



Sommario

Introduzione..... 2

Stati di polarizzazione..... 2

Birifrangenza e dicroismo 7

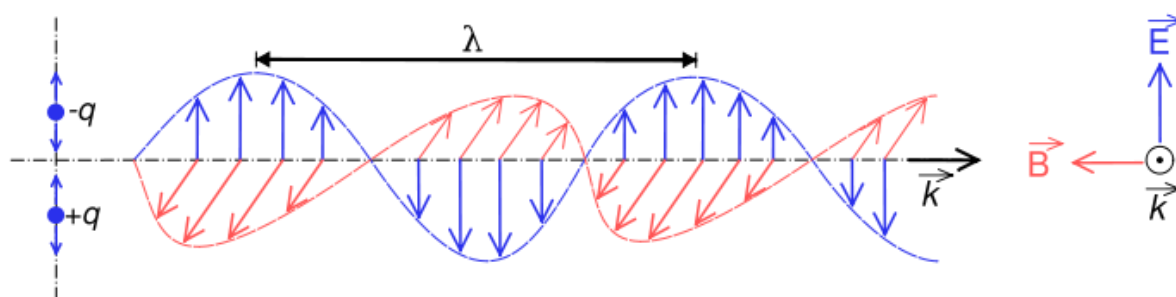
Polarizzazione per dicroismo e birifrangenza 14

Filtri polarizzatori in fotografia 18

Introduzione

L'interazione di una radiazione luminosa polarizzata con la materia, in particolare attraverso la riflessione, può determinare una variazione dello stato di polarizzazione della radiazione incidente. Dall'analisi dello stato di polarizzazione della luce riflessa è possibile risalire a proprietà della superficie riflettente (indice di rifrazione, spessore di strati sottili depositati, rugosità, ecc.).

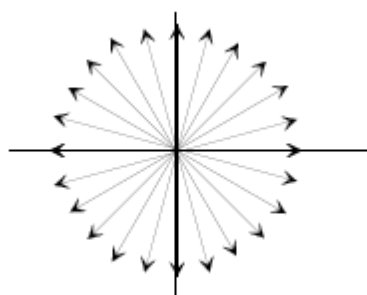
Si ha un'**onda elettromagnetica polarizzata** quando la vibrazione del vettore elettrico \vec{E} associato alla radiazione presenta qualche preferenza circa la direzione, sempre comunque in un piano ortogonale al vettore d'onda \vec{k} .



Stati di polarizzazione

Per descrivere lo stato di polarizzazione, si fa riferimento, per convenzione, al solo vettore elettrico \vec{E} .

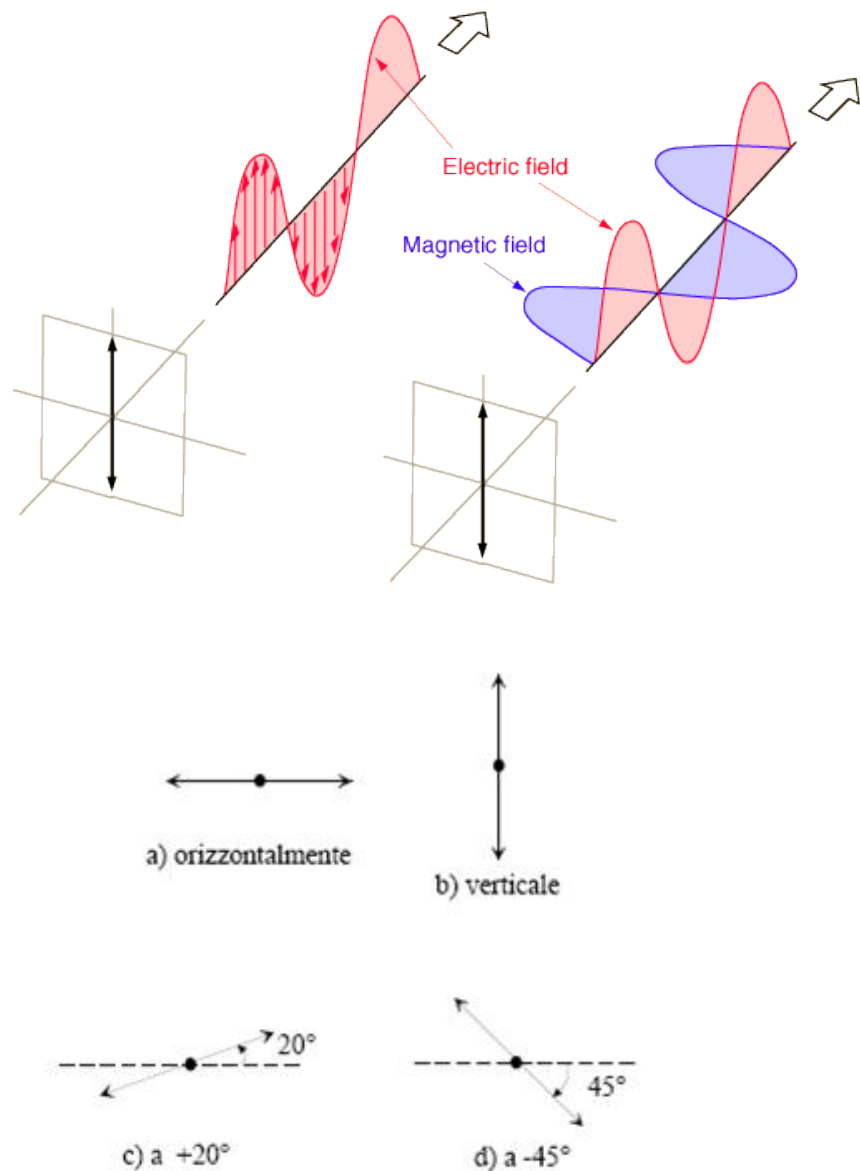
Nel caso di **luce non polarizzata**, l'estremo del vettore \vec{E} , in un dato punto, vibra nel tempo in tutte le direzioni mantenendosi perpendicolare alla direzione di propagazione e può essere rappresentato come in figura:



Gli stati di polarizzazione sono di tre tipi.

Polarizzazione lineare

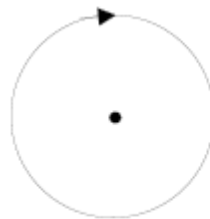
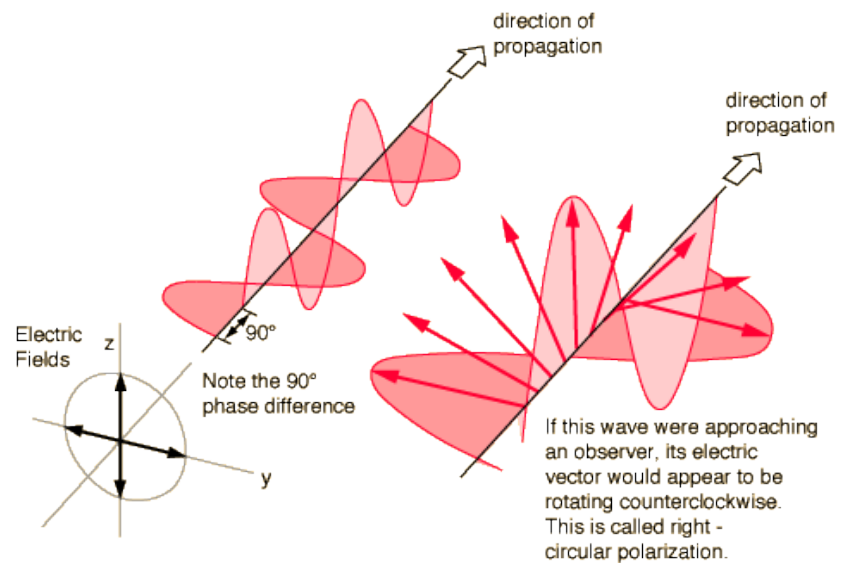
La direzione del vettore \vec{E} è costante nel tempo. L'estremo del vettore \vec{E} , in un dato punto, descrive nel tempo un segmento. Convenzionalmente, viene rappresentata con un segmento a doppia freccia.



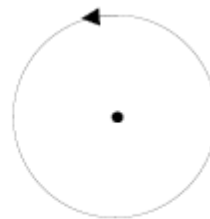
Polarizzazione circolare

L'estremo del vettore \vec{E} , in un dato punto, descrive nel tempo una circonferenza. Si distingue tra polarizzazione circolare destrorsa o sinistrorsa a seconda che l'estremo del vettore \vec{E} , visto da un

osservatore verso cui si propaga l'onda, descriva nel tempo una circonferenza in senso orario o antiorario).



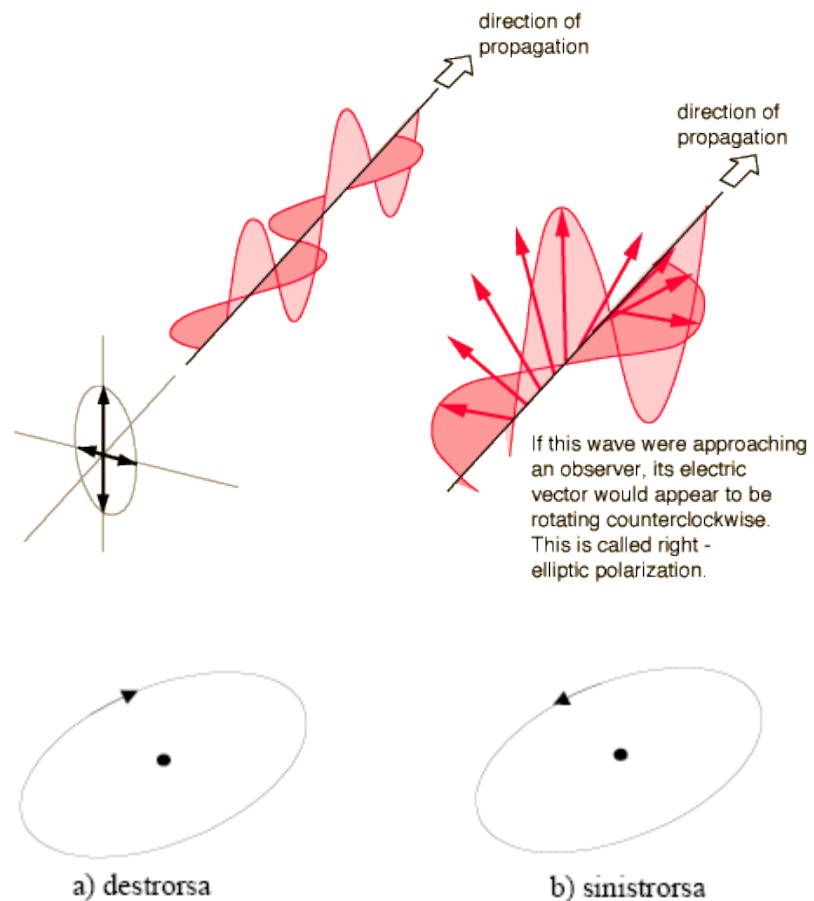
a) destrorsa



a) sinistrorsa

Polarizzazione ellittica

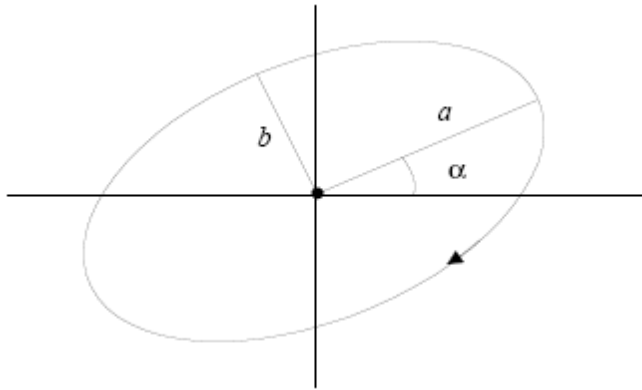
L'estremo del vettore \vec{E} , in un dato punto, descrive nel tempo un'ellisse; anche in questo caso si distingue tra polarizzazione ellittica destrorsa o sinistrorsa a seconda che l'estremo del vettore \vec{E} , visto da un osservatore verso cui si propaga l'onda, descriva nel tempo un'ellisse in senso orario o antiorario.



Il vettore \vec{E} , che rappresenta l'onda in un dato punto dello spazio, giace comunque in un piano ed è quindi scomponibile secondo due direzioni ortogonali tra loro ed alla direzione di propagazione.

Ne consegue che ***si può considerare un'onda elettromagnetica nello stato di polarizzazione ellittico come la sovrapposizione coerente, cioè con una relazione di fase fissa, di due onde della stessa frequenza, polarizzate linearmente secondo due direzioni tra loro ortogonali.***

Le caratteristiche dello stato di polarizzazione (eccentricità, direzione dell'asse principale, verso di percorrenza) dipendono dalle ampiezze delle due onde componenti e dalla loro relazione di fase, costante nel tempo.



Lo stato di polarizzazione ellittico è caratterizzato dai seguenti parametri:

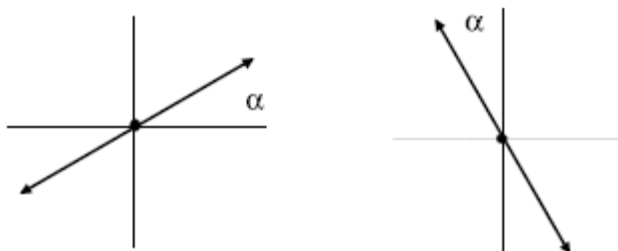
- **angolo α (azimut)**, delimitato dal semiasse maggiore e dall'asse x, con $-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$;
- **ellitticità**, rapporto b/a tra i due semiassi;
- **elicità**, verso di rotazione destrorso o sinistrorso dell'estremo del vettore \vec{E} .

Lo stato di polarizzazione lineare è un caso particolare corrispondente ad ellitticità 0. Lo stato di polarizzazione circolare è un caso particolare corrispondente ad ellitticità 1.

Si può osservare che:

- la polarizzazione lineare comprende un numero infinito di forme che differiscono per azimut;
- la polarizzazione circolare comprende due tipi di forme che differiscono per elicità;
- la polarizzazione ellittica comprende infinite forme che differiscono per azimut, ellitticità ed elicità.

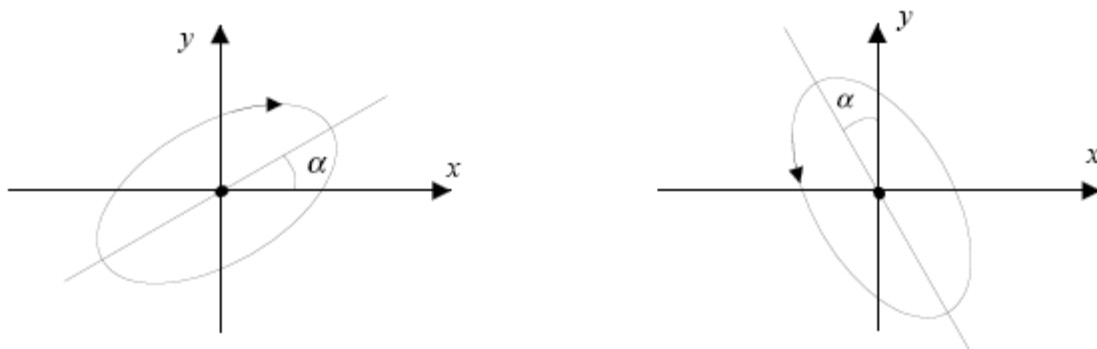
Due **stati di polarizzazione lineare** si dicono **ortogonali** se differiscono per azimut di 90° :



Due **stati di polarizzazione circolare** si dicono **ortogonali** se sono uno destrorso e l'altro sinistrorso:



Due **stati di polarizzazione ellittica** sono **ortogonali** se gli azimut dei semiassi maggiori differiscono di 90° ed hanno stessa ellitticità ma opposta elicità.



Un'onda non polarizzata si può ancora pensare come sovrapposizione di due onde polarizzate linearmente secondo direzioni tra loro ortogonale, ma con differenza di fase che varia a caso nel tempo. Si ha **sovrapposizione incoerente**.

Birifrangenza e dicroismo

Birifrangenza

In natura esistono materiali, definiti **materiali anisotropi**, che non hanno le stesse caratteristiche in tutte le direzioni. Ad esempio, il legno e la mica presentano un'evidente anisotropia meccanica.

Esiste anche un'**anisotropia ottica**, caratterizzata dal fatto che il mezzo reagisce in maniera differente in funzione della direzione e polarizzazione della luce incidente. In altri termini, l'**indice di rifrazione** del mezzo ottico

dipende dalla direzione del vettore elettrico, cosicché la velocità di propagazione dell'onda varierà in funzione della direzione di propagazione. Si può dimostrare che nei mezzi non isotropi è possibile fissare un sistema di riferimento cartesiano che individua tre direzioni particolari, chiamate **assi principali del cristallo**. In base alla teoria della propagazione di un'onda in un mezzo anisotropo, si può dimostrare che in questi cristalli, in corrispondenza di ogni direzione di propagazione \vec{k} , è possibile la propagazione di due onde piane monocromatiche caratterizzate da stati di polarizzazione tra loro ortogonali e diverse velocità di propagazione, che genera il fenomeno della birifrangenza. Per quanto riguarda le proprietà ottiche, i cristalli trasparenti possono essere suddivisi in tre gruppi:

Cristalli del sistema cubico

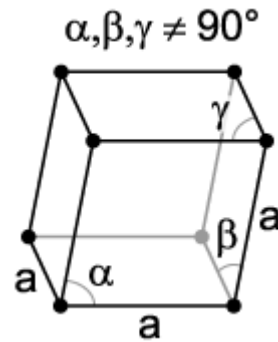
Sono **cristalli isotropi**.



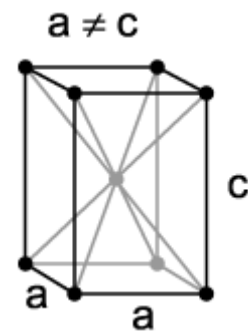
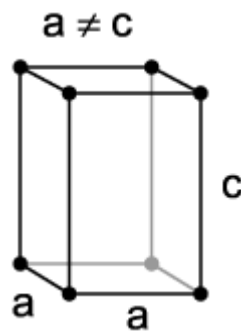
Cristalli dei sistemi trigonale, tetragonale ed esagonale

Sono cristalli caratterizzati da una direzione privilegiata attorno alla quale gli atomi si dispongono simmetricamente.

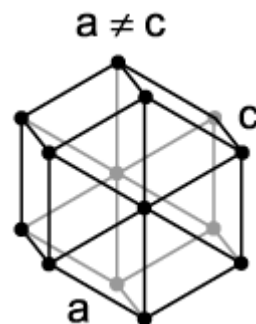
Sistema trigonale (romboedrico)



Sistema tetragonale



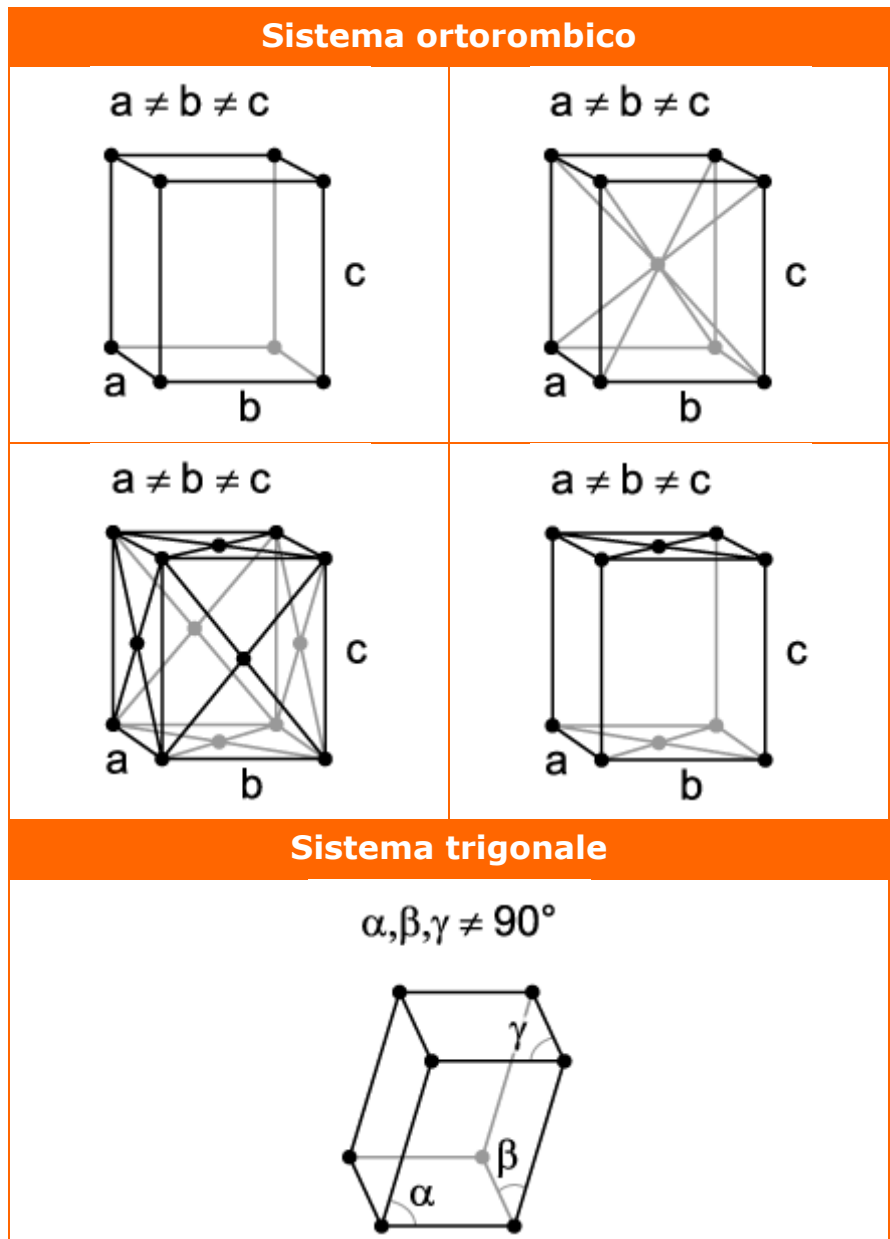
Sistema esagonale



Questa direzione individua l'**asse ottico** ed i cristalli sono noti come **cristalli uniassici**. La luce che si propaga nella direzione dell'asse ottico non subisce birifrangenza.

Cristalli dei sistemi ortorombico e triclino

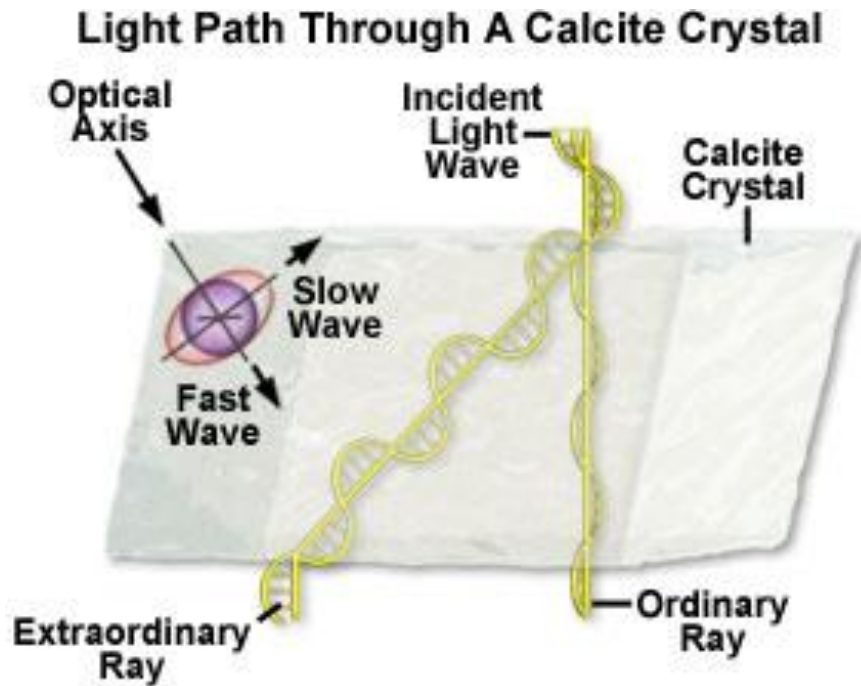
Sono cristalli caratterizzati da due assi ottici e una propagazione assai complessa, noti come **cristalli biassici**.



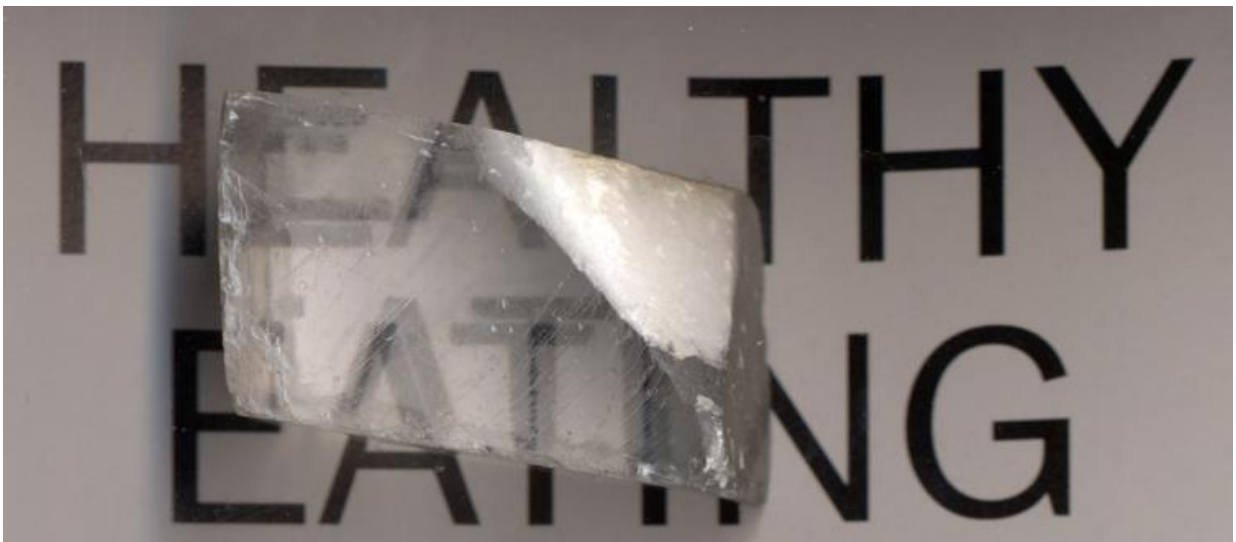
Il fenomeno della birifrangenza fu osservato per la prima volta in un cristallo di **calcite (CaCO_3)**.



I cristalli di calcite, opportunamente tagliati secondo piani cristallini particolari, possono dare origine a due raggi rifratti che si propagano in direzioni diverse. Ruotando il cristallo attorno alla direzione del fascio incidente, si osserva che uno dei due fasci resta stazionario, mentre l'altro ruota tracciando una circonferenza concentrica; il primo fascio viene detto **raggio ordinario**, mentre il secondo viene detto **raggio straordinario**.



Inoltre, mentre l'indice di rifrazione del raggio ordinario non dipende dalla direzione del raggio incidente, l'indice di rifrazione del raggio straordinario varia con la direzione del raggio incidente. I piani passanti per l'asse ottico e contenenti il vettore d'onda della luce incidente sono detti **piani principali**. Il raggio ordinario oscilla perpendicolare al piano principale e quindi alla direzione dell'asse ottico, mentre quello straordinario è polarizzato parallelamente ad una sezione del piano principale.



Dicroismo

Alcuni materiali anisotropi hanno la capacità di assorbire in maniera selettiva una delle due componenti ortogonali in cui è possibile scomporre il vettore elettrico associato all'onda e che presentano stati di polarizzazione lineare a loro volta ortogonali.

Una tipica sostanza dicroica è la **tormalina**, che assorbe fortemente la componente del campo elettrico della radiazione incidente che vibra in direzione perpendicolare all'asse ottico.

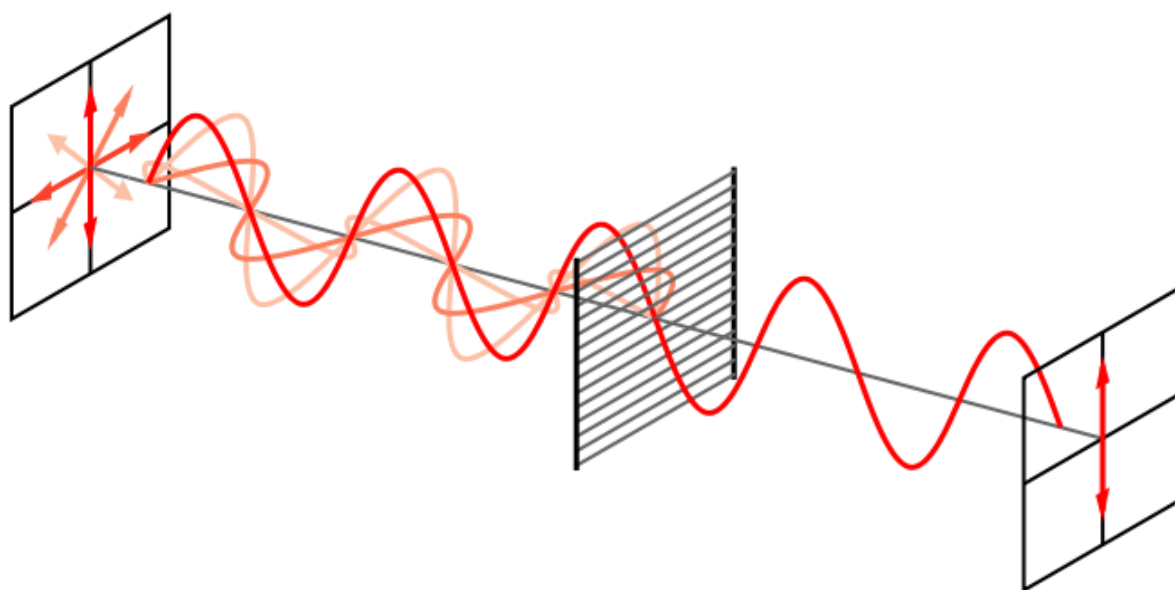


Una lamina di tormalina sufficientemente spessa trasmette quasi totalmente luce polarizzata linearmente nella direzione dell'asse ottico, che diventa l'**asse di trasmissione del polarizzatore**.

Generalmente, il dicroismo è un fenomeno che dipende fortemente dalla lunghezza d'onda della luce incidente. Ad esempio, il cristallo di tormalina ha anche lo svantaggio di assorbire parte della radiazione che vibra in direzione parallela all'asse ottico. Pertanto, quando è illuminato con luce naturale, appare verde se guardato in direzione perpendicolare all'asse ottico e quasi totalmente nero se guardato lungo l'asse ottico.

Polarizzazione per dicroismo e birifrangenza

È possibile ottenere luce polarizzata da una radiazione non polarizzata facendole attraversare mezzi otticamente anisotropi oppure dispositivi (generalmente prismi) opportunamente assemblati. Analogamente, è possibile modificare lo stato di polarizzazione di un'onda in uno stato di polarizzazione dello stesso tipo (ad esempio, lineare \rightarrow lineare) oppure da un tipo ad un altro (ad esempio, lineare \rightarrow ellittico o viceversa).

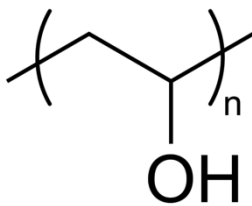


Lamina Polaroid

È il tipo di polarizzatore di uso più frequente (praticamente l'unico utilizzato nelle riprese fotografiche) ed è realizzata con un materiale otticamente anisotropo e dicroico.



Il supporto iniziale, il cui brevetto venne registrato nel 1929 e sviluppato successivamente nel 1932 da Edwin H. Land, consisteva in una serie di microscopici cristalli di solfato di iodochinina, o herapatite, immersi in un film polimerico trasparente di nitrocellulosa. Durante il processo di fabbricazione i cristalli aghiformi venivano allineati mediante applicazione di un campo magnetico. Tale foglio era dicroico, in quanto tendeva ad assorbire la luce polarizzata perpendicolarmente alla direzione dell'allineamento dei cristalli, lasciando passare la luce parallela ad essi. Questo materiale, conosciuto anche come **J-Sheet**, venne sostituito e migliorato dall'**H-Sheet**, messo a punto nel 1938. È un polimero di alcool polivinilico (PVA) impregnato di iodio:



Durante la lavorazione, le catene polimeriche vengono stirate per allinearle e fatte reagire con iodio. In questo modo, gli elettroni di conduzione dello iodio possono spostarsi lungo le catene come se queste fossero dei conduttori. La componente del campo elettrico della luce incidente parallela alla catena è responsabile del moto di questi elettroni e viene quindi assorbita, mentre quella perpendicolare passa attraverso il materiale. Un altro tipo di polarizzatore è il **K-sheet**, costituito da catene allineate di polivinilene, che ha il pregio di essere particolarmente resistente all'umidità ed al calore.

La luce emergente dalla lamina Polaroid risulta polarizzata linearmente in direzione perpendicolare alle catene di alcool polivinilico. Questa direzione, nel piano della lamina e perpendicolare alle catene, è detta **asse di trasmissione**.

I polarizzatori Polaroid vengono contraddistinti dalla sigla **NH X**, dove X rappresenta la percentuale di luce incidente non polarizzata che viene trasmessa. Il polarizzatore ideale, capace di lasciare passare completamente la componente del campo elettrico parallela all'asse di trasmissione e di assorbire completamente quella perpendicolare, avrebbe la sigla NH 50.

I polarizzatori più comuni sono del tipo NH 32, contraddistinti da una trasmissione K_a pari all'80% della componente del campo elettrico parallela all'asse di trasmissione. L'intensità luminosa trasmessa è il 32% di quella

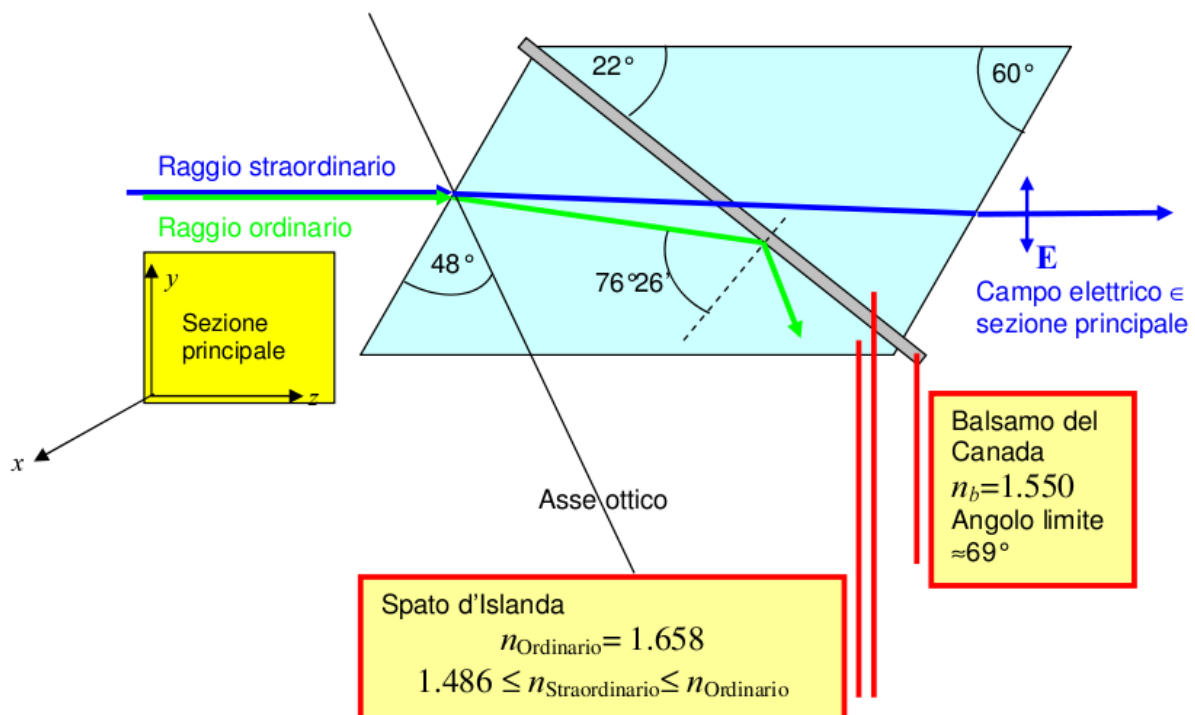
incidente, in quanto fino al 4% della luce incidente viene riflessa da ciascuna delle due facce della lamina. La luce trasmessa, polarizzata quasi completamente in direzione dell'asse ottico può raggiungere al massimo il 40% dell'intensità luce incidente non polarizzata.

I polarizzatori Polaroid sono ottimi su tutto lo spettro del visibile, anche se non hanno un assorbimento del 100% nella regione del blu.

Prisma di Nicol

Sfruttando il fenomeno della birifrangenza e soprattutto il fatto che i vettori elettrici del raggio ordinario e di quello straordinario vibrano in direzioni perpendicolari tra loro, è possibile ottenere un'onda polarizzata linearmente facendo in modo che uno dei fasci subisca una riflessione totale.

Il prisma di Nicol è stato il primo dispositivo utilizzato per ottenere luce polarizzata. È costituito da un rombo naturale di calcite tagliato in due parti secondo un piano diagonale ed incollato con **balsamo del Canada**, una sostanza isotropa che ha un indice di rifrazione $n = 1,55$ intermedio rispetto a quelli della calcite ($n_e = 1,486$ e $n_o = 1,658$).



A causa del fenomeno della birifrangenza, il raggio luminoso incidente non polarizzato viene diviso in un raggio ordinario, polarizzato in direzione ortogonale al piano principale (piano del foglio), ed in uno straordinario polarizzato parallelamente al piano principale. Mentre il raggio ordinario subisce all'interfaccia calcite-balsamo del Canada una riflessione totale,

quello straordinario viene trasmesso e la luce emergente risulta polarizzata linearmente (parallelamente al piano principale). La funzione della seconda metà del rombo è semplicemente quella di far sì che il raggio trasmesso risulti praticamente allineato al raggio incidente.

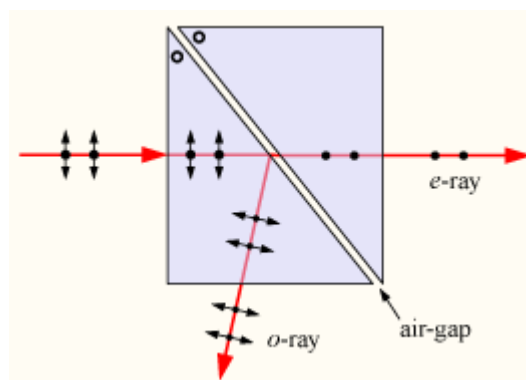
L'angolo di incidenza del raggio entrante non può superare i 29° . In caso contrario, possono verificarsi le seguenti eventualità:

- il raggio ordinario incide sull'interfaccia con un angolo inferiore all'angolo critico e non è più soggetto a riflessione totale ed il prisma trasmette luce in uno stato di polarizzazione ellittico che dipende dallo spessore di materiale attraversato;
- il raggio straordinario è soggetto a riflessione totale all'interfaccia ed il prisma non trasmette luce.

Prismi di Glan-Foucault e Glan-Thomson

Prisma di Glan-Foucault

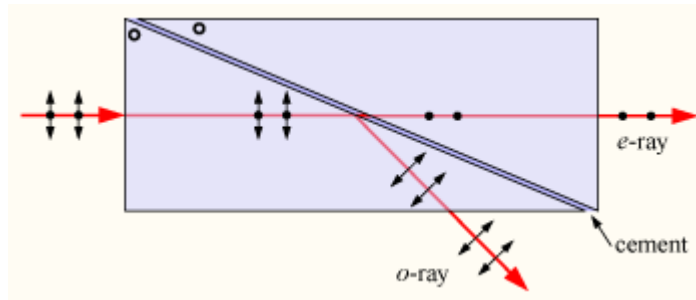
È la versione moderna del prisma di Nicol.
È costituito da due prismi retti di calcite separati da un sottile strato di aria e risulta trasparente in un ampio intervallo di lunghezze d'onda (da 230 nm nell'UV a 5000 nm nell'IR).



L'asse ottico è contenuto nel piano di ingresso del fascio incidente. La condizione di riflessione totale si ottiene con opportuna scelta dell'angolo di taglio.

Prisma di Glan-Thomson

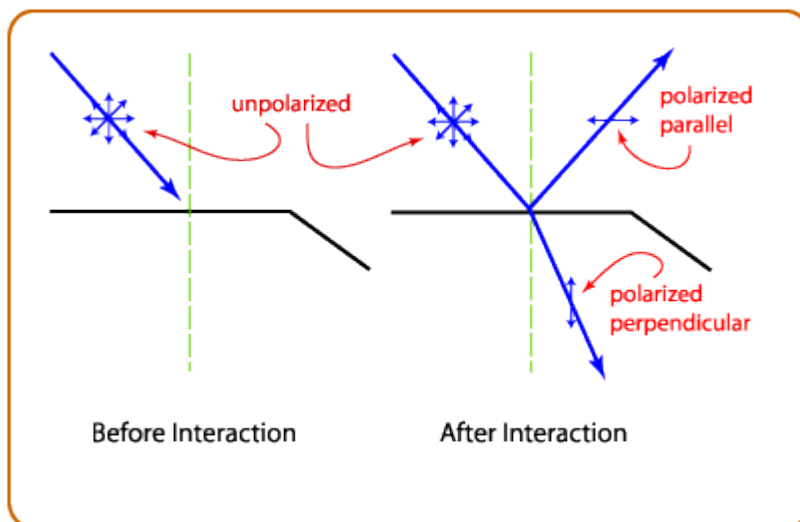
I due prismi di calcite vengono incollati con **glicerina** o altri **oli minerali** trasparenti all'UV.



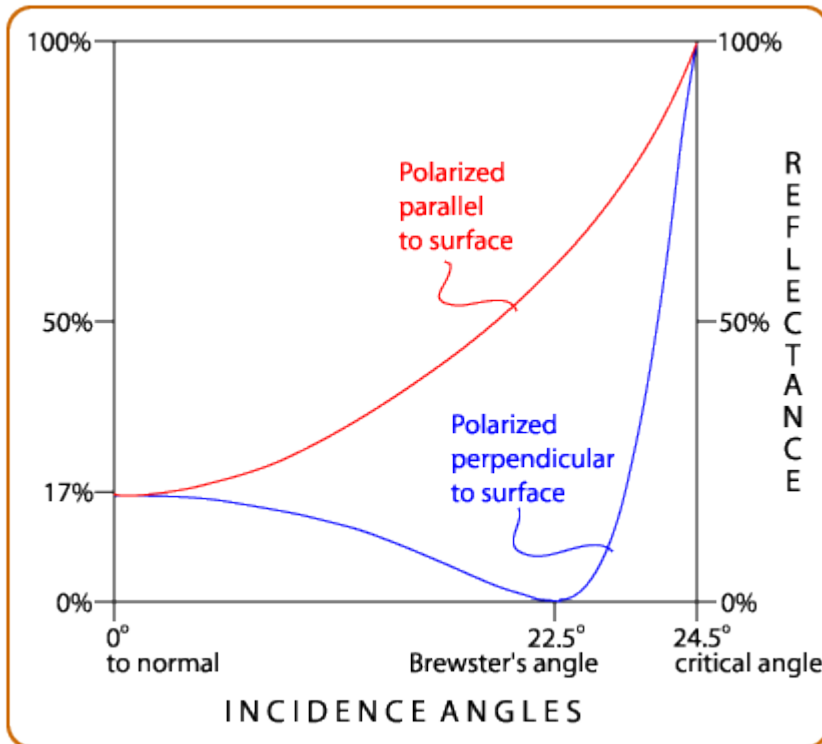
L'angolo di taglio può arrivare fino a 30°.

Filtri polarizzatori in fotografia

Quando un raggio luminoso non polarizzato, che si propaga in aria, incide su una superficie di separazione aria-vetro o aria-acqua, sarà soggetto non solo prevalentemente a rifrazione e secondariamente a riflessione, ma verrà anche polarizzato. Infatti, mentre la componente rifratta è polarizzata perpendicolarmente alla superficie, quella riflessa è polarizzata an parte parallelamente alla superficie.



All'interno del raggio riflesso, il rapporto tra frazione polarizzata parallelamente e frazione polarizzata perpendicolarmente alla superficie di separazione dipende dall'angolo di incidenza, come evidenziato nel grafico seguente.



Questa condizione di polarizzazione orizzontale della luce riflessa permette di eliminare o comunque ridurre i riflessi indesiderati sull'acqua o sul vetro (come nel caso delle vetrine) utilizzando un filtro polarizzatore orientato a 90° rispetto al piano di polarizzazione della luce riflessa.





Inoltre, il filtro polarizzatore consente di saturare il cielo, attenuando anche la foschia, senza alterare i colori.

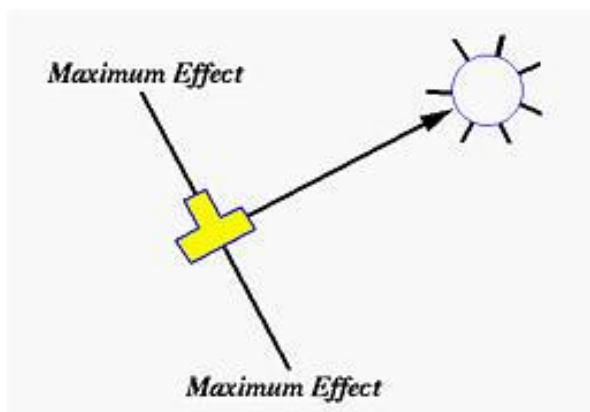


Without Polarizer



With Polarizer

Per spiegare questo effetto, occorre tenere conto che un raggio di luce non polarizzata, allorché colpisce una molecola d'aria o un'altra minuscola particella, viene diffuso e si polarizza in un piano perpendicolare alla direzione di originaria di propagazione. Se si usa un filtro polarizzatore per assorbire i raggi naturalmente polarizzati, il colore blu si scurisce notevolmente. Dal momento che la polarizzazione è più forte ad angolo retto rispetto alla direzione del raggio, l'effetto è maggiore perpendicolarmente alla direzione del sole, mentre è praticamente inesistente in direzione parallela.



Al tramonto, la luce del cielo allo zenit è fortemente polarizzata, come quella che si trova a nord ed a sud; mentre a mezzogiorno, la polarizzazione maggiore si trova vicino ad est e ad ovest. I massimi effetti di polarizzazione si verificano durante giornate molto limpide, in quanto il cielo velato produce effetti progressivamente inferiori, a causa dell'aumento della diffusione multipla e della conseguente depolarizzazione della luce. Utilizzando un obiettivo grandangolare per una ripresa panoramica, si nota che la saturazione del cielo diminuisce gradualmente in funzione dell'angolo di ripresa, quando questo diventa inferiore a 90° rispetto alla direzione del sole. Quindi, a seconda degli angoli relativi fra la direzione solare e l'asse dell'obiettivo, la saturazione del cielo può cambiare da una zona all'altra dell'immagine ripresa.

I filtri polarizzatori per fotografia sono di due tipi: polarizzatori lineari e polarizzatori circolari, analoghi nel funzionamento e negli effetti finali, ma con alcune differenze nella struttura interna. I polarizzatori lineari possono causare qualche problema se impiegati in combinazione con fotocamere che hanno le cellule dell'esposimetro e del sistema autofocus poste dietro specchi secondari o elementi parzialmente riflettenti. In queste situazioni, è necessario utilizzare i polarizzatori circolari.