



**Pós-Graduação Interunidades**  
Instituto de Física da USP

**USP**

# **Interação da luz com a matéria**

Disciplina: Complementos do Eletromagnetismo  
Discente: Cleiton, Erick e Willian

São Paulo, 2019

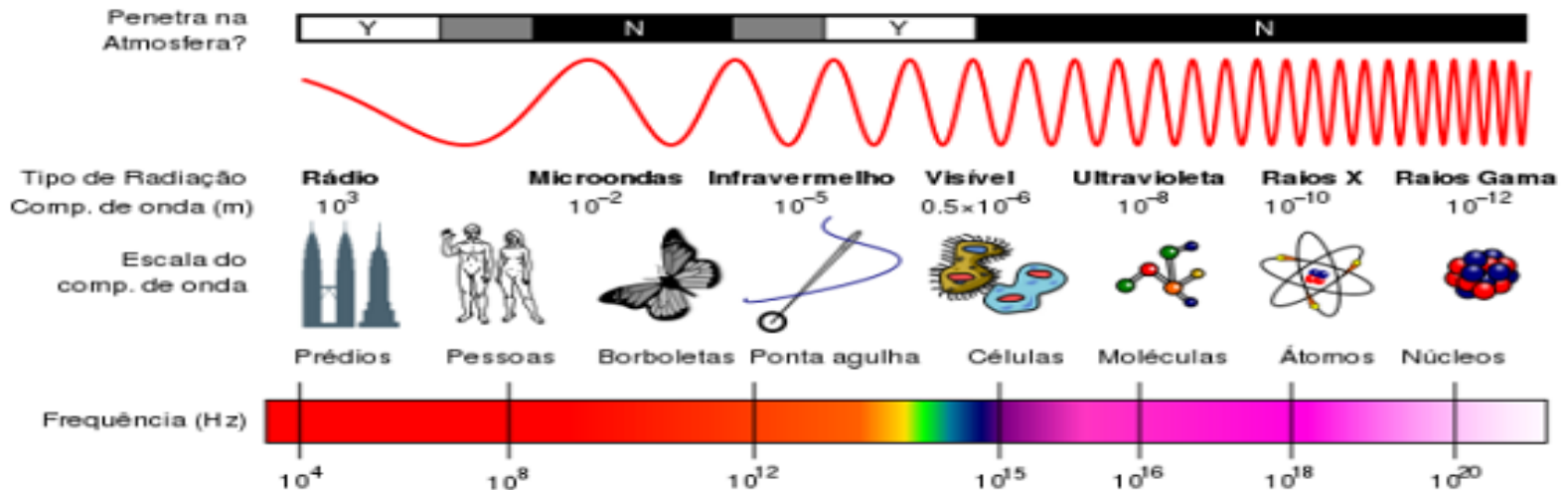
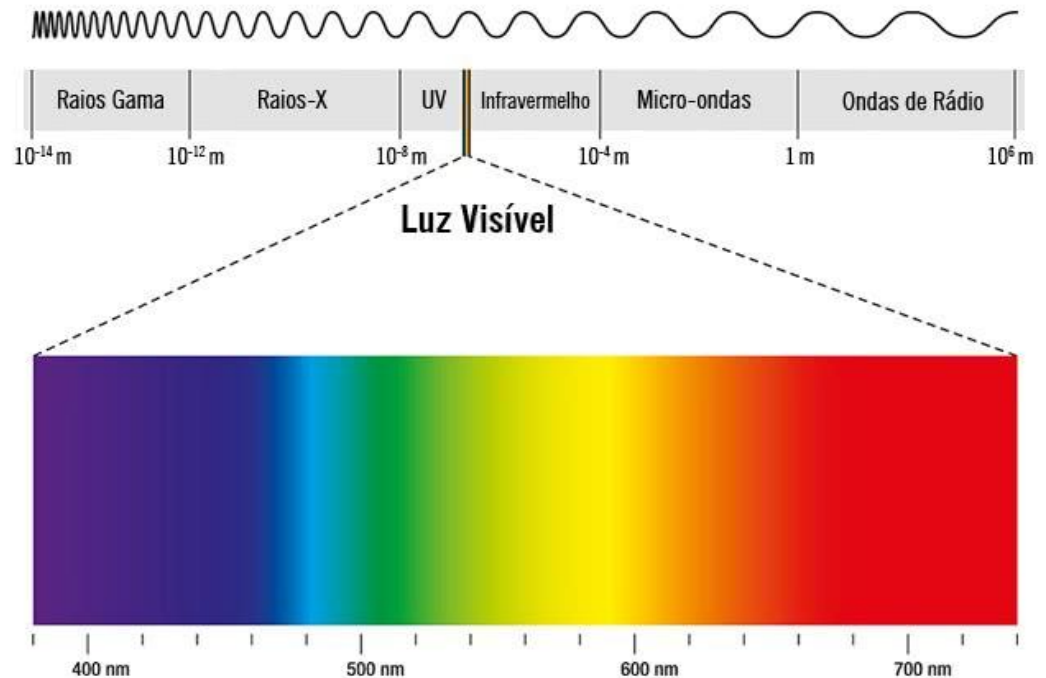
# TÓPICOS DO SEMINÁRIO

- As cores e as Sensações;
- Modelo de Drude;
- Fenômenos de espalhamento

# As cores e as sensações

## Como a física define a cor

A luz visível é uma radiação eletromagnética compreendida entre os comprimentos de onda que variam aproximadamente de 380 a 740 nm.



# O que nós detectamos como cor

## Sensação (Células cone)

## Células detectam preferencialmente

**RGB**



Composição dessas 3 cores geram as demais.

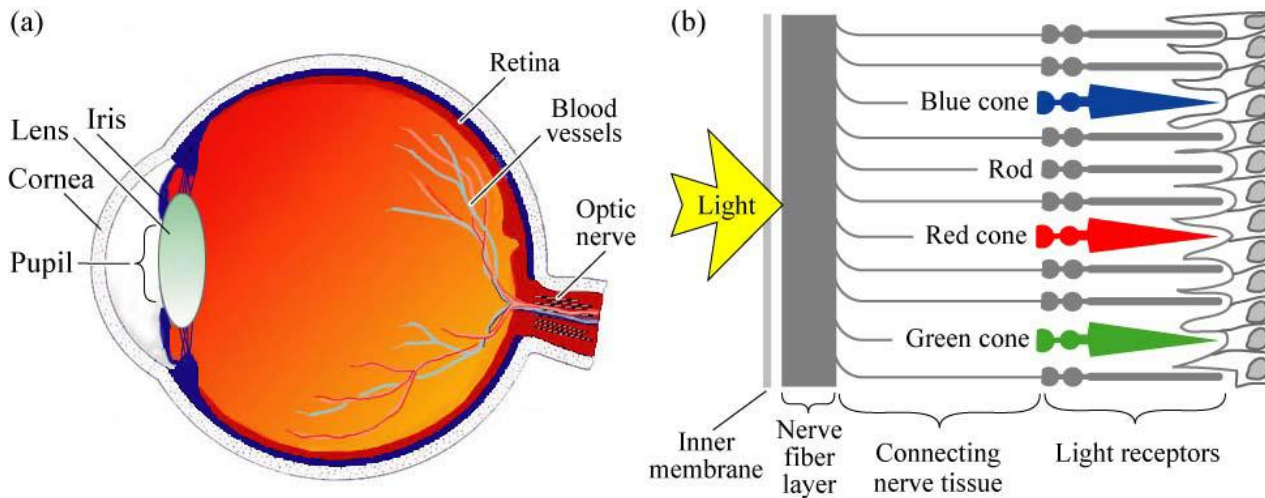
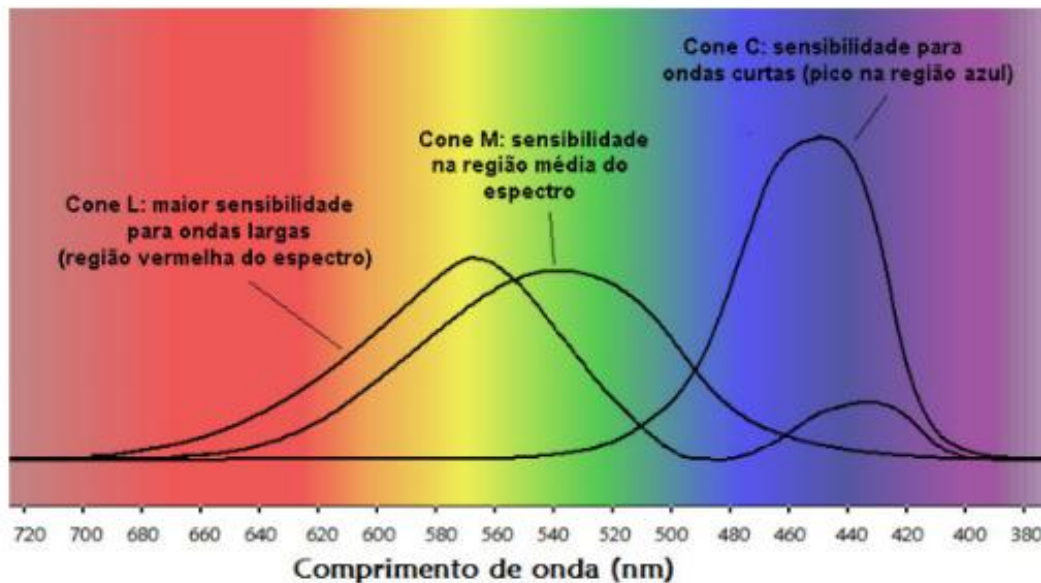


Fig. 16.1. (a) Cross section through a human eye. (b) Schematic view of the retina including rod and cone light receptors (adapted from Encyclopedia Britannica, 1994).

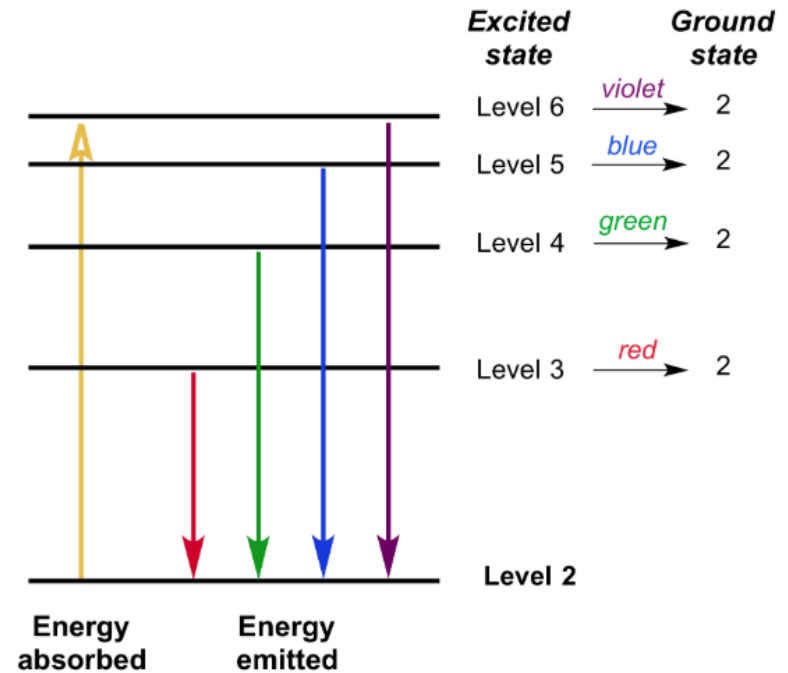
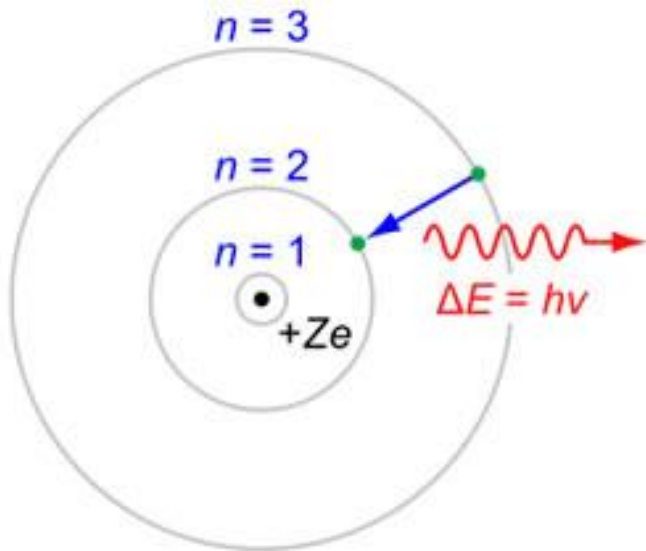
Sensibilidade dos 3 tipos de cones  
No olho humano, com  
denominações L, M e C



# Interação da luz com a matéria

A luz interage com a matéria porque ambas têm propriedades elétricas e magnéticas.

Quando um átomo absorve um fóton de UV ou de luz visível, a energia desse fóton pode excitar um dos elétrons desse átomo para um nível energético mais alto. Este movimento de um elétron de um nível energético mais baixo para um nível energético mais alto, ou de um nível mais alto de volta para um nível mais baixo é chamado de *transição*



Elétrons excitados voltam para o 2º nível de um átomo de hidrogênio e emitem fótons de diferentes frequências, e sendo assim, de diferentes cores de luz

## Consequências da interação radiação matéria

**Modelo de Drude:** Este modelo trata as cargas elétricas presentes na matéria como se fossem pequenos osciladores, que oscilam de maneira forçada sob a ação de ondas eletromagnéticas.

# Modelo de osciladores: o gás de elétrons




# O gás de elétrons



- Condutividade elétrica em metais.
- Elétrons livres como um *gás de elétrons*.
- Utilizar TCG: para estudar interação  $E$  e  $q$ .

Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906)



Conhecido(a) por	modelo de Drude
Nascimento	12 de julho de 1863 Braunschweig
Morte	5 de julho de 1906 (42 anos) Berlim
Nacionalidade	 Alemão
Campo(s)	Física

*Paul Drude (1900).*



# Modelo de osciladores



- Interação com um campo externo.
- Osciladores sob influência desse campo externo.

**Hendrik Antoon Lorentz** (1853-1928)

<b>Conhecido(a) por</b>	Transformação de Lorentz, Força de Lorentz
<b>Nascimento</b>	18 de julho de 1853 Arnhem
<b>Morte</b>	4 de fevereiro de 1928 (74 anos) Haarlem
<b>Nacionalidade</b>	Neerlandês
<b>Alma mater</b>	Universidade de Leiden
<b>Prêmios</b>	 Nobel de Física (1902), Medalha Rumford (1908), Medalha Franklin (1917), Medalha Copley (1918)
<b>Orientador(es)</b>	Pieter Rijke <sup>[1]</sup>
<b>Orientado(s)</b>	Adriaan Fokker, Geertruida de Haas-Lorentz, Hendrika Johanna van Leeuwen, Leonard Ornstein
<b>Instituições</b>	Universidade de Leiden
<b>Campo(s)</b>	Física
<b>Tese</b>	1875: <i>Over de theorie der terugkaatsing en breking van het licht</i>



# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por um agente externo.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$

# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por um agente externo.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$

# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por um agente externo.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$

# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por um agente externo.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$

Influência externa

# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por um agente externo.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$

Influência externa

# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$E = cB$$

$$B = \frac{E}{c}$$



# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

$$E = cB$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{E}}{c}$$

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c} \right)$$

# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$E = cB$$

$$B = \frac{E}{c}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right)$$



$$c \gg v$$

$$\left|q\vec{E}\right| \gg \left|q\vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right|$$

# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$E = cB$$

$$B = \frac{E}{c}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right)$$



$$F \approx qE$$

$$c \gg v$$

(Módulo na direção de oscilação)

$$\left|q\vec{E}\right| \gg \left|q\vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right|$$

# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$E = cB$$

$$B = \frac{E}{c}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right)$$



$$F \approx qE$$

$$c \gg v$$

(Módulo na direção de oscilação)

$$\left|q\vec{E}\right| \gg \left|q\vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right|$$

# Sobre o modelo



- Carga  $q$  sujeita a um campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$E = cB$$

$$B = \frac{E}{c}$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right)$$



$$c \gg v$$

$$\left|q\vec{E}\right| \gg \left|q\vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c}\right|$$

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

(Módulo do campo elétrico)

$$F \approx qE$$

(Módulo na direção de oscilação)

# Sobre o modelo



$$F \approx qE$$

A blue arrow points from the  $E$  in the first equation to the  $E$  in the second equation.

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

(Módulo do campo elétrico)

# Sobre o modelo



$$F \approx qE$$
$$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

A blue arrow points from the  $E$  in the first equation to the  $E$  in the second equation. The  $E$  in the first equation is circled in green.

(Módulo do campo elétrico)

$$F \approx qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

# Sobre o modelo



$$F \approx qE \quad \rightarrow \quad E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

(Módulo do campo elétrico)

$$F \approx qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{F(t)}$$



# Sobre o modelo



$$F \approx qE \quad \rightarrow \quad E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

(Módulo do campo elétrico)

$$F \approx qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{F(t)}$$

$$F(t) \approx qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

ou

$$F \approx F_0 \cos(kx - \omega t), \quad F_0 = qE_0$$

# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por uma influência externa.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$
A blue arrow points downwards from the term  $F(t)$  in the equation, indicating its role as an external force.

# Sobre o modelo



- Luz e matéria possuem propriedades elétricas e magnéticas.
- Vamos estudar as oscilações de cargas influenciadas por uma influência externa.
- Da segunda lei de Newton, temos:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t)$$

Influência externa

$$F(t) = qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

# Sobre o modelo



- Equação diferencial:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t) \longrightarrow F(t) = qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = \frac{F(t)}{m}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = \frac{F(t)}{m}$$

$$, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Solução:  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

# Sobre o modelo



- Equação diferencial:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t) \longrightarrow F(t) = qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = \frac{F(t)}{m}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = \frac{F(t)}{m}$$

$$, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Solução:  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

# Sobre o modelo



- Equação diferencial:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F(t) \quad \longrightarrow \quad F(t) = qE_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = \frac{F(t)}{m}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = \frac{F(t)}{m}$$

$$, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Solução:  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

# Sobre o modelo



- Podemos considerar **3 casos**:

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad \left\{ \begin{array}{l} (i) \quad \omega^2 \ll \omega_0^2 \quad A = \frac{F_0}{m\omega_0^2} \end{array} \right.$$

# Sobre o modelo



- Podemos considerar **3 casos**:

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad \left\{ \begin{array}{ll} (i) & \omega^2 \ll \omega_0^2 \quad A = \frac{F_0}{m\omega_0^2} \\ (ii) & \omega^2 \gg \omega_0^2 \quad A = -\frac{F_0}{m\omega^2} \end{array} \right.$$



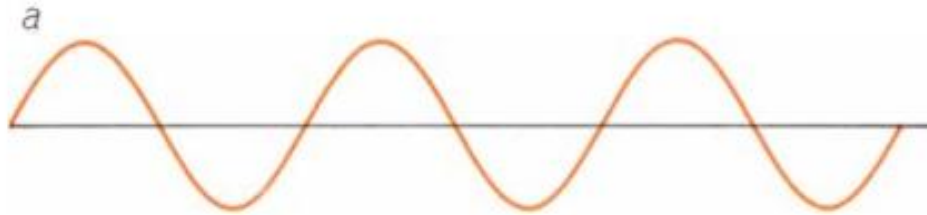
# Sobre o modelo



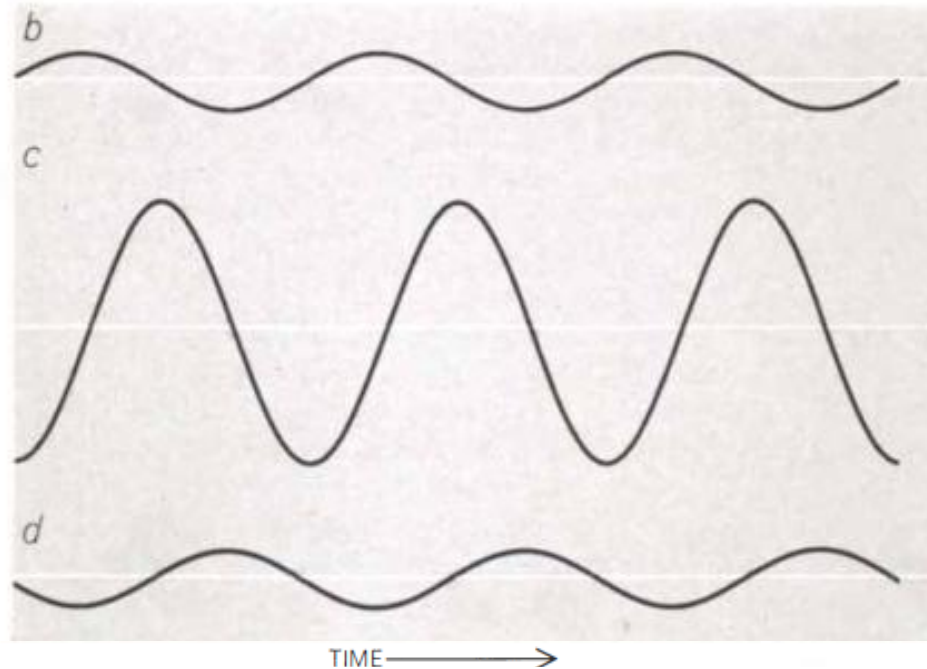
- Podemos considerar **3 casos**:

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad \left\{ \begin{array}{ll} (i) & \omega^2 \ll \omega_0^2 \quad A = \frac{F_0}{m\omega_0^2} \\ (ii) & \omega^2 \gg \omega_0^2 \quad A = -\frac{F_0}{m\omega^2} \\ (iii) & \omega^2 \approx \omega_0^2 \quad A = -\frac{F_0}{m\omega^2} \\ & \omega^2 \rightarrow \omega_0^2 \end{array} \right.$$

# Onda e amplitude de oscilação



Onda incidente  
(frequência  $\omega$ )

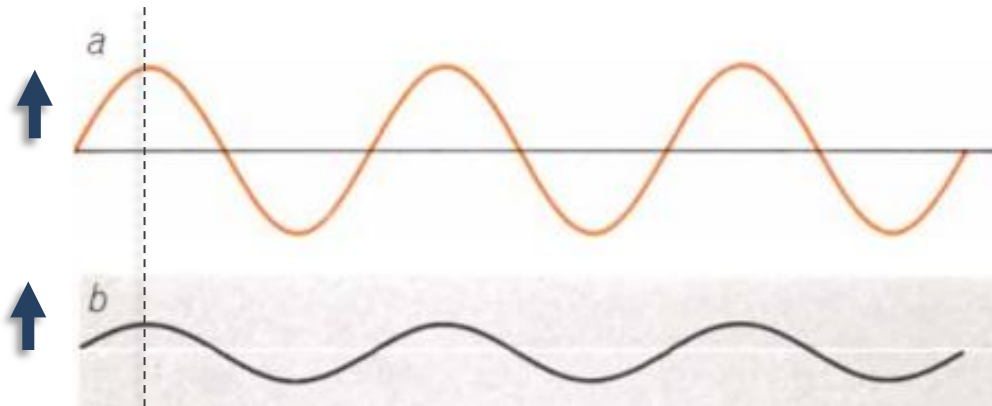


$\omega \ll \omega_0$

$\omega \approx \omega_0$

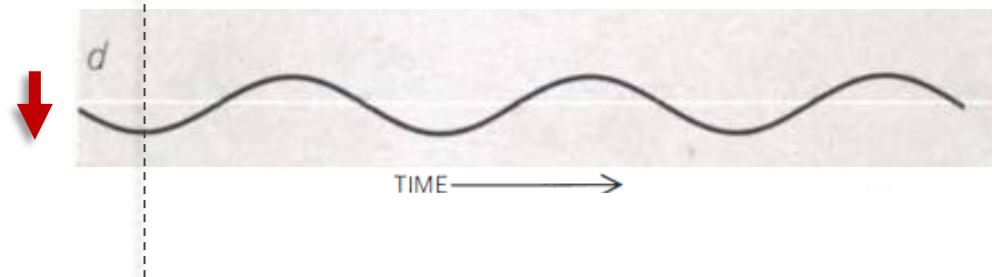
$\omega \gg \omega_0$

# Onda e amplitude de oscilação



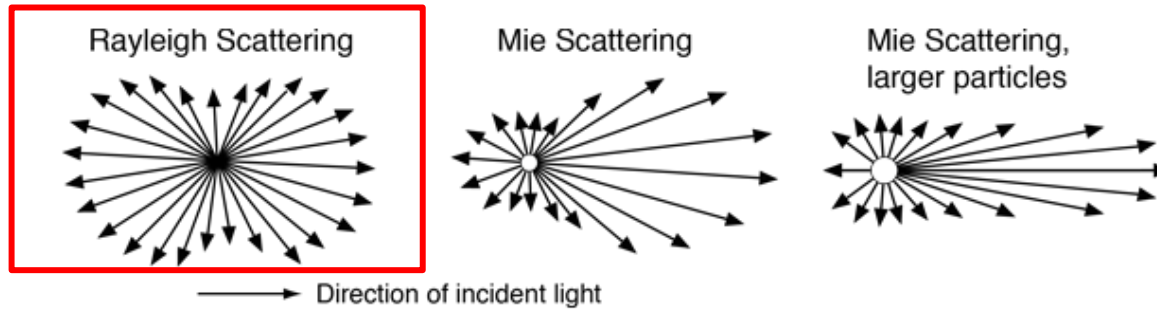
Onda incidente  
(frequência  $\omega$ )

$$\omega \ll \omega_0$$



$$\omega \gg \omega_0$$

# Alguns tipos de Espalhamento



## Espalhamento Rayleigh

Partículas menores que o comprimento de onda da luz visível

Espalhamento estático: variação temporal não é importante.

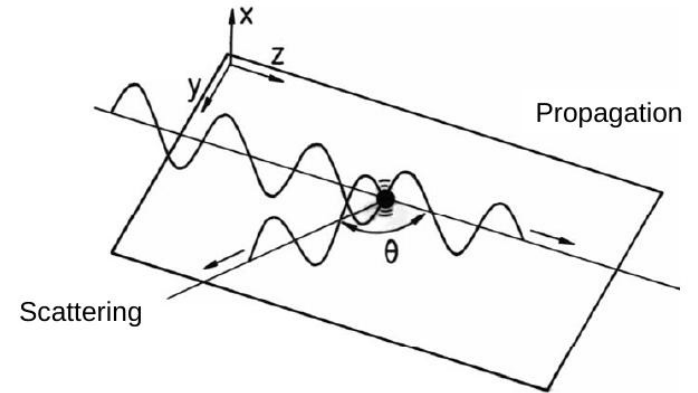
Espalhamento elástico: não há mudança do comprimento de onda.

# Espalhamento Rayleigh



Partículas pequenas

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6$$



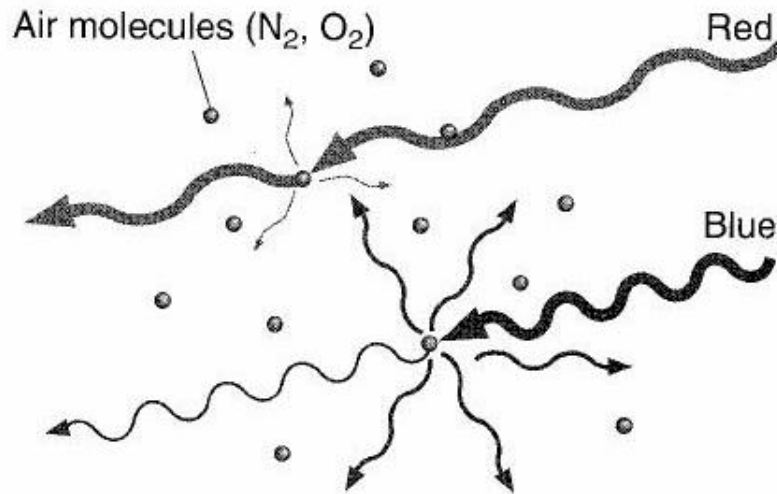
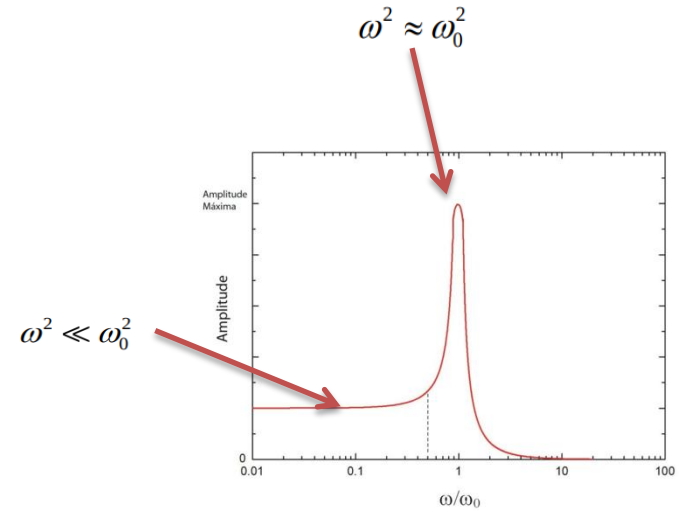
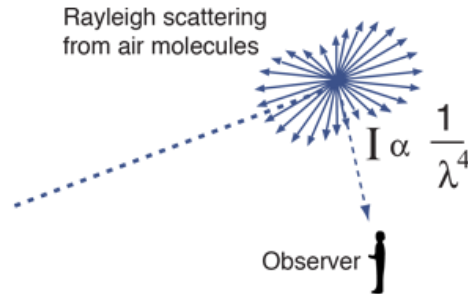
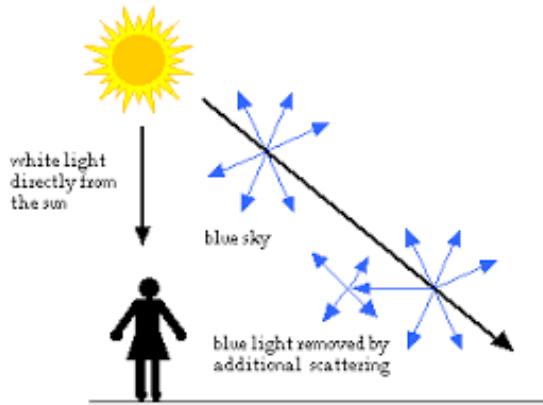
Polarizabilidade ( $\alpha$ ):

$$\mu^{\text{ind}} = \alpha E$$

Moléculas:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \theta)$$

# Espalhamento Rayleigh

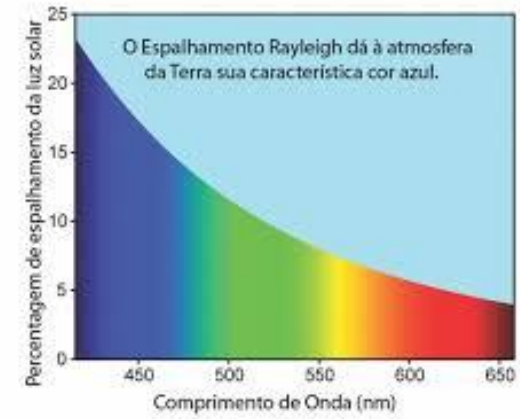
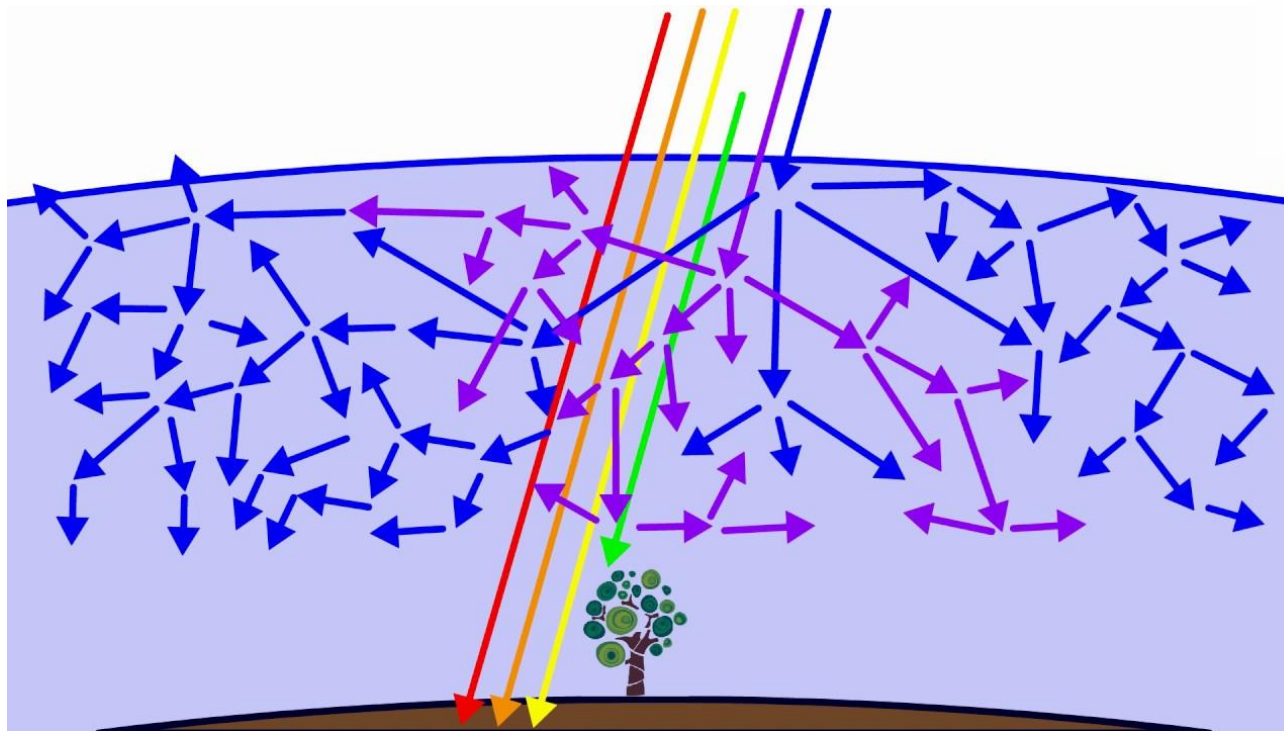


$$\frac{\lambda_{400}^4}{\lambda_{700}^4} \approx 9.4$$

# Espalhamento Rayleigh

$\sin$   
 $x = (2-5y+2x+2y)$   
 $(x-1) = \frac{(x+2)}{5}$

Espalhamento da luz na atmosfera



# Espalhamento Rayleigh



## Nascer e pôr do sol

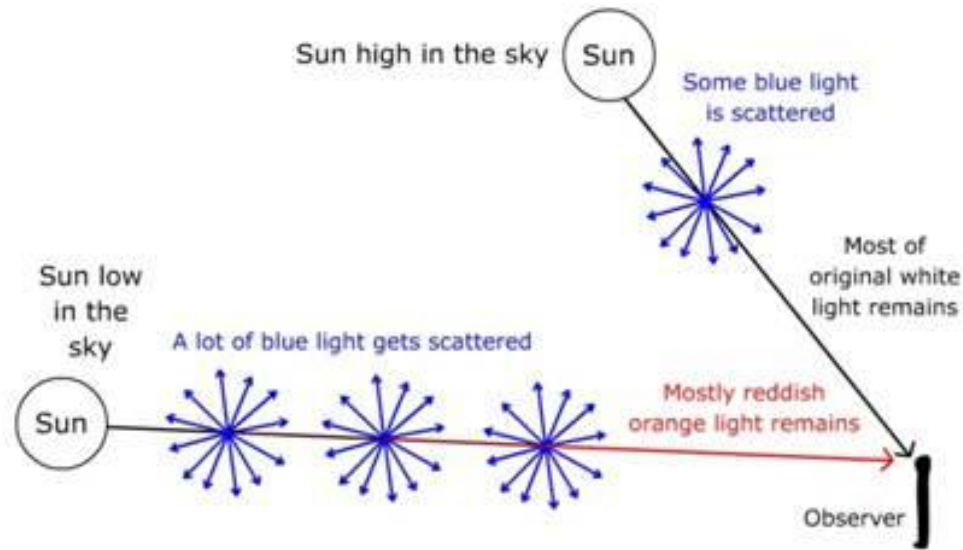
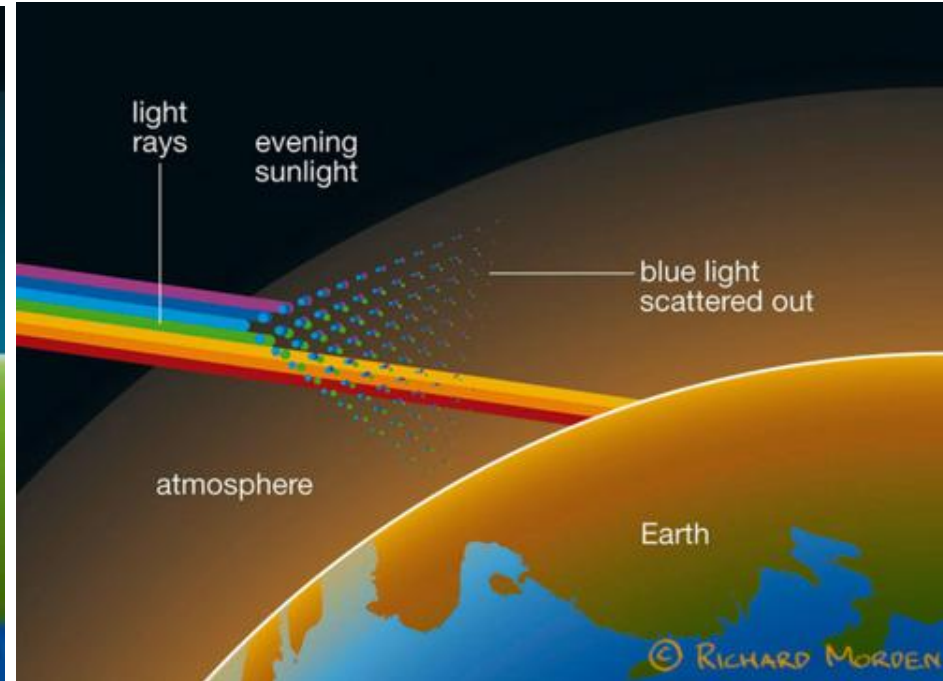


Diagram showing how Rayleigh scattering causes red sunsets and sunrises



# Espalhamento Rayleigh

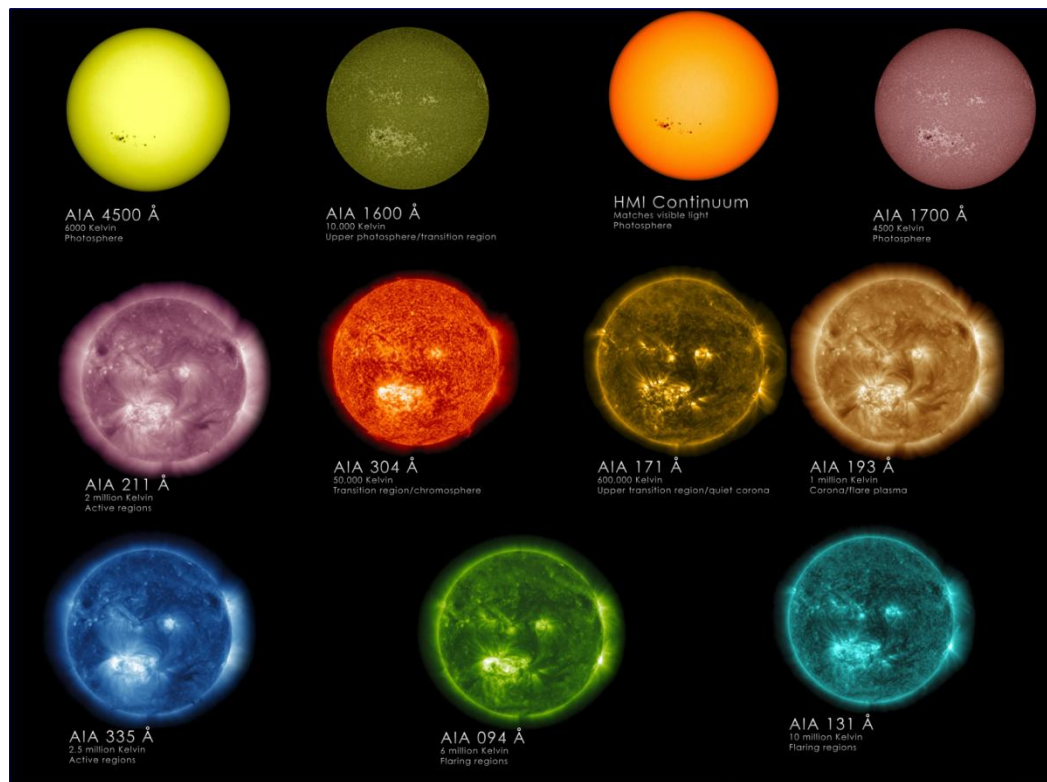


# Cor do Sol



Cores indicam diferenças de temperatura

Pico de emissão próximo a 500 nm



Imagens obtidas pela sonda SDO

# Cor das nuvens



Água no estado líquido e gasoso

Refração e reflexão



Estruturas maiores  
que as moléculas dos  
gases da atmosfera

Moléculas de água mais próximas: Osciladores acoplados

# Cor das nuvens



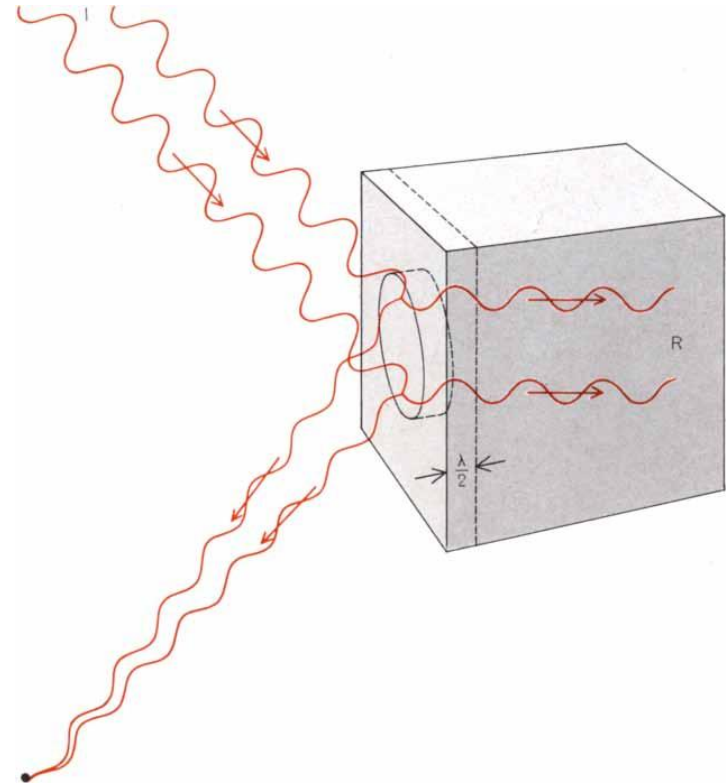
Interação da luz com superfícies

Vibração de osciladores da superfície

Reemissões dos osciladores

Reflexão

Primeira Zona de Fresnel

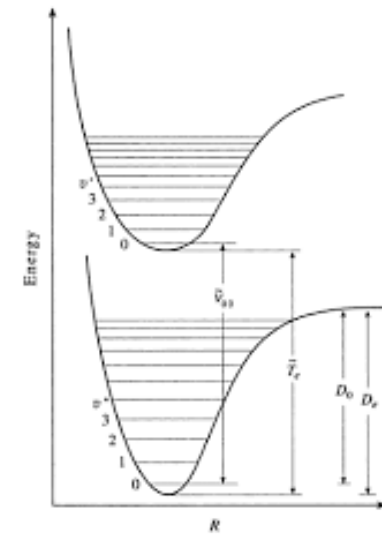
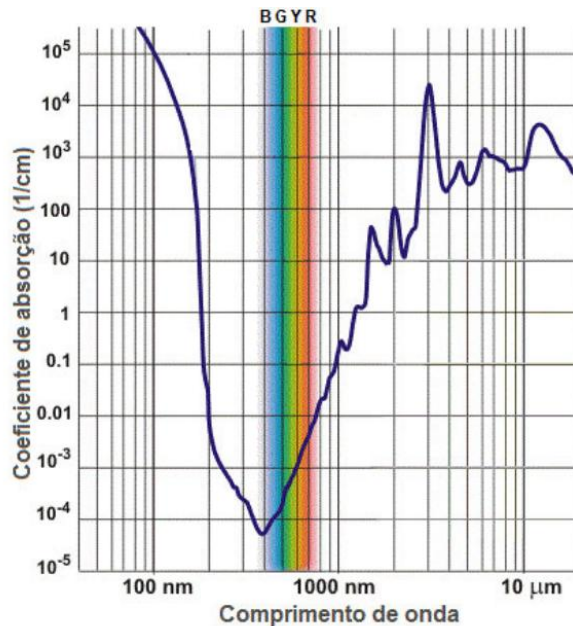


# Absorção da luz



## Cor do mar

Absorção dos comprimentos de onda maiores do espectro visível.



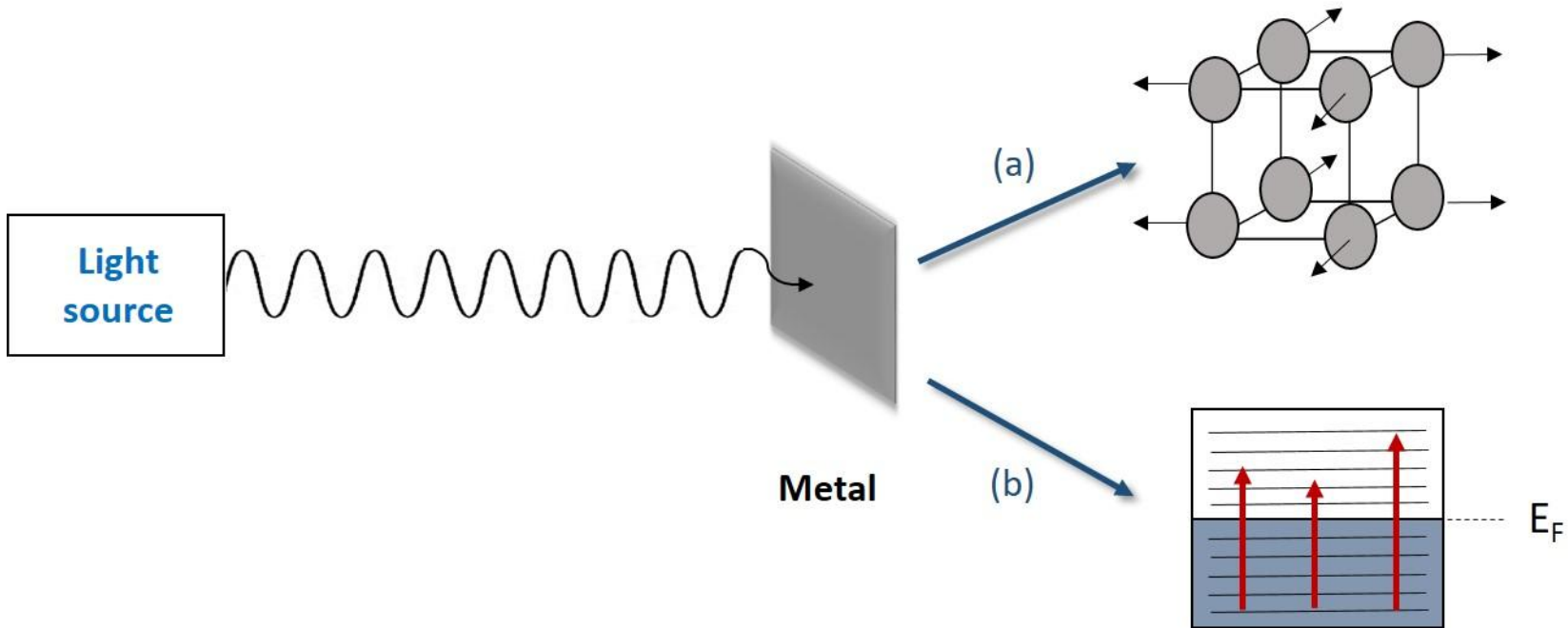
Níveis rotacionais/vibracionais muito próximos.

Curva de absorção da água. R = vermelho, Y = amarelo, G = verde, B = azul

# Absorção da luz



## Interação da luz com metais



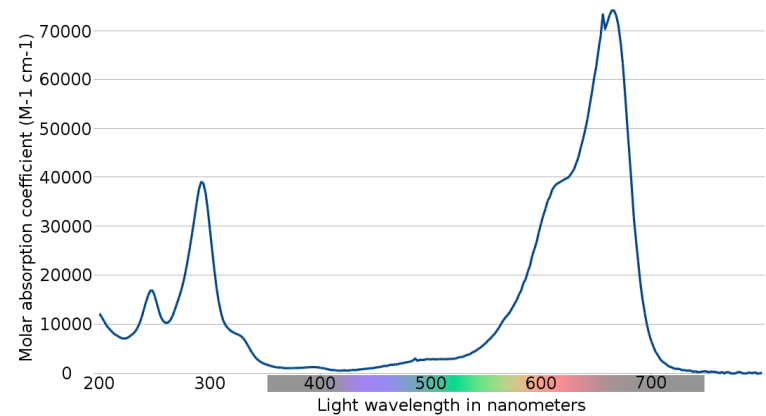
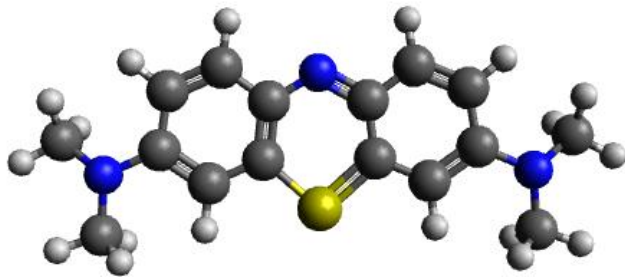
Estados de energia próximos

Absorção de luz visível por elétrons da superfície

# Absorção da luz



## Espectro de absorção do corante Azul de Metileno



# Referências



- Americo S. Kerr, Maria E. R. Xavier. Espalhamento de Luz na Atmosfera. In: Curso de Física da Poluição do Ar FAP 346, 2006.
- Anne L. Scarinci, Fábio Marineli. O modelo ondulatório da luz como ferramenta para explicar as causas da cor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 36(1), 1309, 2014.
- David L. Andrews. Rayleigh Scattering and Raman Effect Theory. **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry**, 3° ed. 924-930, 2017.
- Victor F. Weisskopf. How light Interacts with Matter. **Scientific American**, 60-71, 1968.