

01. Ottica:

Ottica

L'ottica è rivolta allo studio delle proprietà della luce e della sua propagazione attraverso i mezzi materiali.

L'ottica geometrica studia il comportamento della luce quando incontra discontinuità nello spazio (ostacoli, specchi, lenti o prismi) di dimensioni molto maggiori della lunghezza d'onda.

La luce si propaga in linea retta

L'ottica fisica studia il comportamento ondulatorio della luce che emerge soprattutto quando incontra discontinuità nello spazio che hanno dimensioni paragonabili con la lunghezza d'onda.

Dobbiamo tenere conto della natura ondulatoria della luce.

La luce

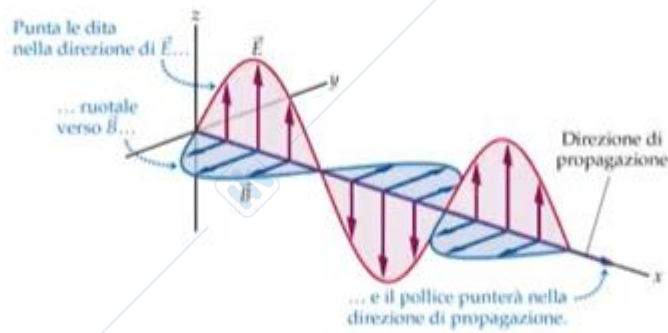
La luce è un'onda elettromagnetica

Nel vuoto si propaga con velocità

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

La velocità della luce nel vuoto c non dipende dalla frequenza della radiazione luminosa

Onda elettromagnetica nel vuoto: direzione dei campi



Configurazione dei campi di un'onda piana che si propaga lungo l'asse x

Il campo elettrico \vec{E} e magnetico \vec{B} sono perpendicolari fra loro e sono entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione

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

In genere non si fa riferimento esplicito al campo magnetico associato, in quanto la sua intensità è sempre determinabile mediante questa relazione.

Il campo elettrico è sempre perpendicolare al campo magnetico

L'onda elettromagnetica nel vuoto è un'onda trasversale \Rightarrow campo elettrico e magnetico sono perpendicolari alla direzione di propagazione

Parametri dell'onda monocromatica

Frequenza: ν

numero di oscillazioni al secondo dei campi elettromagnetici in un certo punto dello spazio

Periodo: T

durata di una oscillazione

$$\nu = \frac{1}{T}$$

Frequenza e periodo sono determinati dalle caratteristiche della sorgente emittente

Parametri dell'onda monocromatica (2)

Lunghezza d'onda: λ

distanza dopo la quale l'oscillazione si ripete (ad un dato istante)

Nel vuoto:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

In un generico materiale la velocità della luce è inferiore a quella nel vuoto:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

A differenza della frequenza, la lunghezza d'onda dipende dalla velocità dell'onda e quindi dal materiale attraversato

La lunghezza d'onda e la sua propagazione sono legate:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

La velocità di propagazione dell'onda < alla velocità di propagazione della luce nel vuoto.

In un generico materiale la velocità della luce è inferiore a quella nel vuoto:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \quad \nu = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$$

A differenza della frequenza che dipende dalla sorgente, la lunghezza d'onda dipende dalla velocità dell'onda e quindi dal materiale attraversato.

Sorgenti luminose

- Gli oggetti che producono la luce che emettono sono detti sorgenti primarie.
- Altri oggetti riflettono la luce e la rinviano ai nostri occhi; essi sono detti sorgenti secondarie.

Una sorgente luminosa che si possa assimilare ad un punto luminoso (angolo sotteso < 1 minuto d'arco $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ rad) è considerata una sorgente puntiforme.

Le sorgenti con un'estensione non trascurabile sono considerate come costituite da un numero infinito di sorgenti puntiformi, e sono dette sorgenti estese.

02. Intensità luminosa:

Energia raggiante

Le onde luminose trasportano l'energia elettromagnetica emessa dalla sorgente.

Flusso di energia raggiante

L'energia elettromagnetica emessa da una sorgente nell'unità di tempo è detta flusso di energia raggiante:

$$\Phi = \frac{dE}{dt} \quad (\text{W})$$

Intensità luminosa

La quantità di energia trasportata da un'onda elettromagnetica che attraversa una superficie unitaria, nell'unità di tempo, è detta intensità dell'onda

L'intensità di un'onda che si propaga nello spazio è data dalla media del prodotto dei campi elettrico e magnetico (vettore di Poynting). Se:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t) \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$I = \frac{1}{2} \frac{E_0 B_0}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{c B_0^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad (\text{W m}^{-2})$$

Per un'onda piana l'intensità è costante

Possiamo partire da questa formula:

$$I = \frac{1}{2} \frac{E_0 B_0}{\mu_0}$$

$$\frac{1}{2} \frac{c B_0^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{E_0^2}{\mu_0 c}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{E_0^2 c \epsilon_0 \cancel{\mu_0}}{\cancel{\mu_0}} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$$

Per l'unità di misura:

$$[\mu] = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

$$[I] = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s m}^2} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Sorgente puntiforme: onde sferiche

Una sorgente puntiforme emette onde sferiche.

I fronti (superfici) d'onda sono delle superfici sferiche concentriche alla sorgente puntiforme.

Il campo elettrico diminuisce come $1/r \Rightarrow$ l'intensità dell'onda diminuisce come $1/r^2$

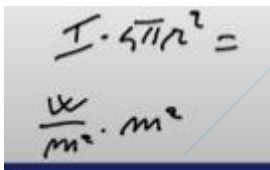
Legge dell'inverso del quadrato della distanza

L'intensità della radiazione emessa da una sorgente puntiforme è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente:

$$I = \frac{\Phi_0}{4\pi r^2}$$

Se una sorgente puntiforme emette energia e noi andiamo a considerare l'intensità luminosa della radiazione elettromagnetica ad una certa distanza r , il principio di conservazione dell'energia dice che l'energia emessa dalla sorgente deve essere uguale a quella che ritrovo a qualunque distanza di quella della sorgente.

L'energia deve essere trasportata via, non può essere né creata né distrutta.



$$I \cdot 4\pi r^2 = \frac{W}{m^2 \cdot m^2}$$

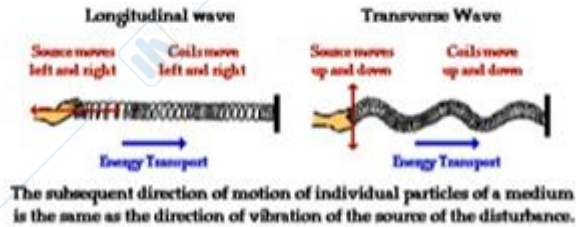
quindi l'energia raggiante emessa dalla sorgente.

Ricavo I e trovo l'intensità luminosa di una sorgente puntiforme decresce con il quadrato della distanza della sorgente:

$$I = \frac{\Phi_0}{4\pi r^2}$$

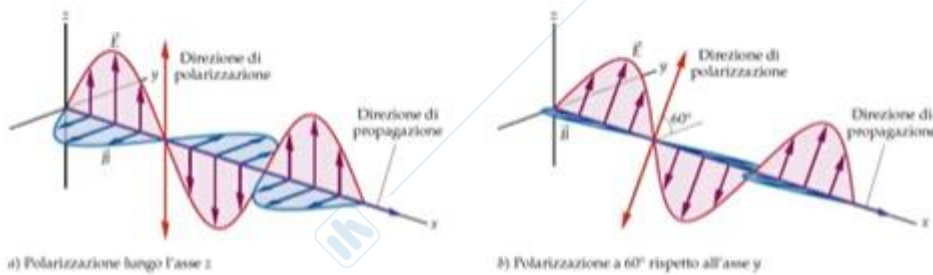
03. Polarizzazione:

Onde longitudinali e trasversali



A differenza di un'onda longitudinale, un'onda trasversale può essere polarizzata

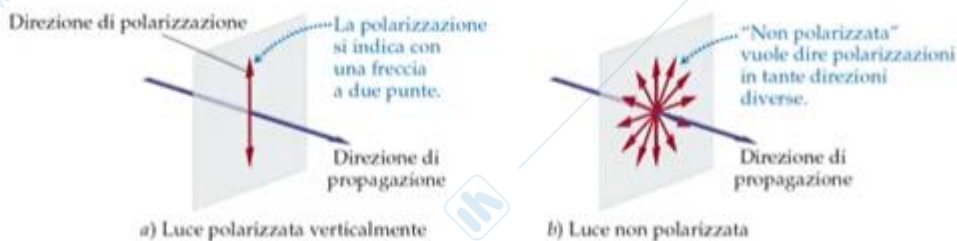
Polarizzazione



La polarizzazione di un'onda elettromagnetica si riferisce alla modalità con cui il campo elettrico oscilla.

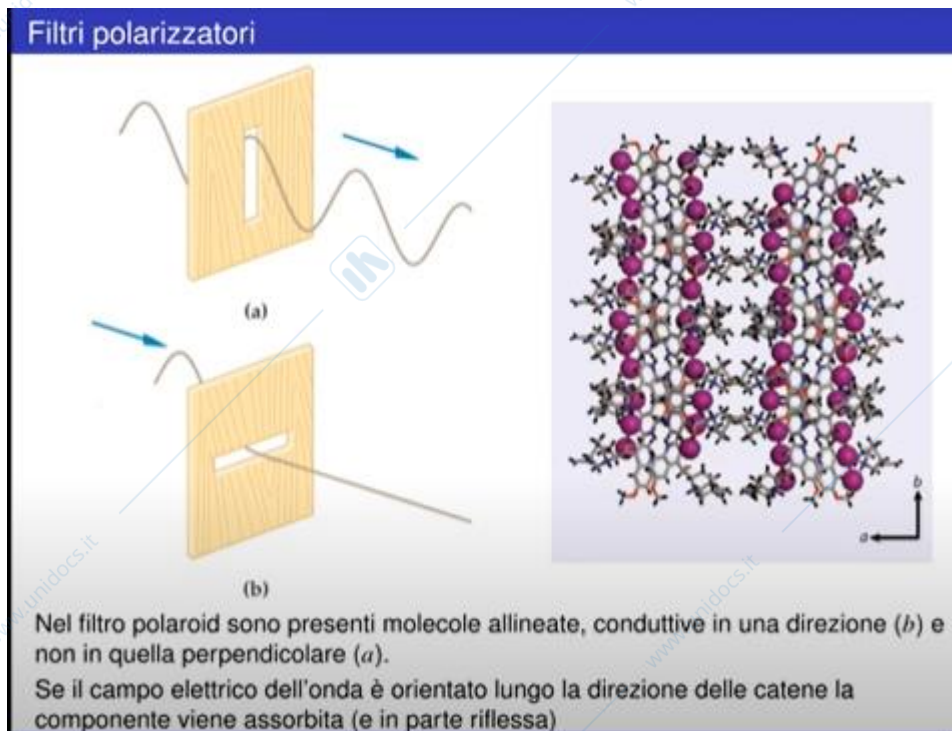
Ad esempio, l'onda in figura è polarizzata linearmente, in quanto il campo elettrico oscilla sempre nella stessa direzione mantenendosi nello stesso piano.

Onde polarizzate e non polarizzate



- In un fascio di luce polarizzata linearmente il campo elettrico è orientato sempre nella stessa direzione.
- In un fascio di luce non polarizzata il campo elettrico è orientato in direzione casuale e questa varia istante dopo istante

La luce emessa da una lampada ad incandescenza è la somma di moltissime emissioni polarizzate con diversa orientazione, ogni emissione dura approssimativamente $10^{-9} \div 10^{-8}$ s e quindi produce un treno di oscillazioni di lunghezza $l \sim 0.3 \div 3$ m. L'effetto è quindi di luce non polarizzata.



Utilizziamo dei filtri polarizzatori che ci consentono di selezionare un'opportuna orientazione del campo elettrico.

Esiste se è diretta parallelamente rispetto questa fessura e non esiste se la vibrazione della corda è perpendicolare rispetto alla fessura.

Ci sono materiali che sono conduttive in una direzione e non in quella perpendicolare; il campo elettrico è orientato nella direzione in cui le sostanze sono conduttive. Allora il campo elettrico produce un moto di elettroni e l'energia viene dissipata.

Invece se il campo elettrico sono in direzione perpendicolare a quella di conduttività del materiale, allora il campo elettrico non ha nessun effetto, non può essere dissipata energia perché in quella direzione la sostanza non conduce.

Se abbiamo un ottimo filtro polarizzatore, l'intensità della radiazione luminosa che si ottiene dopo il filtro è la metà di quella iniziale.

Filtro polarizzatore

Viene fatta passare la componente dell'onda parallela alla direzione di propagazione:

$$E_t = E_0 \cos \theta$$

L'intensità di un'onda elettromagnetica è data da:

$$I = \frac{EB}{\mu} = \frac{E^2}{v\mu}$$

l'intensità dell'onda trasmessa è quindi:

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

Nota: $v\mu = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}\mu = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z$ prende il nome di impedenza caratteristica. Nel vuoto vale: 477Ω

Esaminiamo il caso in cui quando la luce polarizzata passa attraverso un secondo filtro polarizzatore.

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 \cos^2 \theta$$

Filtro polarizzatore e luce non polarizzata

24 / 35

L'angolo tra polarizzazione della luce incidente e asse del polarizzatore è casuale e per ogni treno d'onda transiente si ha che:

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

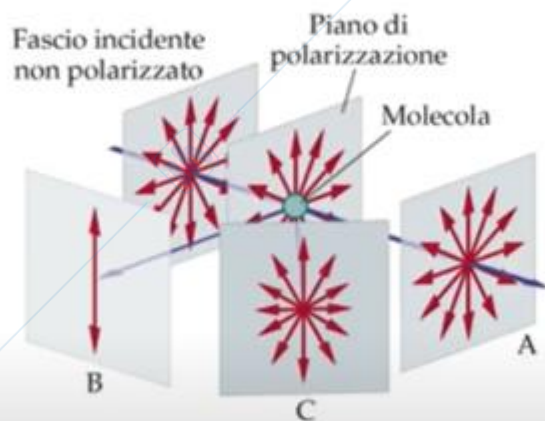
L'effetto è mediato su tutte le polarizzazioni:

$$I = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos^2 \theta = \frac{1}{2}$$

Per avere un fascio incidente che non è polarizzato, bisogna fare la media della risposta del filtro polarizzatore su tutte le possibili orientazioni del fascio incidente.

04. Polarizzazione:

Un fascio di luce non polarizzata può venire polarizzato totalmente o parzialmente dalla diffusione su atomi o molecole che si comportano come piccolissime antenne



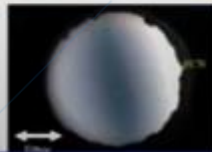
La polarizzazione è massima quando si osserva la luce diffusa a 90° rispetto al raggio incidente.

Polarizzazione della luce diffusa nel cielo

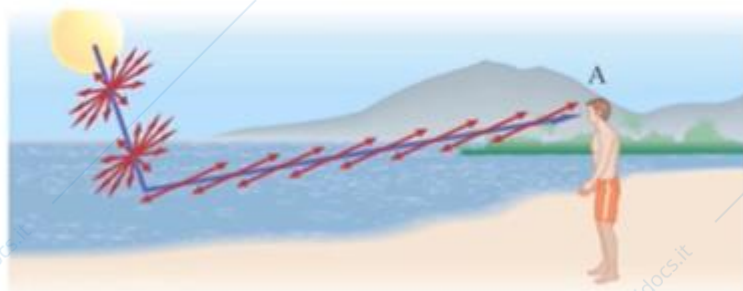
Cielo fotografato attraverso un filtro polaroid.



La polarizzazione della luce del cielo rimane parzialmente visibile anche attraverso le nuvole per cui alcuni animali che distinguono la luce polarizzata possono orientarsi con il sole anche quando questo è nascosto (vedi ad esempio *The Journal of Experimental Biology* 204, 2933-2942 (2001))



Polarizzazione per riflessione



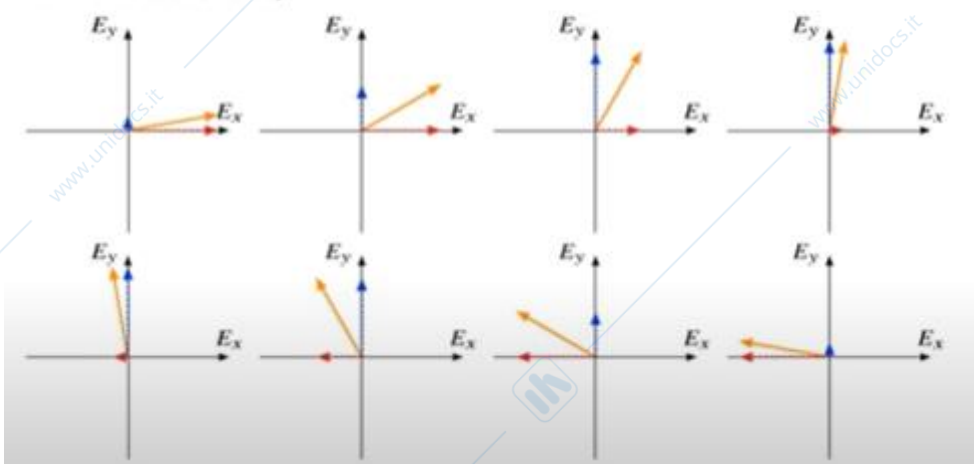
La luce riflessa da superfici piane è parzialmente polarizzata. Si ha polarizzazione completa quando la luce riflessa è sotto l'angolo di Brewster:

$$\tan \theta_b = \frac{n_2}{n_1}$$

che ad esempio per l'interfaccia aria-acqua ($n_1 = 1$ e $n_2 = 1.33$), vale approssimativamente 53° .

Polarizzazione circolare

Se si sommano due onde elettromagnetiche sfasate di un quarto di lunghezza d'onda si ottiene un'onda polarizzata circolarmente (oppure ellitticamente se i due campi hanno intensità diversa).

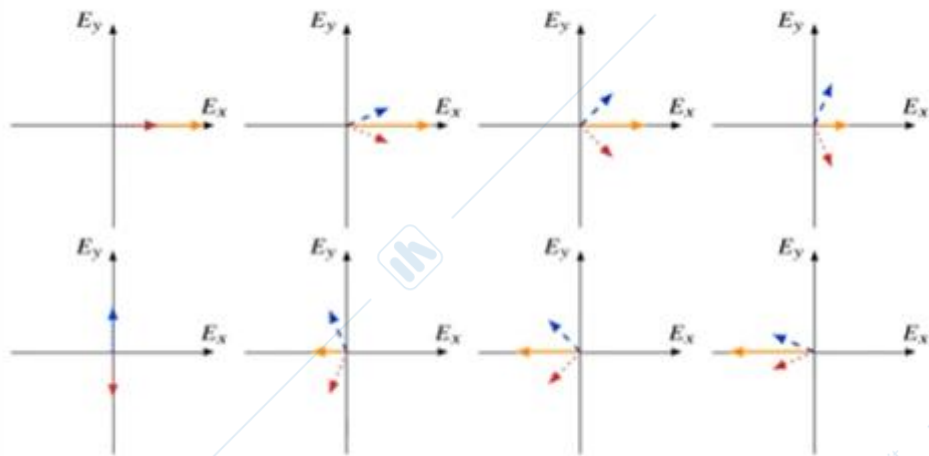


Polarizzazione destrorsa e sinistrorsa

- La polarizzazione si definisce destrorsa se il campo elettrico ruota in senso orario visto dalla sorgente.
 - si può anche utilizzare la regola della mano destra
- Si definisce sinistrorsa se ruota in senso antiorario visto dalla sorgente.

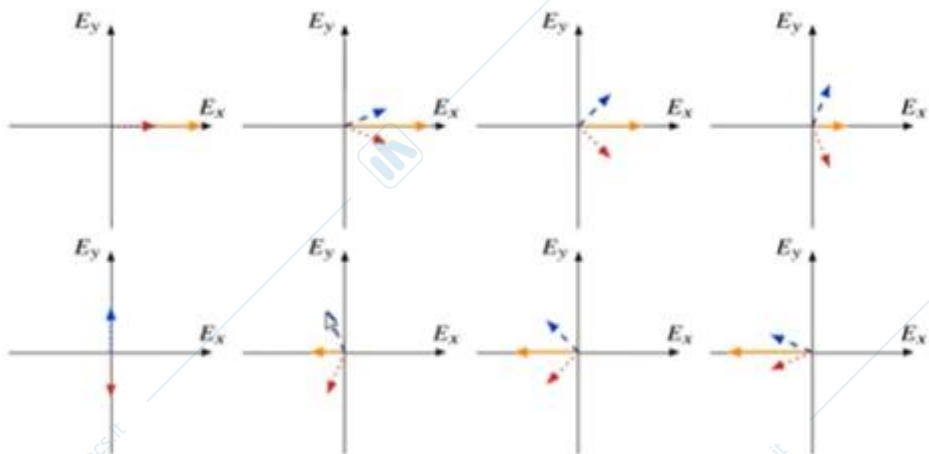
(Naturalmente c'è anche chi usa la convenzione opposta ponendosi dal punto di vista dell'osservatore).

Polarizzazione lineare come somma di due onde polarizzate circolarmente



$$\vec{E} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ 0 \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cos \omega t = \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} + \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos(-\omega t) \\ \sin(-\omega t) \end{pmatrix}$$

Polarizzazione lineare come somma di due onde polarizzate circolarmente



$$\vec{E} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ 0 \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cos \omega t = \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} + \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos(-\omega t) \\ \sin(-\omega t) \end{pmatrix}$$

Sostanze otticamente attive

32

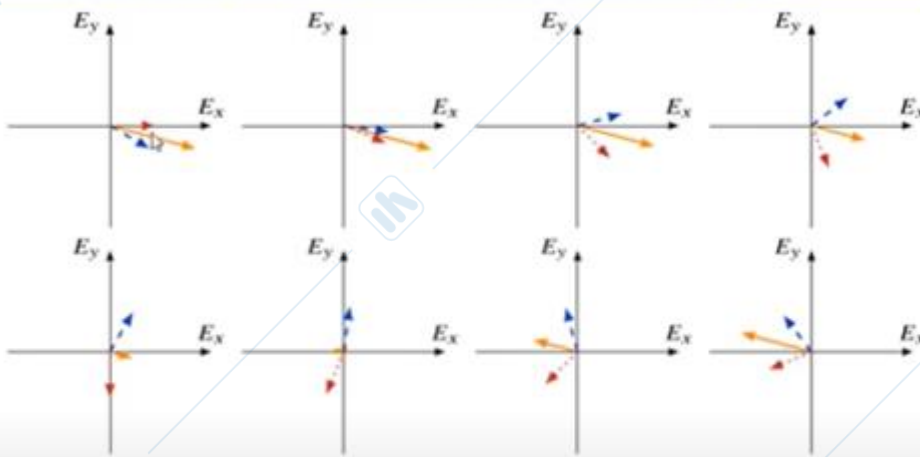


Le molecole chirali possono presentarsi in strutture speculari a parità di composizione chimica

- Sovente sono otticamente attive: la luce si propaga con velocità leggermente diversa a seconda se abbia polarizzazione destrorsa o sinistrorsa

Una differenza di velocità di propagazione introduce uno sfasamento tra le due componenti.

Introduzione di uno sfasamento su una delle due componenti



$$\vec{E} = \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \sin(\omega t + \phi) \end{pmatrix} + \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos(-\omega t) \\ \sin(-\omega t) \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \end{pmatrix} \cos\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

In figura $\phi = -30^\circ$. L'onda risultante è polarizzata linearmente con la direzione di polarizzazione ruotata di -15° e una fase di -15° .

Legge di Biot: potere rotatorio specifico

Dipende dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda a cui è stata fatta la misura

$$[\alpha]_d^T = \frac{\alpha}{l \cdot c}$$

Dove l'angolo di rotazione α del piano di polarizzazione è espresso in gradi, l è il cammino ottico in dm e c è la concentrazione in g/ml .

L'angolo di rotazione è quindi dato da:

$$\alpha = l \cdot c \cdot [\alpha]_d^T$$

Una sostanza capace di ruotare il piano di vibrazione della luce polarizzata:

- in senso orario guardando la sorgente (da sinistra a destra) è detta destrogira
- in senso antiorario guardando la sorgente (da destra a sinistra) è detta levogira.