

Appunti di Mineralogia Ottica

del corso tenuto dal Prof. Antonio Lo Giudice.



Autore: Cristiano Villari

La luce

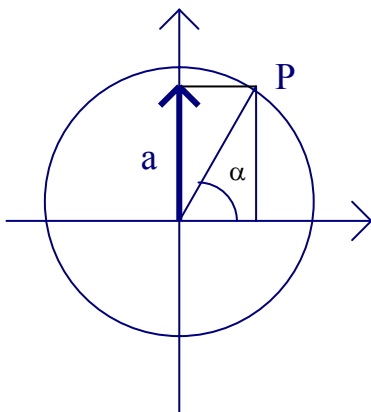
Ci occuperemo delle fenomenologie insorte quando le radiazioni ottiche colpiscono i cristalli dei minerali per definire questi ultimi. La luce è una forma di energia che si propaga in modo rettilineo, provocando la sensazione visiva quando colpisce lo occhio. Sulla luce vigono le ipotesi sulla sua duplice natura, corpuscolare ed ondulatoria. Certi fenomeni sono spiegati dall'una teoria, altri dall'altra. La teoria ondulatoria è sufficiente per spiegare il moto nello spazio e i fenomeni d'interazione tipo la diffrazione della luce. Nel caso della produzione di luce e dell'energia da essa trasportata, è necessario ricorrere alla teoria corpuscolare. Faremo riferimento per i nostri scopi alla teoria ondulatoria. Le radiazioni luminose sono dovute all'interazione di due campi, l'uno elettrico e l'altro magnetico, non statici ma variabili nel tempo. Il propagarsi di queste onde elettromagnetiche avviene in modo rettilineo, mentre l'assorbimento di energia avviene per quanti. Supposta la direzione della luce, esistono due vettori, l'uno ortogonale all'altro, del campo elettrico e del campo magnetico. Supponiamo che il piano di vibrazione del campo elettrico vari, o meglio ruoti intorno alla direzione di propagazione della luce al variare del tempo. In pratica preso un punto sul quale incide una sorgente di luce, possiamo trovare una serie infinita di vettori del campo elettrico e magnetico, purché ortogonali tra loro. Consideriamo il caso in cui i piani di vibrazione del campo elettrico e magnetico restino fissi e non varino nel tempo. In quest'ultimo caso parleremo di onda polarizzata. Nel caso in cui trattiamo onde stazionarie, l'equazione dell'onda è:

$$a = a_0 \sin \alpha \cdot t \quad \text{vedi la figura per la definizione dei termini}$$

ma se queste si muovono, sono soggette alle leggi del moto rettilineo uniforme:

$$v = s/t \quad \text{con } s \text{ indichiamo lo spazio percorso nel tempo } t.$$

La combinazione di queste due equazioni dà il moto ondulatorio. Osserviamo un moto armonico stazionario.



Supponiamo che un punto P avente un'ampiezza iniziale a_0 si muova di moto circolare uniforme lungo la circonferenza. La sua proiezione sull'asse delle ordinate si muoverà di un moto uniformemente accelerato. Al variare dell'angolo α percorso dal punto, varierà anche la sua ampiezza (a) che, ovviamente, oscillerà tra valori negativi e positivi (com'è espresso dalla funzione seno nell'equazione).

Se osserviamo invece un'onda stazionaria al variare dell'angolo percorso, otteniamo diversi vettori, la cui composizione ci dà un'onda dall'andamento sinusoidale. Possiamo definire il periodo T nel quale tempo viene fatto un giro o svolto un ciclo di moto armonico, cioè il tempo per fare un'oscillazione. La frequenza (ν) il numero dei cicli compiuti dal punto descrivente l'oscillazione in un secondo. Per esempio 100 hertz significa che sono stati compiuti 100 giri in un secondo. Tra frequenza e periodo vi è un rapporto di reciprocità ($T = 1/\nu$). Ogni radiazione luminosa è legata alla sua frequenza che non cambia mai. Alla frequenza è legata l'energia trasportata dall'onda; se questa non cambia mai, come accade quando non vi è alcuna interazione tipo fenomeni di assorbimento, la frequenza sarà funzione caratteristica dell'onda. Consideriamo l'equazione del moto uniforme vista precedentemente e soffermiamoci su v . La velocità di propagazione è funzione del mezzo di propagazione attraverso il quale l'onda si propaga. Maggiore è la densità ottica, maggiore è il rallentamento che subisce l'onda. Tutte le onde nel vuoto (che ha densità ottica nulla) hanno velocità uguale a $c = 300.000 \text{ km/s}$. Supponiamo di avere un'onda con ampiezza di oscillazione nulla. Essa percorrerà un giro in un tempo che è il periodo T . Sapendo che:

$s = vt$ per quanto detto prima potrò scrivere questa equazione come:

$\lambda = cT$ dove λ rappresenta lo spazio s chiamato lunghezza d'onda percorso in T

poiché $T = 1/\nu$ possiamo scrivere $c = \lambda\nu$ dove per ν intendo la frequenza.

Poiché la frequenza ν di un'onda non cambia mai, ci riferiamo alla lunghezza d'onda per descrivere l'onda. La lunghezza d'onda tuttavia cambia da un mezzo di propagazione ad un altro per una qualsiasi radiazione. Ci riferiamo a radiazioni aventi determinate lunghezze d'onde solo nel vuoto. L'energia di una radiazione è legata alla sua frequenza, la cui legge è espressa dalla formula:

$$E = h\nu$$

Maggiore è la frequenza, maggiore è l'energia trasportata. L'intensità di una radiazione è legata al numero di quanti che si propagano in un certa direzione nell'unità di tempo.

Le radiazioni luminose rappresentano quella parte dello spettro elettromagnetico le cui lunghezze d'onda nel vuoto sono comprese tra 480 e 630 nm e sono visibili all'occhio umano. Ad ogni frequenza viene attribuito un colore. Gli estremi di questa gamma di colori sono il rosso e il violetto. Chiameremo radiazioni monocromatiche quelle associate ad una sola lunghezza d'onda, una sola frequenza, un solo colore. Chiameremo policromatiche quelle onde associate a più lunghezze d'onda, più frequenze e quindi più colori.

Leggi dell'ottica

Vediamo cosa accade quando un'onda si propaga in un mezzo materiale. Avendo questi una densità ottica variabile, la velocità di propagazione dell'onda è variabile, Al di là dell'assorbimento subito dalla radiazione nel mezzo, quest'ultima continuerà nel suo moto rettilineo uniforme. Variazioni di direzione si possono avere solo nelle discontinuità ottiche, ovvero nelle superfici di separazione tra due mezzi. Vediamo un esempio. Se ho due mezzi separati da una discontinuità ottica, sarà variato il moto dell'onda non più uniforme. Assisteremo a due fenomeni coesistenti. Una parte della radiazione sarà riflessa, un'altra sarà rifratta continuando il suo cammino. Se immaginiamo l'onda come un treno di fotoni, parte di questi ritorna nel mezzo di origine, parte viaggia nel secondo mezzo secondo una direzione diversa dalla precedente. Poiché l'energia deve conservarsi:

$I_0 = I_1 + I_2$ dove I_0 è la radiazione incidente, I_1 quella riflessa, I_2 quella rifratta.

Se $I_1 = 0$, la superficie di discontinuità è trasparente ed ho il fenomeno della rifrazione

Se $I_2 = 0$, la superficie di discontinuità è riflettente ed ho il fenomeno della riflessione.

La legge che regola la riflessione è la **1° legge di Cartesio**:

I raggi d'incidenza e di riflessione e la normale alla superficie sono complanari.

2° legge di Cartesio:

L'angolo d'incidenza è uguale a quello della riflessione.

Nel caso della rifrazione, rimanendo valida la 2° legge, avremo la **3° legge di Cartesio**

Il rapporto tra il seno dell'angolo d'incidenza e quello di rifrazione è costante.

Questo rapporto è uguale al rapporto tra le velocità delle onde nei due mezzi di propagazione e viene indicato come **indice di rifrazione (n)**.

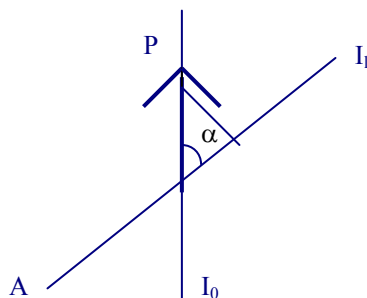
Se la velocità del primo mezzo è maggiore del secondo, il raggio rifratto si avvicina alla normale del piano d'incidenza. Se la velocità del primo mezzo è minore del secondo, il raggio rifratto si allontana dalla normale del piano. Se però nell'ultimo caso per un dato angolo d'incidenza (detto angolo limite) l'angolo di rifrazione è 90° , il raggio rifratto sarà parallelo alla superficie secondo un fenomeno detto di **riflessione totale**. Pertanto per angoli d'incidenza minori dell'angolo limite avrò la rifrazione. Per valori d'incidenza maggiori dell'angolo limite avrò la riflessione. Gli indici di rifrazioni sono tanti quante sono le lunghezze d'onda della radiazione. Questa proprietà si chiama **dispersione dell'angolo di rifrazione**.

Polarizzatori

Vogliamo distinguere la luce polarizzata da quella non. L'occhio umano non è in grado di operare questa distinzione. Vi sono sostanze naturali o artificiali capaci di polarizzare la luce. Se vengono attraversate da onde normali, questa sostanza le polarizza, ovvero l'onda vibrerà su un solo piano. Questi strumenti ottici prendono il nome di **polaroid**. Le freccette sono i piani di vibrazione della luce prima e dopo.



Le onde polarizzate sono meno nocive per la salute. Se metto un altro polarizzatore, visivamente non mi accorgo di niente, tuttavia ruotando l'asse del secondo polarizzatore posso variare l'intensità fino ad annullarla. L'intensità iniziale dipende dal piano di vibrazione che il primo polarizzatore dà alla luce. Nell'angolo di 360° si alternano 2 massimi e 2 minimi separati da 90° . Sviluppiamo il disegno su un piano perpendicolare ai raggi col verso uscente dal foglio.



P rappresenta il piano di vibrazione del primo polarizzatore

A rappresenta il piano di vibrazione del secondo polarizzatore

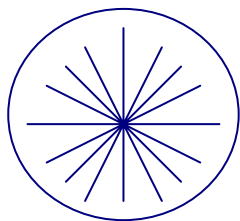
α rappresenta l'angolo tra di essi

Poiché l'intensità è $I = k \cdot a^2$ con a = ampiezza dell'onda.

I può essere rappresentato dal vettore evidenziato in figura avente come modulo la quantità a e come direzione quella del piano su cui vibra. L'intensità è proporzionale al quadrato dell'ampiezza. Il vettore dopo incontra un secondo polaroid ed esiste un angolo α tra i piani di vibrazione dei due polarizzatori. Durante questo passaggio si ha un assorbimento d'intensità tanto più grande quanto è l'angolo tra i due piani di vibrazione. Se facciamo la proiezione di P su A possiamo scrivere che.

$$I_1 = I_0 \cos^2 \alpha \quad \text{minimo per } \cos = 0 \text{ e massimo per } \cos = 1$$

Come mai allora la luce non polarizzata non subisce quest'effetto di attenuazione d'intensità. Facciamo esempio di luce normale tramite un disegno.

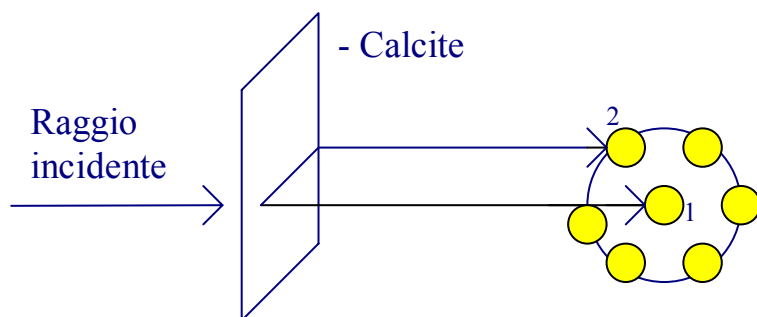


Il punto mi rappresenta il punto d'incidenza della luce uscente dal foglio, mentre il cerchio mi rappresenta tutti i possibili piani di propagazione rappresentati dalle linee.

Se impongo con un polaroid un piano di vibrazione P fisso qualsiasi, il vettore parallelo a questi passerà completamente, per gli altri passeranno solo le componenti. Quindi in ogni caso, causa la simmetria di ordine infinito della circonferenza, per quanto vari il piano di vibrazione, passerà sempre luce e sarà sempre la stessa come intensità. I minerali sono sostanze taluni capaci di polarizzare la luce. I minerali isotropi rispetto al cammino ottico sono quelli della scala monometrica. I minerali anisotropi sono quelli della scala dimetrica e trimetrica.

Gruppo Dimetrico

Immaginiamo d'interporre dopo un polarizzatore un mezzo anisotropo (un cristallo tipo la calcite) e verifichiamo cosa accade. Se metto dopo il cristallo uno schermo nero vedrò due punti luminosi invece che uno solo.



I due vettori rappresentano le due onde rifratte. Per il momento lasciamo stare gli altri punti luminosi.

Evidentemente dentro la calcite è partita un'altra onda, quindi la calcite è un minerale anisotropo. Consideriamo la prima onda rifratta, evidentemente il piano lungo il quale si propaga resta fisso poiché tale rimane il punto luminoso (1) ruotando il polarizzatore. Se considero invece il secondo raggio rifratto, variando il piano di vibrazione, varia la posizione del punto luminoso e quindi i piani su cui giace. Il punto si disporrà sui punti di un'ipotetica circonferenza man mano che ruoto. Evidentemente i due raggi rifratti non sono complanari a dispetto della prima legge di Cartesio. Consideriamo adesso la terza legge di Cartesio. Essa dice che:

$\sin i / \sin r = v_1 / v_2 = n$ evidentemente n non è costante all'interno della calcite.

In definitiva la prima onda ha un comportamento normale che si accosta con le leggi dell'ottica e pertanto la chiameremo **raggio ordinario**. La seconda onda rifratta ha un comportamento straordinario dalle leggi dell'ottica e la chiameremo **raggio straordinario**. Tutti i minerali della scala dimetrica presentano questo fenomeno che è chiamato **birifrangenza**. Mi chiedo se le due onde sono polarizzate. Faccio attraversare le due onde attraverso un polarizzatore e verifico se rispettano la legge sull'intensità precedentemente detta. Osservo che quando uno dei due raggi raggiunge il massimo d'intensità, l'altro arriva al minimo. Evidentemente i due piani di vibrazione delle due onde sono diversi e perpendicolari tra loro. Difatti se ruoto di 90° l'uno raggiunge il massimo, l'altro scompare. Quindi questi minerali sono dei polaroid particolari che assegnano determinati piani di vibrazione alla luce ortogonali tra loro. La doppia rifrazione e la contemporanea polarizzazione prende il nome di **birifrazione**. Essa è comune a tutti i minerali del gruppo dimetrico. Mi chiedo se il fenomeno della birifrazione accade in un minerale dimetrico per qualsiasi direzione di propagazione dell'onda incidente. Questo fenomeno avviene sempre tranne che per una sola direzione parallela all'asse cristallografico del minerale. Lungo questa direzione esso si comporterà come un mezzo isotropo, per cui non si avrà birifrazione. Quest'unica direzione è quella per cui avviene la rifrazione normale e pertanto viene definita **asse ottico** del cristallo. Per questo motivo i minerali del gruppo dimetrico vengono definiti minerali birifrangenti uniassici in quanto dotati di un solo asse ottico. La velocità di propagazione dell'onda ordinaria, se costante, la chiamo v_0 . Se v_0 è costante lo sarà anche:

$c/v_0 = W$ con il quale indichiamo l'**indice di rifrazione dell'onda ordinaria**.

Per l'onda straordinaria avrò un v_1 variabile in funzione della direzione di propagazione. Quindi sarà variabile il rapporto:

$c/v_1 = E$ con il quale indichiamo l'**indice di rifrazione dell'onda straordinaria**

in funzione della direzione di propagazione dell'onda incidente. In pratica W sarà sempre lo stesso mentre E varierà al variare della direzione d'incidenza. I minerali anisotropi continui sono tali, perché i valori di discontinuità che trovo variano con continuità ovvero nel complesso il cristallo ha infiniti indici di rifrazione dove W ed E sono gli estremi. Indicherò con E^1 tutti quelli dentro quest'intervallo.

$E^1 - W$ = differenza di cammino ottico tra l'onda straordinaria e quella ordinaria.

Questo numero si definisce **birifrangenza** e misura quantitativamente la consistenza del fenomeno. Per direzioni di propagazioni diverse si presenteranno valori di birifrangenza diversi in termini d'intensità, seppure il fenomeno sarà il medesimo. Questo tipo di cristallo del gruppo dimetrico sono uniassici e si differenziano da quelli del gruppo monometrico che hanno infiniti assi ottici.

Gruppo Trimetrico

Se immaginiamo di ripetere lo stesso esperimento di prima, considerando stavolta un minerale trimetrico, il risultato che si otterrebbe sarebbe il medesimo. Se vado ad inserire un polaroid arrivo alle stesse conclusioni. Tuttavia noto che variando il piano di vibrazione del polarizzatore, entrambi i buchi luminosi ruotano attorno ad un punto d'equilibrio (mentre prima ne ruotava solo uno). Quindi in un minerale trimetrico le regole di Cartesio non sono rispettate da entrambe le onde e pertanto vengono definite straordinarie. Per entrambe le onde la velocità di propagazione è funzione della direzione di propagazione. Quindi avrò due velocità v_1 e v_2 e due indici di rifrazione che chiamo rispettivamente α e γ . Poiché le proprietà ottiche sono proprietà vettoriali a variazione continua, le coppie α^1 e γ^1 , al variare della direzione di propagazione, dovranno variare con continuità all'interno di un intervallo di variazione i cui estremi saranno α e γ entro cui si collocheranno tutti gli altri indici. L'uno sarà l'indice di rifrazione più piccolo, l'altro sarà l'indice di rifrazione più grande del cristallo trimetrico. Ogni minerale ha un suo specifico intervallo. Per convenzione diciamo che α è il più piccolo e γ il più grande. Nel gruppo dimetrico le due onde avevano l'una carattere ordinario, l'altra carattere straordinario. Quindi l'indice di rifrazione dell'onda ordinaria poteva essere ora più grande ora più piccolo di quello dell'onda straordinaria. Per questo nel gruppo dimetrico non abbiamo usato questa convenzione. Ci chiediamo nei minerali trimetrici la birifrangenza avviene sempre. In realtà vi sono due direzioni di propagazione per le quali si realizza la monorifrangenza e pertanto il cristallo si comporta come un corpo isotropo. Quindi il cristallo trimetrico ha due assi ottici e quindi due direzioni diverse non parallele. Pertanto i cristalli del gruppo trimetrico li posso chiamare **biassici, birifrangenti**. Poiché le direzioni di propagazione s'incontrano, formano angoli a due a due uguali e adiacenti (per cui la somma è 180°). Questi angoli vengono chiamati **angoli degli assi ottici** e li indichiamo con **2V**. Se la luce si propaga parallelamente ad uno degli assi ottici, il comportamento del cristallo sarà monorifrangente. Pertanto avremo un indice di rifrazione caratteristico della direzione di propagazione monorifrangente che chiameremo β . Questo indice deve stare all'interno dell'intervallo (α, γ) per ovvi motivi. Se per assurdo β coincidesse per esempio con α , avremmo un comportamento ordinario all'estremo inferiore e straordinario in quello superiore. Quindi $\beta = \alpha$ sarebbe uguale a W che è l'indice caratteristico di un minerale dimetrico. Tutto ciò è assurdo perché stiamo considerando un minerale del gruppo trimetrico. Il cristallo nella sua globalità ha quindi infiniti indici di rifrazione al variare della direzione di propagazione. I valori α , β e γ sono gli indici di rifrazione principali ma non gli unici, come del resto non lo sono E e W per un cristallo dimetrico.

Indicatrice ottica

Le proprietà ottiche vengono rappresentate tramite vettori, che in dipendenza di una direzione di propagazione, rappresentano tutte le possibili altre direzioni di propagazioni. Queste rappresentazioni vettoriali assumono diversi nomi a secondo della proprietà ottica che stiamo considerando. Chiameremo **indicatrice ottica** la superficie vettoriale degli indici di rifrazione. L'indicatrice ottica non è un qualcosa che esiste dentro il cristallo, è solo una rappresentazione de proprietà fisiche del cristallo. Curiamo il comportamento ottico del cristallo, curando alcune proprietà. L'indice di rifrazione è solamente uno scalare ma può essere rappresentato tramite vettori. Se considero per un cristallo una qualsiasi direzione di propagazione, avrò sempre due onde che si muovono all'interno del cristallo. Chiamo n_1 e n_2 i rispettivi indici di rifrazione, generici e diversi tra loro. Le due onde rifratte avranno certi piani di propagazione ortogonali tra loro. Considero due vettori aventi moduli n_1 e n_2 e direzione ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda incidente. Quindi ad ogni direzione di propagazione posso accoppiare due indici di rifrazione. Se adesso considero il cristallo e lo investo con tutte le direzioni possibili di radiazioni, avrò infinite coppie di vettori di indici di rifrazione. Voglio individuare l'origine di tutti questi possibili vettori, così facendo ottengo una superficie vettoriale ovvero l'indicatrice ottica da cui partono tutti i vettori. I vettori suddetti devono essere proporzionali agli indici di rifrazione e avere direzione ortogonale ai piani di vibrazione. Questa superficie non può essere un poliedro che rappresenta una superficie di raccolta di vettori con variazione discontinua. Quindi deve essere un oggetto tridimensionale senza spigoli, facce e vertici. Gli unici che soddisfano queste tre esigenze sono: la sfera, l'ellissoide di rotazione e l'ellissoide a tre assi. Un minerale birifrangente dimetrico o trimetrico non può avere una sfera come indicatrice ottica, in quanto questa ha raggi e quindi vettori aventi tutti lo stesso modulo. Pertanto la sfera è l'indicatrice ottica dei minerali monometrici isotropi. In realtà ad un minerale dimetrico competerà una un ellissoide di rotazione, mentre ad un minerale trimetrico competerà un ellissoide a tre assi. L'ellissoide di rotazione è un solido che si ottiene ruotando un ellisse intorno ad uno dei suoi assi (o quello minore o quello maggiore). In pratica avremo tante sezioni circolari, infinite ed ortogonali all'asse di rotazione. Tutte le sezioni che passano per l'asse di rotazione non sono eguali tra di loro. Dei tre semiassi dell'ellissoide, due sono eguali, l'altro è diverso. Nell'ellissoide a tre assi, i tre semiassi o vettori sono tutti diversi e ortogonali tra loro. Quindi gli ellissi passanti per i semiassi non sono cerchi come nel caso dell'ellissoide di rotazione. Esistono però due sezioni circolari passanti per il centro dell'ellissoide di rotazione aventi il raggio uguale ad uno dei semiassi. Le due sezioni circolari sono uniche e non parallele. Nell'ellissoide di rotazione ho un asse di rotazione di ordine infinito, ho un centro di simmetria ed infiniti piani di simmetria. Verifichiamo che i caratteri geometrici dell'ellissoide di rotazione verificano le proprietà del gruppo dimetrico. Sappiamo che in minerale dimetrico subisce il fenomeno della birifrangenza. Una generica direzione di propagazione deve avere

una corrispondente superficie ottica. Quindi dico che le generiche direzioni di propagazione colpiranno un punto, che è il centro del cristallo e corrisponde al centro dell'indicatrice ottica. Data un'onda di propagazione si formeranno due onde polarizzate. I vettori indici di rifrazione sono in piani ortogonali alla direzione di propagazione. Essendo una superficie ellittica, avrà due semiassi ortogonali tra loro. Questi ultimi rappresentano i moduli dei due vettori. Si può vedere che essi varieranno tra gli estremi dei semiassi dell'ellissoide al variare della direzione di propagazione. Ho dimostrato che l'indicatrice ottica di un minerale dimetrico, o meglio ancora le sue proprietà, sono rappresentate da un ellissoide di rotazione. Tutte le sezioni dell'ellissoide di rotazione tranne quella orizzontale sono ellittiche. Quindi se prendo una direzione perpendicolare alla sezione circolare, questa sarà l'asse ottica che coincide con l'asse cristallografico delle z. Pertanto dato un cristallo, riferendoci a E e W, considero gli indici di rifrazione di una qualsivoglia direzione di propagazione. W poiché è costante, è associato al raggio della sezione circolare, mentre E varia al variare della direzione di propagazione ed è rappresentato dal raggio della superficie ellittica. Distinguiamo due casi:

$E - W > 0$ i cristalli si diranno **otticamente positivi**

$E - W < 0$ i cristalli si diranno **otticamente negativi**

Voglio dimostrare adesso che l'ellissoide a tre assi rappresenta le proprietà ottiche dei minerali del gruppo trimetrico. Anche in questo caso data una generica direzione di propagazione, i due vettori di indice di rifrazione delle onde polarizzate giacciono in piani ortogonali tra loro. In questo ellissoide ho tre assi di ordine 2 e tre piani di simmetria. Tutte le ellissi passanti per il centro dell'ellissoide sono ellittiche. Quindi poiché l'ellissi ha due semiassi, questi ultimi mi rappresentano i moduli dei vettori di indice di rifrazione che abbiamo chiamato a e c; nessuno dei due è costante. Le misure dei due vettori variano continuamente, mentre prima uno restava costante. Difatti le onde polarizzate dei cristalli trimetrici hanno entrambe carattere straordinario. Se prendiamo l'intervallo (α, γ) sappiamo che α è il più piccolo e γ il più grande. Questo intervallo varierà tra il semiasse più piccolo (α) e quello più grande (γ). So però che per due particolari direzioni di propagazione ho la monorifrazione. Difatti l'ellissoide ha due ellissi che non sono altro che sezioni circolari. Quindi le due direzioni ortogonali a queste sezioni rappresentano i due assi ottici. Il raggio di questa sezione circolare mi darà l'indice di monorifrazione dell'onda ordinaria (β). Sappiamo che i cristalli del gruppo trimetrico hanno i tre assi cristallografici non equivalenti tra di loro; mi accorgo che posso riferire questa simmetria a quella dell'ellissoide di rotazione. In pratica voglio vedere se esiste una corrispondenza tra gli assi cristallografici del cristallo e i suoi assi ottici.

Nel **sistema rombico** i tre assi sono mutuamente ortogonali ma non equivalenti tra loro. I tre assi morfologici coincidono con i tre assi dell'indicatrice ottica ma non nel

senso che necessariamente $x = \alpha$, $y = \beta$, $z = \gamma$. Essi sono semplicemente equiversi e si possono intercambiare tra di loro realizzando tutte le possibili combinazioni.

Nel **sistema monoclinico** solo l'asse y forma angoli retti con entrambi gli altri due assi. Quindi x e z non possono corrispondere con α e γ perché non sono ortogonali tra di loro come invece avviene per α e γ nell'ellissoide a tre assi. Posso però identificare il piano dove giacciono x e z che chiamo 010. Quindi solo l'asse y può corrispondere uno dei tre assi ottici. Solitamente y corrisponde a β .

Nel **sistema triclinico** non ho alcuna coincidenza tra gli assi ottici e quelli cristallografici. I cristalli del sistema triclinico sono caratterizzati dal più basso grado di simmetria. Non esistono vincoli con gli assi dell'indicatrice ottica poiché essi hanno in comune solo il centro con quest'ultima.

Il microscopio ottico

Il microscopio da mineralogia è costituito da uno stativo nel quale trovano alloggiamento diverse parti:

- 1) un impianto d'illuminazione
- 2) lenti oculari ed obbiettivi
- 3) un porta oggetti
- 4) due polaroid
- 5) un compensatore

La luce che useremo avrà una sorgente che sarà di posizione opposta a quella dell'osservatore. Noi osserviamo in **trasmissione** ovvero la luce entra da una parte ed esce dall'altra. Le radiazioni ottiche, dapprima parallele tra di loro, passano attraverso una lente convergente e convergono in un punto, permettendoci di fare osservazioni in luce **ortoscopica**. Il crocefilo nell'oculare consente d'individuare i piani di vibrazione dei due polarizzatori. Se utilizziamo solo il primo polaroid, non inserendo il secondo, si dice che facciamo un'osservazione ad un nicol. Se utilizziamo entrambi i polaroid, si che facciamo un'osservazione a nicols incrociati. Dov'è alloggiato il secondo polaroid vi è un altro sistema a slitte (compensatore) dove in uno dei due buchi vi è un minerale chiamato lamina compensatrice. Inoltre più sotto vi è la lente di **Bertalnd-Amici** anch'essa inseribile e disinseribile sul cammino ottico dei raggi luminosi. Questa è una lente defocalizzante che consente al sistema di uscire dalla propria focalizzazione. In pratica viene messo a fuoco una posizione più alta dell'oggetto di osservazione. Ricordiamo che l'ingrandimento totale del microscopio è uguale al prodotto dell'ingrandimento dell'oculare più il prodotto dello ingrandimento dell'obbiettivo. Soffermiamoci ora sulle osservazioni col microscopio.

Osservazioni a luce parallela ad un nicol

Useremo questa osservazione per vedere i minerali più grossi. Osserveremo:

abito, misure angolari, contorni, trasparenza o opacità del minerale.

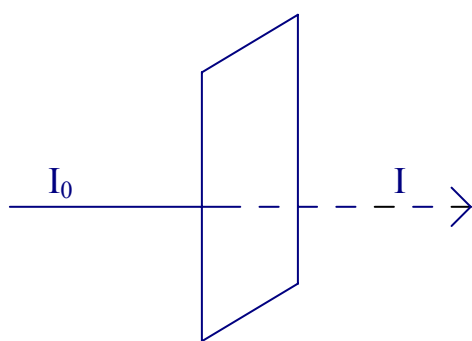
Se il minerale è trasparente, vedrò quest'ultimo illuminato poiché i raggi luminosi possono attraversare il minerale. Un corpo opaco proietterà la sua ombra perché i raggi luminosi non passano. Posso inoltre vedere se il minerale è alterato o colorato.

Pleocroismo

Il pleocroismo è quel fenomeno per cui una sostanza birifrangente e colorata cambia di colore, ogni qual volta cambiamo l'orientazione dei piani di vibrazione della luce polarizzata emergente ed uscente.

Colore di un minerale

Se una radiazione luminosa investe una sostanza trasparente, questa continuerà a trasmettere nella direzione da dove proveniva, a patto che l'incidenza della luce sia ortogonale alla superficie. Se I_0 è l'intensità emergente e I quella uscente:



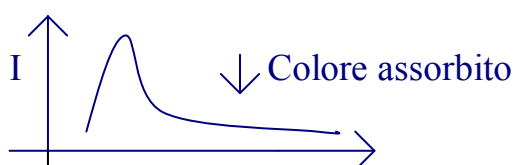
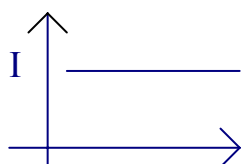
$$I = I_0 e^{-kd} \quad \text{con } d = \text{spessore della lastra}$$

k = coefficiente di
assorbimento lineare

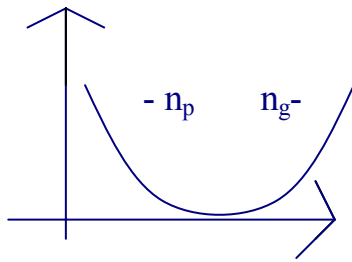
Le radiazioni policromatiche ottiche sono quelle che hanno tutte frequenze che danno luogo a quelle lunghezze d'onda visibili (luce visibile). Per ciascuna banda dovrò applicare l'equazione appena vista. Vediamo da cosa dipende k :

$$k = f(\lambda, n, \text{natura del mezzo})$$

Se la sostanza è anisotropa, ho infiniti indici di rifrazione. La luce bianca è la combinazione di tutti gli spettri della luce visibile. Se ne analizzo lo spettro:



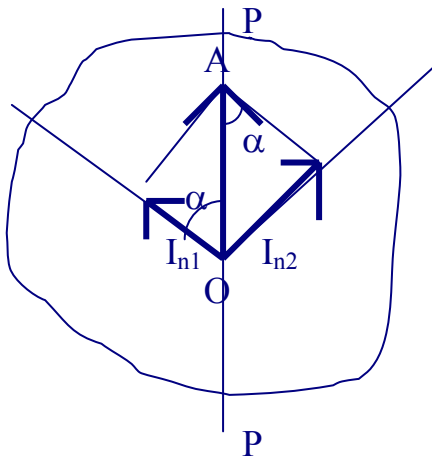
In una prima situazione λ sia sempre lo stesso (vedi primo grafico). In un'altra situazione in funzione delle diverse funzioni di lunghezza d'onda, alcune intensità possono essere assorbite, altre no (vedi secondo grafico). Non avrò più una luce bianca ma colorata relativa alla lunghezza d'onda meno assorbita, ovvero prenderà un colore complementare di quello assorbito selettivamente. Avrò una radiazione policromatica con dominante giallo, per esempio. Io vedo il colore perché esiste un assorbimento selettivo della luce. Soffermiamoci su n. Se la sostanza fosse isotropa avrei solo un indice di rifrazione. Ma per un mezzo anisotropo, se prendo i due estremi degli indici di rifrazione, potrei avere questo spettro:



n_p = indice di rifrazione più piccolo

n_g = indice di rifrazione più grande

Soffermiamoci sul pleocroismo e consideriamo un grafico, assumendo la luce entrante nel foglio e i due relativi piani di vibrazione del minerale.



$OA = I_0$ = intensità della radiazione incidente

PP = piano di vibrazione del nicol del microscopio

I_0 incontra il minerale e si birifrange in I_{n1} e I_{n2}

L'intensità iniziale deve ripartirsi tra le due intensità secondo la relazione:

$$I_{n1} + I_{n2} = I_0$$

Dovrò scomporre vettorialmente I_0 nelle sue componenti all'interno del minerale:

$$I_{n1} = I_0 \cos \alpha$$

$$I_{n2} = I_0 \sin \alpha$$

Ciò che io vedo è la somma dei colori trasportati da I_{n1} e I_{n2} .

Se l'intensità di I_{n1} è maggiore di I_{n2} , il colore sarà spostato maggiormente verso I_{n1} e viceversa. Si avranno gli estremi di colore quando una delle due intensità sarà nulla, o meglio quando si annullerà una delle due funzioni trigonometriche.

I minerali dimetrici vengono detti **dicroici** perché hanno due colori principali. Ciò non significa che hanno solo due colori ma bensì infiniti di cui due principali.

I minerali trimetrici vengono detti **tricroici** perché hanno tre colori principali. Ciò non significa che hanno solo tre colori ma bensì infiniti di cui tre principali.

Quando il piano di vibrazione di una delle due intensità coinciderà con il piano di vibrazione del nicol, essa si estinguerà. In pratica vedrò solo il colore dell'altra intensità. Questa poiché è ortogonale alla prima, raggiungerà il suo massimo.

Determinazione dell'indice di rifrazione

Metto la laminetta del mio minerale in modo che uno dei suoi due piani di vibrazione coincida con quello del polarizzatore e otterrò l'altra onda birifratta. Vogliamo adesso misurare l'indice di rifrazione. Per far ciò devo operare con luce monocromatica sia per le sostanze isotrope che anisotrope, ma in quest'ultimo caso la luce deve essere anche polarizzata. Esistono due metodi di misura:

- 1) Metodi diretti: è un metodo che prende l'oggetto e svolge direttamente la misura sull'oggetto in questione.
- 2) Metodi indiretti: è un metodo che consente la definizione della grandezza di un oggetto mediante il confronto con un altro oggetto che abbia le stesse proprietà, preso come riferimento. I metodi indiretti sono quelli usati maggiormente.

In pratica confrontiamo l'indice di rifrazione ignoto della sostanza con quello delle sostanze liquide. Se prendo una sostanza solida e la metto dentro un liquido, fin quando hanno indici di rifrazioni diversi riconosco i contorni della sostanza. Il perché di ciò che accade è semplice. La superficie della sostanza costituisce una superficie di discontinuità di contatto tra mezzi materiali di indici di rifrazione diversi. Se la luce investe la superficie di contatto, la può investire con angoli diversi. Potrò avere raggi luminosi che provengono dal mezzo d'indice di rifrazione minore a quello, viceversa. I raggi luminosi dal più piccolo al più grande passano tutti. Nel caso contrario, solo se l'angolo d'incidenza è più piccolo dell'angolo limite, i raggi passano tutti. Fissato l'angolo limite, tutti i raggi dentro l'angolo limite passeranno, quelli fuori subiranno il fenomeno della riflessione totale. Vedrò il contatto tra due sostanze trasparenti di indice di rifrazione diversi causa questi fenomeni di riflessione totale. Quando l'indice di rifrazione del solido sarà uguale a quello del liquido non vedrò più il contatto. Quindi mi determino l'indice di rifrazione del liquido in quanto è più facile. Se utilizzo il microscopio, prendo il portaoggetti, metto un'ampolla con liquido e

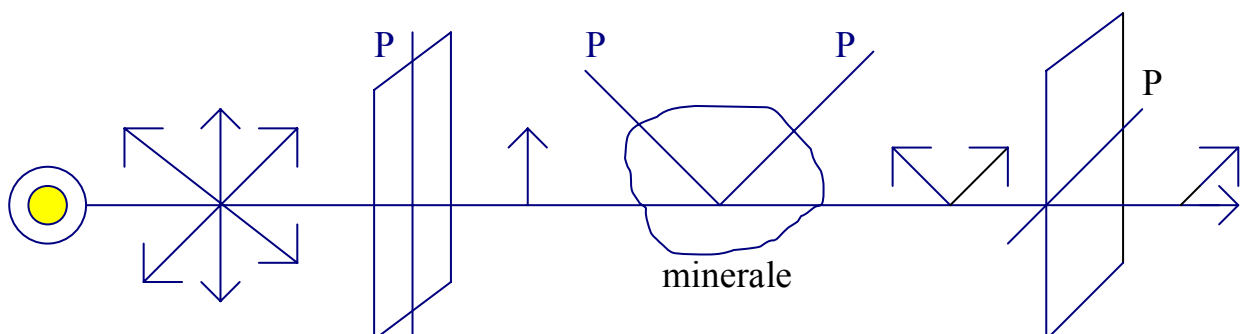
inserisco il minerale di cui voglio misurare l'indice di rifrazione. Metto a fuoco il microscopio in un determinato punto. Se alzo il piatto del microscopio in modo da focalizzare un punto al di sopra del minerale, vedrò il suo contorno illuminato. Esso è chiamato **linea di Becket**. Essa si colloca sempre dalla parte dell'indice di rifrazione maggiore. Quindi quando questa linea corrisponde esattamente con il contorno del minerale (vario continuamente il liquido fin quando non ottengo ciò) basterà misurare l'indice di rifrazione del liquido. Misurare l'indice di rifrazione è utile per le rocce che sono aggregati di minerali, prendendo stavolta in considerazione due solidi invece che due liquidi.

Rilievo

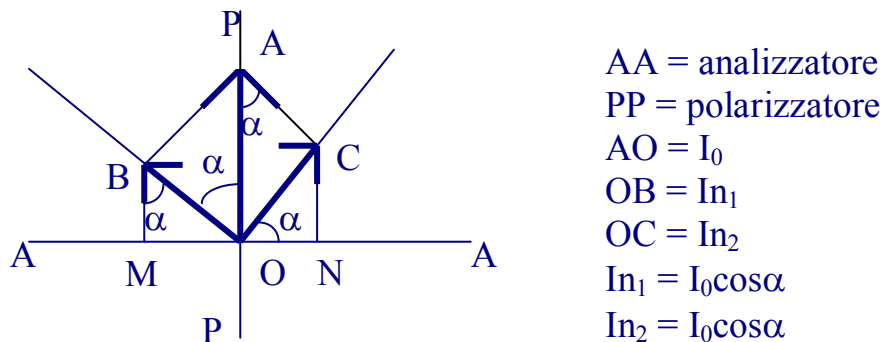
Il rilievo è il modo di apparire di un minerale quando è immerso in una matrice fatta di altri minerali. Se questo minerale ha un indice di rifrazione diverso rispetto agli altri minerali, esso apparirà più in alto o più in basso rispetto agli altri minerali. Se il rilievo è positivo o alzato, l'indice di rifrazione è più alto rispetto a quelli degli altri minerali e viceversa. Ciò avviene perché sarà difficile mettere entrambi a fuoco due minerali che hanno indici di rifrazione diversi, perché l'uno apparirà più alzato, l'altro più represso. Nella linea di Becket avremo più luce dalla parte dell'indice di rifrazione più grande, perché i raggi non essendo perfettamente paralleli, formeranno angoli a volte vicini all'angolo limite.

Osservazioni a luce parallela a nicols incrociati

Quando i minerali sono osservati con due nicols incrociati, essi subiscono effetti diversi in funzione del tipo di minerale che osserviamo. Il comportamento generale dei minerali sarà diverso a seconda se esso è isotropo o anisotropo. Se prendo un mezzo isotropo, sia opaco che trasparente e lo metto tra due polaroid, lo vedrò nero perché l'onda che prima vibra su di un piano, poi dovrà vibrare su un altro piano ortogonale al primo. Se consideriamo un minerale birifrangente, se lo metto tra due polaroid, il cristallo apparirà multicolore. Stavolta girando il piatto del microscopio, i colori permangono ma l'intensità di luce che passa cambia. Se lo giro di un certo periodo esso si estingue. Se lo giro di un altro periodo riappare il colore. Nel giro di 360° vi sono quattro momenti nei quali il minerale è nero o estinto. Chiamerò questi momenti **posizioni di estinzione**. L'angolo tra due posizioni di estinzione è di 90° . La massima intensità è esattamente a metà strada tra due posizioni di estinzioni. Spieghiamo perché accade ciò ed osserviamo cammino della luce dalla lampadina:



L'onda che entra nel minerale ne uscirà tramite due onde, che giacciono su due piani di vibrazione ortogonali tra loro. Dopo incontra un altro polarizzatore (l'analizzatore) che lo obbliga a vibrare su di un piano che, per costruzione, è ortogonale quello del primo polarizzatore. Tutte le onde emesse dalla lampadina percorrono gli stessi spazi con la stessa velocità fino al polaroid. Poiché è anch'esso un mezzo isotropo, le onde escono tutte insieme e percorrono spazi uguali con velocità uguali fino al minerale. Quando entrano nel minerale, poiché esso è un mezzo anisotropo, si formano due onde con indice di rifrazione diversi. Quindi l'onda con indice di rifrazione più piccolo è più veloce ed esce prima dell'onda con indice di rifrazione più grande. Pertanto nel minerale si forma un ritardo R tra le due onde. Dopo di che le onde attraversano il secondo polarizzatore che è anch'esso un mezzo isotropo. Quindi i fenomeni con cui abbiamo a che fare sono spiegati dalla geometria delle onde, e dalla velocità di attraversamento dei minerali. Questo produce i fenomeni precedentemente spiegati. L'insorgenza del colore è connessa con le diverse velocità di propagazione. Rappresentiamo il raggio luminoso che entra nel minerale come uscente dal foglio:



Le onde OB e OC per passare nel secondo polarizzatore devono cambiare piano di vibrazione. Questo produce una variazione d'intensità e passeranno le proiezioni MO ed ON. Per le regole trigonometriche avremo che:

$$OM = I_0 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad \text{e} \quad ON = I_0 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad \text{Ogni } 90^\circ \text{ queste funzioni si annullano.}$$

In pratica le posizioni di estinzione si realizzano quando vi è coincidenza tra i piani di vibrazione della laminetta del minerale e quelli dei due polarizzatori.

Questo discorso spiega la variazione d'intensità, ma l'assunzione di colore quando incrocio i due polarizzatori. Se osservo le onde uscenti dal primo polarizzatore ed entranti nel minerale, la cui laminetta ha spessore d , posso dire che:

$$d = v_1 t_1 \quad \text{con } v_1 \text{ e } v_2 \text{ le velocità delle onde rifratte nel minerale}$$

$$d = v_2 t_2 \quad \text{indichiamo } \Delta t = t_2 - t_1 \text{ (ritardo delle onde). Sostituendo:}$$

$$\text{poiché } t_1 = d/v_1 \text{ e } t_2 = d/v_2 \text{ avrò che } \Delta t = t_2 - t_1 = d/v_2 - d/v_1 = \Delta t = d (1/v_2 - 1/v_1)$$

$$\Delta t = \text{differenza di tempo delle onde}$$

Poiché a questa differenza può corrispondere uno spazio medesimo ad una velocità medesima, se ci riferiamo al vuoto, posso trovare Δt moltiplicandolo per c :

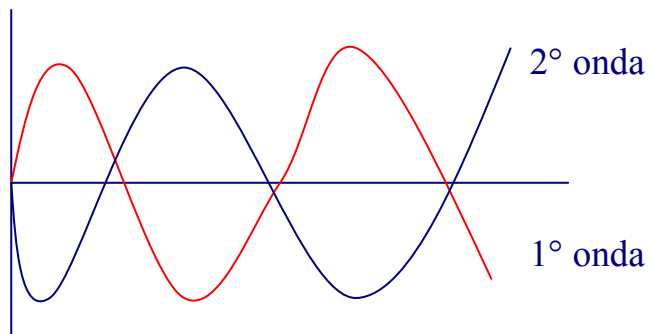
$$R = \Delta t \cdot c \quad \text{dove } c = \text{velocità della luce nel vuoto.}$$

In pratica trovo il ritardo in termini di distanza percorsa in lunghezza. Sostituendo a Δt

$$R = \Delta t \cdot c = d \cdot c (1/v_2 - 1/v_1) \quad \text{ma i rapporti } c/v_2 \text{ e } c/v_1 \text{ sono gli indici di rifrazione:}$$

$$R = d (n_2 - n_1) \quad \text{dove ricordiamo che } n_2 - n_1 \text{ è la birifrangenza.}$$

Se ritorniamo al disegno della pagina precedente, vediamo che le onde OM e ON hanno direzioni opposte. Esse inoltre devono essere per forza positive ed avere la stessa ampiezza. Rappresentiamo queste onde in un grafico:



Dal grafico si vede che le due onde sono sfasate di $\lambda/2$

Questa mezza lunghezza d'onda di ritardo va a sommarsi al ritardo visto poco fa:

$$R = d (n_2 - n_1) + \lambda/2$$

Il primo ritardo (primo addendo) è dovuto per anisotropia in seno alla laminetta del minerale. Il secondo ritardo (secondo addendo) è dovuto a motivi geometrici di scomposizione vettoriale. Sappiamo anche che due radiazioni coerenti e giacenti sullo stesso piano possono interferire. L'interferenza è la somma vettoriale di queste due onde. Nel grafico appena visto, le due onde si annullano dando vita ad un'intensità di ampiezza nulla, ovvero la radiazione non esiste (interferenza negativa). Potrebbero anche esservi casi in cui l'onda per somma vettoriale si rafforza (interferenza positiva)

In pratica ogni qual volta che:

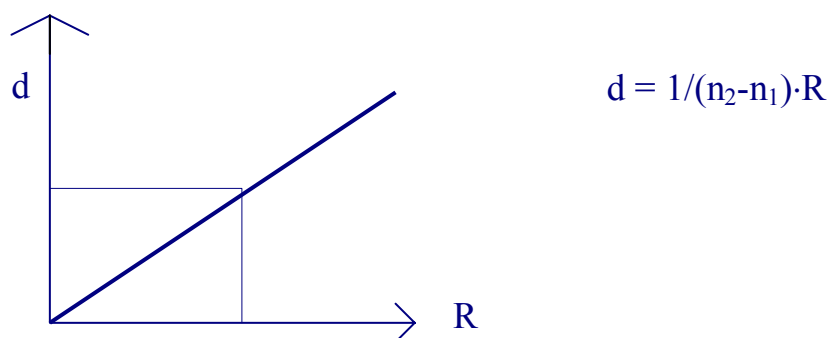
$$R = (2k + 1) \lambda/2 \quad \text{avrò **interferenza negativa**. Per } R = n \lambda \text{ avrò **interferenza positiva**}$$

L'intensità è funzione del ritardo delle onde. Ricordiamo che stiamo utilizzando una luce bianca compresa tra 3800 e 7800 nm quindi, poiché alcune onde subiscono interferenza positiva ed altre interferenza negativa, avrò una variazione dello spettro con l'assunzione di un colore denominato **colore d'interferenza**.

Questo colore non è proprio del minerale, ma si genera in seguito a fenomeni d'interferenza dovuti a ritardi che abbiamo esaminato. Poiché non sto variando la direzione di propagazione della luce del microscopio, per quanto io giri il microscopio, varierà solo l'intensità della radiazione ma non il suo colore in quanto il ritardo è sempre il medesimo. Ritorniamo alla formula precedente. Poiché nella osservazione al microscopio osservo colori diversi, evidentemente ho spessori diversi e quindi d cambia nella formula. Questo accade perché il gesso (il minerale che stiamo usando) è altamente sfaldabile, e quindi nella preparazione del preparato, vi è stata una variazione dello spessore. Il fenomeno d'interferenza si realizza nel secondo polarizzatore. Questo colore viene anche denominato **colore complementare** dei colori estinti. Le onde represse danno un contributo minore di quelle rafforzate al colore. Tutte queste considerazioni fatte finora valgono purché il mezzo sia birifrangente. Ritorniamo alla formula precedente che regola l'insorgenza del colore.

$$R = d (n_2 - n_1) + \lambda/2$$

Questa equazione indica il ritardo ma non il tipo d'interferenza (positiva o negativa). Quest'ultima è indicata dalle due formulette viste per ultimo. I colori d'interferenza non sono propri del minerale. Tuttavia se ci riferiamo ad uno spessore costante ($d = 30$ micron) possiamo utilizzare i valori di birifrangenza massima come caratterizzanti del minerale. Per verificare la variazione dei colori al crescere del ritardo, utilizziamo la **Tavola di Michel Levy**. In essa il rosso segna una ciclicità del fenomeno della interferenza. I colori fino al primo rosso vengono detti colori di 1° ordine, quelli fino al secondo rosso vengono detti colori di 2° ordine e così via, via per gli altri. I colori di ordine più basso sono i più intensi e hanno maggiore tonalità. Facciamo un grafico:



Il coefficiente angolare della retta è l'inverso della birifrangenza, quindi ad un determinato spessore d può corrispondere un solo ritardo e quindi un solo colore specifico. All'aumentare dello spessore diminuiscono i colori fino a ridursi a quelli principali, il rosso e il verde, che finiranno col confondersi. Questo perché all'aumentare del colore aumentano i colori che per interferenza distruttiva vanno via.

Ricordiamo che durante le quattro posizioni di estinzione i piani di vibrazione della luce nella laminetta coincidono con i piani di vibrazione dell'analizzatore e polarizzatore, a patto che le posizioni di estinzione si realizzino nelle direzioni individuare dal crocefile del microscopio.

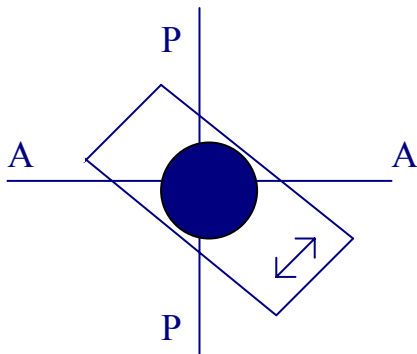
Tipi di estinzione

Immaginiamo d'intersecare un minerale sfaldandolo. L'intersezione tra un piano cristallografico (piano di sfaldatura) e un piano della sezione individua una **direzione cristallografica**. Non tutti i minerali hanno direzioni cristallografiche. Mi chiedo se vi sono relazioni tra le direzioni cristallografiche e i piani di vibrazione della laminetta del minerale. In pratica voglio sapere se sono coincidenti o meno. Per saperlo non devo fare altro che individuare le posizioni di estinzione coincidenti con le direzioni di vibrazione del minerale, incrociando i nicol. Se le direzioni ottiche (piani di vibrazione della luce birifratta) non coincidono con le direzioni cristallografiche diremo che il minerale presenta **estinzione inclinata**. Se viceversa verificassimo la coincidenza tra queste due direzioni, parleremo di **estinzione retta**. Ogni qual volta l'estinzione è inclinata, possiamo misurare l'angolo di estinzione, individuato dalle direzioni ottiche e cristallografiche. Basta far coincidere le direzioni del crocefilo con quelle ottiche, misurarne l'angolo (es. 254°) e poi far coincidere le direzioni del crocefilo con quelle cristallografiche, misurandone l'angolo (es. 231°). L'angolo di estinzione sarà dato dalla differenza dei due valori (es. $254^\circ - 231^\circ = 23^\circ$). Vediamo i minerali che tipo di estinzione presentano.

- 1) I minerali monometrici, in quanto isotropi, saranno **sempre estinti**.
- 2) I minerali dimetrici, in quanto birifrangenti uniassici, hanno un'indicatrice ottica uguale ad un ellissoide di rotazione il cui asse di simmetria coincide con l'asse cristallografico delle z. Per qualsivoglia generica onda con generica direzione di vibrazione, competeranno due onde E e W perpendicolari tra loro. Se individuo una direzione ottica, se l'una sarà E, la perpendicolare sarà il suo W. L'estinzione sarà **sempre retta** per qualsiasi minerale del gruppo dimetrico. L'estinzione inclinata non è possibile per i minerali dimetrici.
- 3) I minerali trimetrici sono birifrangenti e biassici. In seno allo stesso gruppo:
 - a) Nel sistema rombico i tre assi morfologici devono coincidere con i tre semiassi dell'indicatrice ottica (rappresentata da un ellissoide a tre assi). In virtù di questo per tutte le sezioni parallele ai tre assi (x,y,z) avrò sempre **estinzione retta**. Per le rimanenti sezioni generiche (hkl) avrò sempre **estinzione inclinata**.
 - b) Nel sistema monoclinico un asse, quello y, poteva coincidere con un asse cristallografico, mentre gli altri due insieme coincidevano col piano (010) perpendicolare ad esso. In virtù di questo solo le sezioni parallele all'asse y (h0k) avranno **estinzione retta**. Tutte le altre sezioni rimanenti presenteranno **estinzione inclinata**. Tra l'altro la sezione (010) avrà estinzione inclinata massima.
 - c) Nel sistema triclinico nessun asse ottico coincide con gli assi cristallografici. Pertanto i minerali triclinici presenteranno **sempre estinzione inclinata**.

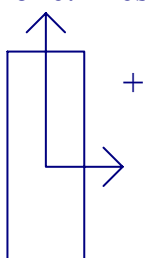
Il compensatore

All'interno del minerale vi sono due onde che si propagano con indici di rifrazione n_1 ed n_2 ovviamente diversi tra loro. Mi chiedo quale dei due sia il più grande. Il microscopio ed il comportamento ottico del minerale possono rispondermi a questa domanda. I compensatori sono fatti da un'armatura metallica, dove vi è un foro all'interno del quale vi è un minerale birfrangente, limpido, trasparente ed incolore). Questa laminetta quindi è fatta con materiale birfrangente che da luogo a due onde birfratte, quando è attraversato da luce. Se la incrociamo con un altro polarizzatore, avremo una luce rossa (ritardo di 1° ordine). L'orientazione della laminetta è tale che, le direzioni di vibrazione delle sue onde coincidono con le direzioni corte e lunghe dell'armatura. L'orientazione ottica è nota, si chiama gamma, è indicata dalla doppia freccia ed innesca un ritardo che da un rosso di 1° ordine. L'orientazione della laminetta è a 45° dalla direzione di entrambi i nicol come si vede in figura:



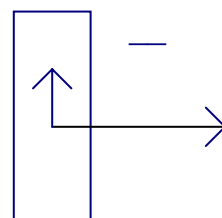
La doppia freccia indica la direzione del nostro gamma

Data una laminetta di un minerale incognito, il compensatore ci permette di scoprire gli indici di rifrazione grande e piccolo del minerale. Essendo questi birfrangente, presenta colori d'interferenza dovuti al ritardo innescato da esso. Se inserisco la laminetta compensatrice oltre ovviamente ai due nicol, questi produrrà un ulteriore ritardo che potrà sommarsi o sottrarsi a quello prodotto dal minerale. Se il ritardo aumenta, il colore d'interferenza aumenta verso i colori di ordine superiore mentre se il ritardo diminuisce, il colore d'interferenza diminuisce verso colori di ordine inferiori. Tornando alla nostra figura, se gamma coinciderà con l'indice di rifrazione più piccolo, il ritardo diminuirà. Se gamma coinciderà con l'indice di rifrazione più grande, il ritardo aumenterà. In pratica l'onda dopo aver attraversato la laminetta compensatrice, potrà viaggiare o più veloce o più lenta. Può avvenire che i minerali con estinzione retta presentino un abito con forma cristallina propria e allungato. **Solo** per i minerali ad estinzione retta, posso mettere in relazione la direzione di allungamento con la grandezza dell'indice di rifrazione che vibra parallelo a questa direzione. Messo il minerale in posizione d'estinzione potrò avere due situazioni:



**Allungamento
positivo**

oppure



**Allungamento
negativo**

Osservazioni a luce convergente a nicols incrociati

Per vedere se un cristallo è uniassico o biassico (e quindi dimetrico o trimetrico) devo fare al microscopio un'osservazione **conoscopica** (a luce convergente) e non **ortoscopica** (a luce parallela). Al di sotto del piattino del microscopio vi è una lente che permette di far convergere la luce in un punto. Farò un'osservazione su fenomenologie indotte dal minerale che si manifestano all'esterno di esso. Farò uso anche di una lente defocalizzante che permette di vedere uno spazio al di fuori dell'oggetto in questione. Le fenomenologie che osserveremo si realizzano anche per motivi d'interferenza, che si manifestano con l'insorgenza di certi colori d'interferenza. Useremo anche la lente addizionale di Bertland – Amici.

Figura d'interferenza dei minerali dimetrici

Qualsiasi sezione di un minerale dimetrico sarà sempre birifrangente tranne quella perpendicolare all'asse ottico (sezione monorifrangente). Vogliamo trovare questa ultima. Se la osserviamo a nicols incrociati, essa apparirà sempre estinta. Vogliamo fare un'osservazione in base a ciò che si vede per questa sezione che ricordiamo essere sempre la 001 ovvero quella perpendicolare all'asse z. Inserita la lente di Bertland – Amici vedrò delle zone nere che disegneranno una geometria a croce, e delle zone colorate, che disegneranno ognuna delle geometrie circolari ovvero cerchi concentrici con centro nella croce. Le curve dello stesso colore si dicono **isocromatiche** mentre le due zone nere si chiamano **isogire**. Se ruoto il piatto del microscopio, l'immagine non cambia. Questa figura si chiama **figura d'interferenza** perché si realizza per fenomeni d'interferenza nell'analizzatore. Ricordiamo sempre che ho considerato una sezione ortogonale all'asse z e quindi isotropa. Considero i raggi convergenti incidenti sul minerale come appartenenti a tante falde coniche. Consideriamo l'unico raggio che si propaga come treno d'onda lungo l'asse comune a tutte le falde coniche, ovvero quello parallelo all'asse z. Questo treno di onde si propagano parallelamente all'asse ottico, non si birifrangono, restando polarizzate nel piano dove vibravano. Consideriamo un raggio appartenente alla prima falda conica. La direzione di propagazione di questo treno di onde sarà obliquo rispetto all'asse ottico e quindi esse saranno birifratte. Si formeranno quindi due onde che avranno un ritardo tra di loro per l'anisotropia del mezzo:

$$R = d (n_2 - n_1)$$

Misuriamo questo ritardo

Calcoliamo lo spessore della laminetta (in questo caso la distanza percorsa d_1 sarà maggiore del reale spessore) e la moltiplichiamo per la birifrangenza E-W. E sarà un poco diverso da W, essendo scostato dal raggio ottico di poco. Si formeranno quindi due treni d'onda, che acquisiscono l'un con l'altro un ritardo eguale a:

$$R_1 = d_1 (E_1 - W)$$

Lo stesso tipo di sorte subiscono i raggi della stessa falda. Questi treni di onde subiscono il medesimo ritardo. Nella seconda falda, per il discorso di prima, si formeranno treni di onde (escluse quelle lungo l'asse ottico) con un ritardo:

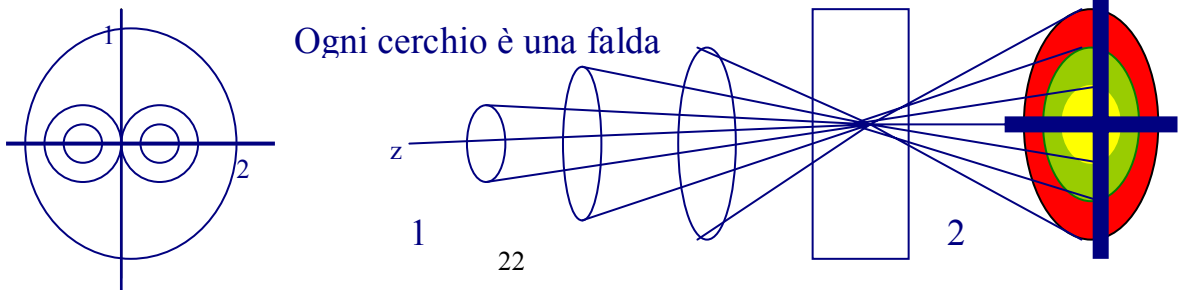
$$R_2 = d_2(E_2 - W)$$

Questo ritardo sarà maggiore del primo, e tutte le onde di questa falda subiranno lo stesso tipo di ritardo quantitativo. Se considero la terza falda, avrò un treno d'onda che subirà lo stesso fenomeno precedente con due onde aventi ritardo uguale tra loro.

$$R_3 = d_3(E_3 - W)$$

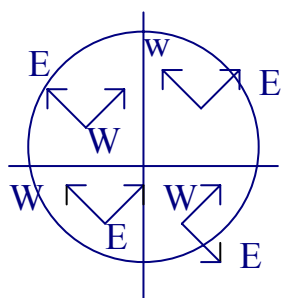
Una volta che tutte queste onde arriveranno all'analizzatore interferiranno sullo stesso piano, generando colori più alti per ritardi maggiori. Ad onde con ritardi diversi corrisponderanno colori d'interferenza diversi. Se il piano in cui raccolgo l'immagine è ortogonale all'asse ottico, otterrò un cerchio, essendo questi la figura geometrica che si ottiene dall'intersezione di una falda conica con un piano. Ognuna di queste curve circolari avrà un colore, indicante il medesimo ritardo della falda associata. Voglio vedere perché si forma la croce. Poiché faccio l'osservazione a nicol incrociati, ogni qual volta i piani di vibrazione della laminetta sono paralleli ad uno dei polarizzatori, si ha l'estinzione. Queste posizioni coincidono con il crocefilo del microscopio. Difatti se ruoto polarizzatore ed analizzatore l'uno rispetto all'altro, la croce cambia di posizione. L'intensità su una isocromatica ha dei minimi corrispondente con le isogire e dei massimi distaccati di 45° dalle isogire. Le posizioni d'estinzione non sono quindi fisse. Se però considerassi una sezione non perpendicolare all'asse ottico otterrei che i bracci della croce resterebbero gli stessi, le curve assumerebbero forma ovale e il centro del crocefilo sarebbe spostato. La figura d'interferenza si muoverà se sposterò i nicols. Se avviene che la sezione è assai storta, tale che l'asse ottico esce fuori dal cerchio, stessa sorte toccherà al crocefilo della figura d'interferenza. Se giro quest'ultima, vedrò un braccio della croce entrare ed uno uscire. Per comodità quindi sceglierò sempre una sezione perpendicolare all'asse ottico. Per i minerali trimetrici osserverò una figura d'interferenza diversa. Osserverò delle curve colorate (**isocromatiche**) e zone nere (**isogire**) a geometria a croce con intersezione dei bracci della croce del centro. Se ruoto la figura, avrò una separazione delle isogire che si divideranno in due curve. Ruotando ancora assumono geometria ad iperbole i cui asintoti saranno individuati dai piani di vibrazione della luce. La geometria delle isocromatiche che sono alcune concentriche in un punto, altre concentriche nel punto opposto, varierà in modo da assumere geometria a uovo.

La direzione 1 rappresenta β mentre la direzione 2 è la bisettrice ottica (del $2v$).



Segno ottico

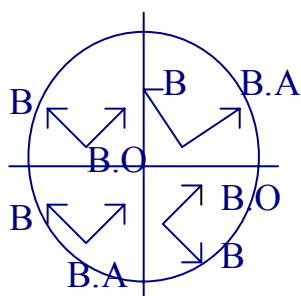
Considero la figura d'interferenza dei cristalli dimetrici uniassici e precisamente quella relativa alla sezione ortogonale all'asse ottico. Per qualsiasi direzione di propagazione della luce, il piano di vibrazione dell'indice di rifrazione più grande contiene la direzione di propagazione e l'asse ottico. Questa sezione è detta sezione principale. I due indici di rifrazione principali vibreranno lungo direzioni parallele alle direzioni lungo-corto dell'armatura del compensatore. Introduco la lamina compensatrice. Nei quattro quadranti della figura d'interferenza si avranno alternativamente addizione e sottrazione di ritardi. Guardiamo la figura:



Sappiamo dove vibrano W ed E ma non conosciamo chi dei due è il più grande. Per scoprirlo utilizziamo la lamina compensatrice.

Supponiamo nel quadrante in basso a destra abbiamo addizione di ritardi. Quindi gamma corrisponderà con l'indice più grande. In quella direzione vibra w e quindi avremo che $E < W$ e il cristallo sarà otticamente **negativo**. W vibra nella posizione tangenziale mentre E vibra nella posizione radiale. Visivamente mi accorgerò del tipo di ritardo tramite l'avanzamento o l'arretramento dei colori. Inserendo la lamina compensatrice, nelle zone di addizione di ritardo vedrò il colore azzurro mentre nelle zone di sottrazione vedrò color giallo. Per $E > W$, ovviamente, avrò segno **positivo**.

Vediamola situazione per i minerali trimetrici.



B.A è la bisettrice acuta dell'angolo acuto $2v$

B.O è la bisettrice ottusa dell'angolo ottuso $2v$

Se α è la bisettrice ottusa e γ quella acuta il cristallo sarà otticamente **positivo**.

Ricordiamo sempre la relazione $\alpha < \beta < \gamma$.

Supponiamo che nel quadrante in basso a destra vi sia addizione. Evidentemente gamma sarà parallelo all'indice di rifrazione più grande che nel nostro caso sarà la bisettrice ottusa. Quindi β sarà minore della bisettrice ottusa che quindi corrisponderà a γ per la relazione scritta poc'anzi. Quindi α sarà la bisettrice acuta. Visivamente vedrò nel quadrante il colore azzurro in quanto abbiamo addizione. Segno **negativo**.

Indice

La luce	pag 2
Leggi dell'ottica.....	pag 4
Polarizzatori.....	pag 5
Gruppo Dimetrico.....	pag 6
Gruppo Trimetrico.....	pag 8
Indicatrice ottica.....	pag 9
Il microscopio ottico	pag 11
Osservazioni a luce parallela ad un nicol.....	pag 12
Determinazione dell'indice di rifrazione.....	pag 14
Osservazioni a luce parallela a nicols incrociati	pag 15
Tipi di estinzione	pag 19
Il compensatore.....	pag 20
Osservazioni a luce convergente a nicols incrociati.....	pag 21
Figura d'interferenza.....	pag 21
Segno ottico.....	pag 23
Indice.....	pag 24