



INSTITUTO DE FÍSICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Pós-Graduação

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Aula 8

POLARIZAÇÃO

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

Óptica moderna – Fundamentos e Aplicações S. C. Zílio (e-book)

-Internet

-Artigos RBEF, *The Physics Teacher*, *Physics Education*, *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics*, etc...

Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar

(Birrefringence in wave plates and optical activity of a sugar solution)

N. Carlin¹, E.M. Szanto, W.A. Seale, F.O. Jorge, F.A. Souza,
I.H. Bechtold e L.R. Gasques

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 23/9/2004; Revisado em 3/2/2005; Aceito em 11/5/2005

Propagação da Luz em um Meio Anisotrópico Uniaxial

(Light Propagation in an Uniaxial Anisotropic Media)

Eden V. Costa

*Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense
Avenida Litorânea s/n, Boa Viagem, 2410-340, Niterói, RJ, Brasil*

Trabalho recebido em 1 de julho de 1993

Determinação dos Ângulos de Brewster para a Calcita em Três Direções

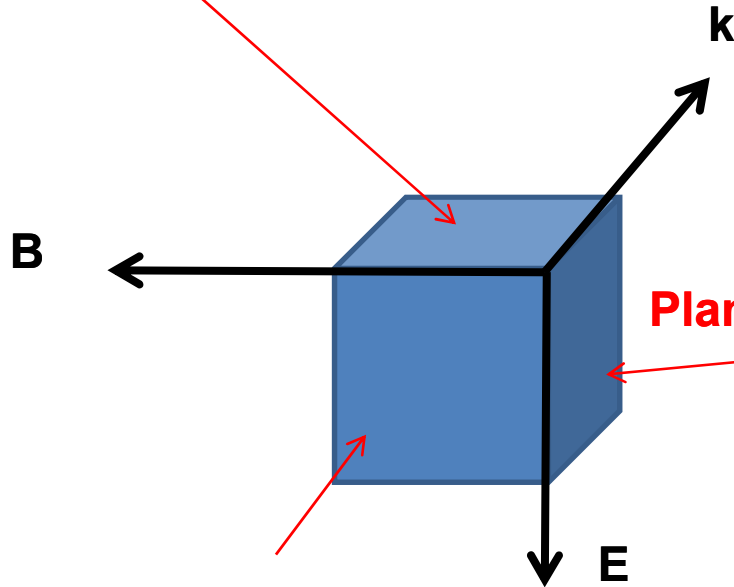
(Determination of the Brewster's Angle in Three Direction for the Calcite)

Eden V. Costa

*Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense,
Boa Viagem, 24210-340, Niterói, RJ, Brasil
eden@if.uff.br*

Recebido em 17 de maio, 2000. Aceito em 28 de Setembro, 2000

Plano de polarização → perpendicular a **E**



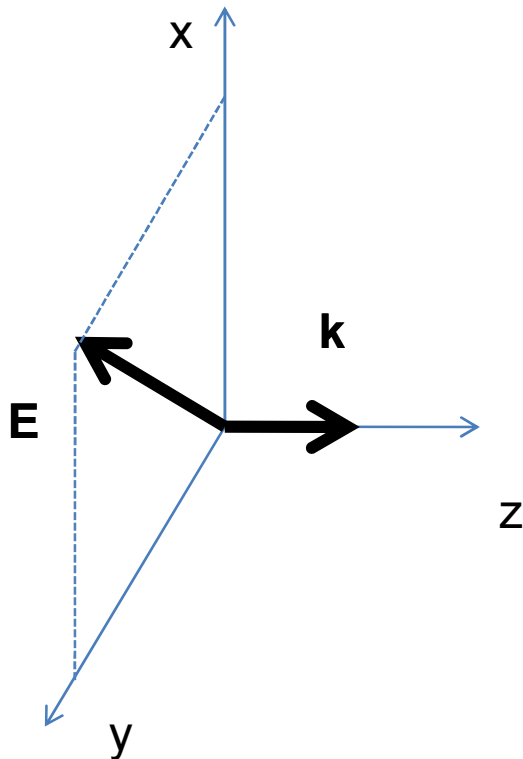
Plano de vibração → perpendicular a **B**

Plano da onda → perpendicular a **k**

Sua direção define o **eixo de polarização**

$$\mathbf{k} = k \mathbf{z}$$

$$\mathbf{E} = [E_{ox} \mathbf{x} + E_{oy} \mathbf{y}] e^{i(\omega t - kz)}$$



$$E_{ox} = a$$

$$E_{oy} = b e^{-i\gamma}$$

Em geral as amplitudes do campo elétricos serão complexas e não terão nem o mesmo módulo nem a mesma fase.

$$E_{ox} = a$$

$$E_{oy} = be^{-i\gamma}$$

$$\mathbf{E}(z,t) = ae^{i(\omega t - kz)} \mathbf{x} + be^{i(\omega t - kz - \gamma)} \mathbf{y}$$

ou se escolhermos a parte real:

$$\mathbf{E}(z,t) = a \cos u \mathbf{x} + b \cos(u - \gamma) \mathbf{y}$$

$$u = \omega t - kz$$

$$E_y / b = \cos u \cos \gamma + \text{sen } u \text{ sen } \gamma =$$

$$= (E_x/a) \cos \gamma \pm [1 - (E_x/a)^2]^{1/2} \text{sen } \gamma$$

$$\frac{E_x^2}{a^2} - 2 \frac{E_x E_y}{ab} \cos \gamma + \frac{E_y^2}{b^2} = \text{sen}^2 \gamma$$

No plano xy, qualquer equação quadrática,

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey = F$$

Representa uma cônica desse plano. O discriminante da cônica é o invariante

$$\Delta = B^2 - 4AC$$

Se $\Delta > 0 \rightarrow$ hipérbole

Se $\Delta < 0 \rightarrow$ elipse

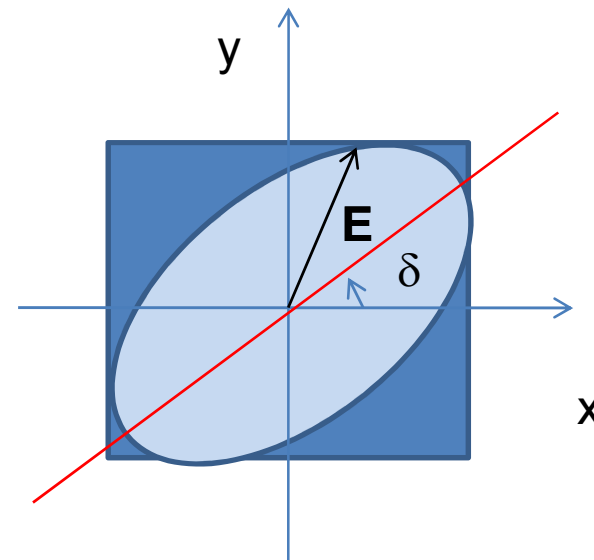
Se $\Delta = 0 \rightarrow$ parábola

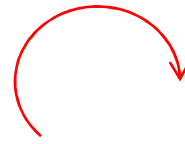
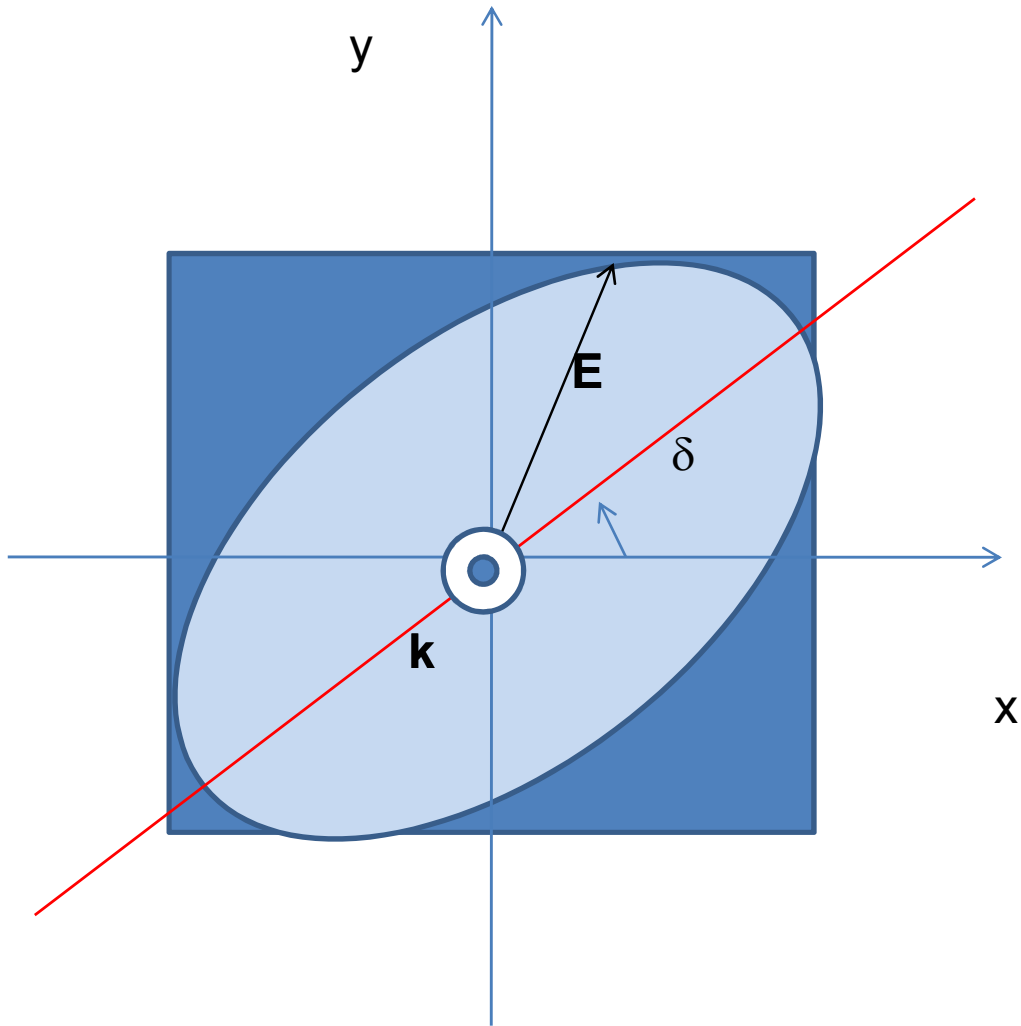
Além disso, uma rotação de eixos segundo o ângulo

$$\delta = (1/2) \text{arc tg } [B/(4AC)]$$

Faz com que os novos eixos cartesianos coincidam com os eixos da simetria cônica, o que elimina o termo misto de sua equação.

Como o discriminante é $\Delta = -(4/a^2 b^2) \text{sen}^2\gamma \leq 0$, **E** descreve sempre uma elipse.





Polarizada à direita ou dextrogira
Helicidade negativa



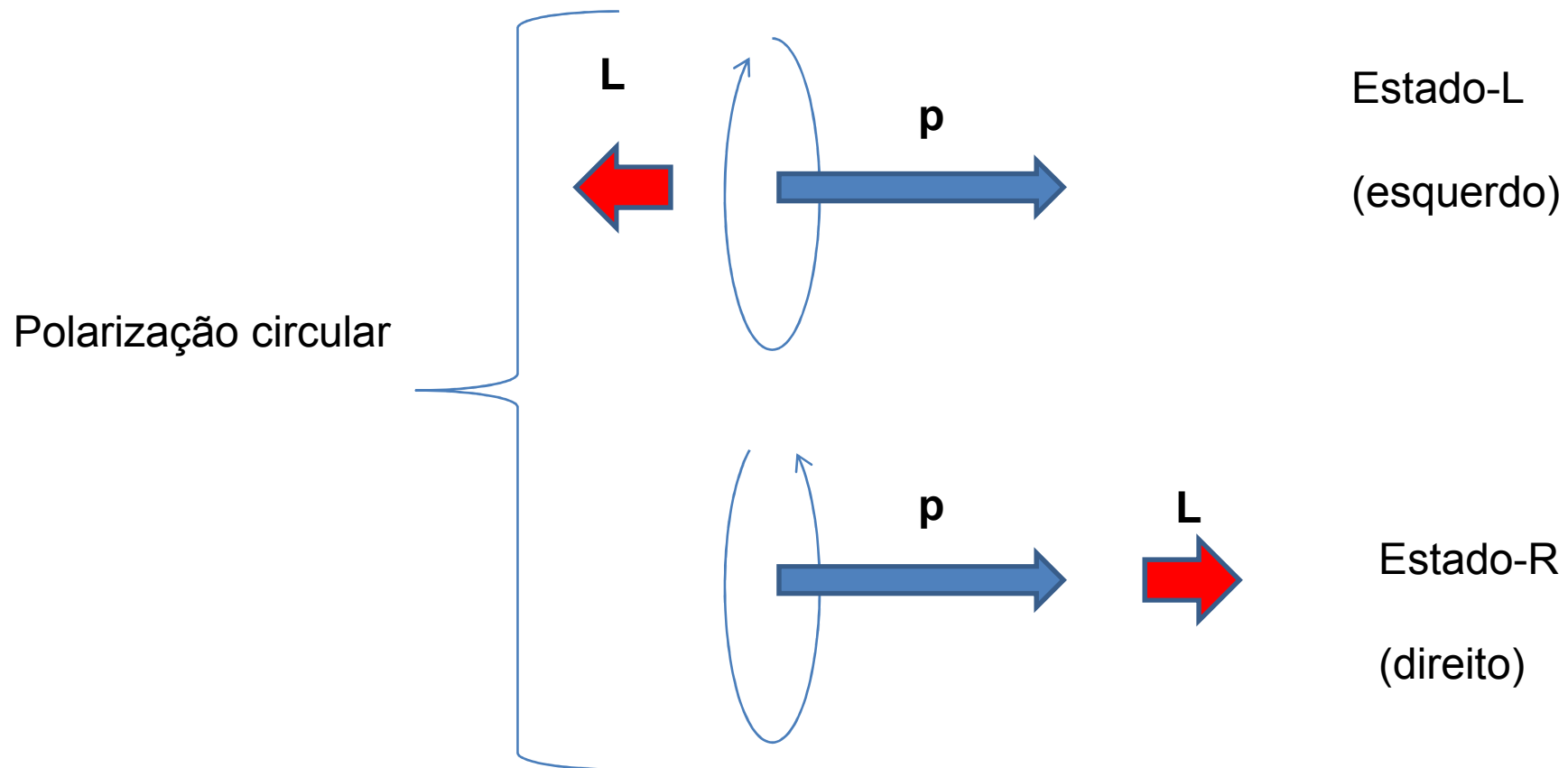
Polarizada à esquerda ou levógira
Helicidade positiva

Quando $E_{oy} = E_{ox} = E_o \rightarrow$ polarização circular

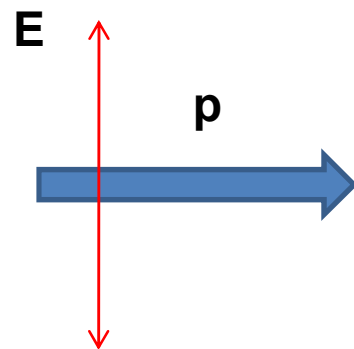
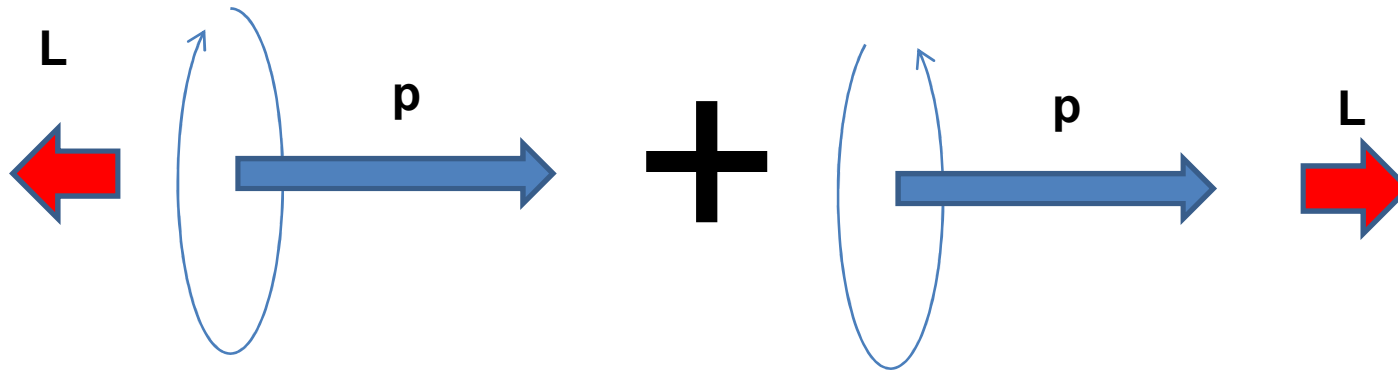
Quando a diferença de fase δ for um múltiplo para de π a elipse se degenera em uma reta \rightarrow polarização linear

Momento angular e fótons

$$\vec{L} = \pm \frac{E}{\omega} \hat{k} = \pm \frac{\hbar\omega}{\omega} \hat{k} = \pm \hbar \hat{k}$$

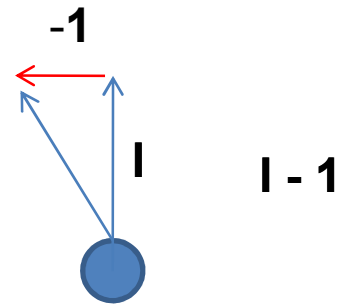
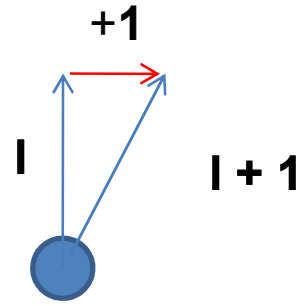
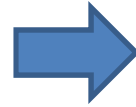
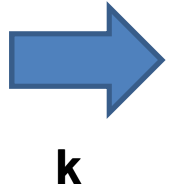


Polarização linear



Regra de seleção atômica $\rightarrow \Delta l = \pm 1$

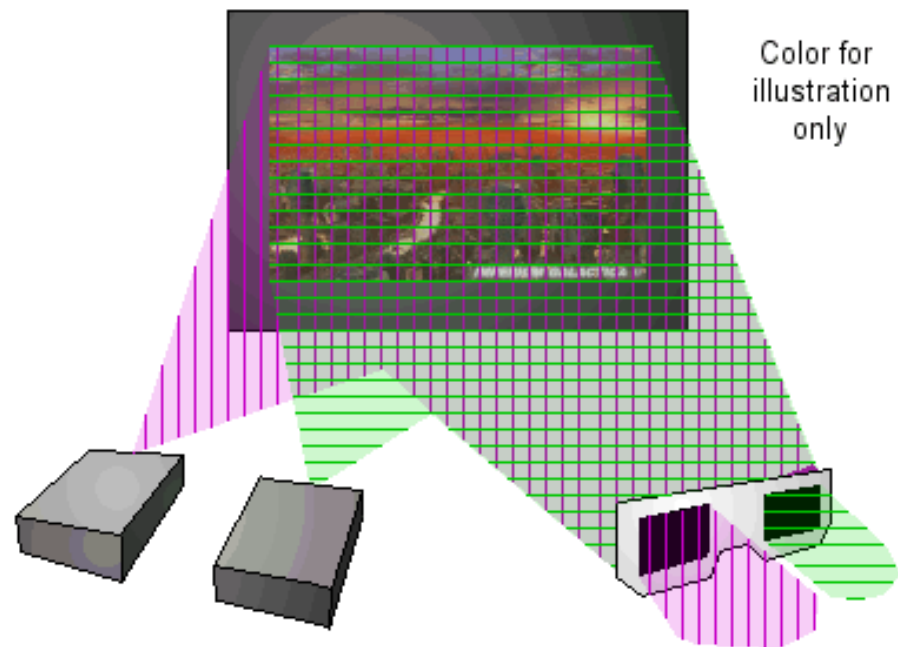
$$\vec{L} = \pm \hbar \hat{k}$$



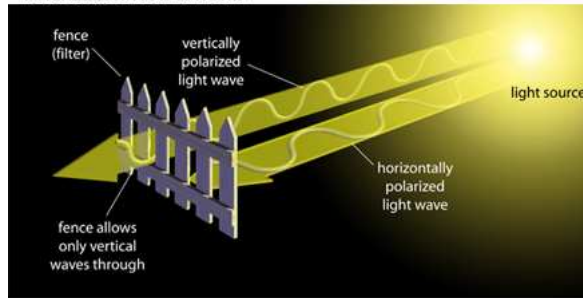
Imagens 3D

Imagens 3D usam luz polarizada para produzir sensação de profundidade. Nossa percepção de profundidade é devido, em grande parte, a habilidade do olho de enxergar o mundo de um ângulo ligeiramente diferente. O cérebro funde as duas visões em uma tridimensional.

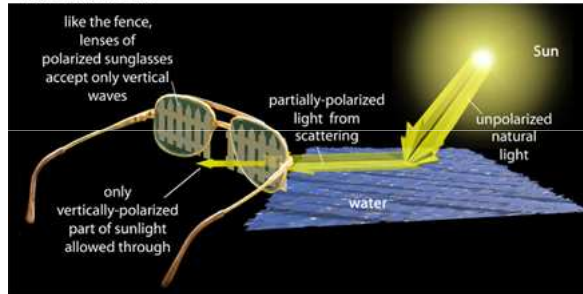
Durante a filmagem de um filme 3D, duas câmeras gravam a ação de perspectivas ligeiramente diferentes. Quando o filme é mostrado, dois projetores com filtros polarizadores, são utilizados.



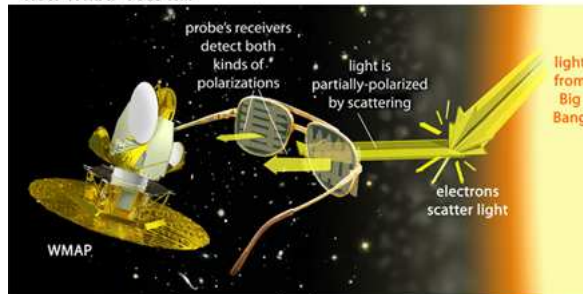
Polarization: How It Works



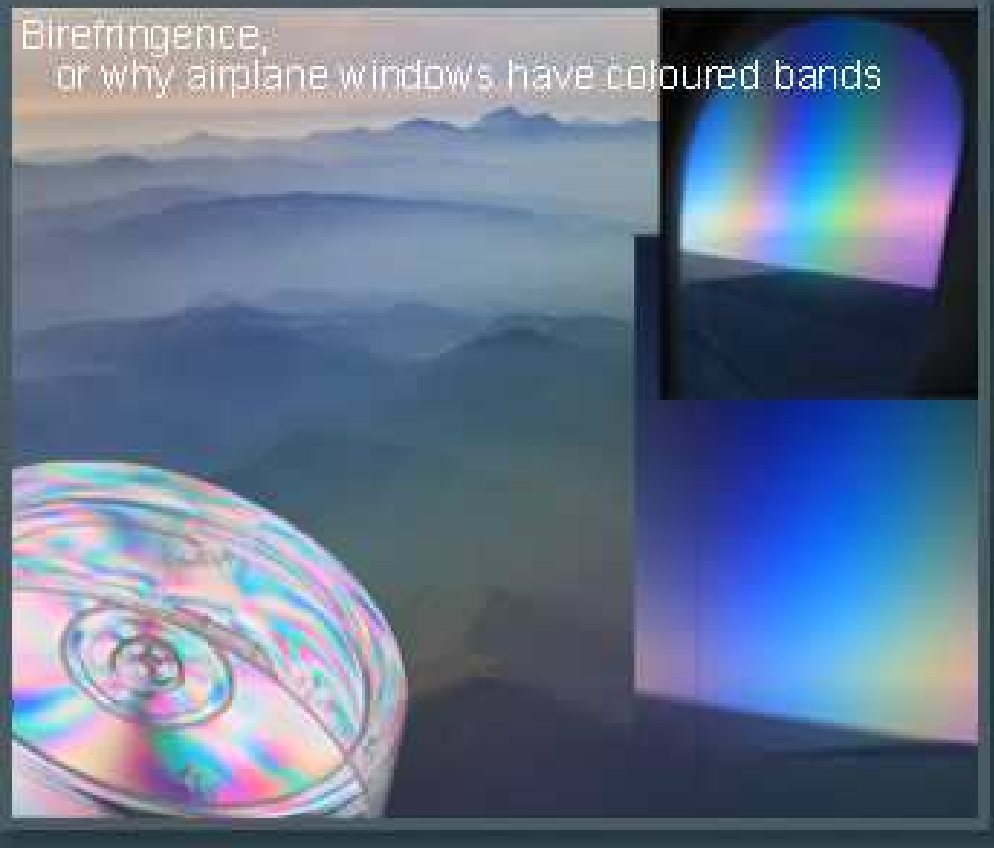
how we see it...



how WMAP sees it...

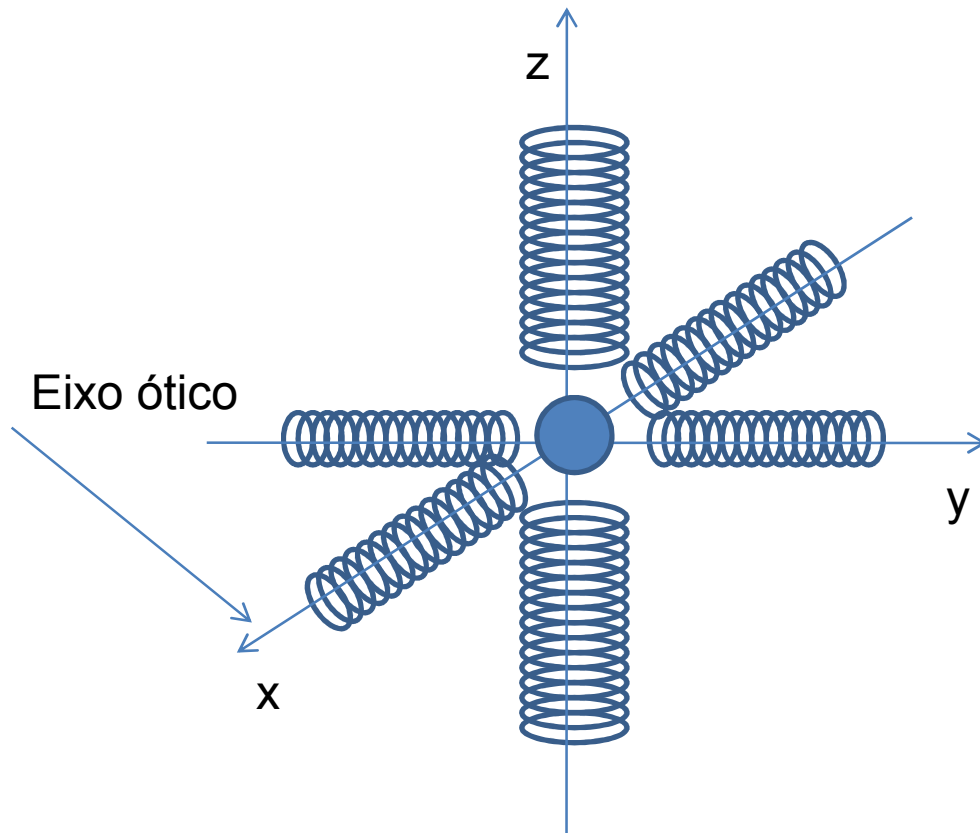


Birefringence,
or why airplane windows have coloured bands



DICROÍSMO → absorção seletiva de um dos dois estados de polarização ortogonais que compõem um feixe de luz polarizada. O polarizador dicróico é fisicamente anisotrópico, absorvendo fortemente uma das componentes do campo, mas sendo essencialmente transparente para a outra.

BIRREFRIGÊNCIA



Substância óticamente anisotrópicas : $k_x \neq k_y = k_z$

Um material desta natureza, com dois índices de refração distintos, diz-se birrefringente

$$\vec{D} = \vec{\epsilon}\vec{E}$$

$$\vec{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix}$$

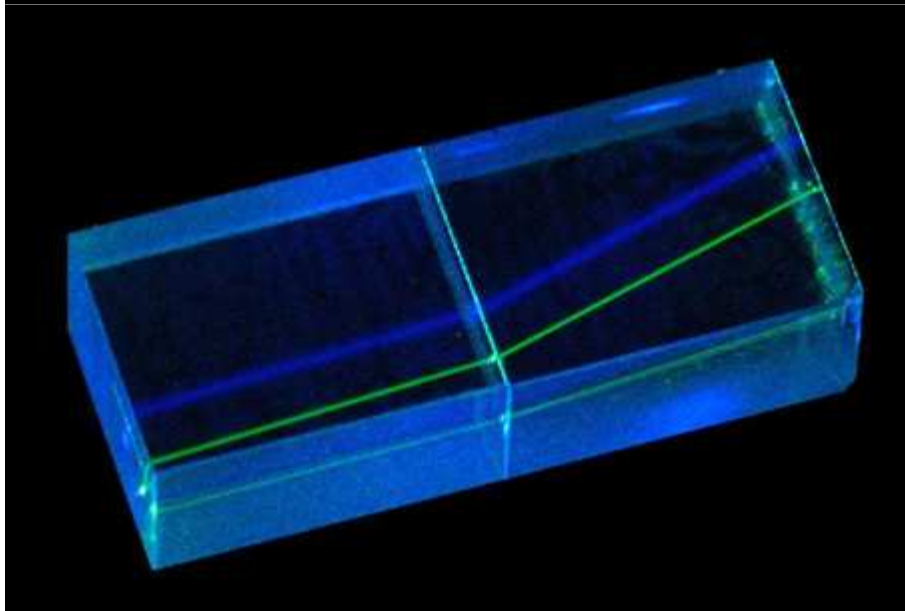
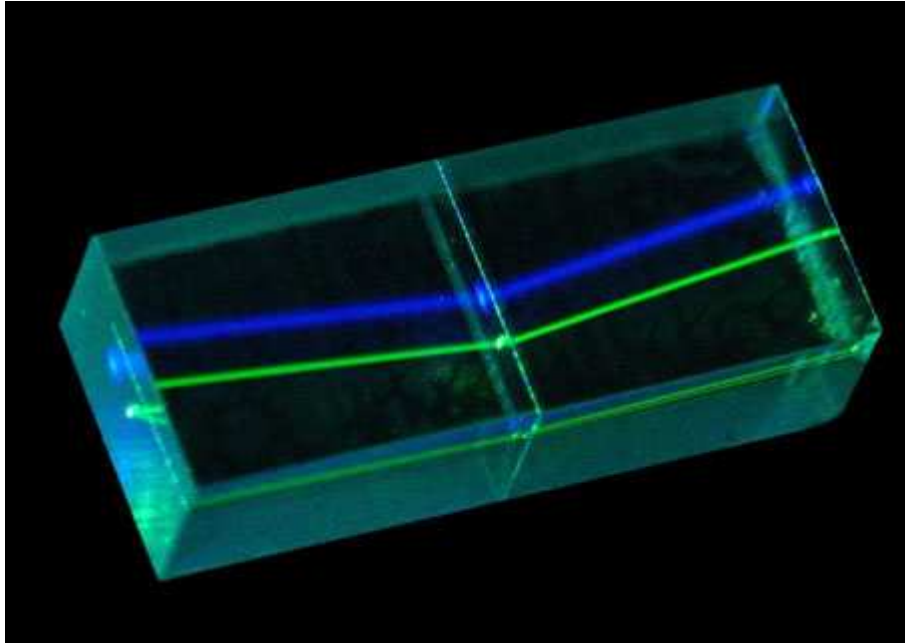
$$\vec{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{vmatrix}$$

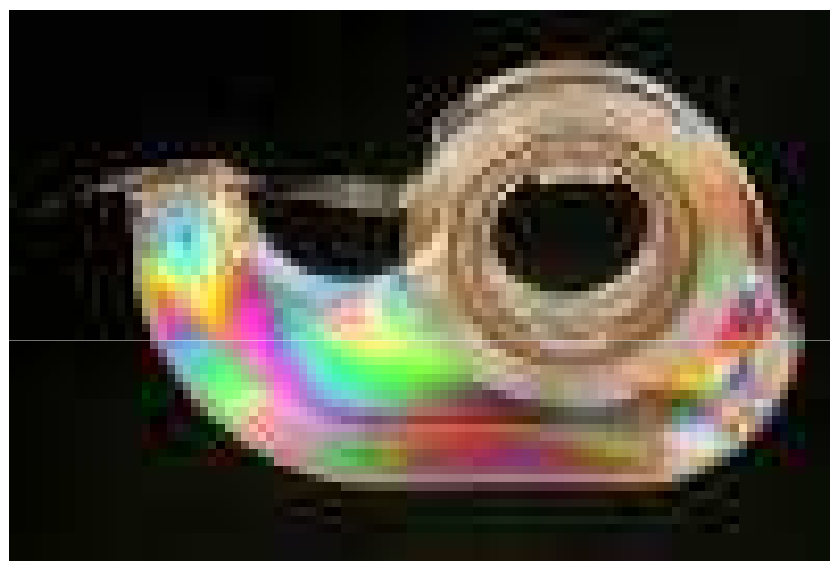
$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

$$n_x \neq n_y = n_z$$

$$v = c/n$$

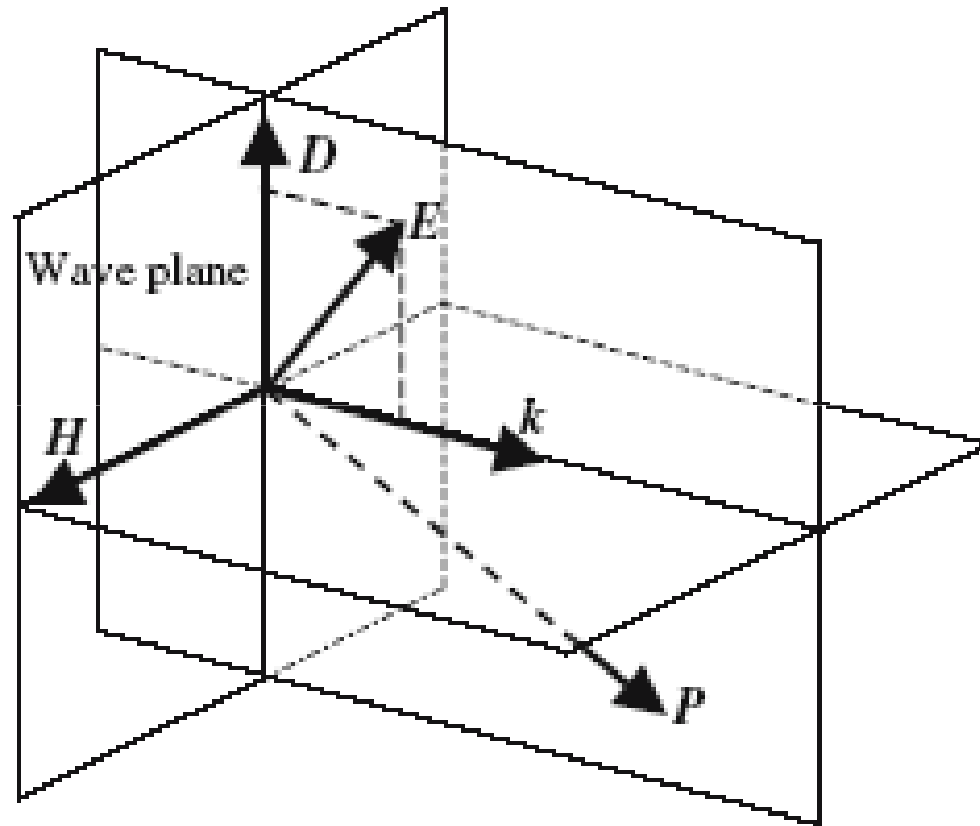
$$v_x \neq v_y = v_z$$



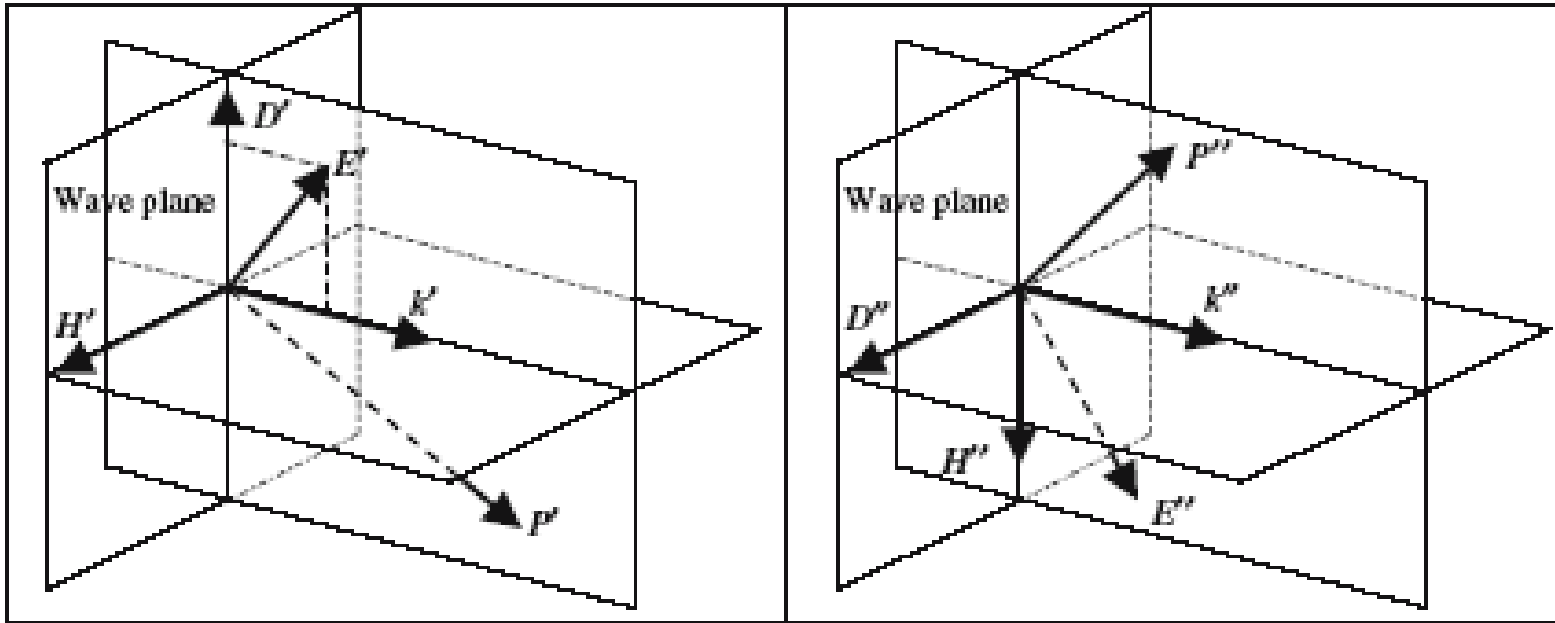


Constantes dielétricas principais	Velocidades de fase associadas	Índices de refração principais
ϵ_x	$v_x = (\epsilon_x \mu_0)^{-1}$	$n_x = c/v_x$
ϵ_y	$v_y = (\epsilon_y \mu_0)^{-1}$	$n_y = c/v_y$
ϵ_z	$v_z = (\epsilon_z \mu_0)^{-1}$	$n_z = c/v_z$

No caso de meio anisotrópico, a descrição da onda é preferencialmente feita em termos do vetor \mathbf{D} , porque este é paralelo aos planos da onda e perpendicular ao vetor de onda \mathbf{k}



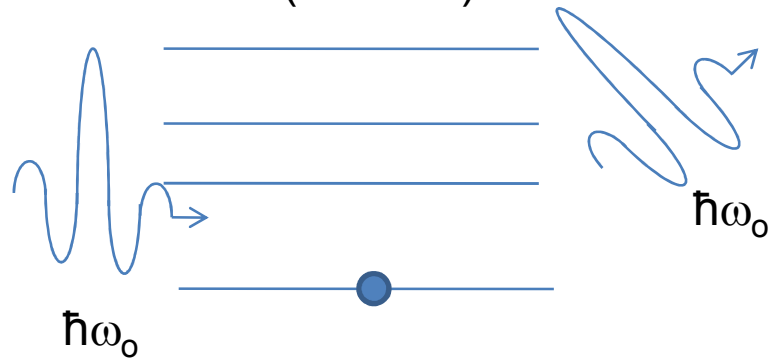
$$\vec{P} = \vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$



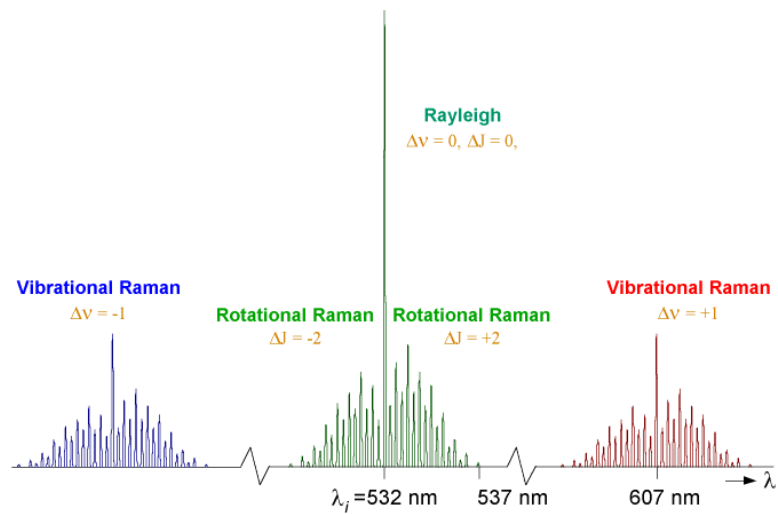
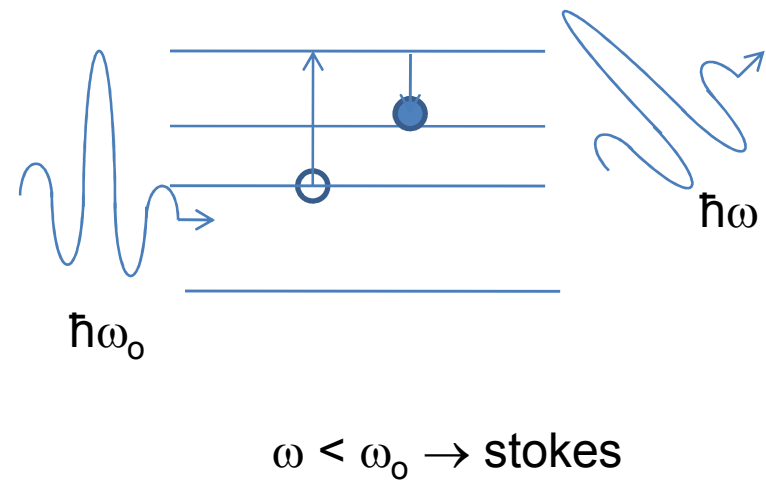
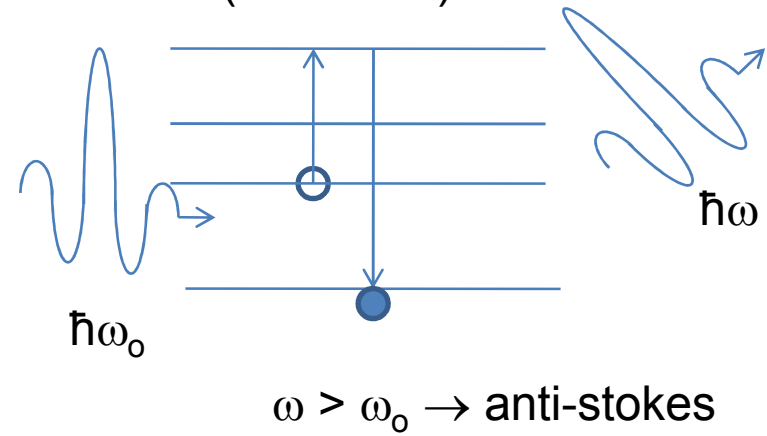
Para uma dada direção de propagação, há duas velocidades de propagação. O vetor de onda tem assim dois módulos possíveis. Para cada valor está associada uma disposição específica de (\mathbf{D} , \mathbf{H} , \mathbf{k}) e do campo elétrico.

DISPERSÃO E POLARIZAÇÃO

Espalhamento Rayleigh (elástico)



Espalhamento Raman (inelástico)



DISPERSÃO → absorção de energia de uma onda incidente e na subsequente reemissão de uma parte dessa energia.

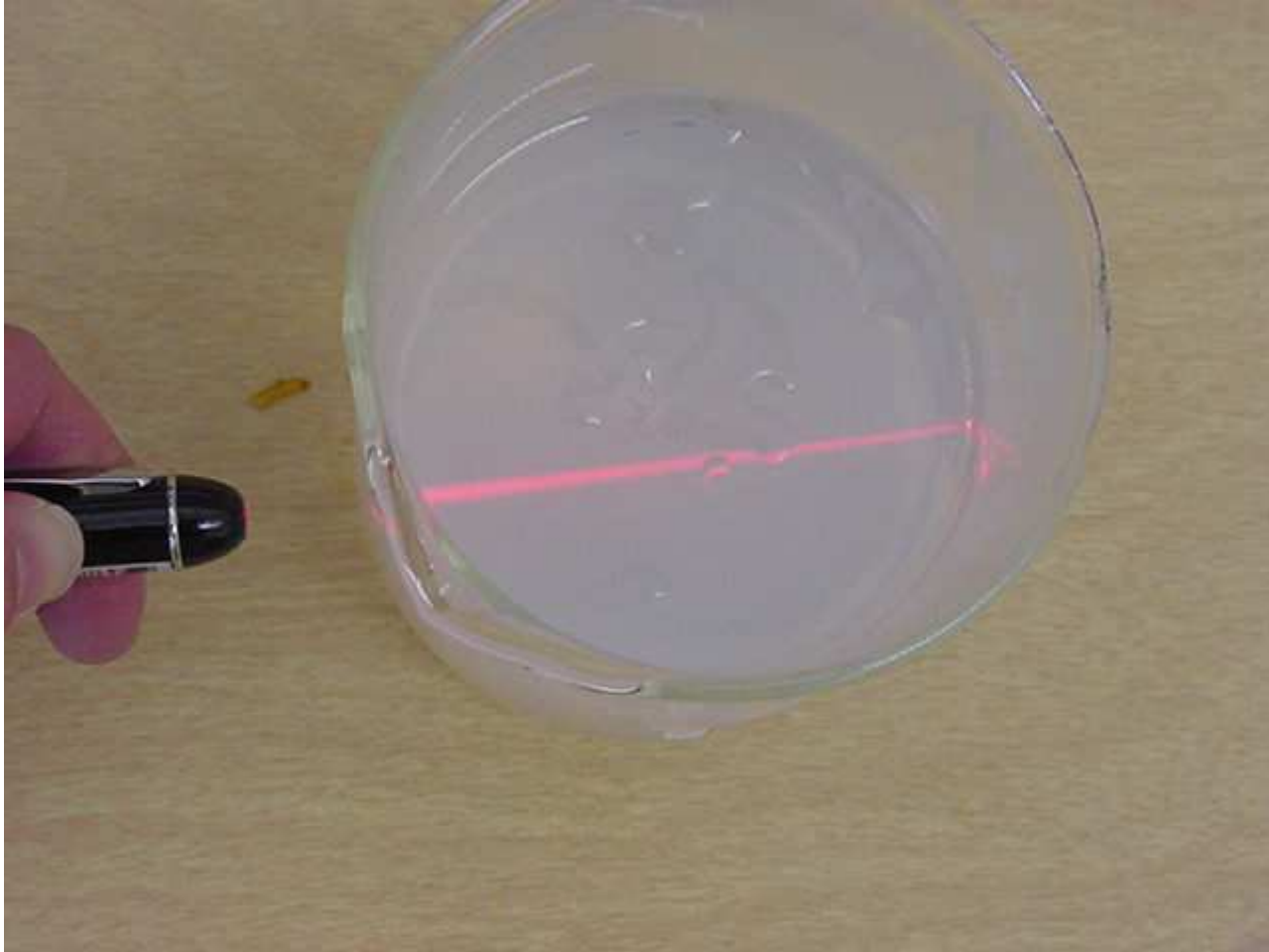
É este mecanismo físico que está na base da reflexão, da refração e da difração, constituindo, portanto, um processo de natureza fundamental.



(Terra vista da Lua) Sem a atmosfera o céu diurno seria tão negro como o espaço.



Efeito Tyndall



Equations for the scattering of
electromagnetic radiation by spherical
particles

as the particle size is much greater than
the wavelength of light.

The basis for distinguishing between Tyndall and Rayleigh scattering is the intensity of the phenomenon. Colloidal particles are much larger than atoms or molecules. It follows from scattering theory that Tyndall scattering (by colloidal particles) is much more intense than Rayleigh scattering (by atoms or molecules). Tyndall scattering can be used to determine the size of colloidal particles. Tyndall scattering is also often used to describe light scattering by macroscopic particles such as dust in the air. However, this phenomenon is more like [reflection](#) Reflection (physics)

Reflection is the change in direction of a wavefront at an interface between two different medium so that the wavefront returns into the medium from which it originated....
, as the macroscopic particles become visible in the process.

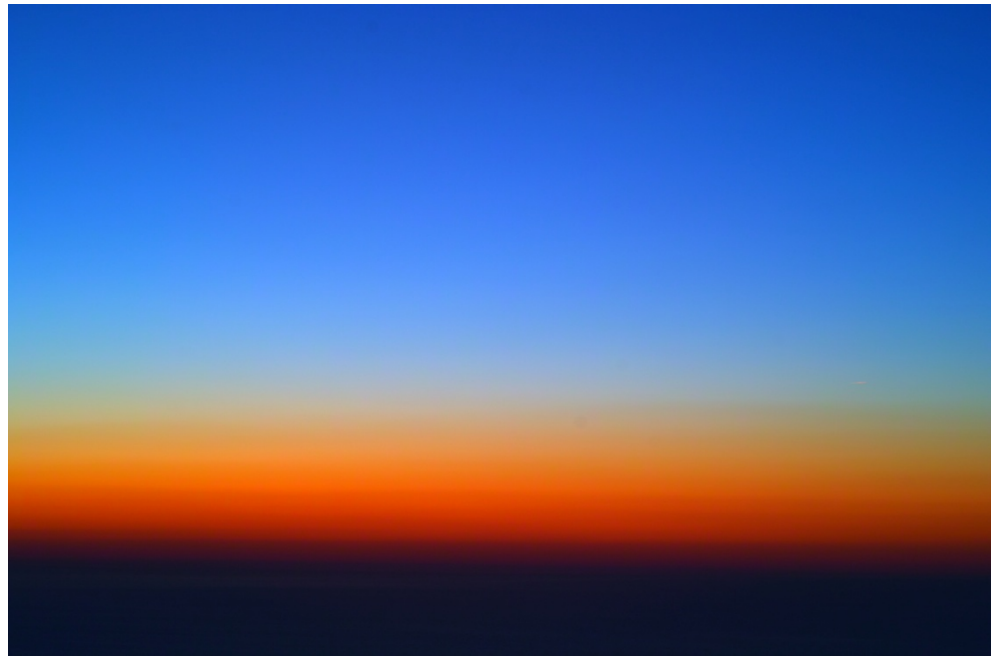
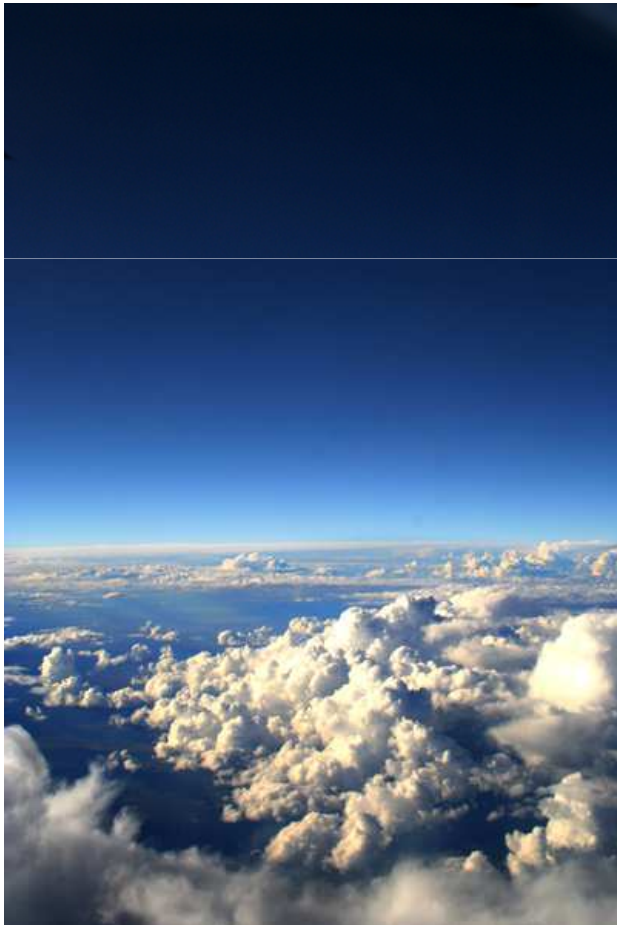
When measuring [Raman spectra](#) Raman scattering

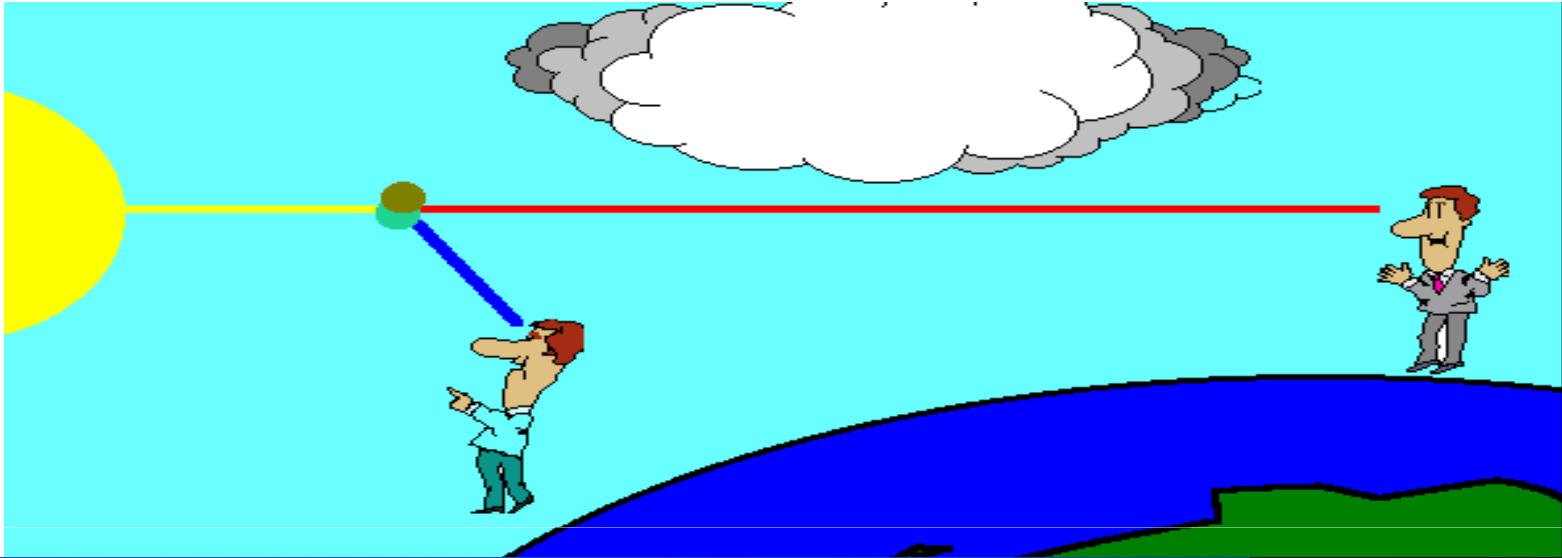
Raman scattering or the **Raman effect** is the elastic scattering of a photon. Discovered by C.V. Raman in liquids and by Grigory Landsberg and Leonid Isaakovich Mandelshtam in crystals....
of solutions, [ultrafiltration](#) Ultrafiltration

Ultrafiltration is a variety of membrane filtration in which hydrostatic pressure forces a liquid against a semipermeable membrane. Suspended solids and solutes of high molecular weight are retained, while water and low molecular weight solutes pass through the membrane....
may be needed to minimize interference by Tyndall scattering.

Prolonged and brilliantly coloured sunsets and twilights were frequently seen in **London in the summer of 1815**

Espalhamento Rayleigh





Explicação molecular

Dipolo induzido

$$\vec{D}(t)_{\text{induzido}} = \alpha \vec{E}$$

$$\alpha = \alpha(R) = \alpha(R_o) + \frac{d\alpha}{dR}(R - R_o) + \dots$$

polarizabilidade

$$\vec{E} = \vec{E}_o \cos(\omega_o t)$$

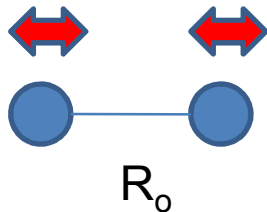
Campo externo (fóton)

$$R - R_o = \Delta R_o \cos(\omega_n t)$$

$$\vec{D}(t)_{\text{induzido}} = \left(\alpha(R_o) + \frac{d\alpha}{dR}(R - R_o) \right) (\vec{E}_o \cos(\omega_o t)) = \alpha(R_o) \vec{E}_o \cos(\omega_o t) + \frac{d\alpha}{dR} \vec{E}_o \cos(\omega_o t) \Delta R_o \cos(\omega_n t)$$

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$$

$$\vec{D}(t)_{\text{induzido}} = \alpha(R_o) \vec{E}_o \cos(\omega_o t) + \frac{d\alpha}{dR} \frac{\Delta R_o}{2} (\cos(\omega_n + \omega_o)t + \cos(\omega_n - \omega_o)t)$$

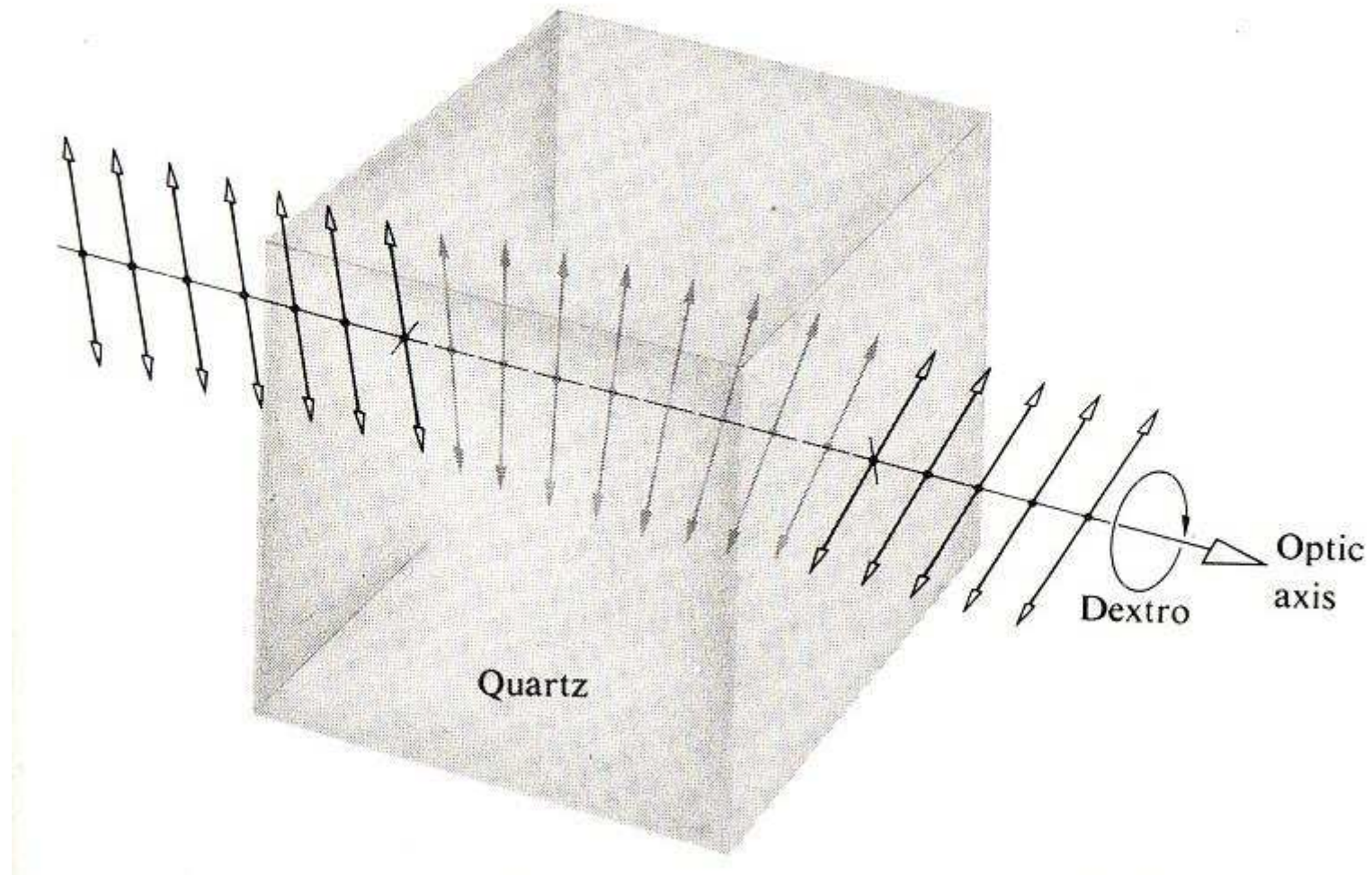


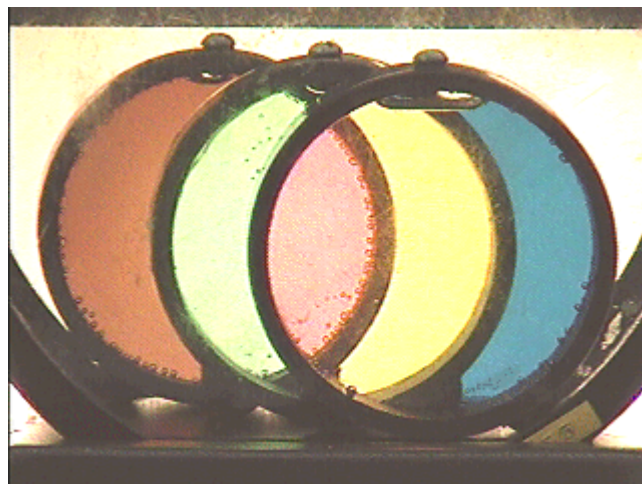
Anti-Stokes



Stokes

ATIVIDADE ÓTICA





M8-04: OPTICAL ACTIVITY IN KARO SYRUP TANK

G. R. Davies, Polarized Light Corridor Demonstrations, TPT 28, 464-467 (1990).

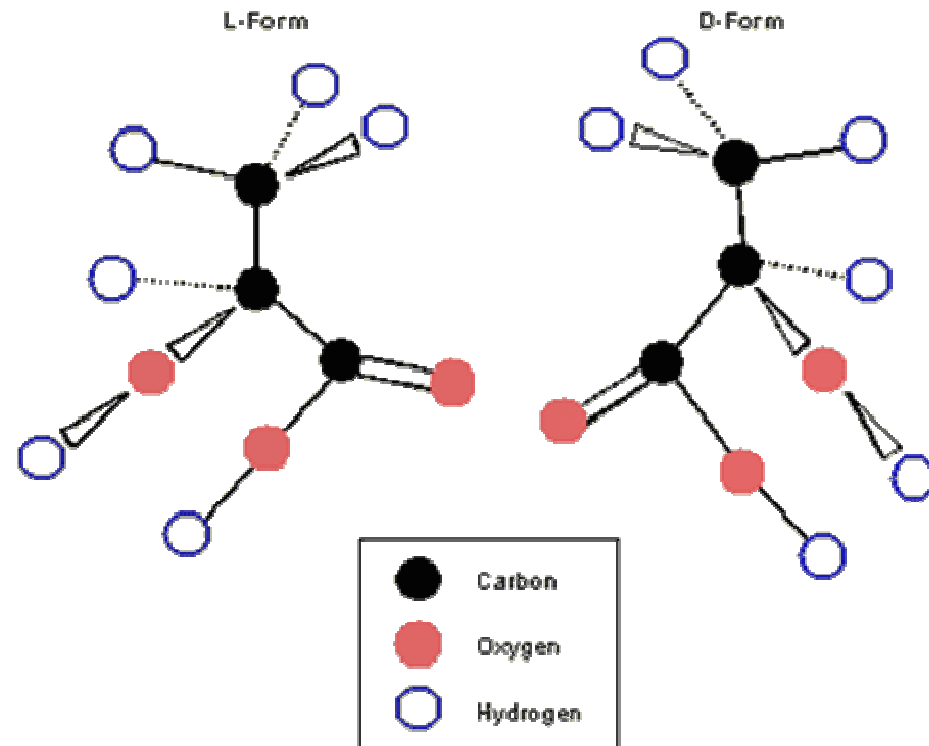
Em 1844 o alemão Eilhardt Mitscherlich observou que os cristais de sal de ácido tartárico comercial (ácido obtido dos tártaros – depósitos que se formam na fermentação da uva) apresentavam atividade ótica. O que não acontecia com cristais do ácido racêmico (do latim racemus, uva), que tinha a mesma composição química.





Em 1848, Louis Pasteur mostrou que o ácido racêmico, que é uma forma óticamente inativa do ácido tartárico, é composto por iguais quantidades de constituintes dextrógiros e levógiros. Substâncias deste tipo, com a mesma forma molecular mas diferindo na estrutura, são conhecidas como isômeros.

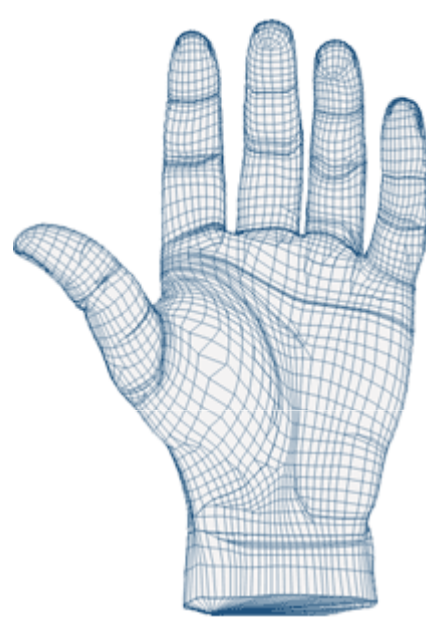
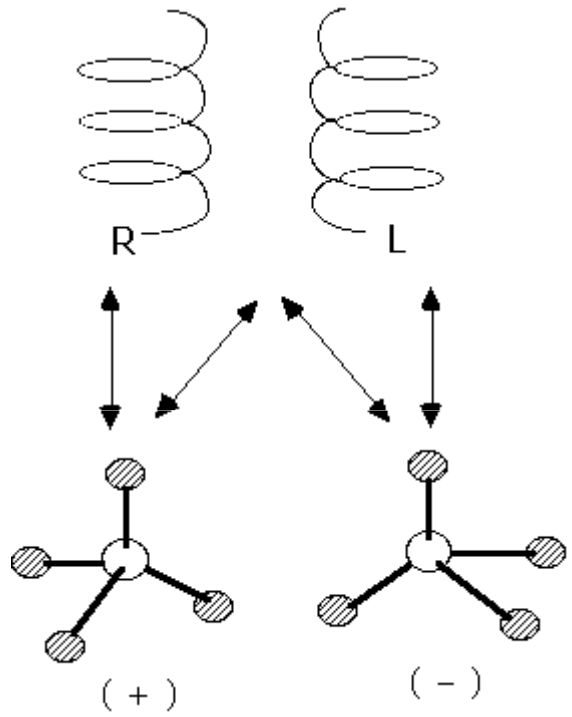
Pasteur conseguiu cristalizar o ácido racêmico e separar dois tipos de cristais enantiomórficos. Quando dissolvidos em água, estes cristais dão origem a soluções dextróginas e levóginas.



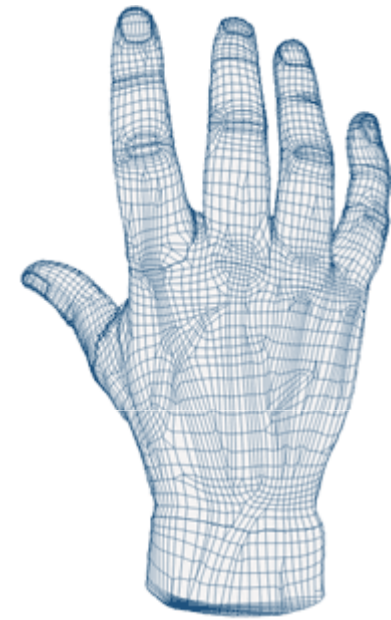
Pasteur também observou que na fermentação do paratartarato de amônia, o polarímetro utilizado indicava haver um aumento da atividade ótica dos cristais de mão esquerda, sendo que os de mão direita foram atacados durante a fermentação. Pasteur postulou que esta seletividade com a necessidade nutricional dos microorganismos vivos e, descobriu um novo método biológico para separar os cristais do ácido racêmico.

Pasteur então reforçou sua teoria da assimetria molecular, onde as propriedades biológicas das substâncias químicas dependiam não só dos átomos, mas também como estes estão arranjados no espaço.

Parecia que a química da vida apresentava uma preferência pela quiralidade de certas moléculas, havendo uma distinção entre matéria viva e matéria morta. “O Universo é dissimétrico”



LEFT HAND



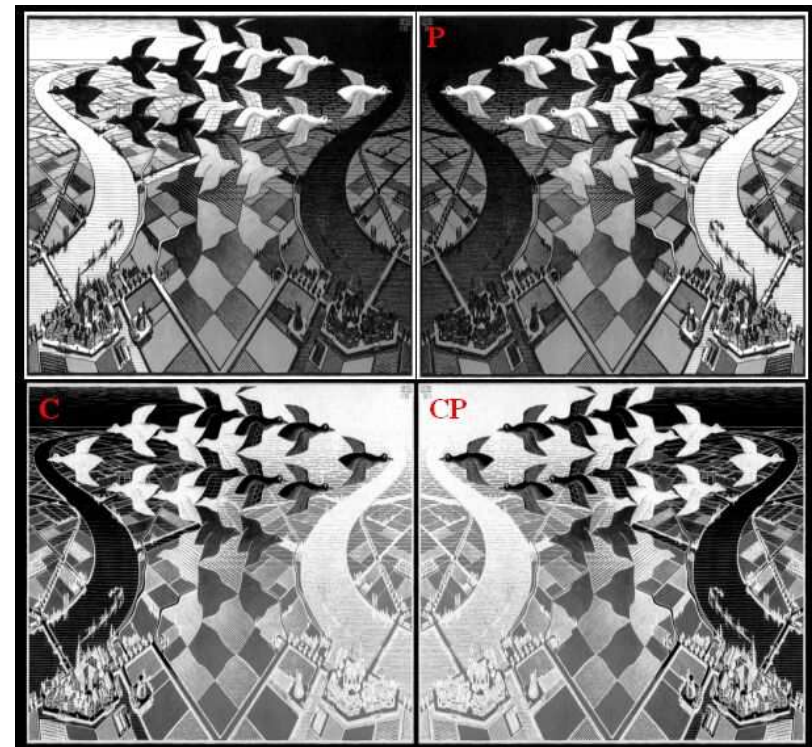
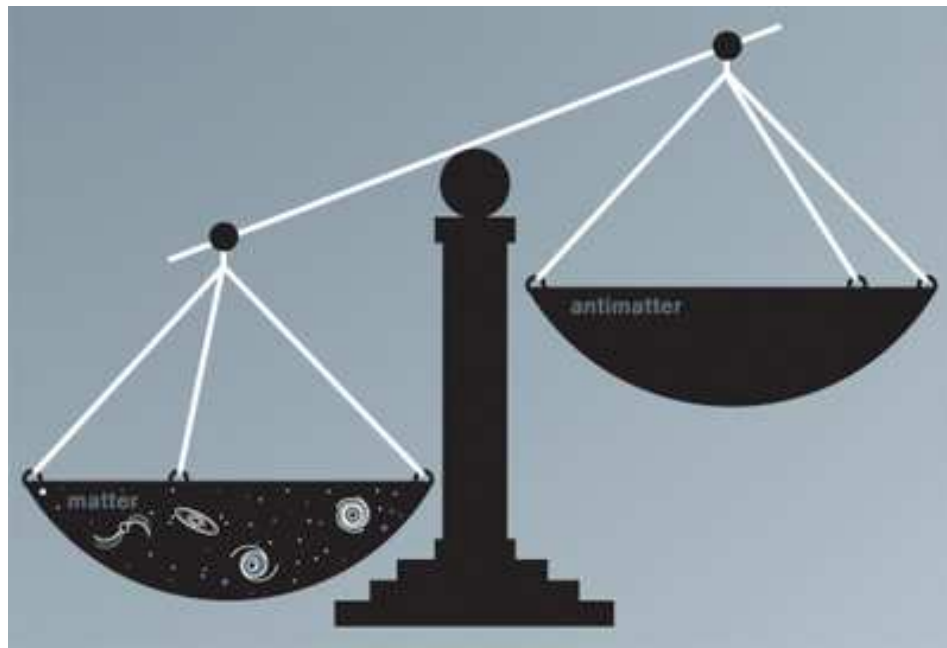
RIGHT HAND

“We live in a chiral world.
Indeed, chirality and life are
so inextricably linked that the
detection of chirality outside
our planet is used as a test for
extraterrestrial life. ”

**Professor Varinder
Aggarwal**

As moléculas biologicamente ativas incluindo o amino ácidos (que dão origem a proteínas) (tipo L) e açucares (tipo D) são quirais.

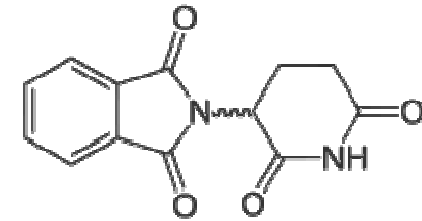
As reações químicas são consequência da força eletromagnética entre os átomos e esta conserva paridade, ou seja, qualquer processo resultante dessa interação e sua imagem especular tem a mesma probabilidade de ocorrer. Então, esperaria-se que o mundo fosse habitado por igual número de enantiômeros



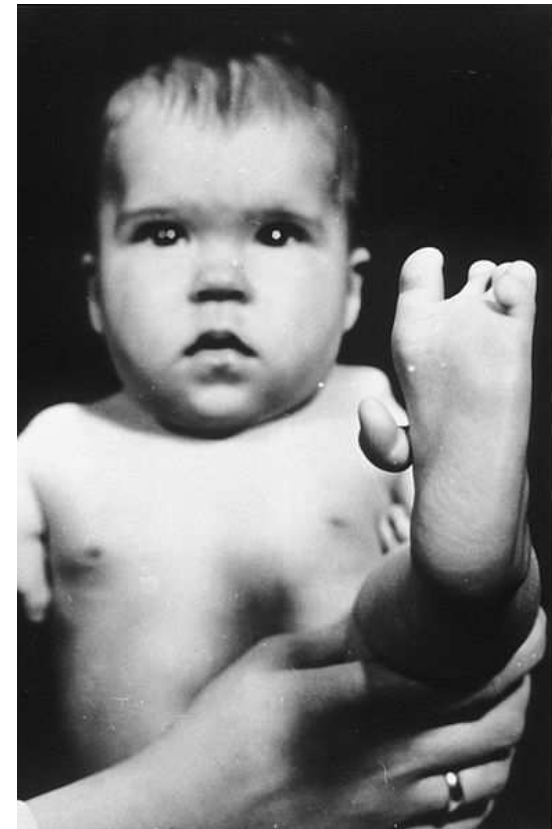
antibióticos

Compostos sintéticos como alguns antibióticos, possuem iguais quantidades de Levógiros e Destrógiros, enquanto as bactérias, assim como os homens, apresentam sua célula predominantemente levógira. Logo, é desnecessário ingerirmos a fração levógira do antibiótico, pois ela não afetará outro organismo levógiro.

Talidomida é uma mistura racêmica

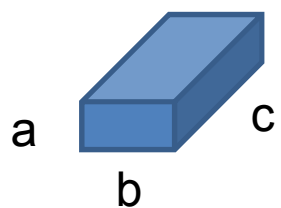


Somente um isômero em particular da talidomida causa teratogenicidade

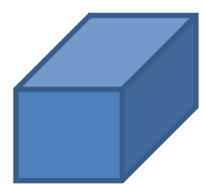


SIMETRIA MOLECULAR

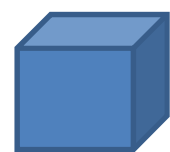
Relação entre simetria e níveis de energia



$$a < b < c$$

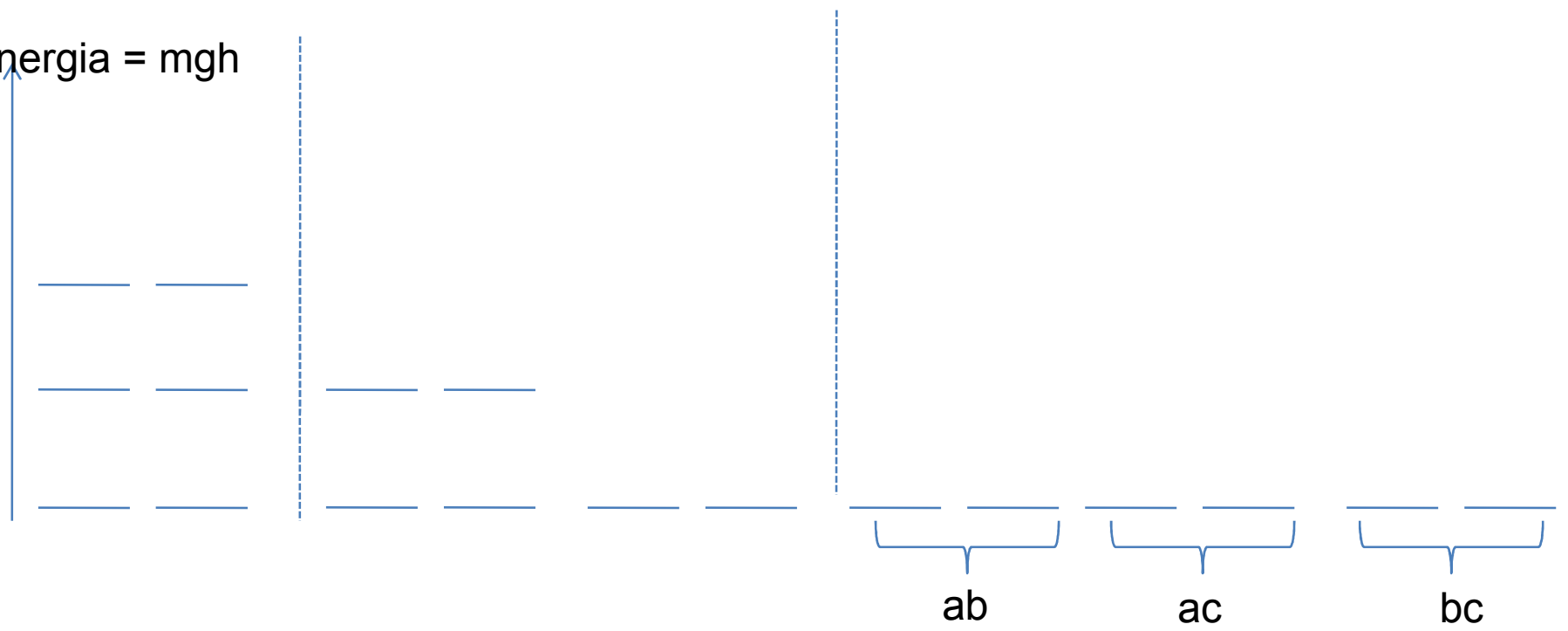


$$a = b < c$$



$$a = b = c$$

Energia = mgh

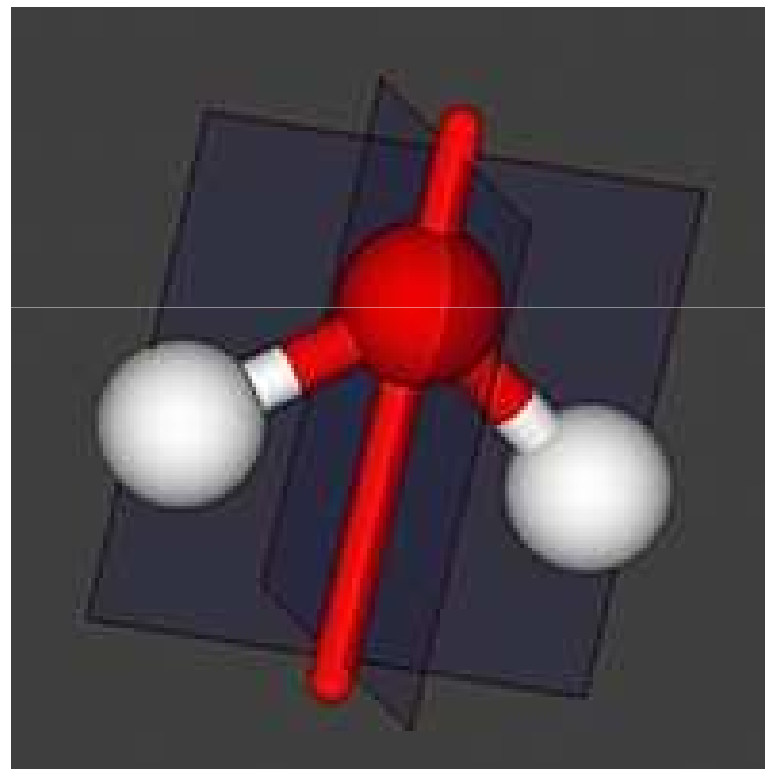


Simetria I < Simetria II < Simetria III

Degenerescência I < degenerescência II < degenerescência III

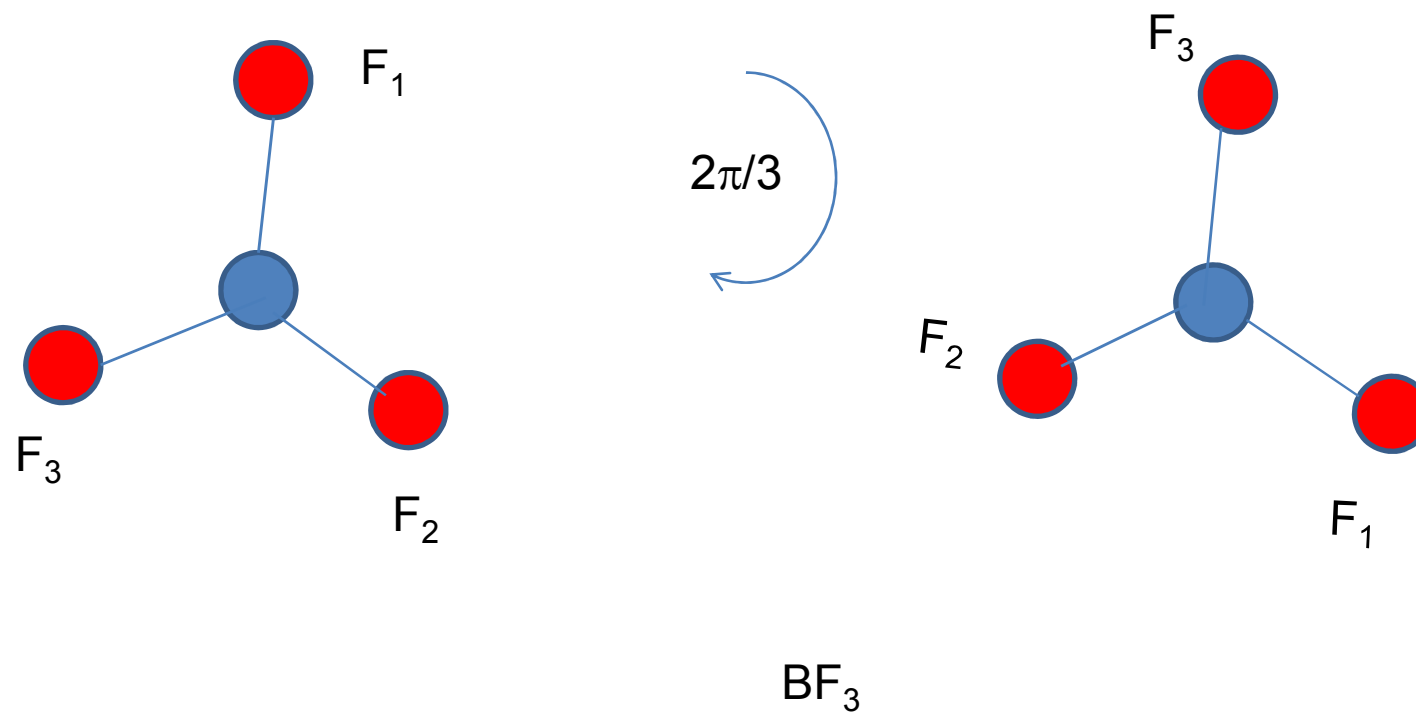
O mesmo se aplica a moléculas → quanto mais simétrica, menos níveis de energia diferentes possui e maior degenerescência daqueles níveis!

Uma molécula tem simetria se uma transformação resulta em uma nova orientação indistinguível da original



Operação de simetria

É uma operação que leva a molécula a uma nova orientação equivalente a original.
Exemplo: rotação

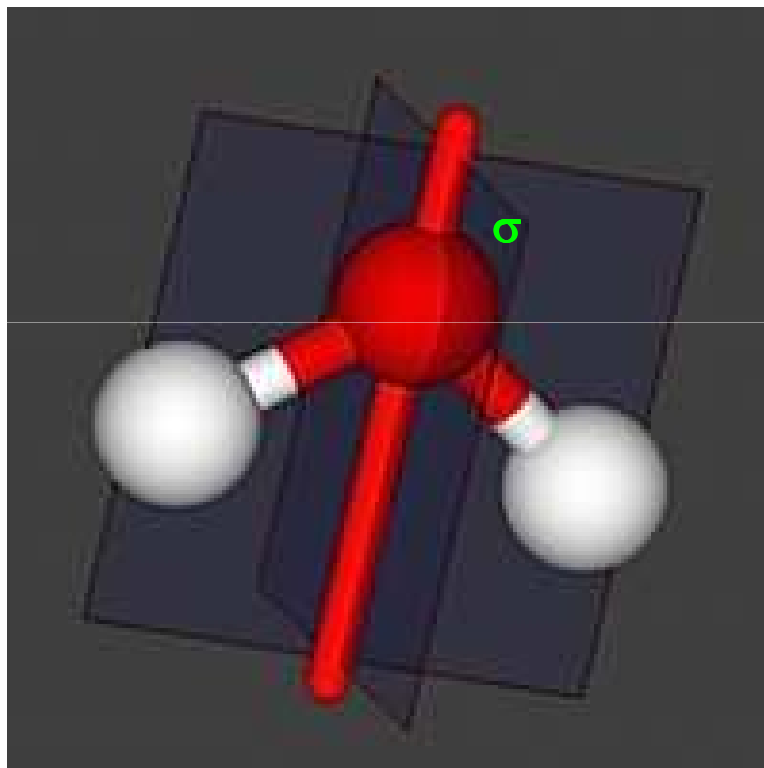
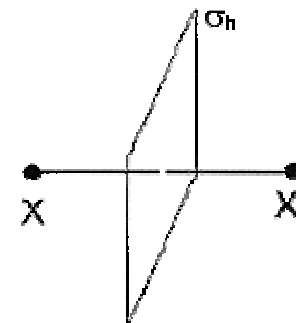


Um **elemento de simetria** é um objeto (ponto, linha ou plano) através do qual a operação de simetria é realizada.

Elementos de simetria incluem: eixo próprio (C_n), plano espelho (σ), centro de inversão (i), Eixo impróprio (S_n) e identidade (E)

Identidade (E) → esta operação diz para não fazer nada com a molécula.

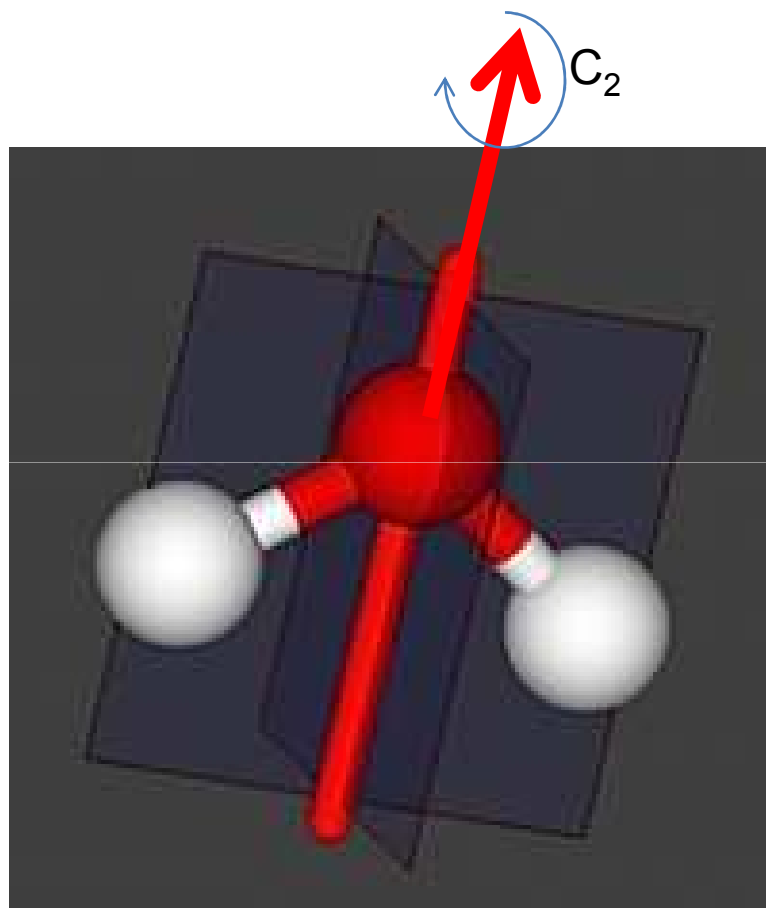
Reflexão através de um plano (σ)



Note que $\sigma^2 = E$

Rotação em torno de um eixo (C_n)

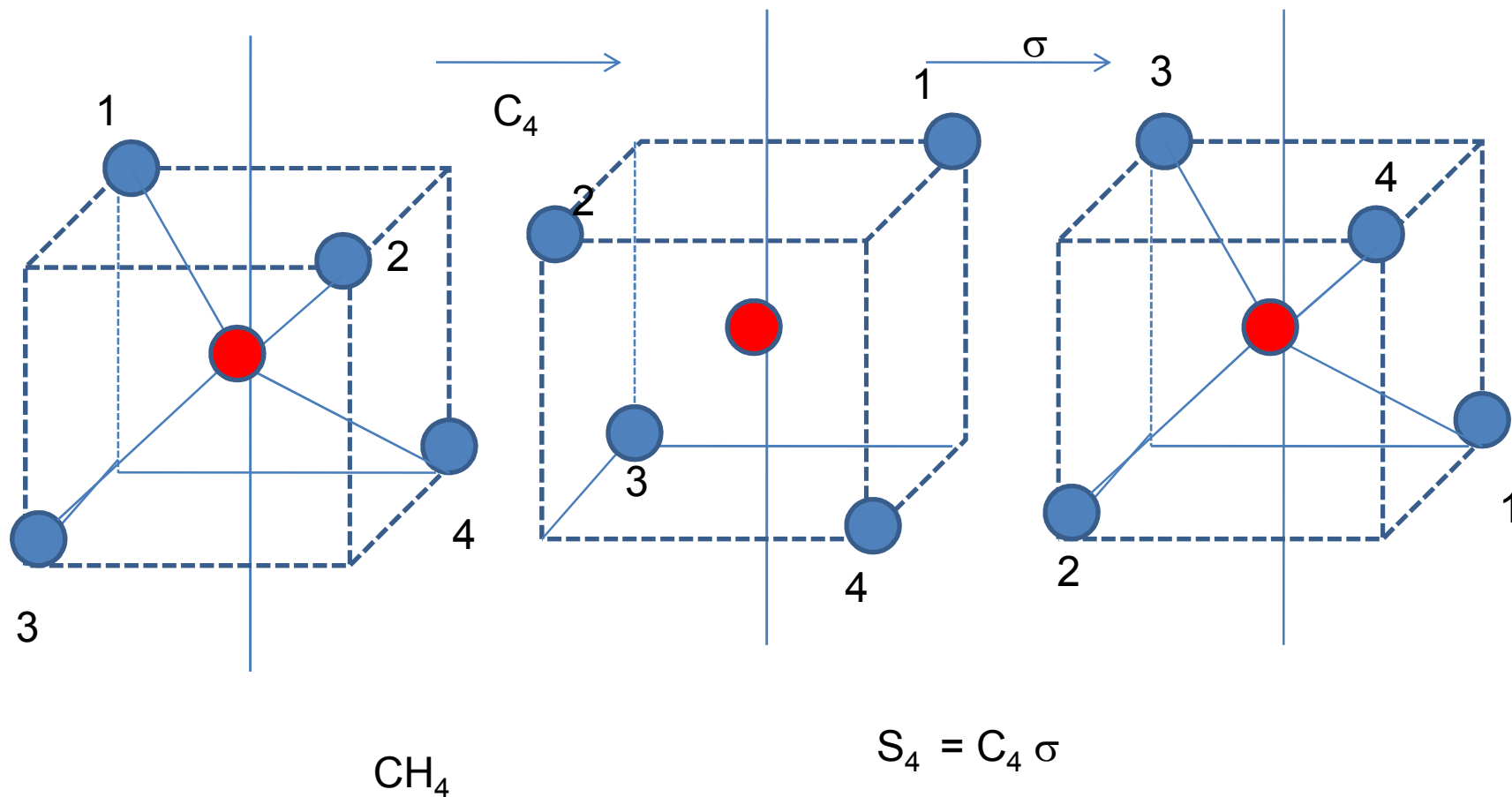
$$n = 2\pi/\theta$$



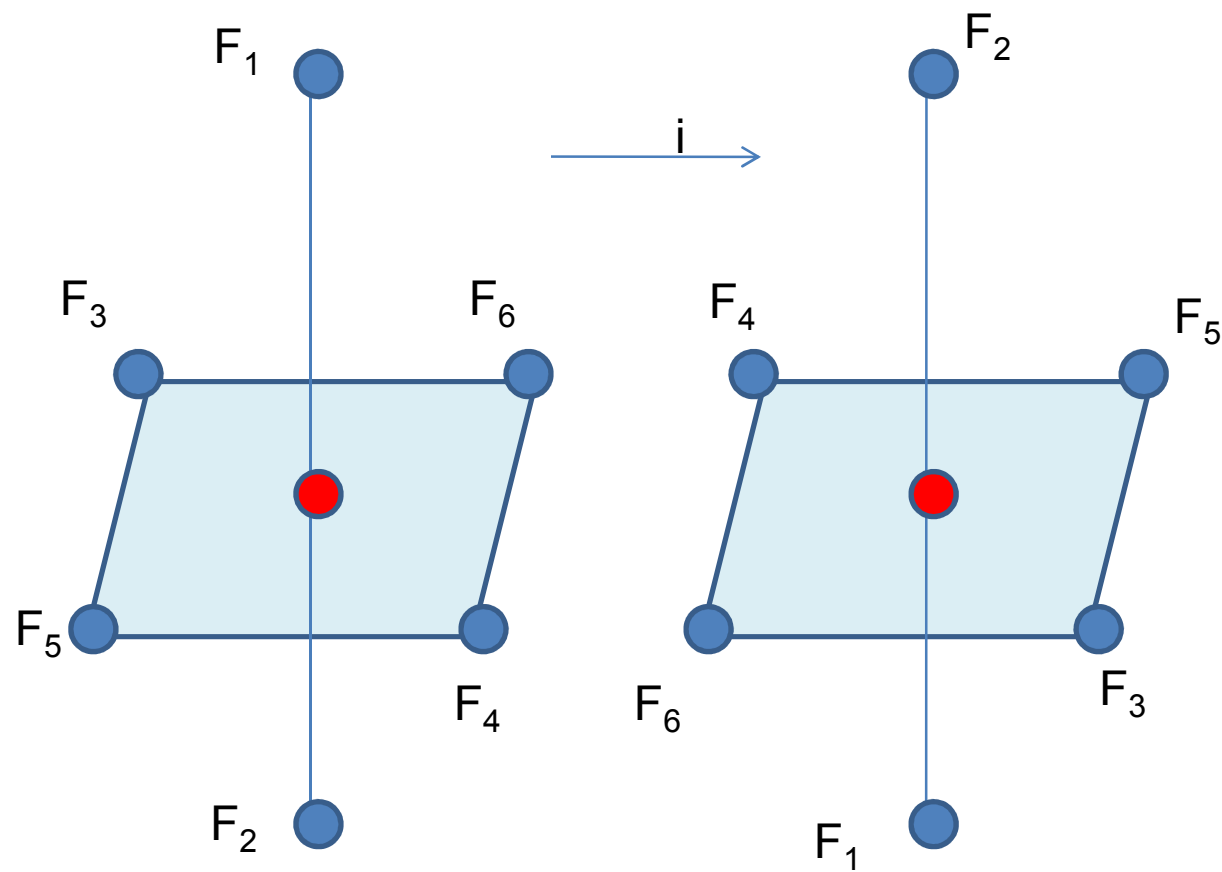
$$(C_n)^n = E$$

Rotação imprópria (S_n)

Consiste de uma rotação de $2\pi/n$ seguida de uma reflexão através de um plano perpendicular ao eixo de rotação



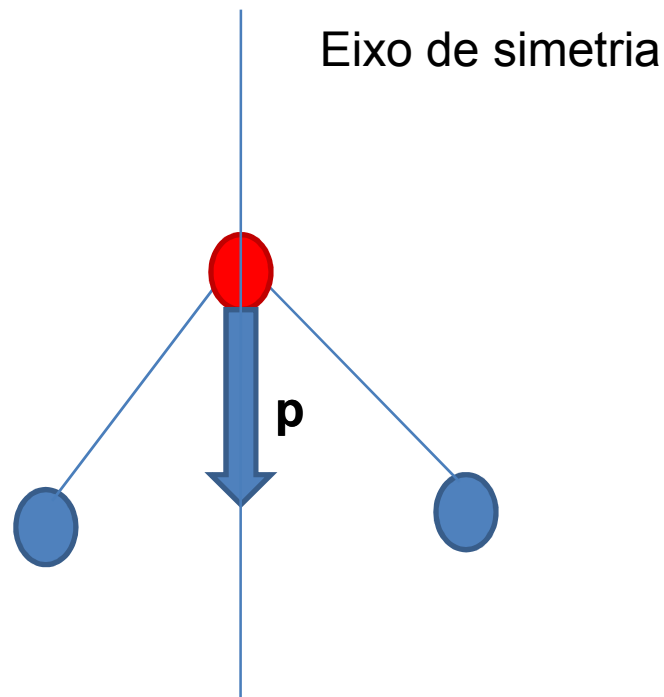
Inversão (i) consiste em passar cada átomo pelo centro da molécula e colocá-lo no lado oposto



SF_6

Momento de dipolo → a direção do vetor momento de dipolo não deve mudar após uma operação de simetria. Então, se tivermos um eixo próprio de simetria, o momento de dipolo deve estar sobre este eixo.

Ex: água



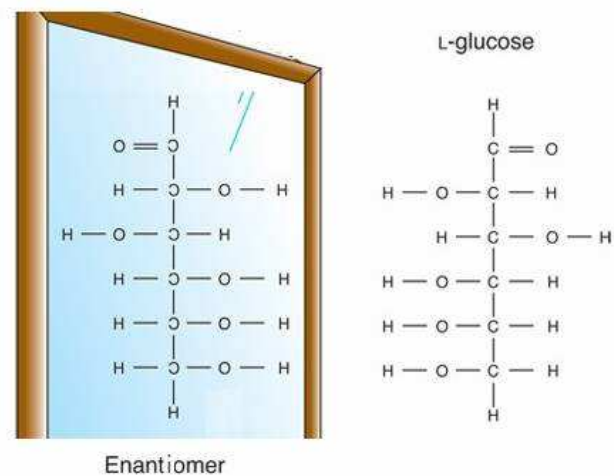
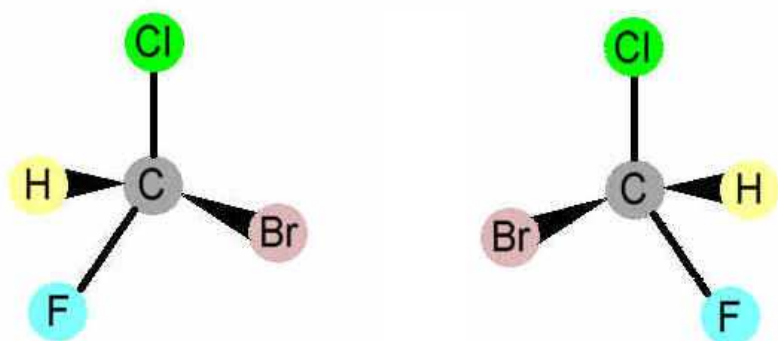
Se a molécula tem dois ou mais eixos de simetria não coincidentes, a molécula não pode ter momento de dipolo uma vez que \mathbf{p} não pode estar sobre dois eixos diferentes.

Uma molécula com centro de simetria não pode ter \mathbf{p} , uma vez que a inversão muda a direção de \mathbf{p}

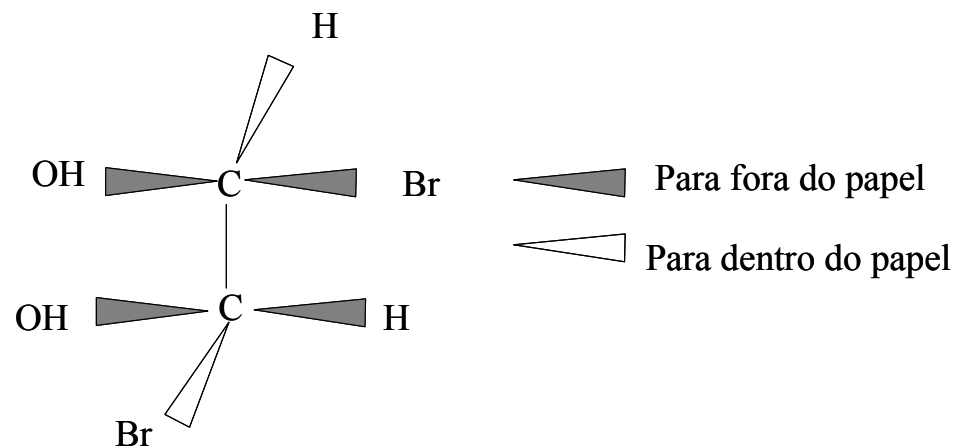
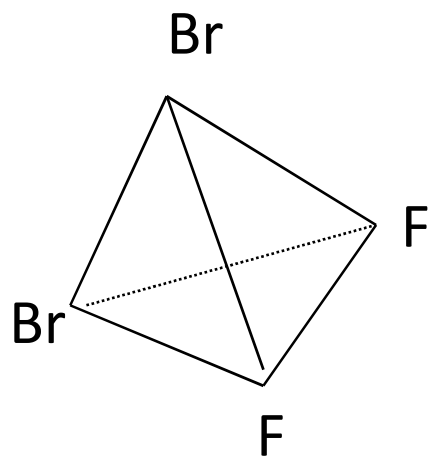
Simetria e atividade ótica

Se uma molécula é igual a sua imagem no espelho, é óticamente inativa.

Se uma molécula não pode ser superimposta sobre sua imagem no espelho, então pode ser óticamente ativa.

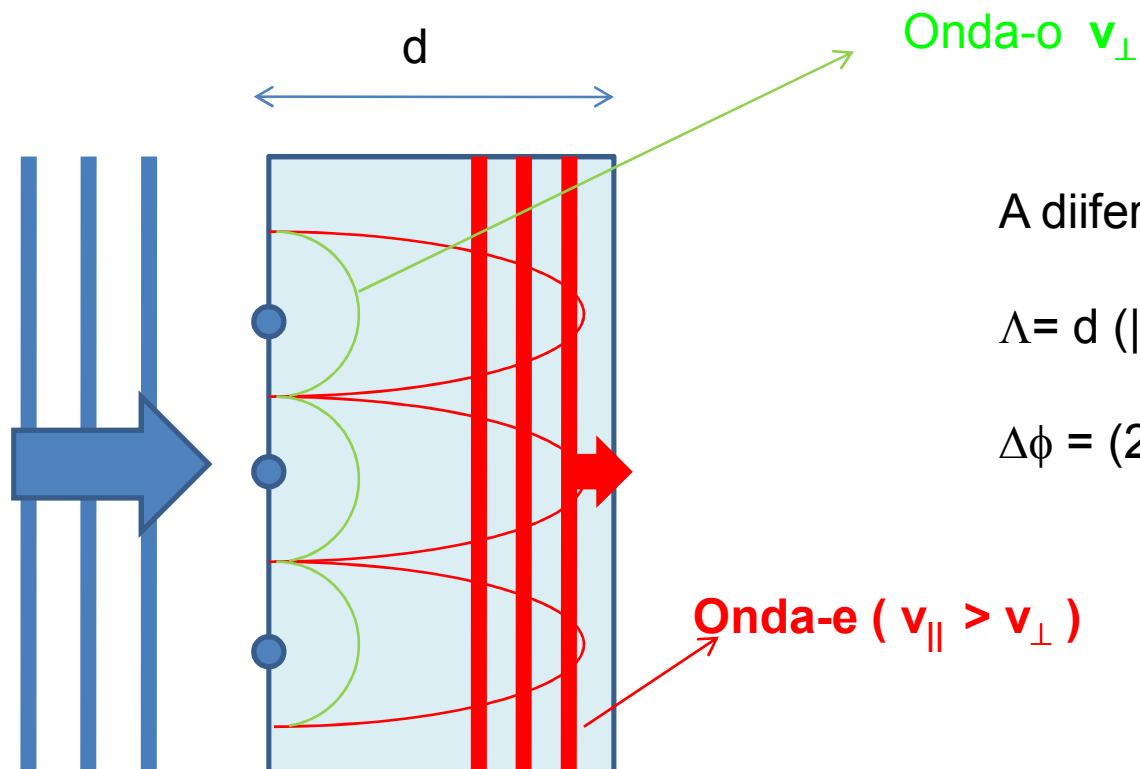


Moléculas com um plano espelho, centro de inversão, ou eixo impróprio de rotação não podem ser opticamente ativas. Moléculas sem estes elementos de simetria podem ser opticamente ativas. Usando este critério, quais das moléculas abaixo são inativas, indique quais elementos estão presentes que te dizem que a molécula é inativa.



Lâminas de atraso

Uma das componentes polarizadas linearmente da onda, de algum modo sofre uma variação de fase em relação à outra, de uma quantidade bem definida. Pode-se converter qualquer estado de polarização noutra e criar estados de polarização circular ou, de um modo geral elíptica.



A diferença de caminhos óticos é:

$$\Delta = d (|n_o - n_e|) = \Delta\phi/k_o$$

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) d (|n_o - n_e|)$$

Lâminas de atraso

Uma das componentes polarizadas linearmente da onda, de algum modo sofre uma variação de fase em relação à outra, de uma quantidade bem definida. Pode-se converter qualquer estado de polarização noutra e criar estados de polarização circular ou, de um modo geral elíptica.



No processo de fabricação, as moléculas da fita durex são alinhadas por estiramento ao longo do seu comprimento deixando-a birrefringente.

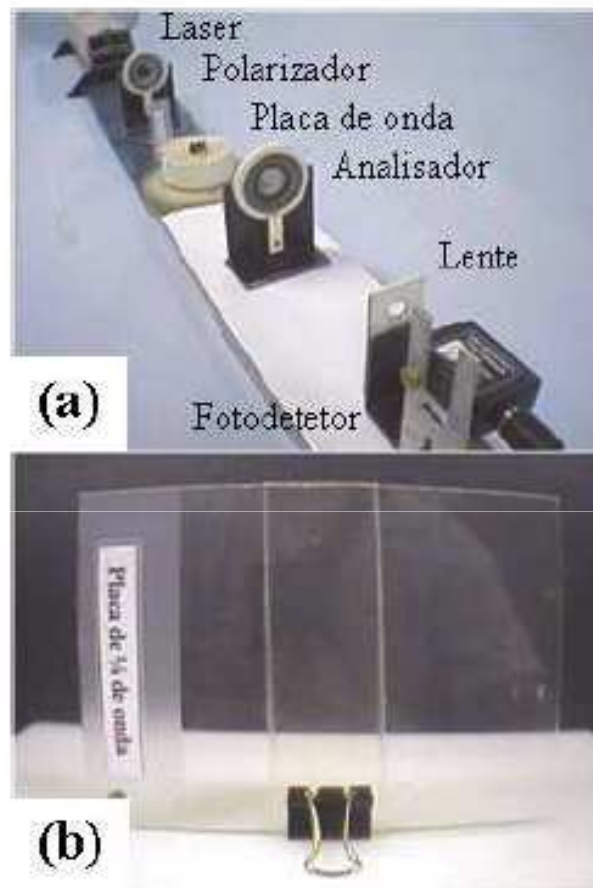


Figura 2 - Foto do arranjo experimental para estudo das placas de onda. (a) Vista geral mostrando o laser, polarizadores, fotodetector e placa e (b) vista aproximada de uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda feita com lâmina de vidro e camadas de fita durex.

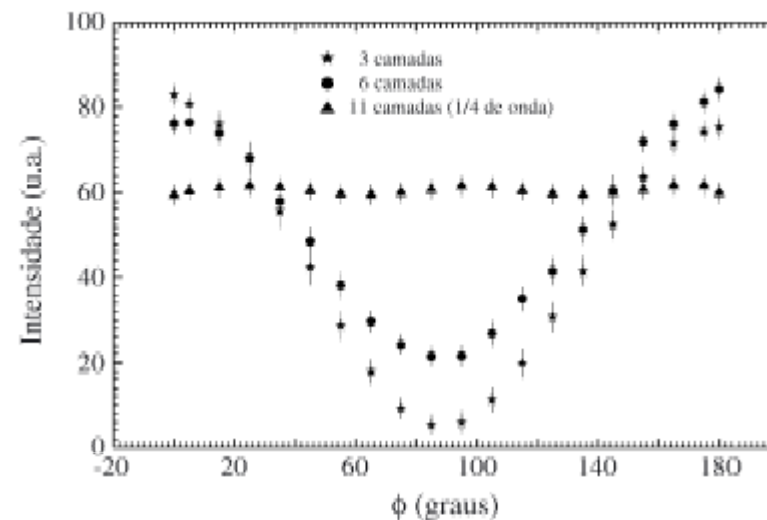


Figura 3 - Intensidade de luz em função do ângulo entre os dois polarizadores (ϕ) para 3, 6 e 11 camadas de fita durex. Para 11 camadas a intensidade transmitida é constante, indicando que a luz é circularmente polarizada.

$$\Delta n \sim 3 \times 10^{-4}$$



[Solar glory](#) at the [steam](#) from [hot springs](#) at [Yellowstone National Park](#). A **glory** is an optical phenomenon produced by light backscattered (a combination of [diffraction](#), [reflection](#) and **refraction**) towards its source by a cloud of uniformly-sized water droplets.



<http://www.atoptics.co.uk/rayshad.htm>