ISTITUTO NAZIONALE di FISICA NUCLEARE
Sezione di Bologna

DIPARTIMENTO di FISICA
Università degli Studi di Bologna

Giovanni Pietro SINI

INTRODUZIONE ALLA MICROSCOPIA in RADIAZIONE POLARIZZATA

Revisione ed aggiornamento con la collaborazione di

Donato Di FERDINANDO e Gabriele SIRRI

Bologna - 2006

NB: Questo testo può venir liberamente copiato, diffuso o stampato, purché a titolo gratuito e con la citazione della fonte

INDICE

INDICE 2

PREMESSA 3
1 - LA BIRIFRAZIONE 3
2 - CAUSE DELLA BIRIFRAZIONE 7
3 - LA BIRIFRAZIONE DEGLI OGGETTI BIOLOGICI E NON BIOLOGICI 9
4 - LA POLARIZZAZIONE PER RIFLESSIONE 12
5 - PRODUZIONE DELLA RADIAZIONE POLARIZZATA 15
6 - I FENOMENI DELLA RADIAZIONE POLARIZZATA IN MICROSCOPIA 17
6.1 - POLARIZZAZIONE ELLITTICA E CIRCOLARE 17
A) CON D = 0 18
B) CON D = λ / 4 19
C) CON D = λ / 2 19
D) CON UN VALORE DI **D** DIVERSO DA UN NUMERO INTERO DI **λ / 4** 19
E) CON D = λ 20
6.2 - INTERFERENZA DEI FASCI BIRIFRATTI 21
A) PER D = 0 22
B) PER D = λ / 2 22
C) PER D DIVERSO DA **mλ** O DA **(2m + 1) λ / 2** 23
A) In luce bianca Per D = 0 23
B) In luce bianca Per D $\neq$ 0 23
6.3 - IL TAVOLINO UNIVERSALE O TEODOLITICO DI FEDOROW 26
6.4 - I COMPENSATORI 27
A) COMPENSATORI CON SFASAMENTO FISSO 28
B) COMPENSATORI CUNEIFORMI 29
C) COMPENSATORI VARIABILI 30
7 - LE OSSERVAZIONI CONOSCOPICHE 32
8 - IL MICROSCOPIO POLARIZZATORE 36
8.1 - STRUTTURA DEL MICROSCOPIO POLARIZZATORE 37
8.2 - OSSERVAZIONI QUALITATIVE 43
8.3 - OSSERVAZIONI QUANTITATIVE AL MICROSCOPIO POLARIZZATORE 44
8.4 - OSSERVAZIONI QUANTITATIVE COL SOLO POLARIZZATORE 46
8.5 - DETERMINAZIONI QUANTITATIVE IN CONOSCOPIA 47
9 **- LA RADIAZIONE POLARIZZATA IN EPISCOPIA E LA BIRIFLESSIONE** 48
10 - CONCLUSIONI 51
BIBLIOGRAFIA 52

PREMESSA

Lo studio della radiazione polarizzata rappresenta uno dei capitoli più intricati ed imbarazzanti dell'ottica poiché il semplice approccio geometrico, sufficiente per spiegare tanti fenomeni derivanti dalla rifrazione, dalla riflessione e dalla diffusione, non basta più. L'ottica ondulatoria è fondamentale e da lì vengono le complicazioni.

In campo mineralogico e chimico, il problema principale del riconoscimento della specie mineralogica o chimica a livello microscopico è stato per oltre un secolo risolto con l'uso di microscopi speciali, corredati e strutturati in vista dell'utilizzazione della radiazione polarizzata. Generalmente, queste tecniche presuppongono che il campione venga ridotto a sezione sottile (10 – 50 μ) con notevole dispendio di tempo ed energie.

Lo stesso problema viene da decenni risolto con nuove tecniche, in particolare colla diffrazione degli elettroni e dei raggi X. Il microscopio polarizzatore ha qui perso molte delle sue applicazioni: con quantità anche piccole di materiale, spesso ridotto semplicemente in polvere, si ottiene in breve tempo una diagnosi esatta. Semmai c'è da ricordare che la diffrazione dei raggi X non fornisce molte indicazioni sulla quantità del materiale identificato né sulle quantità relative dei vari componenti di un aggregato, né sulla loro morfologia o sulle dimensioni dei singoli granuli, né sui loro rapporti reciproci; per questi dati, è ancora necessario ricorrere ai metodi ottici. Questi metodi sono ancora irrinunciabili in certi casi, come nel riconoscimento semplice delle differenti specie di fibre di amianto.

Del resto, i concetti e le tecniche della polarizzazione sono oggi ampiamente applicati sia in campo scientifico, come in astrofisica, sia in campo tecnologico. Impossibile occuparsi di display a cristalli liquidi (LCD), di fibre ottiche, di optoelettronica o di laser senza imbattersi nella radiazione polarizzata.

1 - LA BIRIFRAZIONE

La "luce" è una sensazione, una rappresentazione psichica, provocata, in condizioni normali, da un agente fisico, una "radiazione elettromagnetica", che è una forma di energia radiante in cui due campi, uno elettrico ed uno magnetico, oscillano in piani perpendicolari fra loro. La direzione di propagazione giace in entrambi i piani. I vettori elettrico e magnetico dell'oscillazione sono perpendicolari alla stessa direzione di propagazione; l'onda è dunque "trasversale". La grande maggioranza dei fenomeni di cui ci si occupa nel campo dell'ottica si può spiegare considerando il solo vettore elettrico; a questo solo, dunque, faremo riferimento d'ora in poi.

Sia **t** il "periodo", il tempo impiegato dall'oscillazione a compiere un ciclo completo, e λ la "lunghezza d'onda", lo spazio percorso dall'oscillazione durante un periodo. Di tutte le possibili radiazioni elettromagnetiche, quelle che normalmente impressionano l'occhio umano hanno una lunghezza d'onda che varia fra 0,4 μ e 0,7μ[1]; questa gamma, questo "spettro" di radiazioni, si chiama "spettro ottico" e, ad ogni valore di λ, corrisponde una diversa sensazione di colore (parte inferiore della fig. 1 ove i valori di λ sono indicati in

[1] Il simbolo μ (mu = m minuscola greca) indica il millesimo di millimetro. Il "nanomètro" (nm) è il millesimo di μ, cioè il milionesimo di mm.

nanometri o nm).

In una qualunque onda trasversale, dunque, la vibrazione ha luogo in una direzione perpendicolare alla direzione di propagazione; tale vibrazione non avviene allo stesso modo in tutte le direzioni perpendicolari alla propagazione, cioè la vibrazione non presenta una simmetria di rotazione attorno alla direzione di propagazione. Questa mancanza di simmetria costituisce la "polarizzazione" dell'onda.

Considerando separatamente ogni onda trasversale in un fascio di radiazione, la vibrazione avviene in una sola direzione perpendicolare alla propagazione, per cui ogni singola onda è "totalmente polarizzata".

Se una sorgente ottica produce (come è il caso per la maggioranza delle sorgenti reali) un grande numero di onde le cui direzioni di vibrazione sono caoticamente disposte, si ha nel fascio di radiazione complessivo una distribuzione statisticamente uniforme di quelle direzioni, e tale fascio si chiamerà "non polarizzato" o "naturale".

Un fenomeno di polarizzazione nel fascio "naturale" si verifica quando si introduce nel suo percorso qualche elemento che produca una asimmetria attorno alla direzione di propagazione.

Secondo la rappresentazione delle radiazioni ottiche ispirata ai princìpi delle teorie elettromagnetiche, anche la vibrazione ottica è dunque trasversale ed è data anch'essa da due vibrazioni fra loro perpendicolari, una elettrica ed una magnetica. Nella radiazione ottica polarizzata, la direzione del vettore elettrico (vettore di Fresnel[2]) e la direzione di propagazione (D in fig. 1)giacciono in un piano che è il "piano di vibrazione" (V in fig. 1). Il piano perpendicolare a quello di vibrazione, pure esso passante per la direzione di propagazione, si chiama "piano di polarizzazione (P in figura).

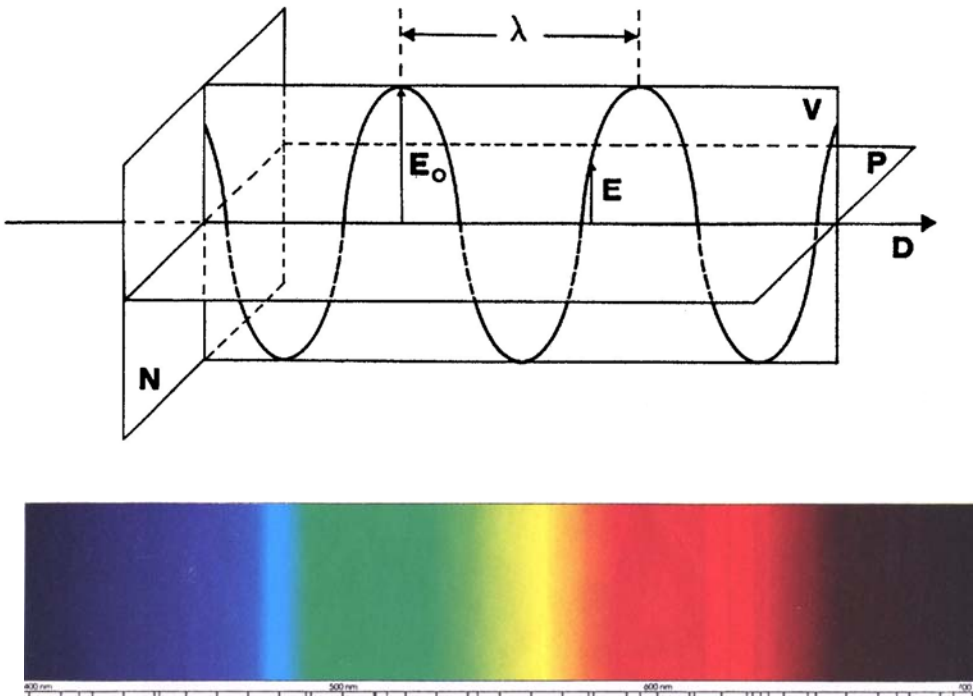


Fig. 1 - Schema di onda ottica linearmente polarizzata. **D** è la direzione di propagazione; **V** è il piano di vibrazione contenente il vettore elettrico; **P** è il piano di polarizzazione, perpendicolare al precedente, e passante anch'esso per la direzione di propagazione; **N** è un piano perpendicolare alla direzione di propagazione, sul quale la proiezione della radiazione polarizzata è costituita da un segmento.
In basso, la porzione "ottica" dello spettro delle radiazioni elettromagnetiche, con λ compresa fra 400 e 700 nm.

[2] Augustin FRESNEL (1788 - 1827), grande fisico francese (pronuncia Frenèl).

Se i vettori elettrici dei vari fotoni[3] componenti un fascio sono tutti paralleli, la radiazione si dice "**linearmente polarizzata**" o "totalmente polarizzata"; si dice invece "parzialmente polarizzata" se una percentuale qualunque dei fotoni oscilla in altre direzioni. Supponiamo per ora che la differenza di fase fra i vari fotoni di un fascio non abbia un valore costante (radiazione "incoerente").

Nella radiazione "naturale", dal punto di vista matematico, tutto avviene come se esistessero due sole vibrazioni elettriche di eguale ampiezza fra loro perpendicolari: il rapporto di fase fra queste due vibrazioni essendo però continuamente, rapidamente e caoticamente variabile, si ha lo stesso risultato che si avrebbe ammettendo un numero infinito di vibrazioni risultanti, ottenute per interferenza delle onde elementari, con direzioni di vibrazione casualmente distribuite.

Un corpo capace di alterare lo stato di polarizzazione di un fascio (polarizzato o non) che lo attraversi si dice "birifrangente". Questa proprietà ottica, di cui vedremo fra breve i dettagli, è legata alla struttura intima del corpo, cioè al fatto che gli elementi che lo costituiscono (molecole micelle, ecc.) sono disposti ordinatamente; quando il vettore elettrico di un fotone che si propaghi in quel corpo incontra in direzioni diverse una diversa distribuzione di particelle, si ha un diverso indice di rifrazione e/o un diverso assorbimento.

Il valore dell'indice di rifrazione e del coefficiente di assorbimento non sono dunque costanti in un corpo birifrangente ma dipendono dal piano di vibrazione considerato: per ogni possibile direzione di propagazione, essi sono massimi in un certo piano e minimi in un altro piano di vibrazione perpendicolare al precedente.

Quando un corpo presenta una o più proprietà il cui valore è variabile a seconda della direzione considerata, lo si chiama "anisòtropo", e quindi i corpi birifrangenti per la loro variabilità di indice e/o di coefficiente di assorbimento sono da considerare anisòtropi[4].

Ma se l'indice (e quindi la velocità di propagazione delle radiazioni) è massimo per una certa direzione di vibrazione e minimo per un'altra, ciò significa che qualunque fotone incidente sul corpo birifrangente potrebbe propagarsi con infinite direzioni di vibrazione fra le quali ve ne sono due per cui si avrà velocità di propagazione massima e minima. Per il principio di Fermat[5], semplificando, la radiazione che si propaga da un punto ad un altro sceglie sempre il percorso massimo e quello minimo; quindi, di tutti gli infiniti piani possibili di vibrazione esistenti in un corpo birifrangente e relativi ad una certa direzione di propagazione, la radiazione userà solo quei due per cui la velocità (o l'indice) è massima e minima.

Ne consegue che la radiazione che si propaga in un corpo birifrangente si riduce a due soli fasci i cui piani di vibrazione, nel caso più generale, sono perpendicolari fra loro e giacciono nelle due direzioni per cui il corpo birifrangente presenta l'indice massimo e minimo possibile.

Allora, qualunque fascio che incida su un corpo birifrangente si sdoppia in due fasci polarizzati linearmente, le cui velocità di propagazione sono la massima e la minima possibile. Questa è la "doppia rifrazione" o "birifrazione" o "birifrangenza", che si verifica in tutti i corpi otticamente anisotropi; ecco perché tali corpi sono detti "birifrangenti".

Quando i due fasci polarizzati emergono dal corpo birifrangente, si trovano sfasati fra loro (a causa della diversa velocità con cui si sono propagati nel corpo stesso) e possono avere direzioni di propagazione diverse.

In un corpo NON birifrangente, l'indice ed il coefficiente di assorbimento hanno lo stesso

---

[3] Per "fotone" indichiamo qui la singola onda elementare che fa parte di un fascio di radiazione.

[4] L'anisotropia, appena definita, si distingue perciò dalla **inomogeneità**, la quale si definisce come una diffenza di proprietà di un corpo **da punto a paunto**, indipendentemente dalla direzione. Un corpo anisotropo può essere omogeneo ed un corpo isotropo può essere inomogeno: basta che le sue proprietà non varino con la direzione.

[5] Pierre FERMAT (1608 - 1665), matematico francese, forse il fondatore del calcolo differenziale (pron. Fermà).

valore per tutte le direzioni, cioè il corpo è otticamente "isotropo" e nessun fascio incidente è birifratto; il corpo è "monorifrangente" ed i fenomeni di rifrazione in esso obbediscono alle leggi ordinarie della rifrazione.

Sono isotropi e monorifrangenti i corpi amorfi, cioè privi di struttura cristallina, come il vetro, e non sottoposti a tensioni meccaniche o campi elettrici o magnetici, ed inoltre i cristalli del sistema monometrico, i liquidi, i gas.

Sono invece anisotropi e birifrangenti i corpi sottoposti a tensioni ed i corpi cristallizzati nei sistemi dimetrici e trimetrici, oppure i corpi che non hanno un'apparenza esterna di cristalli, ma ne hanno l'intima organizzazione, come certe strutture viventi.

Nei corpi "birifrangenti" l'indice può essere massimo (o minimo) per tutti i piani di vibrazione passanti per una certa **direzione previlegiata** di propagazione, nonché minimo (o massimo) per una direzione perpendicolare alla precedente e poi variabile, fra un massimo ed un minimo, per tutte le altre direzioni di propagazione. La differenza fra indice massimo e minimo (la "birifrazione" in senso generico) assume il massimo valore per tutte le direzioni di propagazione perpendicolari alla direzione previlegiata. In altre parole, vi è una direzione di vibrazione con indice massimo (o minimo), e tutte le direzioni perpendicolari ad essa presentano un indice costante diverso dal precedente.

Ne consegue che un'onda che si propaghi parallelamente alla direzione previlegiata non viene polarizzata né birifratta poiché nel piano perpendicolare ad essa (in cui possono giacere le sue vibrazioni) l'indice è costante quale che sia la direzione di vibrazione considerata. Questa direzione previlegiata è detta **asse ottico** del corpo[6] ed è parallela ad un asse di simmetria della struttura cristallina di esso. L'asse ottico è facilmente riconoscibile poiché nella sua direzione il corpo si comporta come monorifrangente; in tutte le altre direzioni il corpo è birifrangente.

Si comportano a questo modo i corpi birifrangenti che cristallizzano nei sistemi dimetrici (trigonale, tetragonale, esagonale). Essi vengono detti **uniassici** per la presenza di un solo asse ottico[7].

Altri corpi cristallini invece, che sono classificati nei sistemi cristallografici trimetrici (rombico, monoclino e triclino) presentano una direzione previlegiata di propagazione per cui si può avere il minimo o massimo indice, ma perpendicolarmente ad essa si ha un piano in cui l'indice non è costante; vi è dunque una direzione di indice massimo, una di indice minimo perpendicolare alla precedente ed una terza di indice intermedio, perpendicolare alle due precedenti. Lungo la direzione previlegiata il corpo non è quindi monorifrangente, ma vi sono due direzioni giacenti in un piano passante per la direzione previlegiata, simmetricamente disposte ai lati di quella stessa direzione, in cui il corpo si comporta come monorifrangente; questo fenomeno si spiega in base allo studio geometrico delle proprietà del corpo. Si hanno così due assi ottici lungo i quali non avviene birifrazione e perciò i cristalli trimetrici sono chiamati "biassici". Il cosiddetto **angolo fra gli assi ottici**, indicato con $2V$, ha valore diagnostico per il riconoscimento delle specie mineralogiche.

In un corpo birifrangente uniassico i due fasci originati per birifrazione di un fascio incidente non sono uguali: uno si propaga con indice che non varia al variare della direzione (di propagazione) ed obbedisce quindi alle leggi ordinarie della rifrazione: si chiama **raggio ordinario**; il suo indice (costante al variare della direzione) si indica con $\mathbf{n_o}$; l'altro fascio presenta indice variabile e non obbedisce quindi alle leggi della rifrazione: si chiama **straordinario**; il suo indice ($\mathbf{n_S}$) varia fra due valori estremi di cui il più alto (o il più basso) coincide con $\mathbf{n_o}$; la differenza $\mathbf{n_S - n_o}$ può quindi variare da zero (nelle direzioni in cui il valore estremo di $\mathbf{n_S}$ coincide con $\mathbf{n_o}$) ad un massimo (nelle direzioni in cui $\mathbf{n_S}$ assume l'altro valore estremo[8], che più si discosta da $\mathbf{n_o}$). Il valore assoluto massimo della differenza

---

[6] Si noti che l'asse ottico non è una linea ma solo una direzione.

[7] Si può dire anche "monoassici".

[8] Questo valore estremo di n_S è detto **indice principale straordinario**.

$\mathbf{n_s - n_o}$ si chiama **potere di birifrazione** o semplicemente **birifrazione**[9] del corpo uniassico. Il valore $\mathbf{n_s - n_o}$ può essere positivo o negativo a seconda che il valore estremo di $\mathbf{n_s}$ sia maggiore o minore di $\mathbf{n_o}$; vedremo che, in base a questo valore di $\mathbf{n_s - n_o}$, i cristalli sono detti **positivi** o **negativi**.

Nei corpi birifrangenti biassici entrambi i raggi birifratti sono **straordinari** nel senso che il loro indice è sempre variabile con la direzione di propagazione o di vibrazione. Nessuno di questi raggi **straordinari** obbedisce quindi alle leggi abituali della rifrazione. Si chiama $\mathbf{n_\gamma}$ il massimo valore possibile dell'indice in tali corpi ed $\mathbf{n_\alpha}$ il minimo possibile. La differenza $\mathbf{n_\gamma - n_\alpha}$ esprime il potere di birifrazione del corpo biassico.

2 - CAUSE DELLA BIRIFRAZIONE

Se si trovano in due direzioni diverse di un corpo due indici, cioè due velocità di propagazione diverse, ciò significa che il vettore elettrico della vibrazione incontra in quelle direzioni proprietà diverse, e cioè una diversa natura, o una diversa distribuzione o un diverso orientamento delle particelle elementari costituenti il corpo (fig. 2).

Si presuppone quindi che il corpo birifrangente presenti una distribuzione ordinata nello spazio delle sue particelle (micelle, molecole, atomi, ioni, ecc.). Questa è la ragione per cui i corpi allo stato cristallino sono birifrangenti: le particelle sono ordinate in un **reticolo cristallino**, cioè sono disposte secondo i nodi di una rete a tre dimensioni e sono orientate sempre allo stesso modo in questa struttura. Fanno eccezione i cristalli del sistema monometrico, in cui il reticolo cristallino presenta maglie elementari cubiche e non vi sono elementi di anisotropìa nella struttura delle molecole.

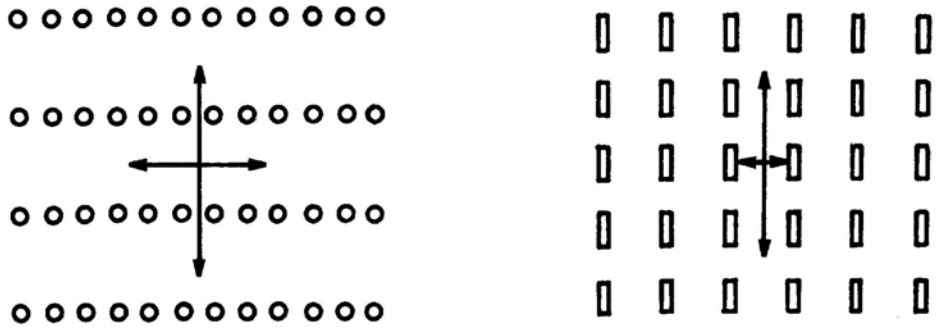


Fig. 2 - A sinistra: Schema di corpo birifrangente in cui le particelle elementari sono in sé stesse isotrope, ma diversamente distribuite a seconda della direzione considerata. A destra: Schema di corpo birifrangente in cui l'anisotropia è dovuta all'orientamento preferenziale di particelle che in se stesse sono anisotrope, anche se uniformemente distanziate.
Le frecce indicano le direzioni di vibrazione per cui l'indice è massimo o minimo (direzioni previlegiate).

Nei corpi cristallini birifrangenti l'anisotropìa è **primaria** e **di struttura**, cioè dovuta all'intima struttura del corpo, ed indipendente da agenti esterni. Ma l'anisotropia può essere anche **di orientamento** cioè dovuta alla presenza di particelle di forma allungata, in sé stesse anche isotrope, ma orientate con direzione preferenziale ed immerse in un mezzo isotropo di indice diverso. L'orientamento preferenziale delle superfici di contatto fra particelle e mezzo

[9] Si dice anche **potere birifrangente** o **potenza birifrattiva**.

di inclusione crea l'anisotropia ottica.

Vi può essere anche un'anisotropia **indotta** in un corpo isotropo, cioè provocata dallo stabilirsi di tensioni orientate interne che creano un'anisotropia per l'azione delle forze orientate sulle proprietà meccaniche ed ottiche del corpo. Si parla di **fotoelasticità** . Questo fenomeno fu scoperto da Brewster[10]; esso si può verificare anche in liquidi soggetti a forze orientate (effetto Maxwell) quando le molecole del liquido sono in sé stesse anisotrope e vengono orientate dalle forze applicate. Se l'anisotropia indotta è temporanea, si parla propriamente di fotoelasticità; se l'effetto si prolunga anche al cessare della forza esterna, vale a dire è permanente, si può parlare di **fotoplasticità**. Quasi tutti gli oggetti fabbricati con resine sintetiche estruse a caldo mostrano una birifrazione permanente dovuta alle tensioni interne "congelate" durante il rapido e non omogeneo raffreddamento cui il materiale liquido e caldo va incontro quando viene iniettato nello stampo.

Altro caso interessante di corpi isotropi con birifrazione indotta da tensioni meccaniche è costituito da materiali plastici organici trafilati o laminati, come le fibre tessili. Dopo la trafila o la laminazione, il materiale viene raffreddato ed indurisce, e le tensioni indotte rimangono permanenti nel materiale. Se il materiale è costituito da molecole, macromolecole o micelle non isotrope, l'operazione di trafila può provocare un orientamento preferenziale delle molecole.

Anche un campo elettrico può rendere debolmente birifrangente un liquido od un gas (effetto Kerr[11]); effetto analogo, dovuto ad un campo magnetico, fu scoperto da Cotton-Mouton e da Voigt.

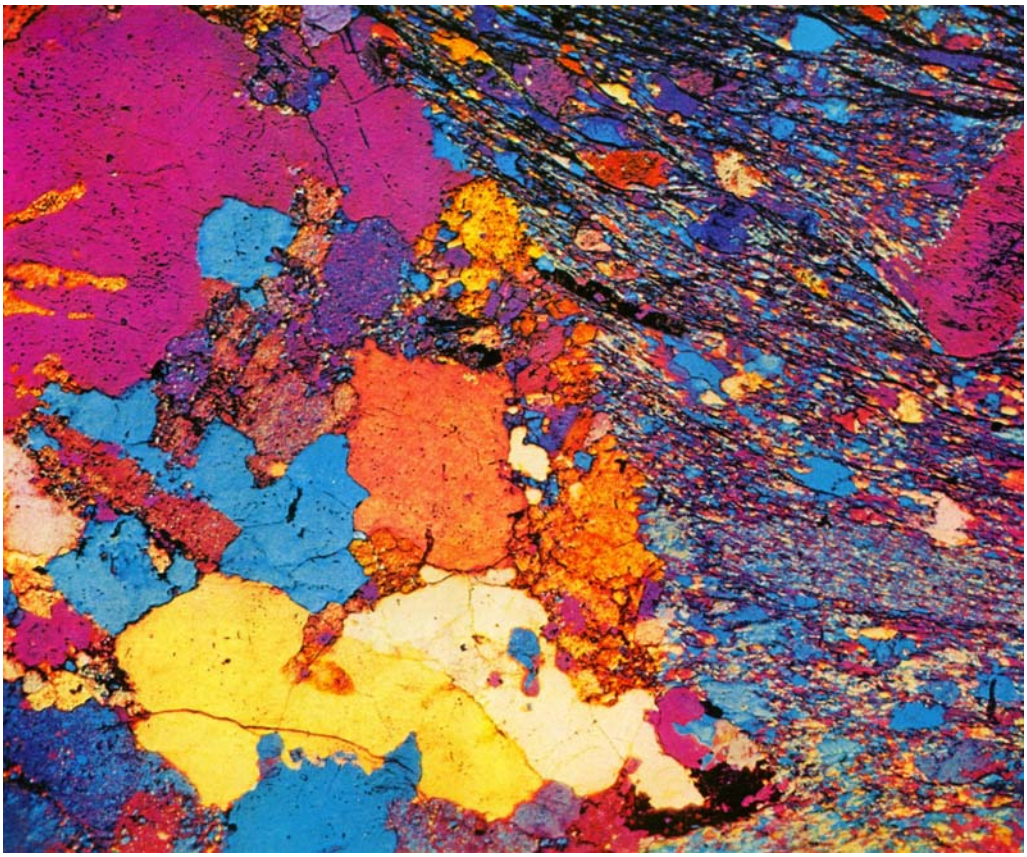


Fig. 3 - Sezione sottile di conglomerato Algonchiano della Turingia, osservato a Nicol incrociati. I colori sono

[10] Sir David BREWSTER (1781 – 1868), (pronuncia: Devid Brùuste), grande ottico inglese, benché oppositore della teoria ondulatoria che ormai si era affermata ai suoi tempi.

[11] John KERR (1824 – 1907), fisico scozzese.

“di interferenza”, dovuti alla birifrazione dei singoli granuli cristallini della roccia. L’oggetto in sé stesso è quasi incolore. 20 ingrandimenti. (Da: “Jena Review”, N° 4 / 1966, Veb Carl ZEISS, Jena)

3 - LA BIRIFRAZIONE degli OGGETTI BIOLOGICI e NON BIOLOGICI

Si è già detto che sono birifrangenti i corpi isotropi sottoposti a tensioni e quelli cristallizzati nei sistemi dimetrici e trimetrici.

Corpi cristallini inorganici si trovano come prodotti artificiali nella ricerca e nell’industria chimica, e come prodotti naturali nella stragrande maggioranza delle rocce e dei loro derivati, come polveri, sabbie, sedimenti fluviali, lacustri e marini, ecc. (fig. 3).

Ma anche molti esseri viventi contengono cristalli isolati o masse microcristalline non viventi: cristalli costituiti da prodotti di rifiuto, coloranti, pigmenti, ecc. in molti tessuti vegetali, nelle urine degli animali, in certe affezioni patologiche; masse microcristalline nei gusci e scheletri calcarei o silicei di Protozoi, Poriferi, Celenterati, Echinodermi, Anellidi, Crostacei, Molluschi, Vertebrati (fig. 4).

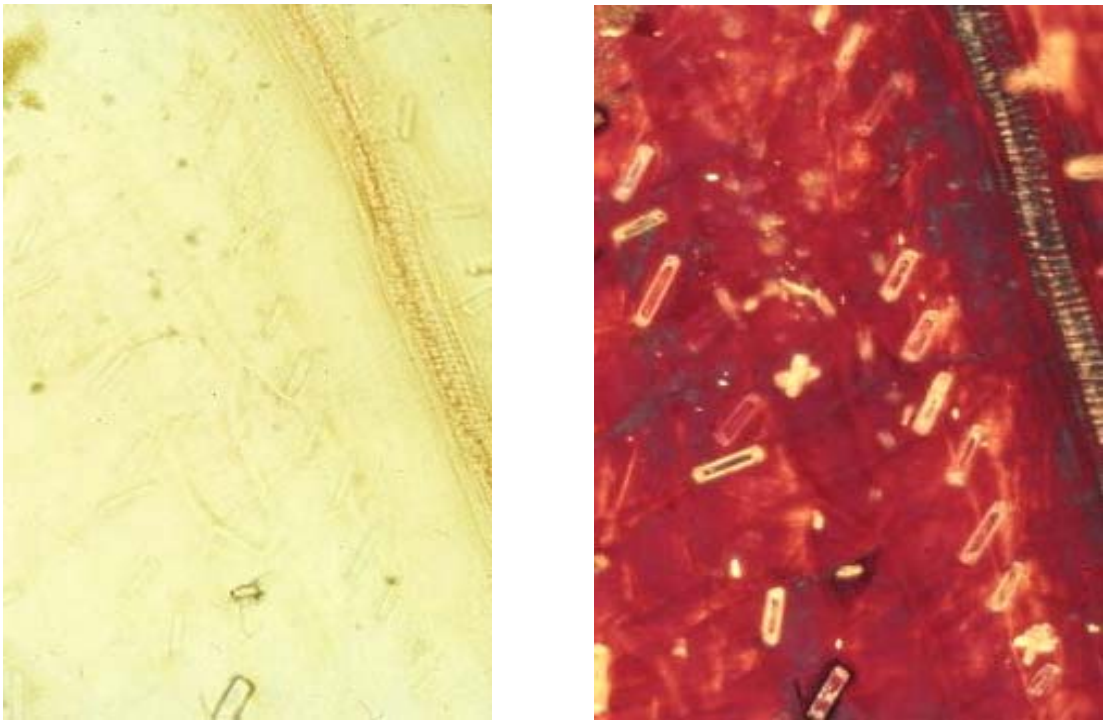


Fig. 4 - Scaglia (catafillo papiraceo) esterna del bulbo di cipolla osservata in condizioni normali, cioè in fondo chiaro (a sinistra) ed a Nicol incrociati con compensatore Rosso di 1° ord. (a destra). 140 : 1.
In radiazione polarizzata appaiono con vivo contrasto i cristalli di ossalato di calcio contenuti nelle cellule epidermiche morte ed alcune trachee con ispessimenti spiralati di lignina. La variabilità dei colori di fondo è dovuta alle differenze di spessore della scaglia, e quindi alle sue differenze di potere birifrattivo.

Cristalli organici artificiali si incontrano spesso nella ricerca e nell’industria chimica, farmaceutica, ecc. (fig. 5).

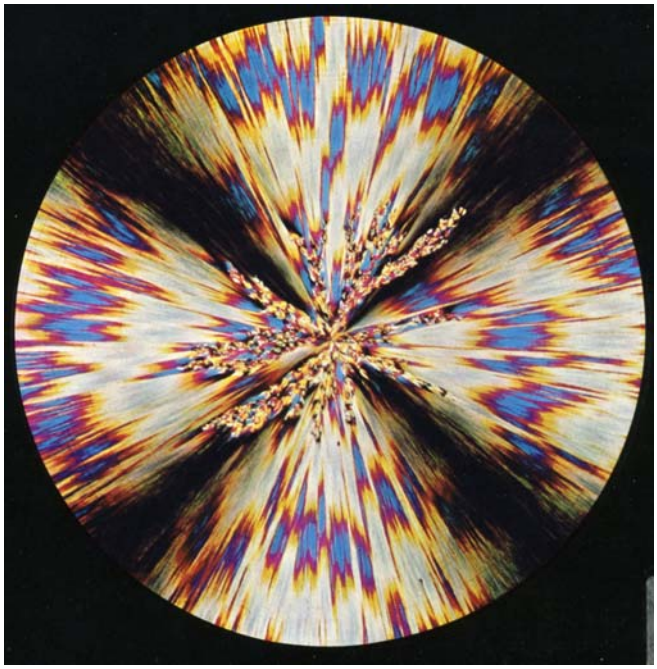


Fig. 5 - Gruppo di cristalli di acido ippurico formatisi per raffreddamento della sostanza fusa, osservati a Nicol incrociati. 70 : 1. La croce nera indica le zone dell'agglomerato cristallino in cui i cristalli elementari aghiformi sono orientati con le loro direzioni previlegiate parallele a quelle dei Nicol, in modo da trovarsi in posizione di estinzione. (Da: Zeiss Informazioni, 61, 1966, Carl Zeiss, Oberkochen)

Campo interessante è lo studio della struttura dei metalli e loro leghe (in episcopia, vedi il § 9), dei materiali ceramici, ecc.

Molte strutture viventi sono birifrangenti per la disposizione orientata delle macromolecole o delle micelle che li costituiscono. Si tratta di un'organizzazione submicroscopica confrontabile con quella dei cristalli.

Il discorso vale in particolare per le strutture pellicolari (membrane cellulari e nucleari con strati di molecole orientate di lipidi, ecc.) e per le strutture fibrillari: fibre e fibrille nervose, connettivali, muscolari, ecc. Sono birifrangenti tutte le formazioni cornee, cheratinizzate, ecc. (peli, unghie, capelli, strato corneo dell'epidermide), gli esoscheletri chitinosi di molti invertebrati, ecc.

Ben nota la forte birifrazione di molti componenti dei tessuti e fibre vegetali, come cellulosa, lignina (fig. 4), amido, ecc. (fig. 6).

Si ricordino gli ispessimenti di lignina dei vasi legnosi e librosi (fig. 4), gli elementi sclerenchimatici, ecc. Anche la struttura macromolecolare degli acidi nucleici presenti nel nucleo e nel condrioma produce una lieve birifrangenza; fortemente birifrangenti sono i tessuti mineralizzati, ossa (fig. 7), denti, ecc.

Nel caso delle strutture biologiche fibrillari proteiche vi è una anisotropia "di struttura" per la forma allungata delle macromolecole e "di orientamento" per essere le fibrille più o meno parallele ed immerse in un mezzo di diverso indice. Le due anisotropìe sono spesso concordi di segno ed i loro effetti si sommano; in altri casi si possono avere effetti di segno opposto che si elidono parzialmente, come avviene per le nucleoproteine.

Nel caso di strutture biologiche fibrillari l'identificazione dell'asse ottico può essere assai difficoltosa, per cui tutti i fenomeni ottici in esse vengono riferiti alla direzione di allungamento della struttura.

Ricordiamo infine le proprietà polarizzanti dei grassi ed altri prodotti dell'attività cellulare. Per le loro proprietà ottiche, si studiano assai bene le strutture utilizzate come fibre tessili naturali (peli animali o vegetali, fibre legnose vegetali, ecc.) oltre alle fibre artificiali già ricordate.

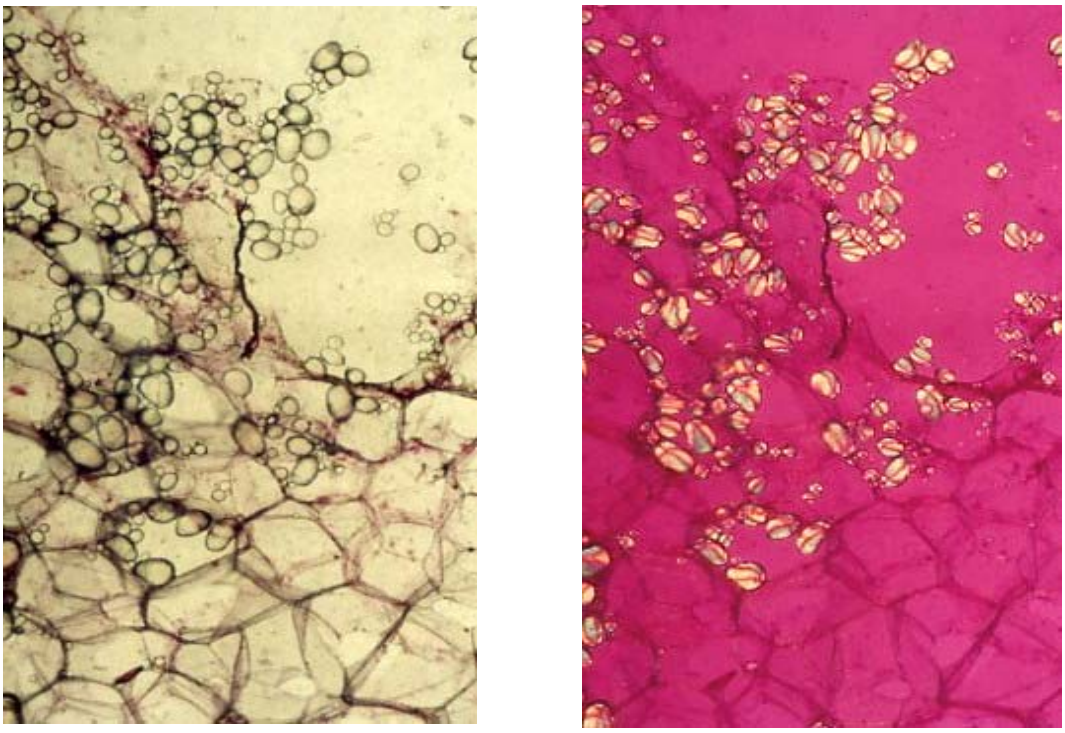


Fig. 6 - Granuli di amido in una sezione sottile di tubero di patata, osservati in campo chiaro (a sinistra) ed a Nicol incrociati con compensatore Rosso di 1° ord. (a destra). 100 : 1.
Si noti il contrasto con cui appaiono i granuli di amido in radiazione polarizzata. In ogni granulo si osserva una "croce di Malta" scura dovuta non al percorso conoscopico (vedi il § 7), ma alle stesse cause descritte nella fig. precedente; qui non si tratta di cristalli aghiformi, ma delle molecole di amido, che sono allungate, e quindi anisotrope, perché formate da catene polimeriche di glucosio.

Per le loro proprietà polarizzanti, si riconoscono assai bene i frammenti cristallini di quarzo inglobati nei tessuti polmonari dei malati di silicosi.

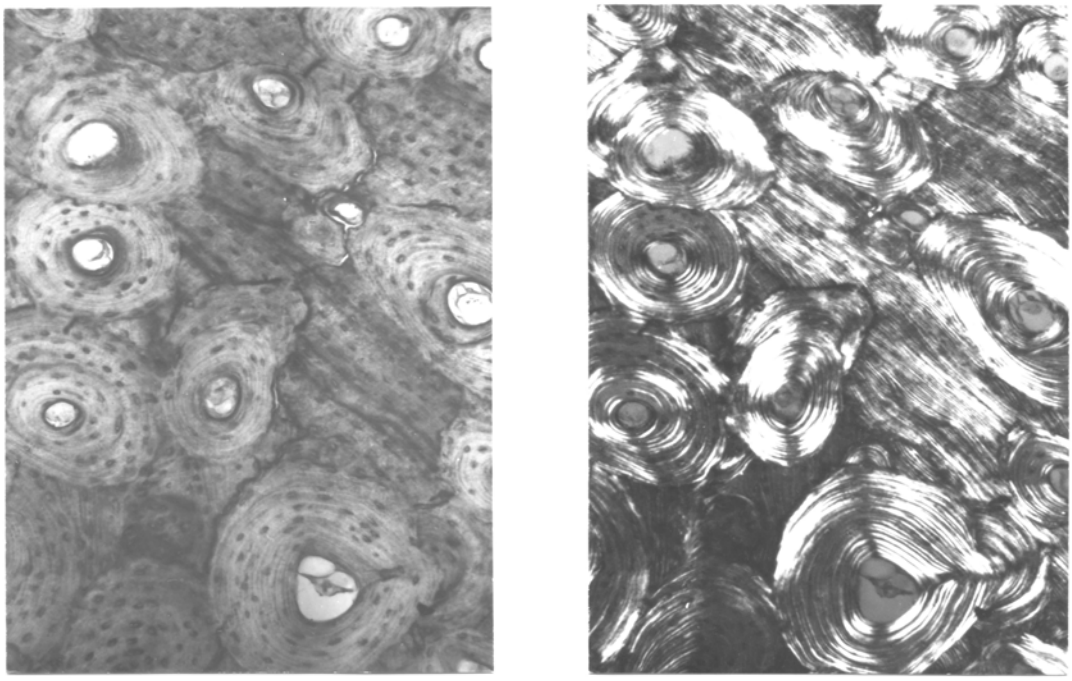


Fig. 7 - Sezione di tessuto osseo (femore umano) osservata in campo chiaro (a sinistra) ed a Nicol incrociati (a destra). 100 : 1.
L'osservazione in radiazione polarizzata mette bene in evidenza la struttura lamellare del tessuto e la

disposizione concentrica delle lamelle birifrangenti attorno ai "canali di Havers". Ogni sistema di lamelle concentriche mostra una croce di Malta, dovuta all'andamento circolare delle lamelle (vedi le didascalie delle due figure precedenti): in corrispondenza dei bracci della croce le direzioni previlegiate delle lamelle sono parallele alle sezioni principali dei Nicol.

4 - LA POLARIZZAZIONE per RIFLESSIONE

Quando una radiazione attraversa la superficie di separazione fra due corpi trasparenti isotropi viene parzialmente riflessa e parzialmente trasmessa. Il rapporto fra le intensità delle due parti dipende dall'angolo d'incidenza, dall'indice dei due mezzi trasparenti e dallo stato di polarizzazione della radiazione incidente.

All'atto della riflessione di un fascio, sia la porzione trasmessa che quella riflessa sono decomposte in due fasci polarizzati ad angolo retto fra loro; normalmente la fase dei due fasci trasmessi è identica e la loro ampiezza è assai simile, per cui è difficile scorgere lo stato di polarizzazione della parte trasmessa; inoltre i due fasci rifratti sono entrambi "ordinari", cioè si propagano collo stesso indice e percorrono lo stesso cammino: NON SI HA BIRIFRAZIONE; si rivela il fenomeno solo poiché i due fasci non hanno in genere ampiezza uguale ed il fascio risultante è parzialmente polarizzato: l'ampiezza della vibrazione presenta valori massimo e minimo in due direzioni perpendicolari fra loro. Dunque, tranne che per incidenza zero, un fascio trasmesso da un corpo isotropo è parzialmente polarizzato (non birifratto), nel senso che la sua ampiezza non è la stessa per tutti i piani di vibrazione.

La porzione riflessa è anch'essa decomposta in due fasci polarizzati con la stessa fase e lo stesso percorso, i cui piani di vibrazione giacciono parallelamente (fascio **p**) e perpendicolarmente (fascio **s**[12]) al piano d'incidenza. L'ampiezza di queste due componenti riflesse varia però in misura maggiore che non in trasmissione ed è data dalle equazioni di Fresnel:

Ampiezza della componente **p** = $tg^2 (i - r) / tg^2 (i + r)$ (1)

Ampiezza della componente **s** = $sen^2 (i - r) / sen^2 (i + r)$ (2)

in cui **i** = angolo di incidenza ed **r** = angolo di rifrazione.

Si vede che, quando **i + r = 90°**, il raggio riflesso e quello rifratto sono perpendicolari fra loro e l'ampiezza della componente **p** è nulla[13], per cui il raggio riflesso è totalmente polarizzato, ed il suo piano di vibrazione è perpendicolare al piano d'incidenza.

Il valore di **i** per cui avviene questo fenomeno si chiama **angolo di Brewster (i_b)**. Il valore di tale angolo si ricava dalla formula: $tg\, i_b = n_2 / n_1$ (3)

in cui n_1 ed n_2 sono gli indici dei due mezzi attraverso cui si propaga la radiazione. Quando la riflessione avviene secondo l'angolo di Brewster, una semplice superficie di qualunque pezzo di vetro diviene un perfetto polarizzatore.

Se il fascio incidente è polarizzato, esso si decompone ancora in due fasci rifratti e due riflessi, che vibrano sempre paralleli e perpendicolari al piano d'incidenza. Se però il piano di vibrazione del fascio incidente è perpendicolare al piano di uno dei due fasci riflessi o rifratti, quest'ultimo fascio non si forma poiché nel suo piano la proiezione del vettore incidente è nulla.

Se il piano di vibrazione della radiazione polarizzata incidente è inclinato rispetto al piano d'incidenza, quella radiazione produce due fasci trasmessi polarizzati ad angolo retto, ma il fascio che vibra parallelamente al piano d'incidenza è trasmesso più di quello che vibra

---

[12] Dal tedesco: senkrecht = perpendicolare.

[13] La tangente di $i + r = 90°$ ha valore infinito e si trova al denominatore della formula (1).

perpendicolarmente poiché nella porzione del fascio riflessa è prevalente la porzione **s** che si sottrae al fascio trasmesso[14]; quindi, all'uscita dal corpo trasparente, i due fasci trasmessi si ricombinano in un unico fascio polarizzato linearmente (fig. 8), ma poiché l'ampiezza delle due componenti trasmesse è stata alterata, la risultante è ruotata rispetto alla radiazione incidente. Questa rotazione spiega il fenomeno seguente.

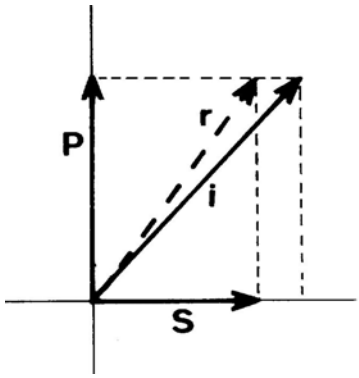


Fig. 8 - Schema illustrante la rotazione del piano di vibrazione di una radiazione linearmente polarizzata in seguito alla rifrazione in un mezzo isotropo. Direzione di propagazione perpendicolare al foglio. **i** è la proiezione del vettore della radiazione incidente che si decompone in due vettori in fase **P** ed **S** di cui **P** è parallelo al piano d'incidenza, **S** è perpendicolare. Di questi due fasci però **S** è trasmesso in minor misura (poiché è prevalentemente riflesso); quando i due fasci **P** (meno attenuato) ed **S** (più attenuato) si ricombinano all'uscita del corpo isotropo, danno un vettore risultante **r** ruotato rispetto ad **i** . La direzione di **P** è quella del piano di incidenza.

Quando un fascio parallelo o conico centrato di radiazione totalmente polarizzata incide sulla superficie sferica di una lente[15], l'angolo fra il piano di vibrazione ed il piano d'incidenza varia da 0° per un diametro della lente (quello parallelo al piano di vibrazione) a 90° per il diametro perpendicolare al precedente, assumendo valori intermedi per posizioni intermedie; i piani di vibrazione dei fasci trasmessi sono legati all'orientamento del piano d'incidenza, che è variabile da un punto all'altro della lente (è legato alla curvatura della superficie sferica di essa). Allora, quando i raggi trasmessi si ricombinano all'uscita dalla lente in un fascio polarizzato, la loro ampiezza essendo stata alterata come si è visto, il raggio risultante vibra in un piano leggermente ruotato rispetto al raggio incidente; il senso della rotazione è lo stesso per quadranti opposti del fascio, ma è opposto per quadranti contigui (fig. 9).

[14] Dall'esame delle equazioni di Fresnel risulta che la componente riflessa il cui vettore elettrico è parallelo al piano d'incidenza ha sempre ampiezza inferiore alla componente "perpendicolare", e si annulla per un angolo d'incidenza pari all'angolo di Brewster.

[15] Viaggiando parallelamente all'asse della lente stessa.

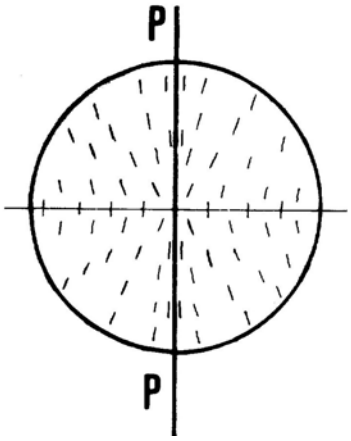


Fig. 9 - Schema della rotazione del piano di polarizzazione della radiazione incidente nella pupilla di un sistema convergente. **P – P** è la direzione di vibrazione della radiazione incidente. L'inclinazione del piano di vibrazione dei raggi trasmessi è stata esagerata per chiarezza.

Il risultato è che, illuminando un sistema convergente (ad esempio un condensatore od un obbiettivo da microscopio, come avviene con i normali metodi di illuminazione) con un fascio totalmente polarizzato, si conserva lo stato del fascio incidente in due diametri della lente, parallelo e perpendicolare al piano di vibrazione del fascio incidente, mentre negli altri punti quello stato è più o meno alterato; osservando il sistema con un analizzatore incrociato (vedi oltre), si vedrà una croce nera che delimita quattro settori chiari; i bracci della croce coincidono coi due diametri della lente che sono parallelo e perpendicolare al piano di vibrazione della radiazione incidente (fig. 10).

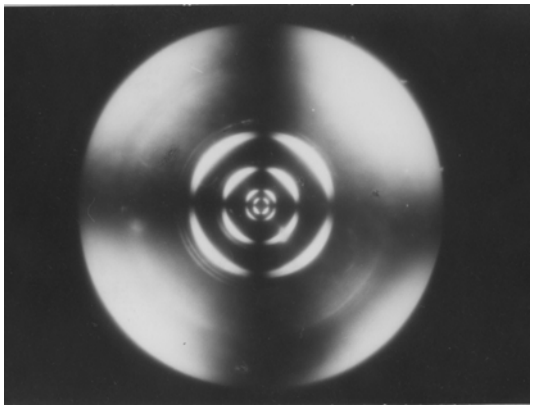


Fig. 10 - Come appare in realtà la pupilla d'uscita di un obbiettivo acromatico da microscopio osservando fra Nicol incrociati, in conoscopìa. Se non si verificasse una rotazione del piano di polarizzazione della radiazione emergente dal polarizzatore, la pupilla dovrebbe apparire tutta nera, supponendo che i vetri usati per la costruzione dell'obbiettivo siano privi di tensioni. Le lunette chiare al centro sono dovute a doppi riflessi sulle superfici delle lenti ("catadiottriche") che accentuano la depolarizzazione della radiazione incidente.

Dunque, qualunque condensatore od obbiettivo, inserito nel percorso di un fascio polarizzato, ne altera lo stato, e ciò per effetto delle riflessioni sulle superfici vetro-aria. Il più semplice modo di ridurre questo inconveniente è di ridurre le riflessioni sulle superfici delle lenti con appositi trattamenti anti-riflettenti. Un altro accorgimento verrà descritto quando si parlerà del microscopio polarizzatore.

5 - PRODUZIONE della RADIAZIONE POLARIZZATA

Per molte applicazioni è necessario disporre di un dispositivo (**filtro polarizzante** o **polarizzatore**) capace di trasformare un fascio di radiazione naturale in un fascio totalmente e rettilineamente polarizzato. NB: il termine "rettilineamente" è già stato spiegato.

Da quanto si è detto, risulta che la semplice rifrazione e riflessione alla superficie di un corpo isotropo può dare una polarizzazione alla radiazione trasmessa o riflessa.

Per rifrazione, si è visto che la polarizzazione è sempre parziale per cui, volendo costruire un polarizzatore per rifrazione, occorre prevedere una successione di numerose lamine parallele i cui effetti si sommino. Questa soluzione non ha quasi applicazioni pratiche.

Per riflessione semplice, è possibile ottenere la polarizzazione completa (quando l'angolo d'incidenza è pari all'angolo di Brewster) ma la percentuale di radiazione riflessa è sempre di poche unità rispetto a quella incidente. Anche questo sistema ha scarse applicazioni.

Un fenomeno di interazione fra vettore elettrico della radiazione e reticoli metallici è sfruttato nei polarizzatori metallici, costituiti da sottilissimi fili od aghi o striscioline metalliche parallele su un supporto trasparente; il vettore elettrico parallelo alla direzione di allungamento degli elementi metallici viene quasi completamente assorbito. Questi polarizzatori non hanno applicazioni in microscopia.

Una applicazione classica è invece data da tutti i sistemi che sfruttano la birifrazione.

Il più noto, anche se oggi abbandonato per vari motivi, fra cui la scarsa disponibilità della materia prima, è il **prisma di Nicol**, così chiamato dal some del suo inventore[16] (fig. 11). In questo prisma, costituito da calcite limpida, il cosiddetto **Spato d'Islanda**, orientato opportunamente rispetto agli assi cristallografici, viene praticato un taglio obliquo con opportuna inclinazione e le due metà sono incollate con **Balsamo del Canada** (resina purificata di varie conifere del Nord America) il cui indice è 1,53 circa. Nella calcite il raggio ordinario ha indice 1,6585 e quello straordinario un indice minimo di 1,4864 (per la riga D del sodio) per cui, quando i due raggi incontrano lo strato diagonale di balsamo con opportuno angolo di incidenza, quello ordinario viene totalmente riflesso verso l'esterno e quello straordinario è invece trasmesso. Il raggio ordinario è poi assorbito dalla montatura.

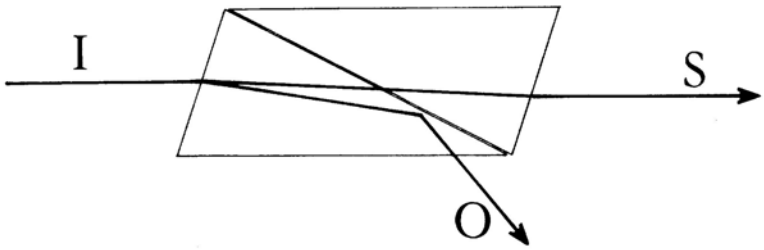


Fig. 11 - Schema di prisma di Nicol. **I** = raggio incidente; **S** = raggio straordinario trasmesso; **O** = raggio ordinario totalmente riflesso a livello dello strato di Balsamo del Canada.

Il prisma è costruito in modo che l'apertura del raggio incidente possa raggiungere il valore di 15° da una parte e dall'altra della direzione mediana; per angoli di incidenza superiori, il raggio ordinario non è più totalmente riflesso e viene trasmesso, oppure il raggio

[16] William NICOL, (1768 – 1852), fisico scozzese, noto per i suoi studi di ottica cristallografica.

straordinario non è trasmesso ma totalmente riflesso anch'esso. Questa limitazione nell'apertura del fascio che attraversa il prisma di Nicol è una delle ragioni del suo abbandono.

Oggi si continuano a chiamare "filtri di Nicol" o semplicemente "Nicol" i polarizzatori usati in microscopia, anche se costruiti con princìpi completamente diversi, ed anche noi useremo il termine "Nicol incrociati" o "Nicol paralleli" riferendoci genericamente ai filtri polarizzatori montati sul microscopio, qualunque ne sia la struttura.

Altri prismi di calcite che sfruttano lo stesso principio di quello di Nicol, e differiscono per la forma del prisma o la disposizione degli strati di Balsamo, sono quelli di Ahrens e di Glan-Thompson.

I prismi di Rochon e di Wollaston sono costituiti da due cunei di materiale birifrangente incollati in modo da avere le superfici di ingresso e di egresso del prisma complessivo parallele fra loro. I due cunei hanno gli assi ottici variamente incrociati in modo che ogni raggio incidente venga sdoppiato in due raggi che emergono dal prisma con direzioni assai diverse. Uno dei due raggi può così essere eliminato; entrambi sono totalmente polarizzati.

Anche questi prismi vengono raramente usati in microscopia, tranne applicazioni speciali (vedi la pubblicazione "MICROSCOPIA INTERFERENZIALE" dello stesso autore).

I filtri polarizzatori di gran lunga più usati in microscopia ed altri campi sono i cosiddetti **polaroidi**, di forma laminare, che sfruttano il fenomeno detto **dicroismo**.

Si chiamano **pleocroici** i cristalli la cui anisotropia si manifesta con una differenza di potere assorbente nelle varie direzioni di vibrazione. Nel caso più generale, di cristalli biassici, si avranno tre direzioni nel cristallo, ortogonali fra loro, spesso parallele con gli assi geometrici del cristallo, lungo le quali il potere assorbente od il colore del cristallo appare con valori estremi. Sono questi i **colori fondamentali**. Si constata il fenomeno osservando per trasparenza e ruotando il cristallo illuminato con radiazione polarizzata: se si usasse radiazione naturale si vedrebbe l'effetto simultaneo di radiazioni oscillanti in infinite direzioni e quindi un colore "medio" costante.

Può avvenire che il cristallo sia più o meno trasparente a seconda della direzione, oppure incoloro in una direzione e colorato in altre, oppure di colore variabile a seconda della direzione; si parla qui di direzioni di vibrazione. Ruotando l'oggetto pleocroico attorno alla direzione di propagazione della radiazione polarizzata incidente, si hanno per posizioni opposte dell'oggetto, ruotate di 180° fra loro, colori o valori di trasparenza uguali.

I cristalli biassici con tre colori fondamentali sono detti **tricroici**.

Nei cristalli uniassici il potere assorbente o il colore assumono un valore estremo parallelamente all'asse ottico ed un valore estremo opposto in tutte le direzioni perpendicolari al medesimo asse. Si hanno così due possibili colori estremi, con tutti i valori intermedi. Per questo motivo i cristalli pleocroici uniassici sono detti **dicroici**.

Un caso evidente di dicroismo è presentato da vari minerali naturali di cui il più noto è la tormalina: una lamina di tormalina tagliata non perpendicolarmente all'asse ottico (il fenomeno è più evidente se la lamina è parallela all'asse ottico) lascia passare quasi inalterato il raggio straordinario ed assorbe fortemente quello ordinario.

La lamina di tormalina trasforma dunque un fascio di radiazione naturale in un fascio polarizzato linearmente ma per il suo colore, che non è mai neutro, e per la difficoltà di ottenere cristalli grandi è raramente usata. In passato, si sono costruiti con la tormalina dei piccoli polariscopi a visione diretta detti "**pinzette a tormalina**" costituiti solamente da due lamine cristalline, senza lenti né altri accessori.

Una sostanza sintetica con proprietà analoghe è l'herapatite (solfato di iodochinina od altri sali della china, così chiamati dal loro inventore Herapath[17]); ma, data la difficoltà di ottenere cristalli sufficientemente grandi, si è adottato il sistema (E.H. Land, 1932) di immergere un enorme numero di cristallini di herapatite (lunghi circa 1 μ e larghi molto

[17] William Bird HERAPATH (1820 – 1868), medico e chimico inglese, che studiò a fondo gli alcaloidi della china.

meno) in un foglio di materia plastica, generalmente alcool polivinilico; sottoponendo il foglio a stiramento e magari a riscaldamento si ottiene l'orientamento parallelo di tutti i micro-cristalli, ed il complesso si comporta come un cristallo unico. Il dicroismo dell'herapatite è fortissimo; con spessori di pochi decimi di mm si ottiene l'estinzione completa del raggio ordinario, mentre quello straordinario è trasmesso per circa il 40% nel senso che in esso si ritrova il 40% dell'energia del raggio incidente. Questo valore di trasmissione è vicino al massimo possibile teorico poiché, analizzando la distribuzione dei vettori nel polarizzatore e trascurando tutte le perdite per riflessione e per assorbimento, è ovvio che ognuno dei due raggi birifratti non può contenere più del 50% dell'energia incidente.

Il colore dei polarizzatori a microcristalli di herapatite è leggermente verdastro. Essi vengono chiamati **di tipo microcristallino** o **tipo J** ed hanno il difetto che nel giro di pochi anni perdono una gran parte del loro potere polarizzante.

Fin dal 1938 essi sono stati quindi sostituiti da un tipo assai più duraturo chiamato **molecolare** o **tipo H** che si basa ancora sul dicroismo degli ioduri di chinino; si costruiscono partendo da un foglio di materia plastica che viene scaldato e stirato ed in genere fissato su un supporto plastico o di vetro; solo dopo, si tratta il foglio polivinilico con la sostanza dicroica. I polarizzatori molecolari sono quasi perfettamente neutri.

I fogli plastici con herapatite sintetica costituiscono la gran maggioranza dei polarizzatori del commercio e di quelli usati in microscopia. Questi **polaroidi** vengono costruiti anche per la regione dell'infrarosso. Uno dei loro vantaggi è di essere sottili (il prisma di calcite è sempre lungo qualche centimetro in direzione dell'asse) e di poter essere quindi sistemati in un punto qualunque dello strumento. Inoltre essi possono lavorare con fasci di apertura assai più elevata dei prismi di calcite, cioè con raggi più inclinati; si possono quindi disporre in certi punti del cammino ottico di un microscopio, ad esempio dopo l'oculare, dove l'apertura è elevata.

Il polaroide è un organo delicato poiché il supporto di plastica è tenero e lo si usa quindi incollato fra due lamine piano-parallele di vetro; esso rimane però sensibile alla temperatura poiché sia l'herapatite che il supporto plastico sono sostanze organiche poco stabili. Occorre quindi evitare il riscaldamento del polaroide[18] ponendo fra esso e la sorgente di radiazione almeno un filtro anti-calorifico.

Altro inconveniente dei polaroidi protetti fra lamine di vetro è che, prima o poi, si formano scollature fra foglio plastico e vetro ed il foglio plastico tende a raggrinzarsi.

Altri polarizzatori sono costituiti da fogli di plastica contenenti macro-molecole orientate di sostanze coloranti. Essi però funzionano solo per certe lunghezze d'onda ed incrociandoli (vedi oltre) si ottiene un fondo colorato invece che nero. Hanno scarse applicazioni.

6 - I FENOMENI della RADIAZIONE POLARIZZATA in MICROSCOPIA

6.1 - POLARIZZAZIONE ELLITTICA E CIRCOLARE

Supponiamo di illuminare un corpo birifrangente con un fascio collimato di radiazione ottica naturale. Ogni singola onda viene sdoppiata in (cioè equivale matematicamente a) due

[18] Il riscaldamento è particolarmente forte poiché il raggio ordinario è assorbito, invece di essere deviato come nei prismi di calcite.

onde polarizzate ad angolo retto fra loro, ma la radiazione incidente è incoerente, cioè costituita da un numero molto grande di onde con ogni possibile rapporto di fase, per cui nessun effetto visibile si produce essendo nel complesso le onde birifratte incoerenti e quindi non potendo esse interferire l'una con l'altra. Al massimo, se la radiazione incidente è obliqua rispetto all'asse ottico del cristallo, il fascio appare sdoppiato a causa del duplice valore dell'indice di rifrazione e quindi dell'angolo di rifrazione.

Se invece sul corpo birifrangente incide un fascio di radiazione polarizzata, si possono avere tre casi (supponiamo per semplicità che il fascio incidente incida perpendicolarmente alla superficie del corpo):

1) Il fascio incidente è parallelo all'asse ottico del cristallo (o ad uno degli assi): in un piano perpendicolare all'asse medesimo il valore dell'indice di rifrazione è costante per tutte le possibili direzioni di vibrazione, per cui il corpo si comporta come monorifrangente o isotropo. Non c'è birifrazione

2) Il fascio incidente è perpendicolare all'asse ottico del cristallo: per ragioni che non interessano in questa sede, il fascio non è sdoppiato in due fasci di diverso percorso, ma è sdoppiato in due fasci coincidenti, polarizzati totalmente in piani perpendicolari fra loro. Nei cristalli uniassici si ha in queste condizioni la massima differenza di indice cioè di velocità fra i due fasci birifratti. Nei cristalli biassici si hanno delle situazioni più complesse; comunque c'è birifrazione.

3) Il fascio incidente forma con l'asse ottico un angolo diverso da 0° e 90°: i due fasci birifratti seguono cammini non coincidenti e sono ancora totalmente polarizzati in piani perpendicolari fra loro. La differenza di velocità fra i due fasci è inferiore a quella massima.

Ebbene, nei casi 2) e 3) i due fasci birifratti viaggiano nel cristallo con diversa velocità, e quindi emergono dal cristallo con una certa **differenza di fase.** Questa differenza è dovuta al diverso cammino ottico dei due fasci, e poiché il **cammino ottico** è dato da :

$$T = d \cdot n \qquad (4)$$

(ove **d** è lo spessore dell'oggetto attraversato dalla radiazione, ed **n** l'indice di quel certo fascio, legato alla sua lunghezza d'onda ed alla sua direzione[19]), la **fase** sarà data da

$$\varphi = T / \lambda = d \cdot n / \lambda \qquad (5)$$

volendola esprimere non in unità di lunghezza assolute ma in funzione di λ . La **differenza di fase** fra i due raggi birifratti sarà:

$$D = \varphi_S - \varphi_O = d \cdot n_S / \lambda - d \cdot n_o / \lambda = d / \lambda \, (n_S - n_o) \qquad (6)$$

ove $\mathbf{n_S}$ ed $\mathbf{n_o}$ sono gli indici dei due raggi, $\boldsymbol{\varphi_S}$ ed $\boldsymbol{\varphi_o}$ le loro fasi e $\boldsymbol{\lambda}$ la lunghezza d'onda in gioco.

La differenza $\mathbf{n_S - n_o}$ è il **potere di birifrangenza** e, come si è visto, può variare a seconda della direzione di propagazione e di vibrazione che si considera in un dato corpo birifrangente da zero ad un valore massimo.

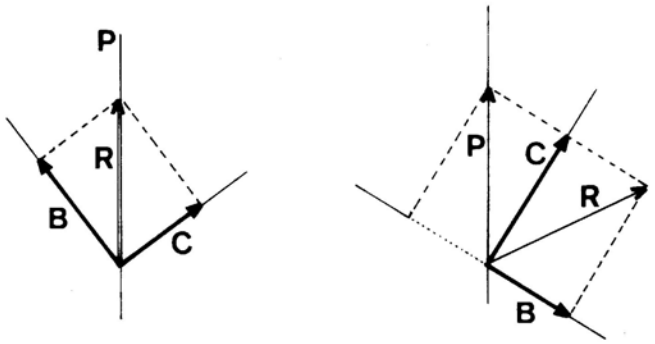
Supponiamo per semplicità, come avviene nella grande maggioranza dei casi, che l'oggetto birifrangente sia dato da una lamina plan-parallela per cui i due fasci birifratti all'uscita dall'oggetto sono paralleli, anche se spostati lateralmente, come avviene nel caso 3) sopra descritto.

Consideriamo cosa avviene dei due fasci birifratti che emergono dall'oggetto, e ciò per certi valori tipici della differenza di fase **D**.

a) Con D = 0, i due raggi birifratti sono sempre in fase; la risultante dei due vettori elettrici corrispondenti è un vettore che oscilla in un piano definito; la direzione del vettore risultante, come pure la sua ampiezza, si possono dedurre in base alla direzione ed all'ampiezza dei vettori componenti secondo la **regola del parallelogramma** per la composizione delle forze. Si può dimostrare che la risultante, supponendo che l'assorbimento dell'oggetto sia nullo per i due raggi birifratti, è identica al raggio incidente, ed è ancora

[19] Si ricordi che **n** è inversamente proporzionale alla velocità di propagazione di una certa radiazione in una certa direzione di vibrazione in un certo corpo.

polarizzata rettilineamente. In questo caso è come se l'oggetto birifrangente non esistesse (fig. 12 a).



a) b)

Fig. 12 - Comportamento della risultante dei due raggi birifratti prodotti da una lamina birifrangente con sfasamento nullo (a) e con sfasamento D = λ / 2 (b). Direzione di propagazione perpendicolare al foglio.
P = direzione di vibrazione della radiazione prodotta dal polarizzatore. **B** e **C** = vettori dei raggi birifratti in fase (a) o in opposizione di fase (b). **R** = vettore risultante che coincide con quello incidente quando **D = 0** (a) ed è invece ruotato quando **D = λ / 2** (b). In b) il vettore **C** si compone con la semi-onda opposta del vettore **B** rispetto al caso a).

b) Con D = λ / 4, il vettore risultante, ottenuto in ogni istante dai due componenti con la solita regola del parallelogramma, non assume mai ampiezza zero, e la sua direzione varia continuamente ruotando in un senso o nell'altro in modo che l'estremità del vettore descrive un'elica destra o sinistra. La proiezione di quest'elica in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione è un'ellisse i cui due assi sono paralleli alle direzioni dei due vettori componenti. Si parla di **radiazione polarizzata ellitticamente**.

Se il piano di polarizzazione della radiazione incidente sull'oggetto si trova a 45° dai piani di polarizzazione dei due raggi birifratti e se l'oggetto presenta lo stesso assorbimento per i due raggi, l'intensità di essi è la stessa ed in questo caso l'ellisse diviene un cerchio.

Tale radiazione **circolarmente polarizzata** si ottiene dunque da un materiale non dicroico il cui asse ottico (o la proiezione di esso nel caso dei cristalli uniassici, o comunque le direzioni di massimo e minimo indice) si trovi a 45° dal piano di polarizzazione della radiazione incidente.

Una lamina birifrangente capace di dare uno sfasamento relativo ai raggi birifratti pari a **λ / 4** si chiama **lamina quarto d'onda** ; in questo caso si assume **λ = 550** oppure **555 nm** o simili (regione "del verde", al centro dello spettro ottico).

c) Se D = λ / 2 , i due raggi birifratti sono sempre in opposizione di fase, quindi il vettore risultante è dato in ogni istante da uno dei vettori componenti e dalla semi-onda opposta dell'altro vettore: nella fig. 12 b, **P** rappresenta la proiezione del vettore della radiazione polarizzata incidente ed **R** il vettore risultante; **B** e **C** sono i vettori componenti cioè i due vettori che rappresentano i raggi birifratti. Si vede che il fascio risultante è ancora linearmente polarizzato ma ruotato rispetto al fascio incidente. Se il piano di polarizzazione della radiazione incidente forma un angolo di 45° col piano di vibrazione dei raggi birifratti, il vettore risultante vibra a 90° dal piano del vettore incidente, supponendo sempre di operare con materiale non pleocroico.

Una lamina birifrangente capace di dare allo sfasamento **D** un valore di **λ / 2** si chiama **lamina mezz'onda** e può operare una rotazione del piano di vibrazione della radiazione incidente di un angolo fino a 90°; dipende dal suo orientamento.

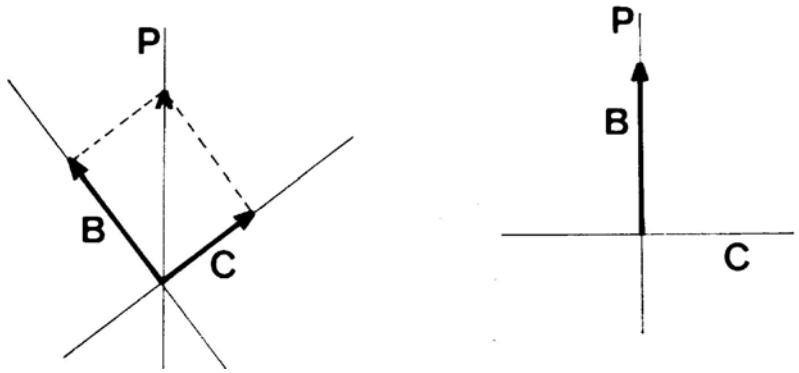
d) Con un valore di **D** diverso da un numero intero di **λ / 4** si ha ancora radiazione polarizzata ellitticamente, ma gli assi dell'ellisse non coincidono più con i piani di polarizzazione dei due raggi birifratti. Si vede che, per ottenere la radiazione polarizzata ellitticamente o circolarmente è sufficiente generare due fasci linearmente polarizzati ad

angolo retto fra loro, con lo stesso percorso e con una differenza di fase permanente. A seconda del valore della differenza di fase e dell'orientamento dei vettori, il vettore risultante può essere polarizzato linearmente o ellitticamente o circolarmente, ma la condizione "lineare" o "circolare" non sono altro che casi limite della polarizzazione ellittica.

e) Se $D = \lambda$, si hanno due vettori costantemente in fase e la risultante è un'onda polarizzata rettilineamente coincidente con l'onda di partenza, supponendo sempre assorbimento nullo per i due raggi birifratti. Si ricade nel caso sopra considerato di $D = 0$ e la lamina si chiama "**a onda intera**" o "**compensatore rosso di 1° ordine**" o "**compensatore λ**" o "**tinta sensibile**". Torneremo su questo argomento.

Finora si è supposto tacitamente di usare una radiazione incidente rigorosamente monocromatica poiché il valore di **D** dipende, come si è visto, dalla lunghezza d'onda (vedi la (6)).

Per ogni valore di lunghezza d'onda presente nella radiazione incidente occorre fare adesso un discorso separato. Si tenga poi presente che nel piano di ogni lamina birifrangente esistono due direzioni previlegiate, quelle di indice massimo e di indice minimo, che sono le proiezioni sul piano della lamina dei due piani di polarizzazione dei raggi birifratti. Queste due direzioni previlegiate sono sempre perpendicolari fra loro. Finora, in tutti i casi esaminati, si è supposto che il piano di polarizzazione della radiazione incidente non coincidesse con quelle due direzioni, quindi il vettore della radiazione incidente si decompone secondo la regola del parallelogramma in due vettori paralleli alle direzioni previlegiate (fig. 13 a). Ma se il vettore della radiazione incidente è perpendicolare ad una delle direzioni previlegiate (e coincide quindi con l'altra), esso non ammette componenti in quella direzione, nel senso che la sua proiezione su di essa è nulla, e quindi non viene decomposto (fig. 13 b).



a) b)

Fig. 13 - Vettore della radiazione polarizzata incidente (P) inclinato (caso a) o parallelo (caso b) rispetto alle direzioni previlegiate dell'oggetto birifrangente (B e C). In (b) si ha una posizione di estinzione ed il vettore P non si decompone: non si ha birifrazione.

Ruotando quindi una lamina birifrangente nel suo piano e mantenendola perpendicolare alla direzione del fascio incidente polarizzato, succederà che in un giro intero vi saranno quattro posizioni (a 90° l'una dall'altra) in cui il vettore incidente sarà perpendicolare ad una delle direzioni previlegiate della lamina, ed in quelle condizioni il fascio incidente non viene birifratto e l'oggetto si comporta come se fosse monorifrangente. Queste quattro posizioni si chiamano, per il fatto che l'oggetto non decompone la radiazione incidente, **posizioni di estinzione**: non sarà possibile cioè rivelare la presenza dell'oggetto, la sua immagine scomparirà (a meno di fenomeni secondari, capaci di dare un'immagine in "campo chiaro" dovuta ai normali fenomeni di rifrazione e/o riflessione nell'oggetto, indipendenti dalla polarizzazione).

Riconoscendo una di queste posizioni di estinzione e conoscendo la direzione del vettore

incidente, si possono conoscere le direzioni previlegiate dell'oggetto: quando l'oggetto è "estinto", le sue direzioni previlegiate sono l'una parallela e l'altra perpendicolare alla direzione del vettore incidente.

6.2 - INTERFERENZA dei FASCI BIRIFRATTI

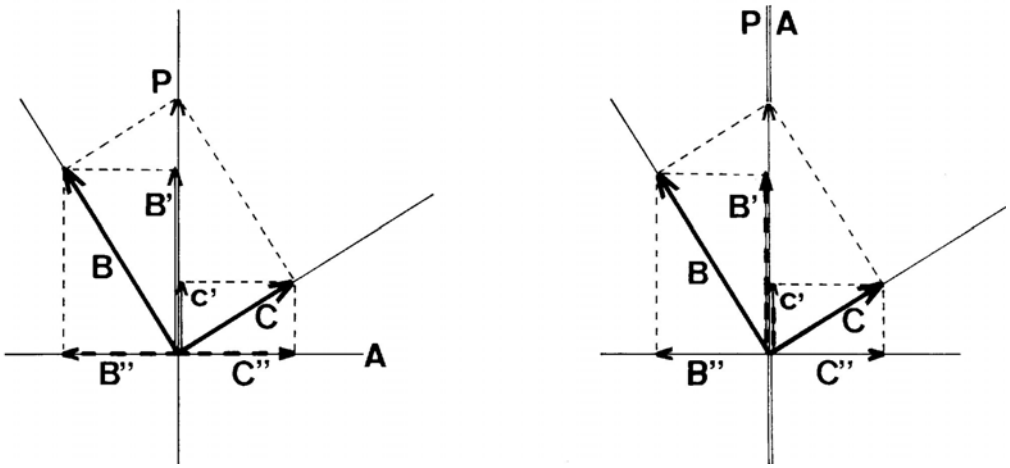
Finora si è studiata la risultante dei due vettori originati da una lamina birifrangente illuminata con radiazione polarizzata linearmente.

Ma, se si vogliono rendere manifesti i risultati della loro interferenza, occorre ricondurre i vettori dei due raggi birifratti in un unico piano. In altre parole, nelle condizioni di fig. 12, il fascio polarizzato **P** viene birifratto in due componenti che vibrano nei piani di **B** e **C** ma questi, essendo perpendicolari fra loro, non possono interferire (il vettore **C** , ad es., ha proiezione nulla nel piano **B** e viceversa). Per ottenere l'interferenza, il sistema più semplice ed universalmente usato è quello di far seguire all'oggetto birifrangente un secondo polarizzatore. I due raggi birifratti si potranno supporre decomposti in questo secondo polarizzatore (chiamato **ANALIZZATORE** proprio per la sua funzione) in due componenti ognuno: una componente perpendicolare al piano di vibrazione dell'analizzatore (questa componente è estinta) ed una componente parallela al medesimo piano (che viene trasmessa).

L'interferenza avviene fra le due componenti parallele trasmesse, le quali hanno la stessa fase e diversa ampiezza rispetto ai vettori birifratti di origine.

Supponiamo dunque di avere un sistema di due polarizzatori con l'oggetto in mezzo; da una parte si trova una sorgente di radiazione naturale, dall'altra l'occhio dell'osservatore; in assenza di oggetto, con i Nicol incrociati si ha fondo nero poiché i loro piani di vibrazione sono perpendicolari fra loro ed il vettore emergente dal primo Nicol non ammette componenti nella direzione dell'analizzatore: nessuna radiazione può passare. È questa una condizione di "estinzione" ed il fondo dell'immagine appare buio. Con i Nicol paralleli si ha invece il campo chiaro poiché i due piani di vibrazione coincidono ed il vettore emergente dal primo Nicol non si decompone nel secondo e viene trasmesso.

Supponendo inoltre di disporre il piano di polarizzazione della radiazione fornita dal primo Nicol non parallelo alle direzioni previlegiate dell'oggetto, e di lavorare con radiazione monocromatica, si considerino vari valori di sfasamento (**D**) fra i due raggi birifratti dall'oggetto (in Fig. 14, **P** è la direzione di vibrazione del polarizzatore, **A** quella dell'analizzatore, **B** e **C** le direzioni di vibrazione ("previlegiate") nella lamina birifrangente (oggetto).



a) b)

Fig. 14 - Caso generale di un corpo birifrangente posto fra polarizzatori incrociati, cioè con direzioni di vibrazione a 90° fra loro (caso **a**) o parallele (caso **b**). Direzione di propagazione perpendicolare al foglio.
P = direzione di vibrazione del primo polarizzatore; **A** = idem, dell'analizzatore; **B** e **C** = direzioni previlegiate dell'oggetto (direzioni di vibrazione dei due raggi birifratti); **B**' e **C**' = componenti dei vettori **B** e **C** in direzione di **P** ; **B**" e **C**" = componenti dei vettori **B** e **C** in direzione perpendicolare a **P** .

a) Per $D = 0$ oppure $D = \lambda$ oppure $D = m \cdot \lambda$, in cui **m** è un numero intero qualunque, e λ, al solito, la lunghezza d'onda, i due vettori **B** e **C** (raggi birifratti) sono in fase; se essi attraversano un analizzatore parallelo al polarizzatore (fig. 14 b) si decompongono nei due vettori **B**" e **C**" che sono perpendicolari alla direzione di vibrazione dell'analizzatore e sono perciò estinti nonché nei due vettori **B**' e **C**' che attraversano l'analizzatore ed interferiscono (essendo coerenti perché originati per sdoppiamento dello stesso fascio).

Con semplici calcoli trigonometrici si può dimostrare che i due vettori **B**' e **C**' , interferendo, rigenerano un vettore identico a quello incidente, linearmente polarizzato nello stesso piano. È come se l'oggetto non ci fosse.

Se invece i due vettori **B** e **C** attraversano un analizzatore perpendicolare col polarizzatore, non passano attraverso l'analizzatore le componenti **B**' e **C**' che vibrano perpendicolarmente al piano di vibrazione dell'analizzatore, ma solo le componenti **B**" e **C**" . Risulta ovvio dalla fig. 14 a) che **B**" e **C**" sono in opposizione di fase e si può dimostrare che essi hanno uguale ampiezza; essi dunque interferiscono nell'analizzatore e si elidono a vicenda. Nessuna radiazione attraversa l'analizzatore. Ancora una volta, è come se l'oggetto non ci fosse: infatti attraverso un analizzatore a 90° (**incrociato**) col polarizzatore, in assenza di oggetto[20] non passa nulla poiché il vettore della radiazione emergente dal polarizzatore (**P**) non ammette componenti in direzione **A** (fig. 14 a). Di conseguenza, nel caso considerato, sia l'oggetto che il campo circostante appaiono neri e perciò si è detto che tutto avviene come se l'oggetto non ci fosse.

b) Per $D = \lambda / 2$ oppure $D = (2m + 1) \lambda / 2$ (**m** = numero intero) cioè con ritardo di fase fra i raggi birifratti pari ad un numero intero dispari di mezze lunghezze d'onda, i due vettori **B** e **C** risultano in opposizione di fase per cui anche **B**' e **C**' saranno in opposizione di fase (fig. 14); con l'analizzatore parallelo al polarizzatore (**Nicol paralleli**) (fig. 14 b) i due vettori **B**' e **C**' attraversano l'analizzatore ed interferendo si elidono almeno in parte; l'oggetto appare scuro su fondo chiaro; il fondo chiaro si ha ovviamente poiché la radiazione proveniente dal polarizzatore passa quasi integralmente attraverso l'analizzatore in assenza di oggetto: i due piani di vibrazione essendo paralleli. Questa volta

[20] La condizione $D = 0$ equivale nel nostro caso ad assenza di oggetto.

la presenza dell'oggetto è chiaramente rivelata.

Con Nicol incrociati dovranno interferire i vettori **B**" e **C**" , che sono sfasati fra loro di $\lambda / 2$ in più o in meno rispetto a **B** e **C** , e quindi sono in fase fra loro: l'oggetto apparirà chiaro su fondo nero. Anche qui la birifrazione rende chiaramente visibile l'oggetto.

c) Per D diverso da $\mathbf{m\lambda}$ o da $\mathbf{(2m + 1)\ \lambda / 2}$ si hanno valori intermedi di sfasamento fra **B** e **C** e di luminosità dell'oggetto; l'oggetto appare sempre visibile, ma non apparirà mai nero né col valore massimo di luminosità.

Dunque, osservando un oggetto birifrangente fra Nicol incrociati o paralleli, si hanno tre casi in cui l'oggetto è invisibile (se si opera in radiazione monocromatica):

— quando la radiazione incidente si propaga nell'oggetto parallelamente all'asse ottico: non c'è birifrazione;

— quando una delle direzioni previlegiate dell'oggetto è parallela alla direzione di vibrazione del polarizzatore (cioè quando ci si trova in una delle quattro "posizioni di estinzione");

— quando lo sfasamento fra i due raggi birifratti dall'oggetto è pari a 0 oppure ad $m\ \lambda$.

Ma supponiamo ora di osservare il complesso: {polarizzatore - oggetto birifrangente - analizzatore} in luce bianca; supponiamo anche che l'oggetto sia una lamina plan-parallela tagliata non perpendicolarmente all'asse ottico.

a) Per $D = 0$ (o per oggetto orientato con una direzione previlegiata parallela alla direzione di vibrazione del polarizzatore) si ripete ciò che si è detto sopra: l'oggetto è invisibile poiché non avviene birifrazione. È l'estinzione.

b) Per $D \neq 0$ occorre introdurre il valore della lunghezza d'onda nel calcolo di **D** , e poiché tale lunghezza d'onda può assumere infiniti valori fra i due estremi dello spettro ottico, anche lo sfasamento **D** non avrà un valore unico.

Supponiamo per semplicità di operare a Nicol incrociati con oggetti non "in estinzione" e consideriamo valori di **D** corrispondenti a $\lambda = 550 - 555$ nm (regione "verde", al centro dello spettro ottico).

Per $D = \lambda / 4$, i due vettori **B** e **C** (fig. 14 a) sono leggermente sfasati; quelli **B**" e **C**" , che interferiscono nell'analizzatore, sono quasi in opposizione di fase e si elidono parzialmente; l'oggetto appare poco luminoso; il valore di **D** varia di poco per valori estremi della lunghezza d'onda corrispondenti ai limiti superiore ed inferiore dello spettro ottico (400 e 750 nm), per cui il colore risultante nell'immagine dell'oggetto è sensibilmente neutro, grigio. Una lamina "quarto d'onda" appare quindi grigia fra Nicol incrociati.

Se si vuole considerare il caso di Nicol paralleli, si può rifare il discorso introducendo uno sfasamento supplementare di mezza lunghezza d'onda fra i raggi interferenti.

Per $D = \lambda / 2$, i due vettori **B** e **C** (fig. 14 a) sono in opposizione di fase; quelli **B**" e **C**" sono in fase, con piccola dispersione per i valori estremi di lunghezza d'onda, per cui l'oggetto appare luminoso, di colore sensibilmente bianco-giallo a Nicol incrociati.

Considerando valori successivi di **D** pari a: $\lambda - 1{,}5\ \lambda - 2\ \lambda - 2{,}5\ \lambda -$ ecc. e considerando, invece di luce bianca, solo una lunghezza d'onda (ad esempio quella citata pari a 550 nm), si avrebbe una successione di valori di luminosità pari a 0 (quando i raggi interferenti sono in opposizione di fase e si ha interferenza negativa) e pari ad un massimo (quando i raggi interferenti sono in fase e si ha interferenza positiva); se, invece di considerare una serie di oggetti di spessore e sfasamento variabile, supponiamo di osservare fra Nicol incrociati una lamina cuneiforme naturalmente birifrangente, il valore di **D** può variare con continuità in direzione perpendicolare allo spigolo del cuneo da 0 ad un massimo con tutti i valori intermedi, e si vedrà fra Nicol incrociati una serie di frange chiare e scure; le frange chiare corrisponderanno a valori di **D** $= (2m + 1)\ \lambda / 2$ (opposizione di fase fra i fasci birifratti) e quelle scure a valori di **D** $= m\ \lambda$ (raggi birifratti in fase, raggi interferenti in opposizione di fase).

La larghezza e l'intensità delle frange sono costanti se il cuneo è geometricamente

perfetto ed otticamente omogeneo.

Ora, se il cuneo fra Nicol incrociati viene osservato in luce bianca, si avranno tanti sistemi di frange parallele quante sono le lunghezze d'onda contenute nella radiazione incidente; per un certo spessore del cuneo tale da produrre raggi birifratti in fase (D = 0) tutti i sistemi di frange presentano una frangia nera: lo sfasamento è nullo indipendentemente dalla lunghezza d'onda ed il cuneo appare nero; per tutti gli altri valori di **D** i vari sistemi di frange non coincidono più ed i colori si mescolano più o meno; quanto più forte è il valore di **D** , maggiore sarà lo spostamento relativo dei vari sistemi di frange, e quindi maggiore sarà il miscuglio dei vari colori, e più pallido il colore risultante.

Dunque, una lamina birifrangente qualunque, non perpendicolare all'asse ottico del cristallo, posta fra Nicol incrociati in modo che le sue direzioni previlegiate non siano parallele o perpendicolari al piano di vibrazione del polarizzatore, apparirà con colore variabile a seconda dello sfasamento esistente fra i due raggi birifratti al momento di emergere dalla lamina. Tale colore variabile essendo dovuto all'interferenza dei raggi birifratti, che avviene nell'analizzatore, si parla di **colori di interferenza**.

Per uno sfasamento **D** fra i raggi birifratti variabile da zero in su, si ottiene in luce bianca e Nicol incrociati una successione costante di colori d'interferenza raffigurabile con una serie di frange colorate dai colori sempre più sbiaditi; questa successione è detta **serie di Newton** e la si raffigura in una **carta di MICHEL - LÉVY**[21] (vedi la tavola seguente) in cui si dispongono lungo il lato maggiore i valori crescenti di **D** da 0 a 3 - 4 λ e sul lato minore i valori di spessore della lamina birifrangente (**d**) da 0 a 50 μ[22]. Pel punto del diagramma corrispondente ad un certo valore di **D** (cioè ad un certo colore) e di spessore **d** si fa passare una semiretta avente per origine il punto di D = 0 e d = 0 (angolo indicato da un quarto di cerchio), e la semiretta incontrerà il perimetro del diagramma in un punto dove si può leggere il valore del potere di birifrazione, cioè la differenza fra indice massimo e minimo dell'oggetto.

Dunque la carta di Michel Lévy, noto lo spessore di una lamina birifrangente osservata in luce bianca fra Nicol incrociati, permette di misurare il potere di birifrazione in base al colore con cui appare la lamina.

Lo sfasamento **D** , si è visto, dipende dallo spessore della lamina e dal potere di birifrazione; questo a sua volta dipende dall'orientamento del piano della lamina rispetto a certe direzioni previlegiate del corpo birifrangente. Con un certo orientamento, il potere di birifrazione può assumere per un dato corpo un valore massimo; tale valore massimo è diverso da un corpo all'altro e può servire come mezzo di riconoscimento.

---

[21] Michel Auguste LÉVY (1844 - 1911), mineralista e geologo francese. Al nome di Lévy si associa a volte quello di F.A.A. LACROIX (1863 - 1948), altro noto mineralogista e petrografo francese.

[22] I colori che appaiono con l'osservazione della lamina cristallina cuneiforme sopra descritta fra Nicol incrociati sono gli stessi di quelli della tavola di Michel Lévy.

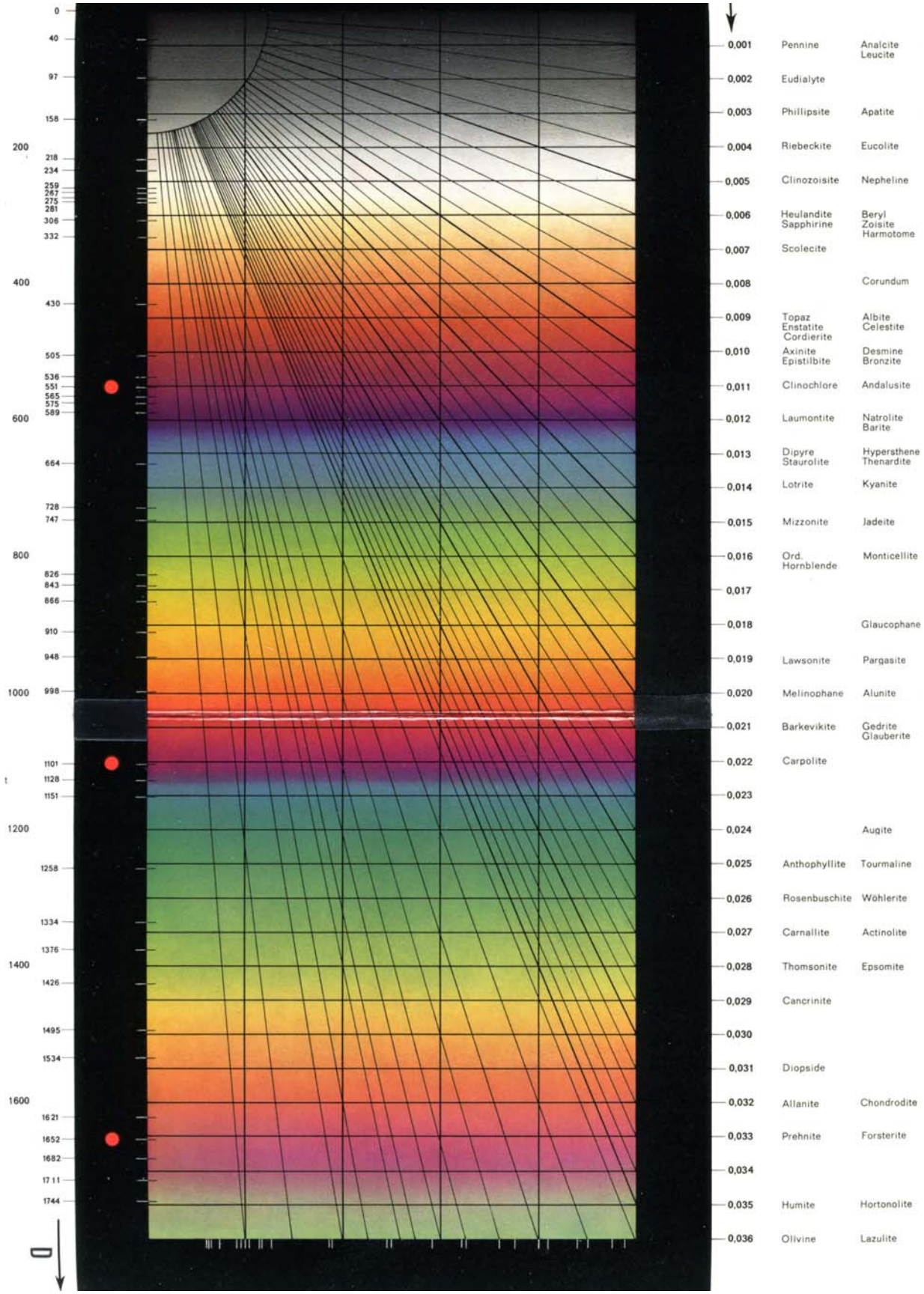


TAVOLA di Michel LÉVY illustrante la serie dei colori di interferenza (serie di Newton) ottenuti da un corpo birifrangente con sfasamento crescente, fra Nicol incrociati. D = sfasamento fra i raggi birifratti dall'oggetto; **in ascissa** = spessore dell'oggetto. Da: ZEISS Oberkochen, stamp. S 40 -

554 - e
In questa tavola, tutta la serie è costituita da "colori di sottrazione" come si verificano in tutti i fenomeni di interferenza negativa in luce bianca: es. gli "anelli di Newton" fra lamine di vetro accostate, i colori delle bolle di sapone, ecc. Le righe nere verticali corrispondono a valori crescenti dello spessore dell'oggetto; da sinistra a destra: 10, 20, 30, 40 μ. I numeri a sinistra indicano valori crescenti della differenza di cammino ottico, cioè dello sfasamento fra i due raggi birifratti dall'oggetto (D), espressi in nanometri (nm). I punti rossi indicano sfasamenti, dall'alto in basso, corrispondenti a λ ("Rosso" di primo ordine), 2 λ (di second'ordine), 3 λ (di terzo)(in realtà si tratta di magenta o porpora, dovuto alla sottrazione della regione spettrale centrale ("verde") dello spettro ottico). I numeri a destra indicano valori crescenti del potere di birifrazione (n_γ - n_α).
Per la diagnosi mineralogica, si osserva la sezione sottile fra Nicol incrociati, si rileva il colore d'interferenza, lo si riporta sulla tavola. Si sceglie poi la linea verticale che corrisponde allo spessore del campione e, dove questa linea verticale incrocia la banda di colore scelta, si traccia una linea inclinata con centro nell'angolo in alto a sinistra, fino ad incontrare la serie dei valori di birifrazione. Quello è il valore da attribuire al campione. Ancora a destra, i nomi di alcuni minerali che possiedono quella birifrazione.

Ricordiamo infine che il fenomeno dei colori di interferenza creati dall'osservazione di corpi birifrangenti in radiazione polarizzata ha dato luogo al termine **polarizzazione cromatica**.

6.3 - Il TAVOLINO UNIVERSALE o TEODOLITICO di FEDOROW

Se il potere di birifrazione è legato alla direzione che si considera in un corpo birifrangente, per il riconoscimento di quest'ultimo è utile conoscere il valore massimo che quel potere può assumere, cioè occorre orientare in tutti i sensi la lamina in esame fra i due Nicol incrociati in modo da ottenere il più alto valore di birifrazione, denunciato dal più alto ordine dei colori di interferenza nella serie di Newton.

Per fare eseguire alla lamina birifrangente in esame tutti i movimenti possibili senza perdere la messa a fuoco, si richiude la lamina stessa fra due semisfere di vetro ed il tutto viene fissato ad un congegno detto **tavolino universale**, ideato da Fedorow[23], costruito sul principio di uno snodo cardanico multiplo (fig. 15); il porta-oggetto può ruotare attorno a 4 o 5 assi diversamente orientati senza che il centro della lamina abbia a spostarsi nello spazio, cioè senza perdere la focheggiatura né la centratura dell'oggetto.

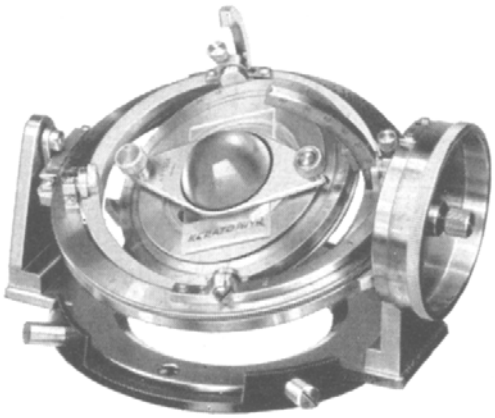


Fig. 15 - Tavolino universale o teodolitico di Fedorow. (da: E. Leitz Wetzlar, notice 55 - 20).

[23] Evgraf Stepanovicˇ FËDOROV (o Fedorow o Fedoroff), (1853 - 1919), famoso cristallografo e mineralista russo.

Oltre che alla ricerca della direzione di massimo potere di birifrazione, il tavolino universale può servire a cercare la direzione (o le direzioni) in cui l'oggetto non è birifrangente , cioè la direzione dell'asse o degli assi ottici, e quindi misurare l'angolo 2 V fra di essi. Si identificano anche le direzioni di estinzione, cioè le direzioni di vibrazione dei due raggi birifratti.

Servendosi dei cerchi graduati del tavolino è possibile conoscere il valore degli spostamenti angolari dell'oggetto e quindi l'angolo formato fra l'asse ottico dello strumento ed il piano della lamina in esame; se l'asse ottico (di centratura) dello strumento coincide con quello della lamina (condizione di estinzione permanente), si conosce anche l'angolo fra asse ottico della lamina e piano della lamina stessa.

L'uso delle semisfere di vetro impone l'uso di obbiettivi speciali a forte distanza frontale (e quindi a piccola apertura e piccolo ingrandimento) e di condensatori speciali. Infatti: le semisfere, che vanno sotto il nome di "**segmenti**" (S), hanno un raggio di 5 – 13 mm e pertanto gli obbiettivi da usare con segmenti debbono essere progettati per avere un "coprioggetto" a forma di semisfera con quel certo raggio; la loro "distanza di lavoro" deve essere adeguata[24]. Non solo ma, per facilitare il lavoro con minerali di indice assai diverso, i segmenti sono costruiti in differenti coppie con diverso valore di indice (per es: da 1,51 a 1,65), ed anche di questo deve tener conto il progetto dell'obbiettivo.

Date queste restrizioni, gli obbiettivi speciali per tavolino universale, indicati spesso colla lettera U (Universaltisch = Tavolino Universale) o S (Segment = segmento), raramente hanno un'apertura superiore a 0,4 ed un'ingrandimento superiore a 30. Con essi quindi è quasi impossibile osservare in conoscopia (vedi il § 7). D'altra parte, usati senza segmenti, godono di una distanza di lavoro di molti mm, sia pure con una riduzione dell'ingrandimento e dell'apertura in ragione del valore dell'indice del segmento.

Dato poi che i segmenti, per l'ingombro meccanico dei dispositivi di rotazione, stanno sollevati di qualche centimetro sopra il piano del tavolino, sul condensatore occorre montare una lente frontale speciale che sporge dal piano del tavolino stesso e si avvicina ai segmenti.

6.4 - I COMPENSATORI ("LAMINE AUSILIARIE")

L'osservazione a Nicol paralleli o più spesso a Nicol incrociati permette dunque di rivelare la birifrangenza di un oggetto, di misurarla in base all'ordine dei colori d'interferenza originati da esso, di identificare le direzioni previlegiate dell'oggetto in base alle posizioni di estinzione, di identificare la direzione dell'asse o degli assi ottici, cioè la direzione di non-birifrangenza.

Ma in casi particolari, per aumentare la sensibilità del metodo nel rivelare le deboli birifrangenze, o per misurare lo sfasamento **D** fra i raggi birifratti dall'oggetto con maggior precisione di quanto non sia consentito dall'esame dei colori d'interferenza, si fa uso di oggetti birifrangenti chiamati **compensatori** . Essi servono sia per osservazioni qualitative che quantitative, e si usano generalmente a Nicol incrociati.

In sostanza essi sono costituiti da lamine birifrangenti tagliate (in genere) non perpendicolarmente all'asse ottico, capaci di sdoppiare la radiazione linearmente polarizzata che proviene dal polarizzatore in due raggi birifratti; lo sfasamento **D** fra questi due raggi può essere fisso oppure variabile per ogni punto della lamina o da un punto all'altro di essa.

---

[24] La distanza di lavoro di un obbiettivo U può variare da 0,5 ad 1,5 mm, e diviene circa il decuplo quando è usato senza segmenti.

a) Compensatori con sfasamento fisso

In questi compensatori lo sfasamento **D** non si può variare, ed è costante per tutti i punti della lamina. La lamina ha quindi spessore e proprietà ottiche uniformi. Può essere costituita da materiali naturali (gesso, mica, quarzo, calcite, ecc.) o artificiali (materie plastiche o "vetri organici").

Il più noto dei compensatori fissi è il **compensatore Rosso di 1° ordine** o **tinta sensibile**, che è una lamina a "**onda intera**", in cui cioè D = 550 (oppure 555) nm; tale valore di **D** corrisponde al "centro di gravità", alla regione centrale dello spettro ottico, detta "del verde". Osservando questo compensatore a Nicol incrociati e luce bianca si vede il campo di color magenta, a causa della eliminazione della regione del verde dallo spettro della luce bianca; infatti, se i due raggi birifratti sono in fase (o sfasati di un'intera lunghezza d'onda) all'uscita dal compensatore, risultano in opposizione di fase all'uscita dell'analizzatore (vedi la fig. 14 a). Tale opposizione è però perfetta solo per una lunghezza d'onda di 550 nm ("verde") ed il verde viene quindi a scomparire dallo spettro ottico, lasciando il magenta: per le altre lunghezze d'onda, lo sfasamento è diverso e l'estinzione incompleta, per cui la radiazione risultante è un miscuglio di due larghe bande, una verso le forti lunghezze d'onda ("rosso"), l'altra verso le deboli ("viola"). Il miscuglio di rosso e viola dà appunto il magenta o "porpora". Il termine "rosso di 1° ordine" è quindi inesatto, visto che il colore prodotto è magenta.

Nella tavola di Michel Lévy (Tavola precedente) lo sfasamento $D = \lambda = 550$ nm corrisponde infatti ad un color magenta, e tale colore è detto **rosso di 1° ordine** poiché esso corrisponde alla banda di colore rossastro del primo ordine d'interferenza; ovvero, considerando un valore di **D** variabile fra 0 e l'infinito, per D = 550 nm si incontra il "rosso" o magenta per la prima volta.

Ora, supponendo per semplicità di disporre il compensatore rosso 1° ord. fra Nicol incrociati con le sue direzioni previlegiate a 45° dalla direzione di vibrazione nel polarizzatore, mettiamo fra i Nicol, prima o dopo il compensatore, un oggetto birifrangente con le direzioni previlegiate parallele a quelle del compensatore.

Lo sfasamento di 550 nm operato dal compensatore, che chiameremo **Dc** , si aggiunge allora allo sfasamento **Do** operato dall'oggetto; se la direzione di massimo indice del compensatore[25] è parallela a quella dell'oggetto, i due sfasamenti si sommano, ed i colori d'interferenza "salgono" verso gli ordini superiori, cioè divengono più sbiaditi; se invece la direzione di massimo indice del compensatore è parallela a quella di minimo indice dell'oggetto, i due sfasamenti si sottraggono poiché il raggio che ha il minimo indice, ad es. (ed anticipa) nel compensatore, ha il massimo indice (e ritarda) nell'oggetto o viceversa: lo sfasamento provocato nel compensatore è di segno opposto di quello dell'oggetto. Allora si avrà uno sfasamento totale Dt = Dc – Do per cui Dt è minore di Dc : lo sfasamento totale è diminuito ed i colori d'interferenza "scendono" in direzione di sfasamento nullo e divengono più saturi fino al grigio ed al nero dell'ordine 0.

Si può a questo modo conoscere la direzione di massimo e minimo indice dell'oggetto (γ ed α , rispettivamente).

L'utilità del compensatore rosso di 1° ord. sta anche nel fatto che, quando l'oggetto è debolmente birifrangente, cioè Do è piccolo rispetto alla lunghezza d'onda, si hanno lievi variazioni di Dt rispetto a Dc , ma esse sono sufficienti a spostare la banda delle lunghezze d'onda estinte, cioè ad alterare l'equilibrio di rosso e viola nella radiazione risultante; si hanno dunque i più vistosi cambiamenti di colore per deboli sfasamenti introdotti dall'oggetto[26]. Un tale oggetto debolmente birifrangente a Nicol incrociati senza compensatore apparirebbe debolmente luminoso su fondo nero, mentre col compensatore in questione appare colorato su fondo magenta, e precisamente giallo ("di sottrazione") se la sua

---

[25] normalmente indicata sul compensatore da un trattino trasversale e dalla lettera γ (g minuscola greca = gamma)

[26] Questa facilità del magenta di virare verso il giallo o il cyan ha dato origine al termine "tinta sensibile".

direzione di massimo indice (il suo "gamma" o γ) è incrociata col γ del compensatore e cyan (altro colore di sottrazione, simile al blu) se i due γ sono più o meno paralleli. Nella carta di Lévy il giallo sta infatti a sinistra del magenta di 1° ordine (valore di D inferiore a λ) ed il cyan a destra (D aumentato).

Se il compensatore viene orientato in modo da formare un angolo di pochi gradi fra le sue direzioni previlegiate e quella del polarizzatore ("posizione sub-parallela"), i colori divengono più scuri ma più vivi e si ha così la massima sensibilità nel rivelare le deboli birifrangenze.

Il compensatore "rosso 1°" o "onda intera" (o semplicemente "λ") dovrebbe quindi essere disponibile in due versioni: 1) normale (direzioni di vibrazione a 45° sulla direzione del polarizzatore); 2) sub-parallela (con il γ ruotato di pochi gradi rispetto alla direzione del polarizzatore), oppure, in alternativa: 3) girevole a piacimento.

Un altro compensatore fisso molto usato è quello "λ / 4" o "lamina quarto d'onda" il cui sfasamento è D = 550 / 4 oppure 551 / 4 = circa 138 nm. A Nicol incrociati, esso appare grigio. Ha applicazioni in osservazioni conoscopiche (vedi oltre). Come è detto sopra, la lamina quarto d'onda produce radiazione polarizzata ellitticamente o circolarmente se illuminata con radiazione polarizzata linearmente.

Il compensatore "onda intera" è detto anche "gesso" o "Gips" poiché era classicamente prodotto con una lamina di sfaldatura di gesso, var. selenite. Quello "quarto d'onda" è detto anche "mica" o "Glimmer" poiché veniva di solito fabbricato con una lamina di sfaldatura di mica muscovite. Oggi entrambi sono spesso fabbricati con fogli plastici con tutte le conseguenze del caso (inomogeneità, alterabilità col tempo, ecc.).

b) Compensatori cuneiformi

Si tratta di cunei molto sottili di materiale birifrangente naturale o sintetico (spesso si tratta di quarzo) in cui lo spigolo del cuneo è perpendicolare alla direzione di indice massimo o minimo e l'asse ottico giace nello spessore del cuneo; generalmente il cuneo si incolla su una lamina plan-parallela dello stesso materiale con le direzioni previlegiate ad angolo retto su quelle del cuneo: gli sfasamenti delle due parti si sottraggono essendo di segno opposto e nel punto in cui lo spessore del cuneo è uguale a quello della lamina lo sfasamento risultante è nullo (frangia nera della serie di Newton); in tutti gli altri punti i due spessori e cioè i due sfasamenti sono diversi, e lo sfasamento risultante è diverso da zero: osservando il cuneo fra Nicol incrociati si vedrà la serie dei colori d'interferenza. Generalmente i cunei sono costruiti per uno sfasamento da 0 a 3 λ o da 0 a 4 λ [27].

Si tratta dunque di compensatori il cui potere di birifrazione è fisso per ogni punto, ma variabile da punto a punto.

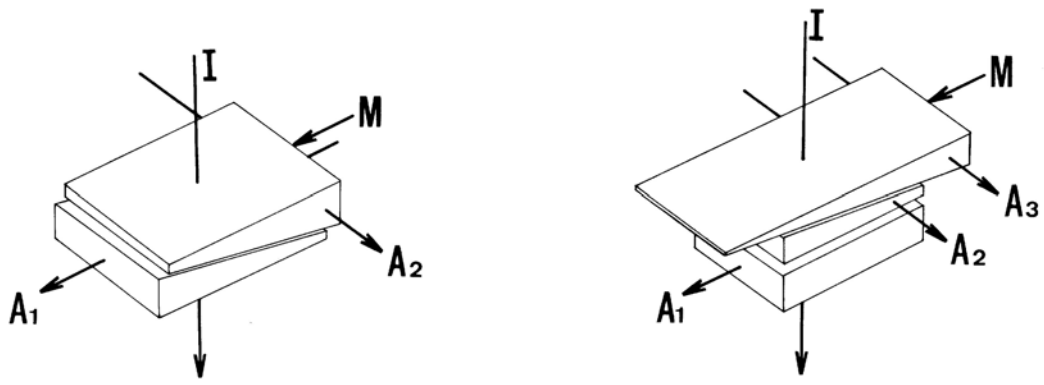
Quando si osserva un oggetto birifrangente fra Nicol incrociati, si dispone l'oggetto in modo che la sua direzione di massimo indice (γ) sia perpendicolare a quella corrispondente del cuneo. Dunque l'effetto del cuneo si sottrae a quello dell'oggetto. Si sposta il cuneo in direzione perpendicolare allo spigolo, in modo da variare lo spessore della regione di cuneo corrispondente al centro del campo e si prosegue lo spostamento finché lo sfasamento introdotto dal cuneo è uguale ed opposto a quello dell'oggetto. In queste condizioni, lo sfasamento risultante è nullo e l'oggetto appare nero. Si ha dunque un certo effetto di birifrazione nell'oggetto che viene "compensato" (donde il termine "compensatore") da un effetto uguale e di segno opposto di una certa zona del cuneo. Poiché l'occhio è molto sensibile nel rivelare il minimo di luminosità di un'immagine, si può conoscere con esattezza quando avviene la compensazione perfetta, e dalla posizione del cuneo si può risalire allo sfasamento, cioè al potere di birifrazione dell'oggetto. Certi cunei portano all'uopo una

[27] La sovrapposizione del cuneo con una lamina consente di evitare che, in corrispondenza della frangia "0", lo spessore del compensatore tenda a zero, divenendo fragilissimo.

graduazione incisa (cuneo di Wright[28]) ma, per vedere la graduazione a fuoco, occorre mettere il cuneo nell'oculare e l'analizzatore sopra di esso; si ha così un oculare speciale detto **oculare di Wright**.

I compensatori a cuneo servono dunque per la misura del potere di birifrazione, e sono utilizzabili anche con sfasamenti forti, quando cioè i colori d'interferenza sono pallidi e difficilmente riconoscibili; la compensazione è infatti perfetta solo quando l'immagine dell'oggetto appare nera.

Un caso particolare di compensatore a cuneo è dato dal **compensatore di Babinet**[29] costituito da due cunei di quarzo identici, disposti con gli spigoli paralleli in modo da formare nel complesso una lamina a facce parallele (l'angolo dei due cunei è uguale), e tagliati in modo da contenere l'asse ottico (fig.16 a). La direzione di massimo indice di un cuneo è perpendicolare all'analoga direzione dell'altro cuneo. Come nel caso del cuneo incollato su una lamina plan-parallela, anche col doppio cuneo si avrà una fascia in cui lo sfasamento è nullo, ed ai lati di questa si succedono frange di sfasamento gradatamente crescente. Osservato fra Nicol incrociati con luce bianca, anche il compensatore di Babinet mostra la successione regolare dei colori d'interferenza della tavola di Lévy ma con la frangia 0 (nera) verso il centro invece che ad un estremo.



a b

Fig. 16 - Schema dei compensatori di Babinet (a) e di Soleil (b). A_1 - A_2 - A_3 = assi ottici dei cunei e lamine; I = direzione della radiazione incidente; M = direzione di scorrimento del cuneo mobile, dovuta ad un congegno micrometrico.

Ciò che distingue questo compensatore dal cuneo semplice è il fatto che i due cunei di cui è composto possono scivolare l'uno sull'altro in modo che per ogni punto del sistema lo sfasamento complessivo può variare. Rientriamo così nella categoria dei compensatori variabili.

c) Compensatori variabili

Con i sistemi a cuneo è possibile compensare la birifrazione provocata da un oggetto e così misurarla; ma si ricordi che durante l'osservazione non si adopera un solo punto ben definito del compensatore, ma una zona più o meno estesa di esso (il fascio che l'attraversa ha un diametro non nullo); essendo il compensatore cuneiforme, in questa zona si avrà un potere di birifrazione variabile da punto a punto e ciò che si osserva è il risultato dato da un valore medio di sfasamento.

Per misure precise occorre dunque ricorrere a dispositivi a sfasamento variabile, ma capaci di dare lo stesso sfasamento per tutti i punti della lamina; osservati a Nicol incrociati,

---

28 Frederick Eugene WRIGHT, petrologo statunitense (1877 - 1953).

29 Jaques BABINET (1794 - 1872), fisico, giornalista e divulgatore scientifico francese.

questi compensatori appaiono di colore uniforme, non a bande.

Essi servono ancora a compensare la birifrazione dell'oggetto fino a farlo apparire nero a Nicol incrociati. A questo punto si legge su un organo di comando qualunque lo sfasamento della lamina, che sarà eguale e di segno opposto di quello dell'oggetto.

Il principio cui si ispirano i compensatori variabili è assai vario.

Il compensatore di Soleil[30] (fig. 16 b) è dato da due cunei identici, con gli spigoli paralleli, con le direzioni di massimo indice parallele, disposti in modo da formare una lamina a facce parallele. Facendo scivolare i due cunei fra loro, la lamina complessiva cambia di spessore e quindi cambia il suo potere di birifrazione; gli sfasamenti dei due cunei si sommano semplicemente. Questo potere di birifrazione è però costante per tutti i punti perché lo spessore totale dei due cunei è uniforme (i due cunei sono costruiti collo stesso angolo diedro).

Si ha dunque un compensatore a sfasamento uniforme, variabile a volontà. Per ottenere valori piccoli di sfasamento, fino 0 , si dispone dopo il sistema dei cunei una lamina plan-parallela dello stesso materiale, con la direzione di massimo indice perpendicolare a quella dei cunei, di adeguato spessore. Lo sfasamento del sistema dei cunei è dunque di segno opposto di quello operato dalla lamina e, se si regola la posizione reciproca dei due cunei, i due sfasamenti possono uguagliarsi fino ad avere sfasamento totale nullo.

Il compensatore di Berek[31] (fig. 17) è costituito da una lamina plan-parallela di calcite tagliata perpendicolarmente all'asse ottico. Disponendola in un fascio di radiazione perpendicolarmente all'asse del fascio, essa si comporta come monorifrangente poiché la radiazione si propaga parallelamente all'asse ottico della lamina. Inclinando la lamina in una direzione qualunque, la radiazione che l'attraversa non viaggia più parallelamente all'asse ottico e viene birifratta. Il potere di birifrazione varierà con l'inclinazione della lamina, ed il suo valore sarà leggibile sul tamburo che comanda la rotazione della lamina.

Altri compensatori, basati sullo stesso principio di quello di Berek si chiamano anche "di Ehringhaus". Il loro sfasamento può essere variabile in un intervallo di $0 - 5\ \lambda$ fino ad un massimo di $0 - 150\ \lambda$ a seconda del materiale usato (la calcite è venti volte più birifrangente del quarzo) ed a seconda dello spessore della lamina. Si tratta dunque di dispositivi per la misura di forti birifrazioni.

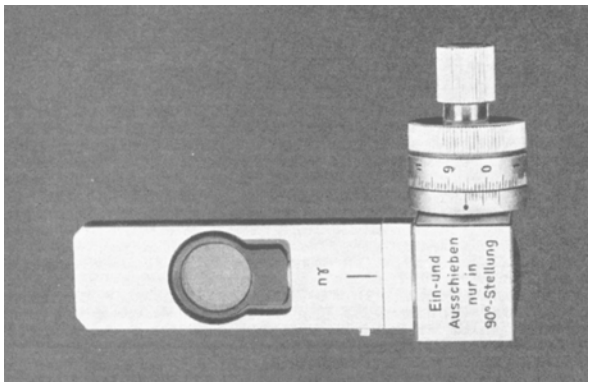


Fig. 17 - Compensatore di Berek a lamina rotante attorno ad un asse perpendicolare all'asse ottico del microscopio. Da; Jena Review, 2, 1965, Veb Carl ZEISS Jena.

Per i valori di birifrazione più piccoli, che provochino uno sfasamento **D** inferiore ad una lunghezza d'onda, esiste tutta una serie di compensatori variabili (di Senarmont[32], di Brace[33]- Köhler, ecc.) in cui una lamina birifrangente, tagliata parallelamente all'asse ottico e disposta perpendicolarmente al fascio incidente, può essere ruotata in senso azimutale, cioè

30 Jean Baptiste SOLEIL (pron. Solèi) (1798 – 1878), fisico francese.
31 Max BEREK (1886 – 1949), mineralista tedesco, collaboratore degli stabilimenti Leitz.
32 Henri Hureau de SÉNARMONT (1808 – 1862) mineralogista francese.
33 De Witt Bristol BRACE (pron.: Brèiss)(1859 – 1905), fisico statunitense.

attorno all'asse ottico dello strumento, in modo da restare sempre perpendicolare al fascio incidente (fig. 18).

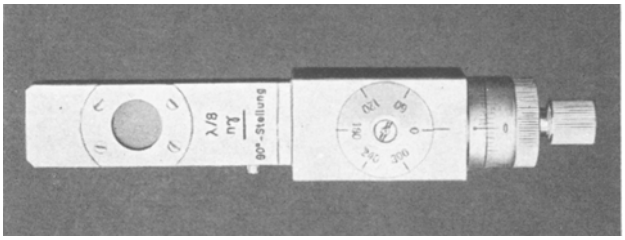


Fig. 18 - Compensatore a rotazione azimutale, in cui una lamina birifrangente ruota attorno all'asse ottico del microscopio. Da: Jena Review, 2, 1965, Veb Carl ZEISS Jena

Questi compensatori a rotazione azimutale producono sfasamenti assai piccoli da 0 ad un quarto d'onda o da 0 a 1/32 e così via. Essi servono quindi a "compensare" e misurare deboli birifrazione, fino a valori dell'ordine di $\lambda/500$.

Essi hanno applicazione anche come compensatori di fase in strumenti interferenziali (vedi la pubblicazione già citata: "Microscopia Interferenziale").

Non entriamo nei dettagli di struttura e di funzionamento di questi delicati congegni poiché si tratta di applicazioni particolari.

7 - LE OSSERVAZIONI CONOSCOPICHE

Finora si è tacitamente supposto di osservare i corpi birifrangenti con un fascio di radiazione collimata, cioè con "raggi" paralleli o sub-paralleli; la radiazione che attraversa l'oggetto birifrangente, in queste condizioni, forma angoli costanti rispetto all'asse ottico ed alle altre direzioni previlegiate dell'oggetto. Ciò che si osserva è allora il risultato di una serie di fenomeni dovuti all'oggetto, considerato in una particolare direzione; in altre direzioni, le proprietà dell'oggetto anisotropo sono diverse ed il fenomeno osservato si presenterà con caratteristiche diverse. Per avere una visione simultanea di ciò che avviene in un certo fascio di direzioni comprese in un dato angolo solido, occorre allora illuminare l'oggetto con un fascio conico di radiazione della massima apertura possibile; il vertice del cono formato dai raggi convergenti si troverà generalmente all'interno dell'oggetto al fine di interessare la minima area possibile dell'oggetto stesso e quindi, nel caso di un aggregato, un cristallo singolo, anche se piccolo.

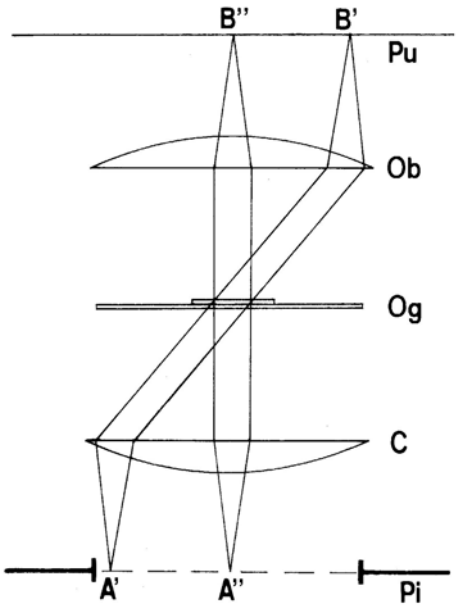


Fig. 19 - Schema di sistema ottico per osservazioni conoscopiche. **C** ed **Ob** rappresentano il condensatore e l'obbiettivo; **Og** è l'oggetto. Prima di **C** e dopo **Ob** si pongono due polarizzatori. La radiazione viaggia dal basso all'alto. **Pi** è la pupilla d'ingresso del condensatore, in cui è schematizzato un diaframma ad iride, quale si ha normalmente in un microscopio. **Pu** è il piano focale superiore dell'obbiettivo.

Le osservazioni con fasci paralleli o sub-paralleli si chiamano anche **ORTOSCOPICHE** e vedremo che nel microscopio polarizzatore esse si realizzano chiudendo al massimo il diaframma di apertura; col diaframma tutto aperto invece (e con condensatore a forte apertura) si realizza il percorso inclinato o convergente del fascio, cioè l'osservazione **CONOSCOPICA** ("**luce convergente**").

Più precisamente, si realizza l'osservazione conoscopica con un sistema, schematizzato in fig. 19, in cui una sorgente (che in genere sarà l'immagine reale della vera sorgente, del filamento incandescente della lampadina, immagine fornita da un sistema collettore, come nell'illuminazione secondo Köhler di un microscopio) si trova nel piano **Pi**; **Pi** rappresenta la pupilla d'ingresso ed il diaframma ad iride, posti nel piano focale anteriore di un sistema convergente **C**, che può essere il condensatore di un microscopio. Ogni punto di quel piano (**A**', **A**", ecc.) si può considerare come un centro di irradiazione o come una sorgente elementare per cui esso emette un fascio divergente di raggi che il sistema **C** fa divenire paralleli poiché i punti **A**', **A**", ecc. si trovano nel suo piano focale.

L'oggetto **Og** è dunque attraversato da infiniti fasci paralleli, ma ogni fascio ha una diversa inclinazione. L'apertura del fascio complessivo sarà pari alla massima inclinazione presentata dei fasci marginali come quello indicato con **A' - B'** .

Dopo aver attraversato l'oggetto, i fasci elementari paralleli **A' - B'** , **A" - B"** , ecc. sono resi convergenti da un altro sistema convergente **Ob** che può essere l'obbiettivo di un microscopio. Ogni fascio elementare produce nel piano focale di **Ob** (cioè in **Pu**, che corrisponde all'incirca alla pupilla d'uscita di **Ob**) un'immagine **B'** , **B"**, ecc. In **Pu** si ha dunque un'immagine reale e rovesciata di **Pi** e ad ogni punto **A'**, **A"** ecc. corrisponde un fascio diversamente inclinato che traversa l'oggetto ed un'immagine **B'** , **B"**, ecc. Ma allora in **B'** , **B"**, ecc. si potrà osservare l'effetto prodotto dall'oggetto sui fasci **A' - B'** , **A" - B"**, ecc., cioè <u>ad ogni punto di **Pu** corrisponde una particolare direzione all'interno dell'oggetto</u>. Osservando **Pu** [34] si ha sott'occhio tutto il piano focale di **Ob** , cioè tutto un insieme di punti corrispondenti ad altrettante direzioni nell'oggetto. Si vede dunque ciò che succede alla

[34] In un microscopio, si osserva la pupilla d'uscita dell'obbiettivo guardando attraverso il tubo dopo aver tolto l'oculare oppure con un "microscopio ausiliario" o con una "lente di Amici-Bertrand"; vedi oltre.

radiazione incidente per tutte le direzioni comprese nel cono di apertura del sistema **C - Ob** . Naturalmente, in queste condizioni l'oggetto non si vede poiché esso si trova presso il fuoco di **Ob** e la sua immagine si trova all'infinito, o comunque molto lontana da **Pu**.

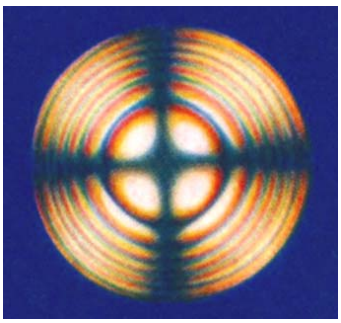
Se, prima di **C** , si pone un polarizzatore, dopo **Ob** un analizzatore incrociato col precedente, e se l'oggetto è birifrangente , si vedranno nel piano **Pu** colori (in luce bianca) o valori di luminosità legati al potere birifrattivo ed allo spessore dell'oggetto per ogni particolare direzione. Poiché si tratta di colori dovuti all'interferenza dei due raggi birifratti dall'oggetto, l'immagine vista in **Pu** si chiama **figura d'interferenza** o **immagine assiale**. Due punti di essa aventi uguale colore corrispondono a due direzioni per cui i raggi birifratti presentano lo stesso sfasamento, cioè per cui il prodotto dello spessore e del potere di birifrazione dell'oggetto è lo stesso.

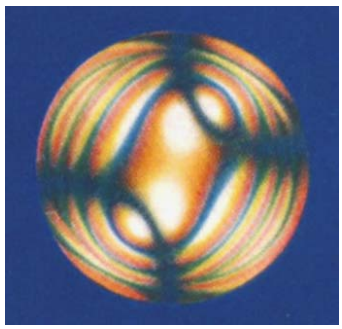
Affinché la figura d'interferenza abbia un andamento regolare, facilmente interpretabile, occorre che l'oggetto sia ridotto ad una lamina a facce piane e parallele, senza irregolarità o fratture.

Normalmente, nella figura di interferenza (fig. 20 e 21) si osserva un sistema di bande colorate ed una croce di bande nere.

Le bande colorate, dette **isocromatiche,** riuniscono tutti i punti di uguale colore, cioè corrispondenti alle direzioni di uguale sfasamento; il colore sarà uniforme lungo di esse poiché il colore è legato allo sfasamento. In radiazione monocromatica, le curve isocromatiche appaiono come bande chiare e scure.

Dato un certo oggetto birifrangente, in direzione dell'asse ottico si ha un potere birifrattivo nullo, il quale aumenta per acquistare il valore massimo perpendicolarmente all'asse ottico (o alla bisettrice degli assi ottici).





Figg. 20 e 21 - Figure di interferenza osservate in conoscopia, create da un oggetto birifrangente; a sinistra, oggetto uniassico tagliato perpendicolarmente all'asse ottico; a destra, corpo biassico tagliato perpendicolarmente alla bisettrice degli assi ottici; il piano degli assi ottici è ruotato a destra di circa 25° rispetto alla verticale.

Dunque nella figura d'interferenza si osserva un punto nero corrispondente alla direzione dell'asse o degli assi ottici circondato da anelli chiari e scuri (in radiazione monocromatica) o colorati (in luce bianca); la successione degli anelli corrisponde ad inclinazioni crescenti dei raggi rispetto all'asse ottico, cioè a valori crescenti del potere birifrangente totale e dello sfasamento fra raggio ordinario e straordinario; dunque quegli anelli presentano la stessa successione di colori della "serie di Newton".

Se la direzione dell'asse ottico dell'oggetto è compresa nel cono di apertura del sistema ottico impiegato, si vedrà nella figura d'interferenza in corrispondenza di esso una macchia nera circondata dalle isocromatiche con andamento concentrico; se l'asse ottico dell'oggetto risulta fuori dell'apertura del sistema ottico, si osserverà solo un settore del sistema di isocromatiche, cioè una serie di frange colorate più o meno curve che non si richiudono su se stesse.

Al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente, il sistema delle isocromatiche varia di aspetto a causa della "dispersione" cioè della variazione di certe

caratteristiche dell'oggetto. Da queste variazioni è possibile stabilire il sistema cristallografico cui appartiene l'oggetto e magari identificarne la specie mineralogica.

Quanto alle bande nere che traversano il sistema delle isocromatiche, esse corrispondono alle direzioni lungo le quali il piano di vibrazione del polarizzatore è parallelo o perpendicolare alle direzioni previlegiate dell'oggetto; in quelle direzioni l'oggetto non sdoppia i raggi incidenti, cioè non avviene la birifrazione poiché il vettore incidente non ammette componenti in uno dei due piani di vibrazione dell'oggetto. Le quattro bande nere corrispondono cioè, ed hanno la stessa origine, delle quattro posizioni di estinzione in cui l'oggetto appare invisibile se osservato in radiazione polarizzata.

Ruotando l'oggetto (che può essere poggiato sul tavolino girevole di un microscopio) le bande nere si spostano parallelamente a se stesse senza cambiare di direzione; se l'asse ottico è fuori della figura d'interferenza, e si ruota ancora il tavolino, si vedranno apparire successivamente, uno per volta, i quattro bracci della croce.

La figura d'interferenza osservata a "luce convergente" subisce varie modificazioni interessanti quando si osservino cristalli biassici (fig. 21: la croce si sdoppia in due rami a forma circa di iperbole) e quando si interpongano fra i Nicol, prima o dopo l'oggetto, compensatori di vario genere; ad es. con il compensatore rosso di 1° ordine si hanno nella figura d'interferenza dei quadranti colorati (giallo e cyan) a forma di lunetta, che indicano se il raggio ordinario ha indice maggiore e minore di quello straordinario (fig. 22); con una lamina quarto d'onda si possono eseguire analoghe determinazioni; oppure si possono porre prima e dopo l'oggetto birifrangente due lamine quarto d'onda opportunamente orientate, il che fa scomparire la croce nera e permette di determinare con esattezza la posizione degli assi ottici che risultano segnati da un punto nero ben definito.

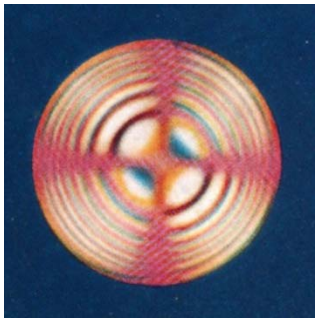


Fig. 22 - La stessa immagine della fig. 20, quale appare trasformata dall'introduzione di un compensatore Rosso di 1° ordine; la posizione dei quadranti colorati indica se l'oggetto ha una birifrazione positiva o negativa (vedi il § 8.5).

Come si vede, l'osservazione conoscopica permette di studiare un oggetto birifrangente in molte direzioni simultaneamente ed in particolare permette di visualizzare con esattezza la posizione dell'asse ottico, di riconoscere i cristalli uniassici e quelli biassici, di distinguere i cristalli in cui il raggio straordinario ha indice maggiore di quello ordinario (cristalli POSITIVI) dai cristalli in cui avviene l'inverso (NEGATIVI), e così via.

È possibile anche misurare l'angolo 2 V fra gli assi ottici di un cristallo biassico, ricordando che, se l'obbiettivo usato è "a secco", l'angolo osservato è in aria; per conoscere l'angolo degli assi nel cristallo occorre eseguire un'opportuna correzione.

La misura dell'angolo degli assi ottici si può eseguire in base alla distanza dei punti corrispondenti agli assi che compaiono nella figura d'interferenza oppure, col tavolino di Fedorow, portando successivamente a coincidere con l'asse ottico di osservazione prima l'uno poi l'altro degli assi ottici del cristallo.

Quando si osservano oggetti birifrangenti pleocroici, i colori propri dell'oggetto possono alterare i colori della figura d'interferenza, complicandone l'interpretazione.

Se l'oggetto è costituito da una sezione di roccia o da un ammasso di cristalli variamente orientati (fig. 3) si avrà in conoscopia una diversa figura d'interferenza per ogni cristallo

compreso nel campo visivo. Per evitare questa sovrapposizione di figure, occorre sfruttare il principio d'illuminazione di Köhler, e precisamente chiudere il diaframma di campo fino ad illuminare solamente uno dei cristalli presenti nel campo visivo; questo discorso è fatto in vista dell'osservazione al microscopio, ma lo si può applicare anche in altre condizioni.

Un altro modo per ottenere un'immagine conoscopica di un micro-cristallo contenuto in un oggetto composito è di utilizzare non il diaframma di campo illuminato, ma un altro diaframma ("di Wright") posto fra obbiettivo ed oculare. Tale diaframma è descritto più avanti.

Per finire, vorremmo far osservare che, durante un'osservazione ortoscopica, ad esempio durante una normale osservazione al microscopio polarizzatore, può capitare di osservare oggetti piccoli birifrangenti, di forma all'incirca sferica, ad es. granuli di grasso o di amido provenienti da tessuti animali o vegetali.

In tali condizioni l'oggetto si comporta come una minuscola lente sferica di grande potenza[35]; nel fascio di radiazione esistente fra condensatore ed obbiettivo di un microscopio, tale lente si comporta ad un tempo come oggetto birifrangente e come un condensatore di cortissima focale; il sistema obbiettivo-oculare del microscopio diviene allora un telescopio che permette di osservare l'immagine conoscopica fornita dall'oggetto sferico. Si potrà allora osservare nell'oggetto qualche linea isocromatica e la croce di fasce nere (chiamata "croce di Malta"). Caratteristica la croce di Malta prodotta dai granuli d'amido di varie piante (nella fig. 6 però i granuli d'amido e tutto l'oggetto sono immersi in balsamo del Canada, per cui l'oggetto è attraversato da raggi sub-paralleli e le bande colorate sono dovute alla birifrazione intrinseca del materiale).

8 - IL MICROSCOPIO POLARIZZATORE

Questo microscopio è uno strumento specializzato per lo studio delle proprietà ottiche e di certe proprietà fisiche di oggetti su scala microscopica.

Generalmente, un microscopio polarizzatore può dare assai più informazioni di quante l'osservatore medio sia capace di trarne; infatti, i fenomeni della radiazione polarizzata osservabili con esso sono assai vari e complessi, e solo una profonda comprensione delle spiegazioni teoriche di quei fenomeni può permetterne l'interpretazione. Una buona esperienza è pure necessaria per decifrare certe immagini.

Da quanto si è già detto a proposito degli oggetti birifrangenti, risulta chiaro quali possono essere i campi di applicazione di un microscopio polarizzatore:

— la biologia e la medicina, per lo studio di strutture viventi birifrangenti o di inclusi cristallini normali o patologici, gusci, scheletri, peli, unghie, ecc.

— l'igiene, per lo studio delle polveri atmosferiche, dei prodotti alimentari e farmaceutici;

— la tecnologia dei vetri, dei prodotti ceramici e da costruzione, per lo studio delle tensioni interne, delle fasi cristalline o di inclusi eterogenei;

— la gemmologia per il riconoscimento delle pietre preziose naturali ed artificiali;

— la chimica, per lo studio delle reazioni e della cristallizzazione dei loro prodotti su scala microscopica;

— la tecnologia delle fibre tessili, della carta ed affini, per lo studio della struttura e delle alterazioni delle fibre; quando si tratti di materiali trafilati od estrusi, lo studio delle proprietà

[35] Questo discorso è valido solo se l'oggetto è immerso in aria o in un liquido con indice di rifrazione assai diverso dal suo.

ottiche permette di risalire al grado di orientamento delle molecole e quindi al trattamento meccanico subìto dalla fibra;

— la mineralogia e la petrografia, per lo studio ed il riconoscimento delle specie mineralogiche e lo studio della struttura e composizione delle rocce;

— la paleontologia, per lo studio di strutture birifrangenti nei fossili e l'analisi quindi della loro origine (fig. 23).

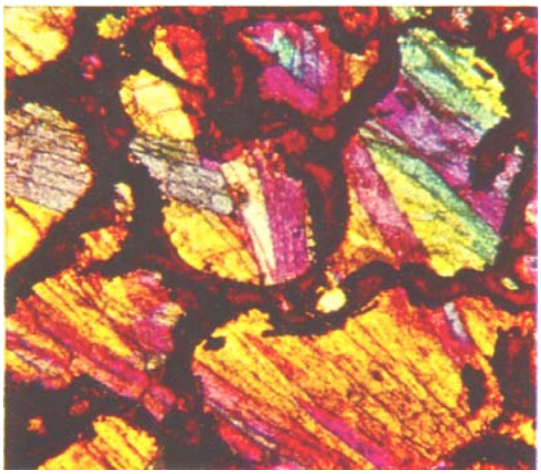


Fig. 23 - Sezione sottile di dente di *Stegocephalia*, fossile del Trias dell'Arizona. 12 ingrandimenti. Nicol incrociati. Si riconosce ancora la struttura intima dell'organo.
Da: ZEISS Informazioni, 62, 1966, Ralph W.G. Wyckoff.

Va comunque messo in rilievo che il microscopio polarizzatore, basandosi sui fenomeni della polarizzazione della radiazione ottica, mette in risalto la struttura intima dell'oggetto anche a livello molecolare, e le immagini da esso fornite risultano dall'azione dell'oggetto sulla radiazione che lo attraversa senza richiedere un trattamento preventivo dell'oggetto. Questo strumento, inoltre, si basa anche su fenomeni interferenziali, e gode quindi dello stesso previlegio del microscopio interferenziale: ben di rado produce artefatti. Non si hanno quindi né gli aloni del contrasto di fase, né le frange del fondo oscuro, né la necessità di colorare l'oggetto.

Pertanto, l'esame delle più fini strutture al microscopio polarizzatore, specie in biologia, può rappresentare un complemento delle osservazioni eseguite al microscopio elettronico o con altri mezzi.

8.1 - STRUTTURA del MICROSCOPIO POLARIZZATORE

Lo strumento di base è costituito da un microscopio classico che è inutile descrivere. La principale caratteristica che distingue la versione "polarizzatore" è la presenza di due filtri polarizzatori, uno prima ed uno dopo l'oggetto.

Tali filtri erano un tempo costituiti da prismi di calcite limpida ("Spato d'Islanda) come quello di Nicol, di Ahrens, ecc. Oggi sono quasi integralmente sostituiti da polaroid del tipo molecolare (vedi sopra).

Il polarizzatore posto dopo l'oggetto si chiama ancora ANALIZZATORE. Almeno uno dei due Nicol o polarizzatori deve essere girevole in modo da poter lavorare "a Nicol paralleli o incrociati".

La posizione abituale del primo polarizzatore (chiamato semplicemente "POLARIZZATORE") è subito sotto il condensatore, subito sotto il diaframma di apertura.

Qui l'apertura del fascio di radiazione è minima e non vi sono problemi in merito al comportamento del polarizzatore alle varie inclinazioni dei raggi.

La direzione di vibrazione del vettore elettrico del polarizzatore è secondo le norme DIN quella del piano trasversale dello strumento (detta "Est - Ovest" o "E - W"). Molti costruttori scelgono però ancora la vecchia disposizione Nord - Sud (N - S).

L'analizzatore è posto raramente dopo l'oculare, come nell'"oculare di Wright" già citato; qui l'apertura è forte e si introduce qualche lieve aberrazione dell'immagine; in genere l'analizzatore è posto fra obbiettivo ed oculare, dove l'apertura è minima. In ogni altro punto del cammino ottico del microscopio lo spazio disponibile sarebbe minore e l'apertura maggiore[36].

Se il tubo del microscopio contiene prismi o specchi (tubi inclinati e bioculari, ad es.), occorre che l'analizzatore sia posto prima dei prismi o specchi poiché questi, per le ragioni già viste, altererebbero lo stato della radiazione polarizzata esistente fra i due Nicol. Se però i prismi o specchi hanno un certo potere polarizzante, la coppia analizzatore-prisma viene a costituire un polariscopio indipendente i cui effetti si sommano con quelli della coppia polarizzatore-analizzatore; per evitare questa indesiderabile sovrapposizione di effetti, si introduce a volte una lamina quarto d'onda od una lamina a forte birifrazione sopra l'analizzatore; così la radiazione linearmente polarizzata che emerge dall'analizzatore viene trasformata in radiazione polarizzata circolarmente ed il prisma eventualmente polarizzante non può dare alcun fenomeno di estinzione (se non si ruota la lamina quarto d'onda).

È poi desiderabile che i Nicol siano facilmente estraibili dal cammino ottico per poter passare rapidamente dall'osservazione con due Nicol a quella con un solo Nicol o senza Nicol.

Il tavolino dello strumento deve essere girevole e centrabile per consentire di ruotare l'oggetto attorno all'asse ottico dello strumento. (ricerca delle posizioni di estinzione, ecc.). Un microscopio fornito di due Nicol e di un tavolino girevole permette già numerose osservazioni qualitative (vedi oltre); si noti che lo stativo ed il sistema ottico sono per ora del tutto normali. Normalmente, il tavolino girevole è munito di una vite di blocco, di arresti parziali ogni 45° e di una graduazione (in gradi sessagesimali) con nonio a 1/10°. La graduazione va da 0° a 360° per rotazione anti-oraria.

In molti casi, specie in biologia ed in certe applicazioni tecnologiche, un tale microscopio polarizzatore semplificato è più che sufficiente.

Per osservazioni qualitative su minerali o gemme, per l'osservazione di fenomeni di foto-elasticità od altro è anche possibile in genere trasformare un microscopio stereoscopico (binoculare, a doppio obbiettivo) in microscopio polarizzatore semplificato. A questo scopo, le migliori case forniscono appositi accessori. In genere i microscopi stereoscopici non possiedono condensatore ed il polarizzatore si pone quindi subito sotto il tavolino. L'analizzatore, data la piccola apertura e la forte distanza di lavoro (molti centimetri) degli obbiettivi stereoscopici, si può porre in genere davanti alla coppia degli obbiettivi. All'analizzatore può essere fissato anche un compensatore λ in posizione fissa o girevole. Fra polarizzatore ed analizzatore non vi è dunque alcuna lente, il che elimina l'effetto depolarizzante dei vetri tensionati e delle riflessioni sulle superfici delle lenti. Per contro, la

---

[36] Spesso si dispone sopra l'obbiettivo un sistema di lenti, detto "TELAN" che fu introdotto per la prima volta da Ehringhaus; una prima lente, negativa, coniuga all'infinito l'immagine reale data dall'obbiettivo, e rende quindi parallelo il fascio (ognuno degli infiniti fasci corrispondenti agli infiniti punti del piano oggetto); la seconda lente, positiva, riporta l'immagine nel piano focale dell'oculare. Nel tratto fra le due lenti, dove il fascio è parallelo, si introducono allora analizzatore e compensatori, senza pericolo di introdurre aberrazioni nell'immagine. Il sistema TELAN permette anche di allungare meccanicamente il tubo senza alterare la lunghezza ottica equivalente, ed inoltre permette di estrarre ed introdurre l'analizzatore o le lamine ausiliarie senza alterare la messa a fuoco. Un'immagine coniugata all'infinito infatti non si sposta introducendo un elemento plan-parallelo che alteri il cammino ottico. Modernamente, si preferisce calcolare l'obbiettivo stesso per dare un'immagine all'infinito; l'oggetto sta nel suo primo fuoco; segue naturalmente una "lente di tubo" convergente che riporta l'immagine nel piano focale dell'oculare. Il fascio coniugato "all'infinito" si forma allora fra obbiettivo e lente di tubo. Si parla di "**obbiettivi con seconda coniugata infinita**".

piccola apertura dell'obbiettivo dello stereomicroscopio e l'assenza di condensatore rendono impossibile la conoscopia.

Gli assi dei due obbiettivi stereoscopici non sono però paralleli e questo porta a qualche differenza nelle immagini e nei colori d'interferenza osservati dai due occhi.

Quando gli stereomicroscopi sono forniti di tavolino girevole, possono servire anche per qualche misura, come quella delle direzioni di estinzione per cui si possono classificare fra i microscopi polarizzatori semplificati.

Ma, quando si debbano eseguire misure precise del potere di birifrazione o la misura di angoli compresi fra direzioni previlegiate dell'oggetto, occorrono al microscopio polarizzatore altre strutture speciali, che ne fanno uno strumento specializzato ben distinto da qualunque microscopio biologico o metallografico; in fig. 24 se ne vede l'aspetto esteriore, in fig. 25 lo schema di principio.

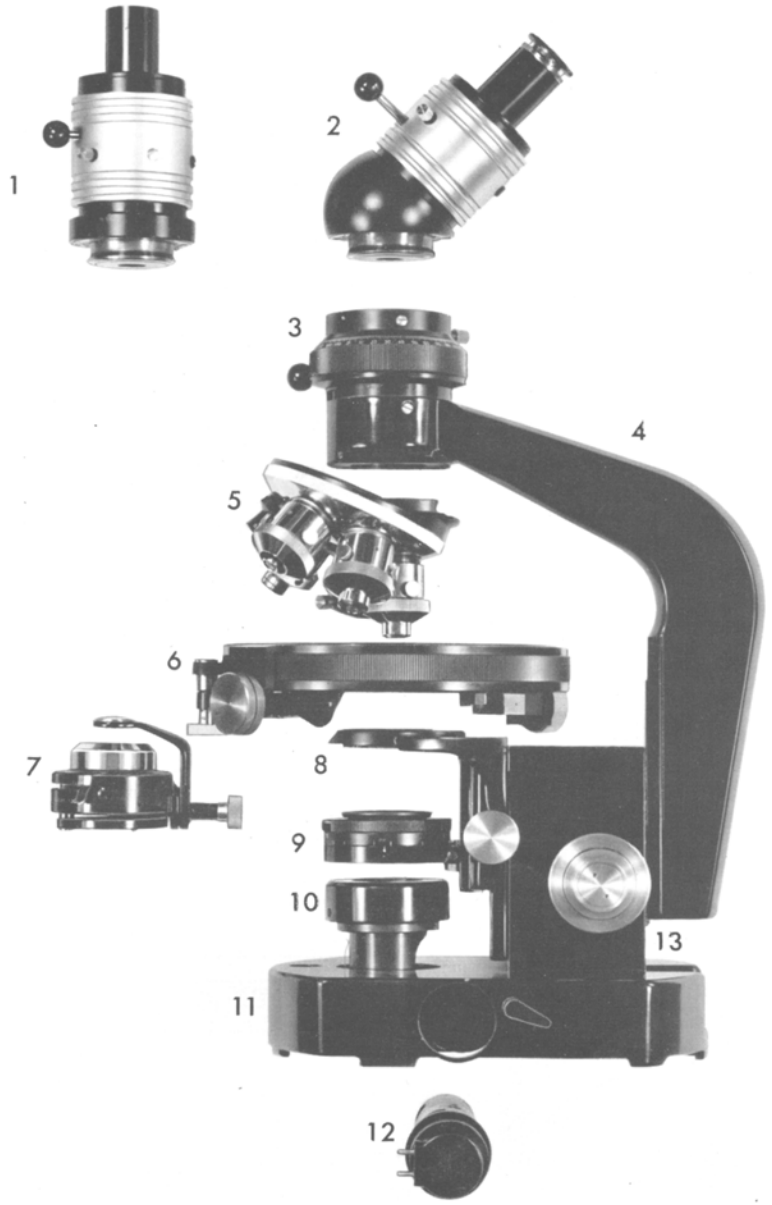


Fig. 24 - Microscopio polarizzatore WILD Heerbrugg, Mod. M 21.
1 = Tubo diritto per la microfotografia, con lente di Amici e relativa regolazione in altezza e dispositivo di

centratura, più il diaframma ad iride. 2 = Tubo inclinato per l'osservazione, contenente gli stessi accessori del tubo diritto. 3 = Tubo intermedio contenente l'analizzatore girevole e la fenditura per i compensatori. 4 = Braccio regolabile in altezza a mezzo della vite macrometrica. 5 = Revolver a sei fori per obbiettivi singolarmente centrabili. 6 = Tavolino con movimento micrometrico di rotazione. 7 = Condensatore "Pol" con lente frontale estraibile. 8 = Porta-condensatore regolabile in altezza. 9 = Supporto girevole per polarizzatore. 10 = Dispositivo di centratura della microlampada. 11 = Piede con alloggiamento per microlampada. 12 = Microlampada con collettore a tre lenti, diframma di campo ed ampolla a filamento concentrato, 20 W. 13 = Manopole macrometrica (agente sul braccio) e micrometrica (agente sul tavolino).

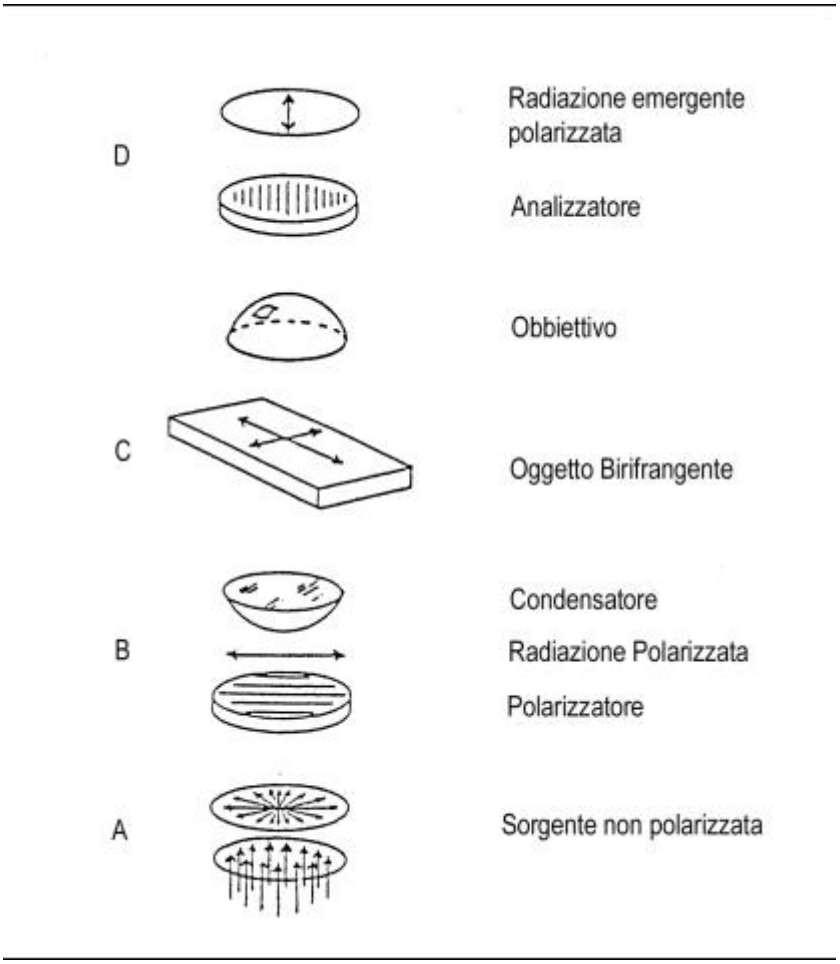


Fig. 25 - Schema di principio di un microscopio polarizzatore, con l'indicazione delle parti essenziali. In alto, occorre aggiungere l'oculare.

Ecco ora le sue principali caratteristiche:

— il condensatore, l'asse di rotazione del tavolino e l'obbiettivo debbono essere centrati in modo che i loro assi coincidano; almeno due dei tre elementi saranno provvisti di appositi mezzi di centratura; i microscopi polarizzatori in genere hanno una montatura centrabile per obbiettivi singoli (con innesto a slitta cuneiforme) o un revolver con fori centrabili (Jena), invece di un revolver per obbiettivi non centrabili come si usa in genere nei microscopi biologici. Qualche casa fornisce dei revolver a fori fissi su cui si montano obbiettivi forniti di dispositivo individuale di centratura (viti {Wild}, camme {Zeiss}, ecc.);

— la rotazione del tavolino, del polarizzatore e magari dell'analizzatore può essere misurata con appositi cerchi graduati muniti di nonio, con una precisione dell'ordine di 0,1° ;

— nell'oculare esiste un reticolo costituito da due fili a 90° fra di loro, ed essendo l'oculare bloccato in una certa posizione ad opera di apposita chiavetta, si hanno nel campo visivo due direzioni fisse di riferimento ortogonali che si rendono rispettivamente parallele

alle direzioni di vibrazione (o "sezioni principali") dei due Nicol; naturalmente, il crocefilo non deve ruotare attorno all'asse: a questo fine non basta la chiavetta sull'oculare sopra citata; occorre che anche il tubo porta-oculare sia fissato nella sua posizione azimutale da una chiavetta e, nei tubi bioculari, la regolazione della distanza interpupillare non deve portare a rotazione dell'oculare. Quest'ultima condizione è automaticamente rispettata nei tipi a doppia slitta trasversale; nei tipi incernierati su un asse centrale (sec. Siedentopf), invece, la cosa è risolta in vari modi, tutti meccanicamente complicati[37].

— vi può essere nel condensatore una lente convergente addizionale rapidamente estraibile, che facilita la realizzazione dell'osservazione conoscopica;

— il guida-oggetti che serve a spostare il vetrino sul tavolino può essere munito di un dispositivo per l'avanzamento a scatti in due direzioni ("salta-punti") per facilitare l'esplorazione sistematica dell'oggetto[38]. Il guida-oggetti stesso deve essere ribassato (con manopole verticali molto piatte) per consentire la rotazione su 360° senza urtare con gli obbiettivi;

— fra l'obbiettivo e l'oculare vi è una fessura che permette di inserire sotto l'analizzatore uno dei tanti compensatori disponibili. La fessura in genere è tale da formare un angolo di 45° fra la direzione di allungamento del compensatore, cioè fra una delle direzioni previlegiate di esso e la sezione principale del polarizzatore. Dunque la posizione del compensatore è in genere fissa. In rari casi, il compensatore rosso 1° è girevole attorno all'asse ottico dello strumento: si è già detto che in certi casi l'osservazione di oggetti debolmente birifrangenti è facilitata ponendo le direzioni previlegiate del compensatore a pochi gradi da quella del polarizzatore, e procedendo per tentativi si cerca la posizione più favorevole. Le dimensioni della fessura per l'introduzione dei compensatori non sono standard (4 × 12; 6 × 18; 6 × 20, ecc.);

— l'osservazione conoscopica si può ottenere semplicemente togliendo l'oculare ed osservando attraverso il tubo la pupilla d'uscita dell'obbiettivo[39], ma normalmente è previsto nel tubo del microscopio, sotto l'oculare, un apposito sistema convergente chiamato **lente di Amici** dagli autori italiani e **lente di Bertrand** dagli autori di lingua inglese. Tale lente è costruita in modo da dare un'immagine reale della pupilla di uscita dell'obbiettivo nel piano focale dell'oculare; dunque l'oculare, assieme alla lente di Amici si comporta come un piccolo **microscopio ausiliario**, cioè un microscopio composto a basso ingrandimento che fa vedere ingrandita la pupilla dell'obbiettivo: la lente di Amici funge da obbiettivo di questo microscopio ausiliario. Questo dispositivo ha la stessa funzione e struttura del "microscopio ausiliario" usato per la centratura degli anelli di fase nel metodo del contrasto di fase. La lente di Amici è facilmente estraibile dal cammino ottico, ed è in genere regolabile in altezza per mettere bene a fuoco la pupilla d'obbiettivo e la figura d'interferenza che vi si forma. Si ricordi che, cambiando obbiettivo, la posizione assiale della pupilla di esso generalmente cambia, e si richiede quindi una nuova focheggiatura del microscopio ausiliario. Osservando la pupilla d'obbiettivo attraverso la lente di Amici si può anche controllare che essa sia uniformemente illuminata e che il diaframma d'apertura sia correttamente regolato; si ha così un mezzo rapido di controllo del sistema d'illuminazione. La lente di Amici è in genere centrabile con apposite viti.

— accoppiato alla lente di Amici vi può essere un diaframma ad iride, detto "di Wright", citato più sopra. Essendo convergente, la lente di Amici forma un'immagine reale dell'oggetto più in basso dell'immagine intermedia, quale si formerebbe normalmente nel piano focale dell'oculare; essa cioè trasporta l'immagine intermedia verso l'obbiettivo; nel

---

[37] In rari casi (mod. Jenapol della Jena, ad es.), l'immagine intermedia viene trasportata da una lente-relé oltre la sua posizione normale. Nella prima immagine intermedia si può porre il crocefilo o qualunque altro reticolo con la certezza che tutto ciò che viene dopo (tubo bioculare, ecc.) non può ruotare il reticolo. Con questa soluzione, si ha inoltre il vantaggio che il reticolo viene visto in entrambi gli oculari.

[38] Quel dispositivo facilita anche il conteggio e le misure volumetriche sui granuli componenti una sezione di roccia.

[39] In realtà, occorrerebbe parlare del "secondo piano focale" dell'obbiettivo, ma in pratica esso coincide abbastanza bene colla pupilla d'uscita, almeno negli obbiettivi medio-forti.

piano di quest'immagine intermedia ravvicinata si pone il diaframma ad iride; esso non risulta visibile nell'oculare (così come non risulta visibile l'immagine dell'oggetto in presenza della lente di Amici) poiché esso si trova assai lontano dal suo piano focale. La funzione del diaframma è quindi di limitare l'immagine dell'oggetto posto sul tavolino senza diaframmare l'immagine della pupilla d'obbiettivo. In questo modo è possibile limitare il campo visivo ad una porzione limitata dell'oggetto e formare la figura d'interferenza in base ad un solo cristallo elementare presente in una sezione sottile di una roccia od altro agglomerato cristallino. Di solito, il diaframma è adiacente alla lente di Amici.

— i polarizzatori usati dovranno essere di ottima qualità per assicurare un fondo veramente nero in condizioni di estinzione e migliorare il contrasto dell'immagine. Un tale miglioramento fornisce la possibilità di rivelare la presenza di oggetti debolmente birifrangenti, cioè aumenta la sensibilità dello strumento. In biologia, si ha spesso a che fare con oggetti assai debolmente birifrangenti ed il grado di annerimento del fondo è la prima condizione per poterli rivelare. Inoltre, i polarizzatori debbono essere, per quanto possibile, "neutri", cioè incolori; una semplice verifica di questa proprietà si esegue in assenza di oggetto incrociando i Nicol: il fondo dell'immagine deve essere privo di colore.

— gli obbiettivi ed i condensatori debbono essere costruiti in modo da alterare il meno possibile lo stato della radiazione polarizzata. Gli obbiettivi normali a questo punto non servono più. I mezzi per realizzare obbiettivi speciali per radiazione polarizzata (contrassegnati in genere con la sigla "POL") sono essenzialmente quattro:

1) Usare vetro libero da birifrazione indotta, cioè libero da tensioni interne createsi durante il raffreddamento del vetro fuso, e libero da compressioni operate durante la lavorazione ed il montaggio meccanico. Tale vetro è chiamato **non tensionato** (**strain-free** degli autori inglesi, **non contraint** dei francesi).

2) Curare molto i trattamenti anti-riflettenti delle superfici delle lenti per attenuare i fenomeni di rotazione del piano di polarizzazione che sono dovuti alla polarizzazione della radiazione riflessa e trasmessa da ogni superficie vetro-aria. Di questo fenomeno si è parlato più sopra.

3) Usare obbiettivi col minor numero possibile di lenti, cioè del tipo acromatico o simili.

4) Evitare nella ricetta dell'obbiettivo i cristalli naturali come la fluorite che possono presentare deboli birifrangenze, benché cristallizzino nel sistema monometrico. Oggi però si fabbrica della fluorite artificiale quasi priva di potere birifrattivo.

Come si vede, gli obbiettivi **Pol** debbono essere costruiti con cure particolari ed essere maneggiati con delicatezza per evitare urti o tensioni meccaniche interne.

— il condensatore, trovandosi compreso fra i Nicol, deve obbedire alle stesse condizioni degli obbiettivi, cioè essere privo di birifrazione o potere rotatorio: vetro non tensionato, buoni trattamenti anti-riflettenti, ecc.

— gli oculari possono essere in genere di tipo normale ma, se presentano un potere birifrattivo sensibile, in accoppiamento con l'analizzatore possono costituire un piccolo polariscopio che disturba la formazione dell'immagine principale. Anch'essi vengono quindi costruiti con vetri non tensionati e con cure speciali, e quindi contrassegnati con la sigla **Pol**. Certi costruttori poi usano mettere, per osservazioni qualitative, l'analizzatore sopra l'oculare; in tal caso anche l'oculare deve essere privo di birifrazione propria, poiché si trova fra i Nicol.

Obbedendo a tutti gli accorgimenti elencati finora, il microscopio polarizzatore diviene un vero strumento di misura e di indagine quantitativa.

Il campo di applicazione ove il microscopio polarizzatore è chiamato a rivelare le più deboli birifrangenze può essere la biologia. In questi casi, si richiede la rivelazione e la misura di sfasamenti fra raggio ordinario e straordinario fino a $\lambda / 10.000$ con oggetti fino a 0,2 μ di diametro. Per queste applicazioni, anche i migliori obbiettivi tradizionali, confezionati secondo gli accorgimenti sopra elencati, presentano sempre una certa rotazione del piano di polarizzazione causata dalle rifrazioni aria-vetro; tale rotazione può arrivare negli

obbiettivi forti a 5 - 6° ed è sufficiente per dare un velo grigio di fondo nell'immagine a Nicol incrociati. È questa luminosità diffusa di fondo che toglie contrasto all'immagine.

Si sono così studiati dispositivi speciali che permettono di ridurre la rotazione del piano di polarizzazione. Accenniamo solo a quello costruito in passato dalla casa American Optical Co. (USA), che contiene, sopra al sistema di lenti di un normale obbiettivo, una lamina mezz'onda ($\lambda/2$) la quale, se ruotata con le direzioni principali a 45° dal piano di vibrazione del polarizzatore, produce un fascio linearmente polarizzato ma ruotato di 90° rispetto a quello incidente.

Dopo la lamina mezz'onda si dispone un doppietto non incollato di potenza complessiva nulla, che non modifica la formazione dell'immagine. Tale doppietto produce una rotazione del piano di polarizzazione come il sistema convergente dell'obbiettivo che lo precede, ma il sistema convergente agisce su radiazione polarizzata in un certo piano ed il doppietto su radiazione polarizzata in un piano ortogonale. In ogni quadrante del fascio si hanno così effetti sottrattivi, nel senso che una rotazione in un senso operata dal sistema convergente è compensata da analoga rotazione in senso opposto del doppietto afocale.

Applicando questa compensazione anche al condensatore, si arriva ad angoli di rotazione totali del piano di polarizzazione di 0,2°.

Questi sistemi corretti trovano applicazione nello studio di strutture viventi finissime.

8.2 - Le OSSERVAZIONI QUALITATIVE al MICROSCOPIO POLARIZZATORE

Consistono in sostanza nel riconoscere e mettere in evidenza gli oggetti birifrangenti. Questo può essere utilissimo in biologia per osservare particolari strutture viventi o non viventi, nella tecnologia dei vetri o altri materiali trasparenti per rivelare la presenza di tensioni interne, per lo studio dei fenomeni di foto-elasticità, cioè di birifrazione indotta da forze di vario genere (vedi sopra), per individuare in qualunque materiale composto la presenza di granuli cristallini, di fibre di amianto, ecc.

Si è già detto che queste osservazioni qualitative si possono eseguire su uno stativo normale con corredo ottico normale, munito di due polarizzatori e di un tavolino girevole.

A Nicol incrociati, il fondo dell'immagine appare nero poiché il vettore trasmesso dal polarizzatore non ammette componenti in una direzione perpendicolare ad esso come quella di vibrazione dell'analizzatore.

In queste condizioni, l'oggetto non birifrangente appare invisibile poiché non altera lo stato della radiazione polarizzata fra i due Nicol.

L'oggetto birifrangente apparirà luminoso o colorato sul fondo nero; il valore di questa luminosità o il colore dipendono dall'orientamento dell'oggetto in senso azimutale e dallo sfasamento **D** fra i due fasci birifratti dall'oggetto stesso, creati per sdoppiamento del fascio proveniente dal polarizzatore. **D** dipende, come si è detto, dallo spessore percorso nell'oggetto dalla radiazione, dal suo orientamento e dal potere birifrattivo dell'oggetto stesso, e lo si può dedurre dalla tavola di Michel Lévy (Tav. fuori testo).

Inoltre, dall'esame della fig. 14 a, si comprende come i due vettori dei raggi birifratti, decomponendosi nell'analizzatore, portino all'interferenza di due vettori che hanno subìto uno sfasamento di mezza lunghezza d'onda: se i due raggi birifratti sono in fase uscendo dall'oggetto, sono in opposizione di fase le loro componenti che interferiscono nell'analizzatore ed in questo caso l'oggetto appare nero dopo l'analizzatore; la presenza di un analizzatore incrociato col polarizzatore corrisponde dunque all'aggiunta di uno sfasamento di mezza lunghezza d'onda fra i raggi birifratti.

A Nicol paralleli, il fondo immagine appare bianco poiché l'analizzatore non modifica lo stato della radiazione polarizzata trasmessa dal polarizzatore. I due raggi birifratti dall'oggetto vengono ricondotti senza alterazione di fase a vibrare nello stesso piano della sezione principale dell'analizzatore e quindi, all'atto di interferire, i due raggi si trovano sfasati di mezza lunghezza d'onda in più o in meno rispetto a quanto si verificava a Nicol incrociati (fig. 14 b).

I colori d'interferenza presentati dall'immagine dell'oggetto a Nicol paralleli sono dunque spostati di mezza lunghezza d'onda nella serie di Newton, cioè sono complementari di quelli osservabili a Nicol incrociati[40] ed appaiono meno saturi. Mancando il fondo nero, il contrasto dell'immagine è sempre minore e quindi non si lavora quasi mai a Nicol paralleli.

L'introduzione di un compensatore fisso ad onda intera (λ) produce a Nicol paralleli un colore verde sbiadito, mentre a Nicol incrociati dà il magenta o "tinta sensibile", di cui si è già parlato. Si è detto come questo compensatore permetta di rivelare con vistosi cambiamenti del colore dell'immagine anche oggetti debolmente birifrangenti, e come esso possa trasformare un'immagine in bianco e nero a debole contrasto in un'immagine con vivi contrasti di colori (Figg. 3, 4, 6 e 23).

Si tenga presente che, in generale, l'immagine di un oggetto birifrangente (e quindi anche di un compensatore) fra Nicol incrociati presenta colori tanto più vivi quanto più si avvicina a 45° l'angolo fra le sezioni principali dei polarizzatori e le direzioni previlegiate dell'oggetto.

Se tale angolo diminuisce fino a zero, cioè fino al parallelismo fra piani di vibrazione dell'oggetto e dei Nicol, i colori divengono sempre più scuri ma rimangono saturi, fino a scomparire; si hanno allora le già citate "posizioni di estinzione".

Fra Nicol paralleli si hanno colori complementari, ma anch'essi rimangono collo stesso grado di saturazione al variare della posizione dell'oggetto, salvo divenire sempre più scuri e scomparire nelle note posizioni di estinzione. Poiché esiste però un fondo chiaro, i colori d'interferenza scuri si sovrappongono al fondo ed appaiono sbiaditi. Ecco perché a Nicol paralleli i colori d'interferenza sembrano meno saturi e questa tecnica è raramente usata.

Se poi si parte da un oggetto a 45° dalle sezioni principali dei polarizzatori, osservando a Nicol incrociati, e poi si ruota lentamente l'analizzatore (od il polarizzatore), si vedono colori sempre luminosi ma sempre meno saturi, fino a completa scomparsa dei colori (oggetto invisibile su fondo bianco) per un angolo reciproco fra le due sezioni principali dei polarizzatori di 45°. Con tale posizione dei polarizzatori, nessun colore d'interferenza è visibile, se la posizione dell'oggetto non cambia. Se si continua a ruotare l'analizzatore verso la posizione di parallelismo col polarizzatore, compaiono i colori complementari.

Ogni inclinazione dell'oggetto birifrangente rispetto all'asse ottico dello strumento fa cambiare i colori d'interferenza poiché fa cambiare lo spessore di oggetto attraversato dalla radiazione incidente, nonché il potere di birifrazione dell'oggetto, che è legato alla direzione di propagazione.

8.3 - OSSERVAZIONI QUANTITATIVE al MICROSCOPIO POLARIZZATORE con CAMMINO ORTOSCOPICO

Il **cammino ortoscopico** della radiazione si realizza in un microscopio diminuendo l'apertura del fascio proveniente dal condensatore, cioè chiudendo il diaframma d'apertura. Come si è detto, da ogni punto di tale diaframma si può pensare originato un fascio conico

[40] Si tratta di una semplificazione: in realtà si ha per Nicol paralleli una "serie di Newton" completamente diversa.

divergente; essendo il diaframma posto nel piano focale del condensatore, ogni fascio conico diviene parallelo a livello dell'oggetto ed è questo lo scopo da raggiungere, l'essenza del metodo ortoscopico.

Un fascio perfettamente parallelo a livello dell'oggetto si può avere solo con una sorgente puntiforme posta nel piano focale del condensatore, cioè chiudendo il più possibile il diaframma; ma non è ragionevole arrivare a questo limite poiché la quantità di radiazione disponibile scenderebbe di troppo, ed inoltre la risoluzione dell'obbiettivo ne soffrirebbe molto. In pratica, si deve accettare di lavorare con una apertura non nulla, cioè con raggi non del tutto paralleli.

Dall'altro lato, aumentando troppo l'apertura, si viene a creare un distinto colore d'interferenza per ogni valore di inclinazione (di apertura) dei raggi cioè per ogni direzione entro l'oggetto, ed il contrasto dell'immagine diminuisce. Occorre allora cercare un compromesso.

Anche nel microscopio interferenziale si ha lo stesso problema: ridurre il più possibile l'apertura del fascio di illuminazione per non perdere di contrasto (e di precisione di misura) senza però danneggiare troppo la risoluzione dell'obbiettivo. Le ragioni di questa limitazione sono analoghe; si può del resto stabilire un parallelismo di principio fra polariscopio ed interferometro, o fra microscopio polarizzatore e microscopio interferenziale: nel polariscopio si ha un fascio di radiazione che viene sdoppiato dall'oggetto ed i due fasci parziali interferiscono a livello dell'analizzatore, a somiglianza di quanto avviene in un interferometro (di Mach-Zehnder, di Jamin, ecc.). Ciò che si osserva all'uscita del polariscopio o dall'interferometro è il risultato dell'interferenza dei due fasci parziali, e poiché il rapporto di fase fra i due fasci dipende dalla direzione, è ovvio che l'interferenza darà risultati netti solo con radiazione parallela, a bassa apertura (teoricamente ad apertura nulla).

L'osservazione ortoscopica dunque, ritornando al discorso iniziale, differisce da quella abituale al microscopio a campo chiaro solo per la ridotta apertura a livello dell'oggetto. In certi stativi si aggiunge sotto al condensatore una lente convergente per aumentare la luminosità dell'immagine, ma ciò non è essenziale.

Nel paragrafo precedente, parlando delle osservazioni qualitative, si è tacitamente supposto di usare il percorso ortoscopico.

Ebbene, le misure e le determinazioni quantitative si possono eseguire col cammino ortoscopico o conoscopico; esse richiedono in ogni caso uno stativo speciale: la rotazione del tavolino e dei polarizzatori deve essere misurabile, si devono poter usare i più svariati tipi di compensatori, si deve poter applicare un tavolino teodolitico o universale di Fedorow, vi deve essere nell'oculare una croce di riferimento con i bracci paralleli alle sezioni principali dei polarizzatori, deve esistere la lente di Amici.

Con un tale strumento specializzato si possono eseguire in ortoscopìa le seguenti determinazioni su oggetti birifrangenti ridotti in lamine sottili:

— identificare la direzione dell'asse o degli assi ottici, magari a mezzo del tavolino universale; quando l'asse ottico dell'oggetto coincide con l'asse dello strumento, l'oggetto appare sempre invisibile, cioè estinto, anche se si ruota il tavolino (quindi l'oggetto) attorno all'asse dello strumento;

— identificare le quattro posizioni di estinzione dell'oggetto per le quali le sue direzioni previlegiate sono parallele ai piani principali dei polarizzatori; per qualunque oggetto birifrangente comunque orientato si presentano quattro posizioni di estinzione nel corso di una rotazione di un giro intero attorno all'asse del microscopio (cioè ruotando il tavolino): una estinzione ogni 90°;

— misurare gli angoli formati dall'asse ottico dell'oggetto o dalle posizioni di estinzione di esso con certe direzioni geometriche dell'oggetto (per es. i suoi contorni, la direzione della fratturazione o sfaldamento spontaneo, ecc.); la misura si esegue a mezzo dei cerchi graduati del tavolino normale o di quello teodolitico;

— identificare le direzioni di massimo e minimo indice della lamina in esame; ciò si può

fare, come si è visto, disponendo l'oggetto con le sue direzioni previlegiate parallele a quelle del compensatore rosso 1° ord.; se i colori d'interferenza dell'oggetto "salgono" dopo l'introduzione della lamina compensatrice, la direzione di massimo indice dell'oggetto (γ) coincide con quella del compensatore; se i colori "scendono", cioè divengono più vivi, le due direzioni di massimo indice sono perpendicolari;

— misurare il potere di birifrazione dell'oggetto; se l'oggetto è poggiato su un tavolino normale, cioè ruota soltanto attorno all'asse ottico dello strumento, si può eseguire la misura in una direzione costante, perpendicolare alla lamina, parallela all'asse dello strumento. Col tavolino di Fedorow invece si può eseguire la misura in infinite direzioni e determinare così quelle di massimo e minimo potere di birifrazione; si trovano così le direzioni per cui si ha il massimo e minimo indice del raggio straordinario.

Il potere birifrattivo è un'importante caratteristica degli oggetti e serve ottimamente come mezzo di riconoscimento. Nella misura si tenga conto dell'inclinazione della lamina in esame (quando si usa il tavolino teodolitico) cioè dello spessore di essa attraversato dalla radiazione.

Si ricordi che la misura del potere di birifrazione si può eseguire semplicemente in base all'identificazione dei colori di interferenza, ma se l'ordine dei colori è elevato si possono commettere gravi errori poiché le varie bande colorate tendono ad assomigliarsi. La compensazione con un compensatore cuneiforme fino ad ottenere il nero nell'immagine dell'oggetto dà risultati sicuri poiché la banda nera nella serie di Newton è una sola e non sono possibili confusioni; ma la misura non è precisa per le ragioni sopra citate. Il cuneo si introduce nell'apposita fessura e si fa scivolare lungo il suo lato maggiore fino ad ottenere la compensazione, cioè l'immagine nera dell'oggetto.

Risultati più precisi si ottengono con i compensatori regolabili di cui si è già parlato. Si possono eseguire misure con precisione superiore ad un millesimo di lunghezza d'onda. I compensatori si pongono sempre nello spazio compreso fra i polarizzatori, prima o dopo l'oggetto, generalmente fra obbiettivo ed analizzatore.

8.4 - OSSERVAZIONI QUANTITATIVE col SOLO POLARIZZATORE

Se l'oggetto è pleocroico, illuminandolo con radiazione polarizzata e facendo ruotare il tavolino si può misurare il coefficiente di assorbimento o il colore (con uno spettroscopio pupillare) per tutte le direzioni di vibrazione giacenti nel piano dell'oggetto. Se l'oggetto è montato sul tavolino universale, la misura di pleocroismo si può eseguire in tutte le direzioni di vibrazione all'interno dell'oggetto (nello spazio).

Osservando l'oggetto in conoscopia, si ha la visione simultanea degli effetti di pleocroismo che si verificano in un fascio di direzioni di propagazione (con direzione unica di vibrazione) comprese nel cono di apertura utile dell'obbiettivo (supposto che l'apertura utile del condensatore sia almeno uguale a quella dell'obbiettivo). Mancando l'analizzatore, i colori d'interferenza non si formano e non si confondono con quelli di pleocroismo.

Il rapporto fra i coefficienti di assorbimento massimo e minimo presentati da un oggetto rappresenta un utile dato per l'identificazione della specie chimica e mineralogica dell'oggetto stesso.

Per quanto riguarda la misura dell'indice di rifrazione dell'oggetto, si usa il metodo della "linea di Becke"[41]: l'oggetto isolato è immerso in un liquido di indice noto; per fenomeni

[41] Friedrich Johann Karl BECKE (1855 - 1931), mineralogista e petrografo cecoslovacco.

complessi di rifrazione, riflessione e diffrazione a livello della linea di contatto fra oggetto e liquido, si forma nell'immagine una linea scura che segna il contorno dell'oggetto: tale linea è la "linea di Becke". Focheggiando in modo da abbassare l'obbiettivo, la linea si sposta dal mezzo più rifrangente (ad es. l'oggetto) a quello meno rifrangente (ad es. il liquido). Quando l'obbiettivo sale, la linea si sposta in senso opposto. Si abbia cura di aumentare la visibilità della linea di Becke chiudendo circa a metà corsa il diaframma d'apertura.

Si procede per successive approssimazioni usando liquidi di diverso indice. Quando l'indice dell'oggetto e del liquido sono uguali, la linea di Becke scompare; misurando l'indice del liquido al rifrattometro (supponendo di non conoscerlo già) si conosce l'indice dell'oggetto.

Se l'oggetto è isotropo, il metodo della linea di Becke si può applicare con un microscopio normale, senza usare radiazione polarizzata. È sufficiente usare l'accorgimento già illustrato di chiudere molto il diaframma d'apertura per rendere più contrastata la linea di Becke.[42]

Se invece l'oggetto è anisotropo, anche il suo indice varia a seconda della direzione di vibrazione e propagazione considerata, e la misura di esso va eseguita con radiazione polarizzata di cui si conosca la direzione di propagazione e vibrazione. Col solo polarizzatore è possibile misurare l'indice dell'oggetto in tutte le direzioni nel piano della lamina-oggetto. Per conoscere l'indice massimo e minimo possibile di una data sostanza o minerale è ovviamente necessario che l'oggetto sia tagliato in modo da contenere nel piano della lamina le direzioni di indice massimo e minimo.

Scompare la linea di Becke quando l'oggetto presenta lo stesso indice del liquido circostante nella direzione parallela a quella di vibrazione delle radiazioni provenienti dal polarizzatore.

Disponendo di numerosi granuli dello stesso materiale (o di un granulo abbastanza grande da poter essere frantumato), si può misurare col metodo della sostituzione dei liquidi l'indice di numerosi granuli; supponendo che essi siano caoticamente disposti nel preparato, i valori minimo e massimo misurati, si avvicinerano molto a quelli reali, poiché almeno una coppia di granuli saranno orientati in modo da presentare i valori minimo e massimo dell'indice di quel materiale.

8.5 - DETERMINAZIONI QUANTITATIVE in OSSERVAZIONE CONOSCOPICA

Al microscopio polarizzatore, l'osservazione conoscopica si realizza aprendo al massimo il diaframma d'apertura e scegliendo condensatore ed obbiettivo della massima apertura possibile; molte ditte costruiscono nella loro serie di obbiettivi un tipo di medio ingrandimento e forte apertura (ad es. il 50:1, NA = 0,9) che è destinato proprio all'osservazione conoscopica[43].

Quello che si vede nella pupilla d'uscita dell'obbiettivo è la sezione di un fascio corrispondente all'apertura utile dell'obbiettivo; se il condensatore ha un'apertura minore dell'obbiettivo, l'apertura di quest'ultimo risulta limitata allo stesso valore.

Per la comoda osservazione della pupilla d'uscita dell'obbiettivo e della figura d'interferenza che vi si forma si può usare un oculare speciale, il "microscopio ausiliario"

---

[42] A questo scopo è possibile anche sfruttare il metodo del contrasto di fase, il che è assai utile nel caso delle polveri.

[43] Si possono usare anche obbiettivi e condensatori ad immersione per disporre di aperture maggiori di 0,95; lo scopo è sempre di osservare il maggior numero possibile di isocromatiche.

usato anche in contrasto di fase, oppure l'apposita lente di Amici. Se si dispone di un tubo bioculare e non si inserisce la lente di Amici, si può osservare in uno degli oculari l'immagine ortoscopica e simultaneamente, sostituendo l'altro oculare col microscopio ausiliario, si può osservare l'immagine conoscopica.

Poiché nel piano focale posteriore dell'obbiettivo, oltre alla figura d'interferenza eventuale, si osserva l'immagine del diaframma d'apertura e quindi l'immagine della sorgente che la microlampada proietta su quel diaframma (immagine del filamento, dell'arco, ecc.), occorrerà che la sorgente presenti una superficie sufficientemente estesa ed uniformemente luminosa. In caso contrario, l'immagine fornita dalla lente di Amici presenterebbe un fondo di luminosità irregolare. Per migliorare questa uniformità, si usa spesso una leggera smerigliatura su una o più superfici delle lenti del collettore o su apposito filtro.

Si è già parlato dell'aspetto generale delle figure d'interferenza; da quanto si è detto, si comprende come l'osservazione conoscopica permetta di distinguere i corpi birifrangenti uniassici da quelli biassici; la miglior prova che un corpo è biassico si ottiene ruotando il tavolino con l'oggetto e constatando lo sdoppiamento della croce nera in due rami d'iperbole. La curvatura delle iperboli è tanto più forte quanto più piccolo è l'angolo fra gli assi ottici.

Per distinguere i corpi birifrangenti positivi da quelli negativi (cioè quelli con indice straordinario maggiore o minore di quello ordinario), si fa uso dei compensatori seguenti:

— col compensatore rosso di 1° Ordine, la figura d'interferenza dei corpi uniassici presenta dei settori opposti gialli e blu; i settori blu coincidono con la direzione γ del compensatore quando il corpo è positivo; la coincidenza fra settori gialli e direzione γ del compensatore indica un corpo negativo (fig. 22). Nei corpi biassici si presentano delle figure nere a forma di piccola mezzaluna con analogo significato dei settori blu sopra descritti per i corpi uniassici;

— col compensatore fisso "quarto d'onda", il rapporto degli indici ordinario e straordinario dell'oggetto è indicato dalla posizione di caratteristici punti neri che compaiono nella figura d'interferenza: il corpo è positivo quando i punti neri si trovano su una retta parallela alla direzione γ del compensatore; per i cristalli biassici la figura è più complessa.

— con il cuneo di quarzo, si osservano spostamenti in un senso o nell'altro dei colori d'interferenza al variare della posizione del cuneo: il corpo è birifrangente positivo quando un aumento di spessore della zona interessata del cuneo fa "salire" i colori d'interferenza nei quadranti orientati secondo la direzione del γ del cuneo.

Se poi si dispone di un tavolino universale, è possibile rivelare con esattezza la posizione degli assi ottici (si ricordi che con due lamine quarto d'onda poste prima e dopo l'oggetto la posizione degli assi ottici è segnata da due punti neri e la croce nera abituale scompare) e misurare l'angolo fra gli assi ed altre direzioni particolari nell'oggetto.

Per maggiori dettagli sull'argomento, il lettore è rinviato ai testi di mineralogia ed ottica cristallografica citati in bibliografia.

9 - LA RADIAZIONE POLARIZZATA in EPISCOPIA e la BIRIFLESSIONE

Si è già visto che, all'atto della riflessione e della rifrazione da parte di un corpo isotropo, la radiazione ottica viene parzialmente o totalmente polarizzata, senza però venire decomposta in due fasci (riflessi o rifratti) polarizzati in piani fra loro perpendicolari e più o meno sfasati reciprocamente.

Invece, all'atto di incidere su un corpo anisotropo, oltre alla parziale polarizzazione

appena citata, sia la frazione trasmessa (rifratta) che quella riflessa di ogni onda incidente viene decomposta in due onde trasmesse e due riflesse, polarizzate in piani rispettivamente perpendicolari ed eventualmente sfasate fra loro.

Per la parte trasmessa si parla di "birifrazione" ed è ciò di cui si è discusso finora; per la parte riflessa useremo definire lo sdoppiamento del fascio riflesso col termine **biriflessione**.

Dunque ogni fascio incidente sulla superficie lucida di un corpo birifrangente (se la superficie fosse scabrosa, la radiazione verrebbe diffusa) viene riflesso e simultaneamente sdoppiato in due fasci polarizzati. Se la radiazione incidente è polarizzata anch'essa, si potranno verificare nella radiazione riflessa fenomeni di polarizzazione rettilinea, ellittica o circolare a somiglianza di quanto si è visto avvenire con i corpi birifrangenti di diverso valore di sfasamento.

La biriflessione può aver luogo anche per incidenza normale, come avviene per la birifrazione.

Anche la biriflessione mostra una certa "dispersione", cioè varia di valore al variare della lunghezza d'onda, ancora a somiglianza con la birifrazione.

Ruotando il corpo biriflettente attorno alla normale alla superficie riflettente ed osservando il corpo fra Nicol incrociati[44] si possono ancora osservare quattro posizioni di estinzione (parziale stavolta) analoghe a quelle che si verificano osservando per trasparenza un corpo birifrangente. Ruotato di 45° rispetto alla posizione di estinzione, il corpo biriflettente mostra il massimo potere riflettente complessivo. Allora in tale corpo esistono due direzioni (chiamate "direzioni principali", corrispondenti alle direzioni previlegiate dei corpi birifrangenti) parallelamente alle quali vibrano le radiazioni biriflesse. Parallelamente alle stesse direzioni principali, si nota anche un fenomeno già studiato nei corpi isotropi: il potere riflettente assume valori diversi, uno massimo ed uno minimo, per cui la radiazione riflessa è globalmente polarizzata, anche per questo motivo. Una certa differenza di potere assorbente esiste anche nel caso dei fenomeni di birifrazione, ma è piuttosto rara, e corrisponde al già citato pleocroismo, fenomeno, appunto, eccezionale.

In certi casi, oltre ad un diverso potere riflettente, si possono notare parallelamente alle direzioni principali dei diversi colori, per cui all'atto della riflessione possono avvenire in un corpo anisotropo gli stessi fenomeni di pleocroismo colorato studiati a proposito della birifrazione.

Possiamo allora così schematizzare i fenomeni ottici che ci interessano:

[44] Ovviamente, si adopera un microscopio episcopico, "a riflessione".

<table>
<tr><th></th><th>RIFLESSIONE</th><th>RIFRAZIONE</th></tr>
<tr><td rowspan="2">CORPI

ISOTROPI</td><td>Polarizzazione parziale (o totale per angoli d'incidenza pari all'angolo di Brewster), purché l'incidenza non sia normale.</td><td>Polarizzazione sempre parziale (tranne che per incidenza normale).</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nessun fascio è sdoppiato in due fasci polarizzati in piani rispettivamente perpendicolari: non si ha né birifrazione né biriflessione.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">CORPI

ANISOTROPI</td><td>PLEOCROISMO (differenza di potere riflettente o di colore al variare della direzione) e quindi parziale polarizzazione del fascio riflesso globale, anche per incidenza normale.</td><td>PLEOCROISMO (raro) cioè differenza del coefficiente di assorbimento o del colore al variare della direzione, e quindi polarizzazione del fascio trasmesso globale.</td></tr>
<tr><td>BIRIFLESSIONE</td><td>BIRIFRAZIONE</td></tr>
<tr><td colspan="2">cioè sdoppiamento di ogni fascio incidente in due fasci riflessi o trasmessi polarizzati in piani reciprocamente perpendicolari ed eventualmente sfasati fra loro. Polarizzazione del fascio globale trasmesso o riflesso di tipo rettilineo, ellittico o circolare (se il fascio incidente è polarizzato). Tutto ciò eventualmente anche con incidenza normale.</td></tr>
</table>

Per osservare il duplice fenomeno della biriflessione (sdoppiamento del fascio incidente in due fasci riflessi polarizzati in piani perpendicolari) e del pleocroismo per riflessione, ci si serve di un microscopio episcopico, munito cioè di un opaco-illuminatore od illuminatore verticale.

Le applicazioni di questa tecnica si hanno in mineralogia, in chimica, in metallografia, in biologia.

Per l'osservazione a Nicol paralleli od incrociati, si pone il polarizzatore prima dell'elemento semi-riflettente[45], in modo che esso sia attraversato dal solo fascio di illuminazione, e l'analizzatore sopra allo stesso elemento semi-riflettente e prima dell'oculare, in modo da essere traversato dal solo fascio che forma l'immagine.

Considerando che in episcopia l'obbiettivo svolge il ruolo di condensatore per il fascio illuminante e che il semi-riflettente svolge le funzioni di specchietto di illuminazione, la posizione citata dei polarizzatori si può così schematizzare: Sorgente - Polarizzatore - Specchio – Condensatore (= obbiettivo) - Oggetto - Obbiettivo - Analizzatore - Oculare. Si ha così lo stesso schema di un microscopio polarizzatore a trasmissione, tranne che la posizione del polarizzatore è prima dello specchio (semi-riflettente nel caso nostro) invece che fra specchio e condensatore.

Da quanto si è detto finora, si comprende come il dispositivo semi-riflettente (lamina o prisma) contenuto nell'opaco-illuminatore, sia capace di alterare lo stato della radiazione polarizzata incidente su di esso. Pertanto occorre aver cura di orientare il polarizzatore in modo che il suo piano di vibrazione sia parallelo ad una delle direzioni principali del semi-riflettente; così si evita la eventuale biriflessione del fascio incidente poiché lo specchio lavora in condizioni di estinzione. In genere, si sceglie una direzione di vibrazione del polarizzatore che sia perpendicolare al piano d'incidenza poiché in queste condizioni il potere riflettente ha in genere il massimo valore possibile per quel dato corpo riflettente e quel dato angolo d'incidenza. D'altra parte, questa maggiore reflettività abbassa il rendimento fotometrico nel cammino di ritorno, formatore d'immagine.

Il polarizzatore non andrà più spostato da quella posizione. All'occorrenza, si ruota l'analizzatore.

La regolazione dello strumento sarà in genere assai critica a causa della molteplicità dei

[45] Vedi l'articolo n° 2 ("Sguardo generale ai metodi …"), presente nel medesimo sito.

fenomeni spuri che si possono presentare, e che possono mascherare il fenomeno principale che si cerca di studiare.

È ancora possibile introdurre compensatori fra il semi-riflettente e l'analizzatore; con un compensatore variabile è possibile misurare lo sfasamento fra i due raggi biriflessi ed inoltre è possibile "compensare" tale sfasamento in modo da eliminare l'effetto di biriflessione; in queste condizioni permane l'effetto di pleocroismo per riflessione che potrà venir studiato separatamente.

Nel microscopio polarizzatore a riflessione va escluso naturalmente tutto il sistema di illuminazione per trasparenza che sta sotto il tavolino, anche se molti strumenti consentono entrambi i tipi di illuminazione.

L'oggetto non va tagliato in lamine sottili piano-parallele, ma da esso si dovrà ricavare una o più superfici lucide e piane.

Le osservazioni che è possibile fare sono in genere eseguite a Nicol incrociati ed in ortoscopia:

— i colori di pleocroismo si possono osservare col solo polarizzatore[46]; a Nicol incrociati si osservano anche in assenza di pleocroismo degli effetti di colore dovuti essenzialmente alla dispersione della biriflessione o del pleocroismo; questi colori da dispersione si presentano anche nelle posizioni di estinzione, per cui **l'oggetto non appare mai completamente nero**; i fenomeni della biriflessione sono assai più complessi di quanto si sia schematizzato nelle pagine che precedono, per cui si hanno spesso delle immagini di difficile interpretazione;

— si può poi osservare che il colore e la lucentezza delle facce di un cristallo non sono gli stessi per tutte le facce, ed i loro valori rispettano la simmetria del cristallo;

— il potere riflettente si può misurare in varie direzioni col solo polarizzatore, e la misura può essere affinata con l'uso di micro-fotometri; si possono eseguire misure su piccolissime superfici[47]. Il potere riflettente è in genere maggiore per quei corpi e per quelle direzioni per cui l'indice di rifrazione è maggiore;

— in linea di principio, è possibile applicare il metodo conoscopico anche alle osservazioni per riflessione. La discussione dei risultati esula dai nostri scopi. Maggiori dettagli si cerchino nei lavori di A.F. Hallimond e Conn-Bradshaw, ecc.

10 - CONCLUSIONI

Un polariscopio è uno strumento concepito per l'esame dei corpi birifrangenti e delle loro proprietà ottiche. Essenzialmente è costituito da due Nicol paralleli o incrociati; ponendo l'oggetto fra i Nicol ed osservando per trasparenza, si rendono visibili certe modificazioni che la radiazione polarizzata subisce quando attraversa l'oggetto.

Col polariscopio si possono rivelare gli oggetti birifrangenti e, con opportuni accorgimenti, si possono studiare i colori d'interferenza e le immagini conoscopiche provocate dalle proprietà birifrattive dell'oggetto.

Si sono esaminati i principali fenomeni provocati dalla polarizzazione delle radiazioni ottiche e dalla birifrazione in certi corpi dotati di anisotropìa; tali fenomeni sono osservabili su scala macroscopica con qualunque polariscopio.

Ma si può combinare un polariscopio (essenzialmente una coppia di filtri polarizzanti)

---

46 Al solito, le misure di colore si possono affinare a mezzo di uno spettroscopio pupillare.

47 Facendo uso di un monocromatore è possibile studiare la variazione del potere riflettente al variare della lunghezza d'onda, cioè la sua dispersione; è questo un ottimo carattere di riconoscimento dei corpi opachi.

con un microscopio per spingere lo studio della radiazione polarizzata e dei corpi birifrangenti su scala microscopica. Si arriva così al microscopio polarizzatore.

Questo può essere costituito da un normale microscopio biologico o metallografico fornito di due Nicol, ed in questo caso può permettere osservazioni qualitative o semplici riconoscimenti di oggetti particolari o direzioni previlegiate.

Oppure si arriva per gradi ad uno strumento appositamente concepito, dotato di accessori ed accorgimenti del tutto speciali, e cioè ad un microscopio polarizzatore, ben distinto da qualunque altro tipo di microscopio **per essere essenzialmente uno strumento di misura**.

Anche per lo studio dei fenomeni interferenziali esistono dispositivi per uno studio macroscopico (interferometri) e combinazioni di interferometro con microscopio che spingono lo studio a livello microscopico.

In fondo, il polariscopio non è che un interferometro in cui si studia il risultato dell'interferenza dei due fasci parziali creati dall'oggetto birifrangente; nell'interferometro classico i due fasci parziali si ottengono con altri mezzi, che spesso non fanno ricorso alla birifrazione.

Un altro paragone è possibile: tutti i dispositivi del tipo del contrasto di fase, del microscopio polarizzatore o del microscopio interferenziale, permettono di studiare le proprietà ottiche dell'oggetto senza alcun intervento su di esso (fissazione, colorazione, inclusione, ecc.). Ciò evita in molti casi la formazione di strutture artificiali per opera degli agenti chimici o fisici usati per la preparazione e colorazione dell'oggetto, e permette quindi di studiare materiale trasparente non colorato allo stato naturale, e quindi di studiare anche oggetti viventi.

Il microscopio polarizzatore in particolare permette di rivelare e misurare il potere birifrattivo dell'oggetto e quindi fornisce indicazioni preziose sulla struttura intima dell'oggetto a livello molecolare. Il suo potere d'ingrandimento passa allora in seconda linea.

La microscopia in radiazione polarizzata è ancora poco studiata, tranne forse che per le sue applicazioni alla mineralogia ed offre un terreno di studio ancora aperto. Specie da parte dei biologi, essa non viene sfruttata in tutte le sue possibilità ed è quindi augurabile che il suo studio venga approfondito.

BIBLIOGRAFIA

Una estesa bibliografia sul microscopio polarizzatore si può trovare alla sezione 6.1.4 nell'ottimo trattato di:

H. BEYER e H. RIESENBERG – "Handbuch der Mikroskopie" - Veb Verlag Technik, Berlin, 1988 . 455 pagg.

Raccomandiamo vivamente questo testo per il suo rigore, la sua completezza e la sua chiarezza. Non per niente i suoi autori sono fra i massimi esperti della casa ZEISS di Jena. Aggiungiamo:

S. BONATTI e M. FRANZINI – "Cristallografia Mineralogica" - Boringhieri SpA, Torino, 1984 (361 pagg.).

Questo testo tratta anche della moderna tecnica della diffrattografia in raggi X.

C. BURRI – "Das Polarisations-Mikroskop", Verlag Birkhauser, Basel, 1950.
F. FALINI – "Il Riconoscimento Microscopico dei Minerali" - Ist. Poligrafico dello Stato, 1953 (589 pagg.).
A. F. HALLIMOND – "Universal stage methods" - Min. Mag. Nr. 7/8, 1950.
A. F, HALLIMOND – ""Manual of the polarizing microscope", sec. ediz., Cooke, Throughton e Simms, York, 1953.
O. LEEDER und H. J. BLANKENBURG – "Polarisationsmikroskopie" - VEB Deutscher

Verlag für Grundsoffindustrie, Leipzig, 1989 (102 pagg.).

Per un approccio generale all'ottica in polarizzazione è bene rivolgersi ad un buon trattato. Citiamo solo:

F.A. JENKINS e H.E. WHITE – "Ottica" - Istituto Editoriale Universitario - Milano, 1972 (791 pagg.).