiosidades/o-que-e-um-arco-iris-de-fogo/>

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

Halo 22°



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

Óptica atmosférica

Parélio



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

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

Núvens iridescentes



Óptica atmosférica

Corona à volta da Lua



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

Óptica atmosférica

Gloria



<https://tempojoapessoa.jimdo.com/fen%C3%B4menos-%C3%B3pticos/g1%C3%B3ria/>