

## O 10 - La POLARIZZAZIONE della LUCE

Gli effetti visibili, le applicazioni pratiche e scientifiche ed ancora le implicazioni concettuali della *polarizzazione* della radiazione ottica sono innumerevoli e la teoria relativa è molto complessa. Per fortuna esiste, già in questo medesimo sito, un testo riassuntivo che tratta dell'argomento, anche se specificamente per le applicazioni alla microscopia ottica ("Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata") ed altri testi sono citati nella bibliografia riportata alla fine del testo precedente.

D'altra parte, molti fenomeni legati alla polarizzazione accadono nell'esperienza quotidiana o possono essere visualizzati con mezzi assai semplici. Su questi ci concentreremo per rispetto degli intenti divulgativi di questa serie di articoli, cercando di darne una spiegazione, almeno intuitiva.

Premettiamo in ogni modo un breve riassunto della teoria, per poi descrivere i materiali ed i dispositivi necessari all'osservazione di alcuni fenomeni. Quest'articolo risulterà probabilmente il più lungo della serie ma, dopo qualche osservazione pratica, speriamo che si possa concludere: "ne valeva la pena".

La radiazione ottica, quella che comunemente si chiama "luce", è composta di onde; un'onda è una variazione periodica di qualcosa: nel caso nostro, di un campo elettrico ed uno magnetico. Ogni singola onda ha una durata limitata, cioè la radiazione è data da un insieme di "treni" d'onda di lunghezza costante<sup>77</sup>, detti "fotoni".

Poiché l'onda ottica è trasversale, ogni fotone oscilla in un determinato piano ("piano di vibrazione",  $V$  in fig. 150), quindi è "polarizzato", ma la radiazione di un'usuale sorgente di luce nel suo complesso è costituita da un gran numero di fotoni che oscillano in piani orientati a caso; dunque, globalmente, tale radiazione non è polarizzata (fig. 151, A).

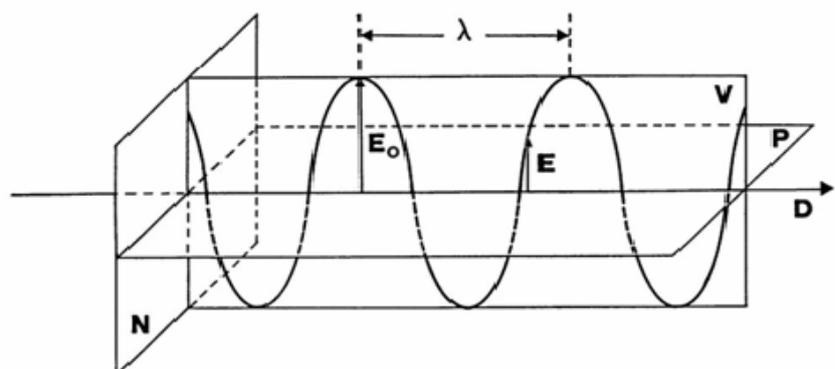
Un "polarizzatore" è un dispositivo simile ad un filtro che seleziona i fotoni che l'attraversano in modo da lasciar passare solo quelli che oscillano in una data direzione (o le componenti di tutti gli altri che oscillano in quella direzione); per questo, la radiazione emergente da un polarizzatore è polarizzata: tutti i fotoni vibrano nello stesso piano (fig. 151, B). Studiando la distribuzione dei vettori che rappresentano ognuno un singolo fotone, si può dimostrare che un polarizzatore elimina la metà dell'energia (non polarizzata) che incide su di esso, oltre alle perdite per riflessione sulle sue superfici ed alle eventuali perdite per assorbimento indesiderato.

Fig. 150

Schema di onda elettromagnetica, nella sua componente elettrica.

$D$  è la direzione di propagazione; l'onda giace in un piano ( $V$ ) che contiene  $D$ , ma il vettore che ne esprime l'ampiezza ( $E$ ) è perpendicolare a  $D$ . Si tratta di onde trasversali. Se un'onda è longitudinale (come un'onda sonora in un gas), non può essere polarizzata.

(Vedi l'articolo O4 - "Lo spettro ottico", pag. 32).



Un tempo, i polarizzatori si chiamavano "Nicol", poiché erano costituiti da prismi di calcite tagliati ed incollati secondo le indicazioni del fisico scozzese Nicol; oggi, anche se vengono ancora chiamati con quel nome, sono di solito costituiti da fogli di plastica trattati con un composto fortemente dicroico<sup>78</sup> (Herapatite).

<sup>77</sup> Trattandosi di un'entità quantistica, non si può definire la sua lunghezza, ma si può parlare di "pacchetto d'onda", come spazio entro cui esiste la probabilità di trovare il fotone.

<sup>78</sup> Il dicroismo è la proprietà di certi corpi di variare di colore a seconda della direzione di vibrazione della radiazione che li attraversa. Un caso particolare di dicroismo è una variazione dell'assorbimento, sempre secondo la

Sul piano di un polarizzatore si può dunque tracciare una direzione “privilegiata”: quella di oscillazione dei fotoni che l’attraversano (fig. 151, B); un fotone che incide su di esso oscillando obliquamente rispetto alla sua direzione privilegiata viene trasmesso solo in parte, secondo il principio del parallelogramma; se incide oscillando perpendicolarmente alla direzione privilegiata, viene soppresso o “estinto”.

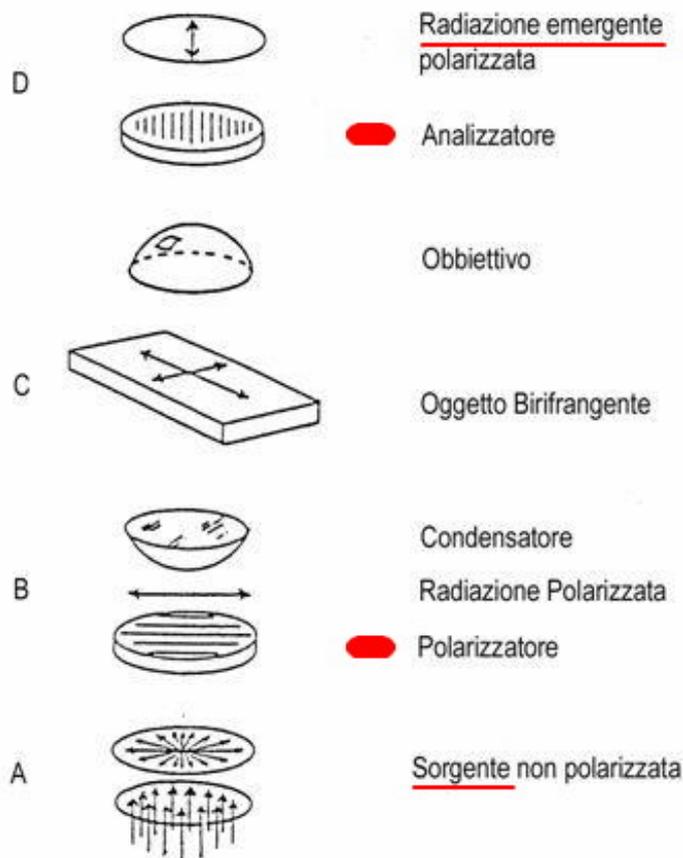
Un sistema di due filtri polarizzanti, in mezzo ai quali si possa porre un oggetto, e che si possa illuminare per trasparenza, costituisce un elementare “**polariscopio**”. Volendo estendere l’esame al livello microscopico, si abbina al polariscopio un microscopio, e si ha così un “microscopio polarizzatore”.

Fig. 151

Questo è lo schema di un **microscopio polarizzatore**. Se però si ignorano i due sistemi ottici essenziali del microscopio (obbiettivo e condensatore), rimangono le due componenti necessarie per molte delle osservazioni in polarizzazione: il polarizzatore e l’analizzatore. Si tratta di due filtri polarizzanti, identici come caratteristiche essenziali, diversi per la funzione che svolgono. La diversità di funzione è messa in evidenza proprio dalla diversità del nome loro attribuito.

Il “polarizzatore” in senso stretto trasforma un fascio di radiazione “**naturale**”, non polarizzata (A), in un fascio polarizzato (B). L’analizzatore (D) invece rivela lo stato di polarizzazione del fascio che incide su di esso, fascio che può essere stato modificato da un “oggetto” trasparente interposto (C).

Le frecce verticali in A (primo schema in basso) indicano la direzione del fascio incidente “naturale”. Tutte le altre frecce indicano la direzione dei vettori elettrici, cioè dei piani di vibrazione delle onde presenti nelle varie sezioni del sistema.



In questo strumento si pone sempre un Nicol (“Polarizzatore” in senso stretto) sotto il condensatore, o comunque prima dell’oggetto, ed uno (“Analizzatore”) sopra l’obbiettivo, o comunque dopo l’oggetto.

Se dunque, dopo il primo Nicol, detto “polarizzatore”, se ne pone un secondo (detto “analizzatore”, fig. 151, D) colla direzione di oscillazione perpendicolare a quella del primo (fig. 151, B), i fotoni emergenti dal primo Nicol vengono estinti dal secondo ed il sistema appare come se fosse opaco. Ciò in assenza di oggetti interposti.

Si parla di “fondo nero” da “Nicol incrociati” e questa posizione relativa dei polarizzatori si chiama “posizione di **estinzione**” (fig. 152).

Ora, molti oggetti naturali (rocce e la maggioranza dei corpi allo stato cristallino, parti solide di tessuti vegetali, alcuni tessuti animali come quello corneo, osseo, connettivo, muscolare) ed oggetti artificiali (fibre tessili, composti chimici, ecc.) sono “**birifrangenti**”. Questo significa che un fotone (o un fascio di radiazione), se attraversa un tale oggetto birifrangente, viene decomposto in due fasci che oscillano in due piani perpendicolari fra loro, nei quali sono contenute due **direzioni privilegiate** dell’oggetto (vedi le due frecce in fig. 151, C).

Ebbene, se poniamo tale oggetto fra due Nicol incrociati, non si ha più estinzione; per lo meno, se le direzioni privilegiate dell’oggetto sono oblique rispetto alla direzione d’oscillazione

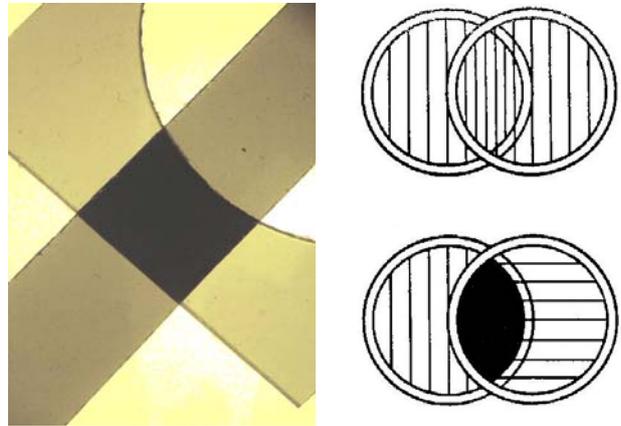
direzione di vibrazione. Il colore o l’assorbimento di un corpo dicroico assumono valori estremi (massimo e minimo) in direzioni di vibrazione a  $90^\circ$  fra loro, come i valori estremi dell’indice. Il dicroismo dell’herapatite è così forte che uno dei due raggi birifratti è trasmesso quasi senza attenuazione, mentre l’altro è totalmente assorbito, anche per spessori minimi (decimi di mm).

dei Nicol, avviene che i raggi polarizzati che incidono sull'oggetto vengono suddivisi (sempre secondo la regola del parallelogramma) in due raggi oscillanti in piani perpendicolari fra loro; questi raggi incidono sull'analizzatore obliquamente rispetto alla direzione privilegiata di esso e quindi in parte lo attraversano. Dopo di ciò essi vibrano nello stesso piano e possono interferire fra loro. Da quest'interferenza, l'immagine finale acquista dei colori e delle caratteristiche da cui è possibile risalire a talune proprietà ottiche dell'oggetto: potere birifrangente, pleocroismo, ecc. Quei colori sono chiamati, per la loro origine, "**colori d'interferenza**" (figg. 158 e segg.).

Fig. 152

Qui si mostra ciò che accade con due pezzi di foglio polarizzante HN 32 della ditta Polaroid, posti in posizione "incrociata"; i due pezzi sono stati scelti di forma irregolare per meglio identificarli. Dove sul fondo luminoso si sovrappone un solo pezzo, la luminosità è circa la metà (per quanto detto sopra, nel 6° paragrafo) mentre, dove i due filtri sono sovrapposti, il fondo è quasi nero.

A destra, uno schema, in cui i due filtri sono rappresentati come dischetti in cui la rigatura indica la direzione "privilegiata", secondo cui oscillano i vettori elettrici dei fotoni che attraversano il filtro. In posizione parallela (a destra in alto), l'analizzatore è quasi senza effetto poiché i fotoni incidenti su di esso sono paralleli alla sua direzione di vibrazione; rimane una debole perdita per riflessione sulle sue superfici e per assorbimento. In basso, l'analizzatore "estingue" il fascio polarizzato prodotto dal polarizzatore.



In questo modo, il polariscopio o il microscopio polarizzatore divengono strumenti di misura. In particolare, i risultati dell'interferenza che avviene nell'analizzatore dipendono dalla fase relativa fra i due raggi birifratti dall'oggetto, questa fase dipendendo dal potere birifrangente caratteristico dell'oggetto e dal suo spessore per cui, noto l'uno, si ricava l'altro.

La fase fra i due raggi birifratti dipende anche dalla lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) e, operando in luce bianca, avviene che si ha interferenza negativa, cioè attenuazione, per certi valori di  $\lambda$ , cioè per certi colori, e rinforzo di altri colori; in questi casi, l'oggetto appare colorato anche se, in radiazione non polarizzata, è trasparentissimo. Questi colori d'interferenza, dovuti a soppressione di certe regioni spettrali, rientrano nel concetto di "**colori di sottrazione**" (vedi alla pagina seguente).

Spesso, si ha interesse ad alterare e misurare lo sfasamento fra i due raggi birifratti dall'oggetto; ciò si ottiene con lamine birifrangenti opportune ("**compensatori**") che si introducono in un luogo qualsiasi fra polarizzatore ed analizzatore. Esse possono portare ad uno sfasamento fisso o variabile, che si somma o si sottrae da quello operato dall'oggetto, e può "compensarlo" fino ad annullarlo. In questo caso, di compensazione perfetta, l'oggetto scompare in quanto la sua birifrazione viene annullata. Poiché in questo caso la birifrazione dell'oggetto è uguale a quella del compensatore, nota la seconda si conosce la prima.

I compensatori più usati sono a sfasamento fisso: quello chiamato "mica  $\lambda/4$ " introduce uno sfasamento di  $1/4 \lambda$  ed è tradizionalmente costituito da una lamina di sfaldatura di mica muscovite. Fra Nicol incrociati appare grigio. Quello chiamato "gesso" o "rosso di 1° ordine" ("Rot I") o "Tinta sensibile" o "onda intera" o " $\lambda$ " introduce uno sfasamento di una lunghezza d'onda di 550 nm (zona centrale, "del verde", dello spettro ottico) e, se osservato fra Nicol incrociati, appare color Magenta (porpora). Questo colore è detto "tinta sensibile" poiché, anche per piccoli sfasamenti dell'oggetto, vira rapidamente verso il giallo o il blu. Il compensatore  $\lambda$  o "onda intera" è tradizionalmente fatto da una lamina di sfaldatura di selenite (varietà trasparente lamellare di gesso, vedi oltre, nota 82).

Quando l'oggetto birifrangente, come descritto in fig. 151 C, viene fatto ruotare attorno all'asse ottico, durante una rotazione completa di  $360^\circ$  avviene che quattro volte, ogni  $90^\circ$ , le direzioni privilegiate di esso sono parallele a quelle dei Nicol. In queste condizioni, si può dimostrare che l'oggetto non produce più birifrazione; fra Nicol incrociati esso quindi è come se non esistesse e si ritrova l'estinzione (campo immagine tutto scuro): quattro posizioni d'estinzione per ogni giro completo dell'oggetto. Inoltre, ruotando l'oggetto, cambiano le condizioni d'interferenza ed i colori nell'immagine cambiano pure, almeno come saturazione. Per questi motivi, un qualunque strumento polarizzatore dovrebbe avere un tavolino girevole attorno all'asse ottico dello strumento, magari con una scala graduata sull'orlo. Un apposito reticolo a

croce, non girevole, posto in posizione tale da essere visto a fuoco assieme all'oggetto, indica le direzioni di vibrazione dei Nicol e permette di misurare l'angolo fra esse e certe strutture dell'oggetto, per es. gli orli.

Con un semplice polariscopio (due pezzi di Polaroid disposti su piani paralleli fra loro e poi "incrociati" in modo che le loro direzioni privilegiate siano fra loro ortogonali) è facile osservare la birifrazione di lamine minerali (es.: lamine di sfaldatura di mica<sup>79</sup> oppure di gesso nella varietà "selenite" o "specchio d'asino"), di tessuti vegetali ed animali, di prodotti industriali (fibre tessili, materie plastiche, ecc.). Molti di questi oggetti danno poi immagini anche più suggestive ed istruttive al microscopio polarizzatore.

Assai istruttiva è anche l'osservazione di un "cuneo di quarzo", che è fornito come compensatore di corredo assieme ai microscopi polarizzatori: si vedono nitidissime tre o quattro frange d'interferenza. Anche un compensatore "rosso 1° ord." è istruttivo poiché appare color porpora a Nicol incrociati, mentre è trasparentissimo in radiazione naturale. Disponendo di una tavola di Michel Lévy, è utile confrontare i colori della tavola con quelli del cuneo in quarzo, di altri compensatori od oggetti birifrangenti. È utile anche confrontare i colori della tavola (che sono "colori di sottrazione" nel senso che sono colori dati dal bianco dopo sottrazione della banda per la quale si ha interferenza negativa) con i colori dello spettro ottico, che sono colori "spettrali puri" (articolo O4 - "Lo spettro ottico", pag. 36, fig. 63, e pag. 39).

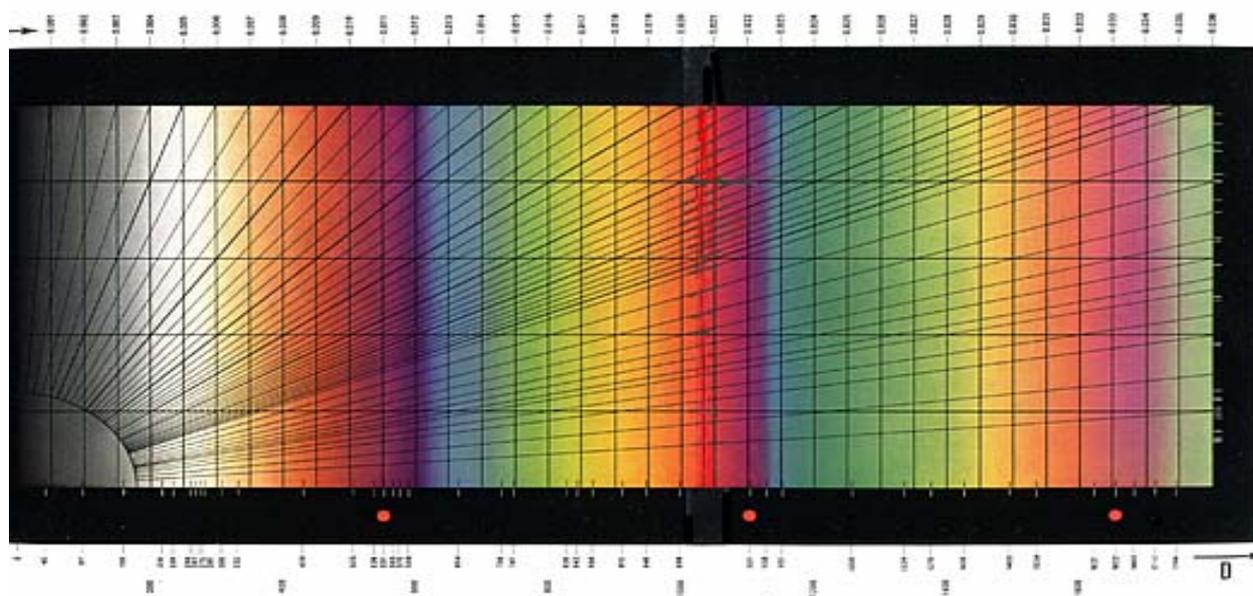


Fig. 153

Tavola di Michel Lévy. Partendo da sinistra a destra, aumenta il potere birifrangente dell'oggetto osservato fra Nicol incrociati e sono mostrati i colori d'interferenza corrispondenti. La tavola copre i valori di birifrazione corrispondenti a sfasamenti fra i raggi birifratti di circa  $3,5 \lambda$  (circa 1800 nm). Lo sfasamento  $D$  pari a  $\lambda = 550 \text{ nm}$  è segnato da un pallino rosso, nella barra nera in basso; per  $D = 2 \lambda$  vale il secondo pallino rosso, e così per  $D = 3 \lambda$ .

Finora abbiamo descritto alcuni fenomeni che si presentano osservando per trasparenza un oggetto birifrangente sottile. È questo il campo di applicazione più importante del polariscopio: la microscopia in radiazione polarizzata, come metodo di studio e di riconoscimento dei minerali e delle rocce.

Ma oggetti birifrangenti, sia pure di struttura irregolare, si trovano spesso anche in organismi viventi; se ne è fatto cenno sopra e ne ripareremo ancora.

#### PASSIAMO ALLA PRATICA

Ora esaminiamo qualche fenomeno che si verifica in oggetti di spessore non trascurabile, anche facilmente reperibili.

Prima cosa: la birifrazione o "**doppia rifrazione**" in senso stretto.

Si dà il caso che i due raggi birifratti che si propagano in un corpo birifrangente, come descritto sopra, non viaggino con la stessa velocità e quindi neppure con lo stesso "indice". Ciò significa che essi possono propagarsi in direzioni diverse: quando un raggio incide su un corpo

<sup>79</sup> Sulla reperibilità della mica muscovite e del gesso-selenite, vedi la nota 82.

birifrangente, nel punto d'incidenza, la rifrazione crea due distinti raggi; il raggio incidente può essere unico, ma i raggi rifratti sono due ed hanno diversa direzione<sup>80</sup>. In pratica, ciò significa che gli oggetti osservati attraverso una lamina birifrangente<sup>81</sup> possono apparire sdoppiati. È proprio questo fenomeno, scoperto molto prima che si scoprisse la polarizzazione e la vibrazione reciprocamente perpendicolare dei due raggi birifratti, che ha portato al termine di “doppia rifrazione”. Questo fenomeno si osserva con prismi speciali (prisma di Wollaston, ad es.) ma anche con un romboedro prodotto dalla sfaldatura spontanea della varietà limpida della calcite (“spato d'Islanda”, fig. 154).

Probabilmente, fu questa la prima osservazione della birifrazione da parte dell'uomo. Un romboedro di calcite limpida, di spessore di almeno 1 cm, è reperibile presso i negozi di minerali per un costo assai modesto. Va manipolato con molta cura per la sua scarsa durezza e la sua fragilità.

È questa la prima esperienza che proponiamo riguardo alla polarizzazione della luce.

Fig. 154

Romboedri ottenuti per sfaldatura spontanea da un cristallo di calcite. L'oggetto posto sotto il cristallo appare sdoppiato; semplicemente, ogni raggio che proviene dall'oggetto (la carta stampata), al momento di incidere sulla faccia inferiore del cristallo, viene sdoppiato ed i due raggi rifratti sono deviati di un diverso angolo.

Questa esperienza viene di solito effettuata con cristalli di calcite, sia perché si tratta di un minerale relativamente comune, anche nella forma limpida, sia perché esso è uno dei minerali col maggior potere birifrangente.

Il cristallo superiore della figura ha uno spessore circa doppio dell'altro, ed anche lo sdoppiamento dell'immagine da esso prodotta è circa doppio: le due immagini della parola “FISSI” in 1 sono separate di una distanza pari circa all'altezza delle lettere; in 2 la separazione è di appena la metà di quell'altezza (vedi la “O” di “COPI”).



#### L'osservazione dei colori d'interferenza.

Per questo scopo, in base a quanto detto sopra e meglio chiarito nella bibliografia (per prima cosa, consultare in questo sito: “Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata”, cap. 6.2, pag. 22), occorre procurarsi una coppia di filtri polarizzanti. Se ne fabbricano con caratteristiche assai diverse, riguardo al grado di estinzione, alla dipendenza dalla lunghezza d'onda, ecc; ma quelli usati in astronomia e microscopia vanno benissimo per i nostri scopi. Un polarizzatore si può acquistare anche presso un negozio di fotografo, e ne esistono anche con diametri di molti centimetri, ma saranno costosi ed inoltre, per non interferire col potere polarizzante dello specchio presente nei modelli reflex, tali polarizzatori sono accoppiati con una lamina birifrangente e quindi danno estinzione solo se voltati in un certo verso. Polarizzatori semplici ed a basso costo si possono acquistare presso la ditta “Ottica TURI”, Piazza Gavinana 6, 51100 - Pistoia ([www.otticatur.it](http://www.otticatur.it) - [otticatur@otticatur.it](mailto:otticatur@otticatur.it)); specificare “Set di filtri analizzatore e polarizzatore, per microscopio biologico”. Tali filtri sono venduti in coppia: il più piccolo del diametro di 15 mm; il più grande, in montatura metallica, del diametro utile di 35 mm circa.

In fig. 155 sono visibili tali filtri, sulla destra della figura. A sinistra sono visibili altri filtri polarizzanti per uso fotografico, dotati di montatura girevole, che servono per scopi fotografici particolari; ne parleremo.

<sup>80</sup> Ciò avviene nel caso più generale; esistono però una o due direzioni all'interno di un corpo birifrangente in cui la birifrazione non avviene. Sono queste gli “assi ottici”.

<sup>81</sup> Limitata da due facce piane e parallele, sufficientemente limpida e di sufficiente spessore.

Fig. 155

A destra: coppia di polarizzatori semplici previsti per l'uso su un microscopio. Il diametro utile è di mm 15 e 35. Quello più piccolo è privo di montatura metallica.

A sinistra, filtri polarizzanti per uso fotografico, in montatura metallica girevole, del diametro utile di circa 30 mm.

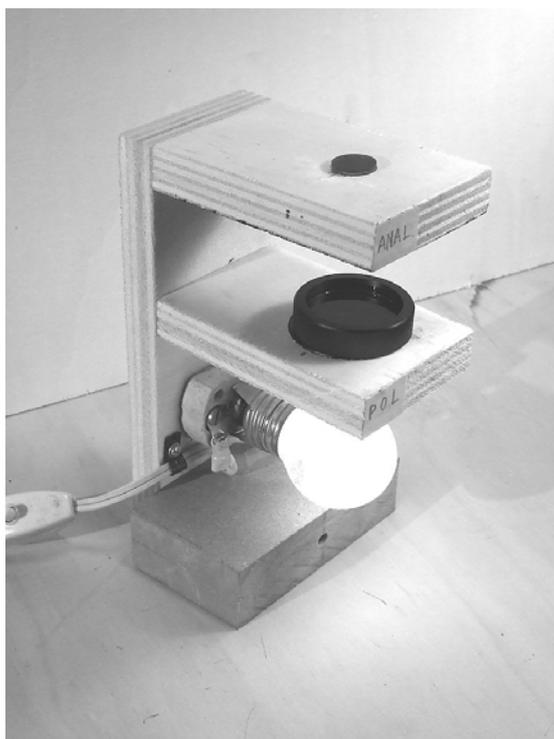


Ora si tratta di disporre i due filtri uno sull'altro, su piani paralleli, separati di qualche centimetro per potervi introdurre un oggetto, e con una lampada sotto per osservare il tutto per trasparenza: sarà questo un elementare polariscopio. Ciò si può costruire con pezzi di legno, secondo la fig. 156.

Fig. 156

Bastano quattro pezzi di compensato multistrato o di truciolare. Sul pezzo verticale (alto 15 - 20 cm almeno) si fissa un portalamпада. Vi si monta una lampadina da 25 W, 220 V, del tipo "latte" od "opale". La lampadina va spenta appena dopo l'uso poiché i polarizzatori normali sono sensibili al calore. Sui due pezzi orizzontali superiori si pratica un foro del diametro appena più piccolo del filtro, in modo che il filtro stesso vi si possa fissare con qualche goccia di attaccatutto. Prima di fissare i filtri è però necessario accendere la lampadina e, guardando dall'alto, ruotare uno dei filtri rispetto all'altro (rotazione attorno ad un asse verticale) finché si ottiene la massima estinzione. Se non si teme la caduta dei filtri, è anche meglio lasciarli liberi di ruotare in modo da poterli mettere anche in posizione "parallela" (fig. 152): le figure ed i colori che si manifesteranno saranno diversi (vedi oltre).

NB: Le parti elettriche in basso sono state mostrate senza protezione ma, per ragioni di sicurezza, devono essere schermate per evitare contatti accidentali. La schermatura può essere ottenuta semplicemente con due pezzetti di compensato fissati ai lati del porta-polarizzatore inferiore. Si lasci in ogni modo un'apertura sufficiente per la circolazione dell'aria ed il raffreddamento della lampadina.



Interponiamo adesso fra i due polarizzatori alcuni oggetti, del tutto incolori. Ciò che si vedrà si può spiegare in base ai pochi cenni dati sopra od ai maggiori dettagli reperibili nella bibliografia citata.

Cominciamo con materiali naturali. Procuriamoci presso un negozio di minerali o presso qualche collezionista un piccolo campione di mica in varietà muscovite o di selenite<sup>82</sup>. Questi minerali si sfaldano con estrema facilità e, con una lametta da barba, è semplice ricavarne laminette di pochi decimi di mm di spessore e di dimensioni di qualche mm almeno. Lavorando a mano libera, è impossibile ottenere una lamina a spessore uniforme, ma questo non guasta per i nostri scopi; infatti, questi minerali tendono a fratturarsi per piani paralleli e, dove i piani si interrompono, specialmente nel caso della selenite, la lamina forma scalini ben definiti con angoli regolari, legati alla struttura intima del reticolo cristallino.

Quasi tutti i minerali presenti sulla crosta terrestre, anche quelli in granuli irregolari che compongono la stragrande maggioranza delle rocce, possono dare fenomeni analoghi, ma abbiamo citato solo la selenite e la muscovite poiché, per la loro tendenza alla sfaldatura, è facile ottenerli in lamine abbastanza regolari ed in piccoli spessori.

<sup>82</sup> La selenite è una varietà cristallina e limpida di gesso; è comunissima nelle colline del bolognese e costituisce anche i blocchi usati in passato per costruire vari edifici di Bologna. La muscovite si può anche trovare all'interno di tostapane, ferri da stiro e stufe elettriche, dove è preziosa come isolante elettrico resistente al calore; oggi però viene spesso sostituita con ceramica o con impasti di frammenti della stessa mica.

Fig. 157

Scaglie di sfaldatura di gesso e di mica ottenute da cristalli più grossi con una lametta. Il primo minerale produce lamine di forma più definita con angoli più regolari; la mica, per contro, forma lamine più sottili e flessibili. Entrambi sono trasparenti ed incolori.



Fig 158

Frammenti di selenite (a sinistra) e di mica (a destra) fra Nicol incrociati. La loro larghezza massima oscilla fra 5 e 15 mm. I colori prodotti dalla polarizzazione in questi oggetti per loro natura incolori sono assai vivi e la fotografia non li rende abbastanza. Le differenze di colore da un punto all'altro delle lamine dipendono dallo spessore e dall'orientamento, come spiegato più sotto e come si vede nella figura 159 a sinistra. Si confrontino i colori di due punti corrispondenti della stessa lamina (vedi la piccola ×). NB: se i colori appaiono troppo sbiaditi, poco "saturi", tendenti al biancastro, significa che le lamine hanno spessore eccessivo. Se i colori si riducono al grigio-nero, sono troppo sottili.

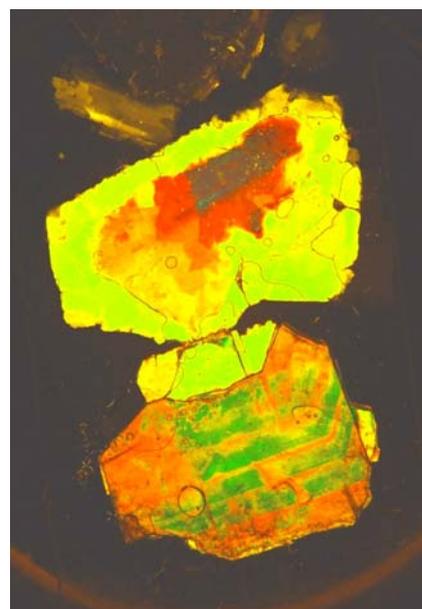
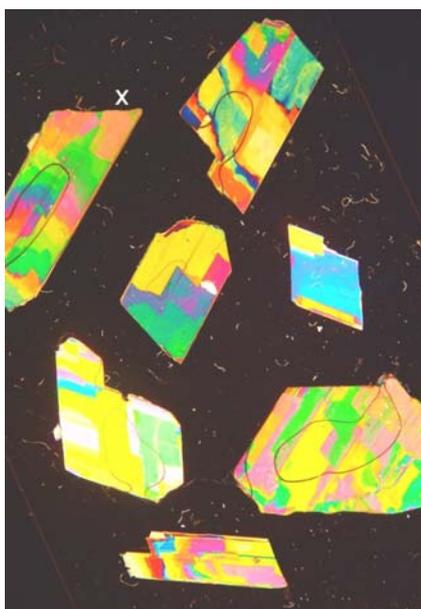
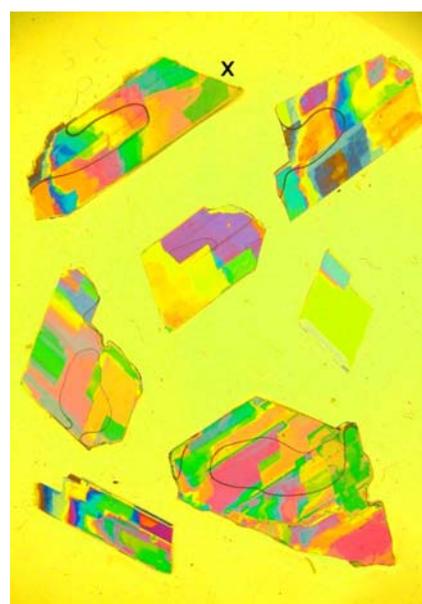
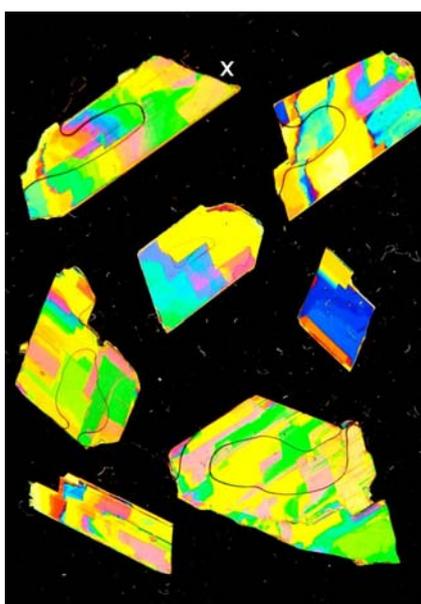


Fig. 159

Le stesse lamine di selenite leggermente ruotate rispetto alla figura precedente (fig. 158, a sinistra) oppure fra Nicol paralleli (qui a destra). I colori cambiano, anche radicalmente; fra Nicol paralleli i colori sono complementari di quelli fra Nicol incrociati, a parità di orientamento delle lamine.

Le linee scure ricurve all'interno delle lamine rappresentano i bordi di alcune bollicine d'aria rimaste nella resina che è stata usata per racchiudere le lamine fra vetrini di protezione.



Su una lastrina di vetro (non di plastica, per ragioni che vedremo più sotto), si dispongano le laminette ricavate con la lametta dal cristallo più grande. Esse appariranno a vivaci colori, come

si vede in fig. 158-159. Se si ruota questo vetrino attorno ad un asse verticale<sup>83</sup>, oppure si ruota l'analizzatore, i colori cambiano; se si afferra una laminetta con un paio di pinzette e la si inclina, cioè la si ruota attorno ad un asse orizzontale, ancora cambiamenti. Insomma, lavorando con la luce polarizzata, gli effetti ottenuti dipendono dalla direzione. La direzione di chi?

Senza rinviare il lettore alla letteratura citata sopra, proviamo a chiarire qualche concetto.

Si chiama **isòtropa** un oggetto le cui proprietà non dipendono dalla direzione o dal suo orientamento; per es., il peso specifico è costante, qualunque direzione si consideri all'interno di un oggetto. Invece **anisòtropa** è un oggetto di cui almeno una proprietà dipende dalla direzione che si considera al suo interno; un esempio? La durezza. Graffiando le diverse facce della maggioranza dei cristalli ci si accorge che la durezza è diversa. Le grandezze il cui valore dipende dalla direzione considerata, si chiamano **vettoriali**; le altre sono **scalari**. Occorre poi non confondere isotropia con omogeneità: vedi la nota 88 a pag. 91.

Ma a noi interessa una grandezza in particolare: l'indice di rifrazione. Nei gas, nei liquidi, nei materiali vetrosi, nei cristalli del sistema **monometrico**<sup>84</sup>, l'indice è indipendente dalla direzione della luce che attraversa l'oggetto: questi oggetti sono isotropi, almeno dal punto di vista ottico. In tutti gli altri cristalli, in certi materiali organici (per es. materie plastiche) e strutture viventi, l'indice invece dipende dalla direzione; questi oggetti sono anisotropi, almeno otticamente. Ma cosa vuol dire "l'indice dipende dalla direzione"? Quale direzione?

Ogni "raggio" di luce rappresenta la direzione di propagazione di una certa forma d'energia. Dunque si deve considerare la direzione di propagazione. Ma, nella luce polarizzata, in un piano perpendicolare alla propagazione (piano N in fig. 150; piano x-y in fig. 160), esiste una direzione privilegiata, quella di oscillazione o vibrazione dell'onda (direzione del piano V nelle stesse figure).

Dunque, in polarizzazione, occorre tener conto ANCHE della direzione di vibrazione.

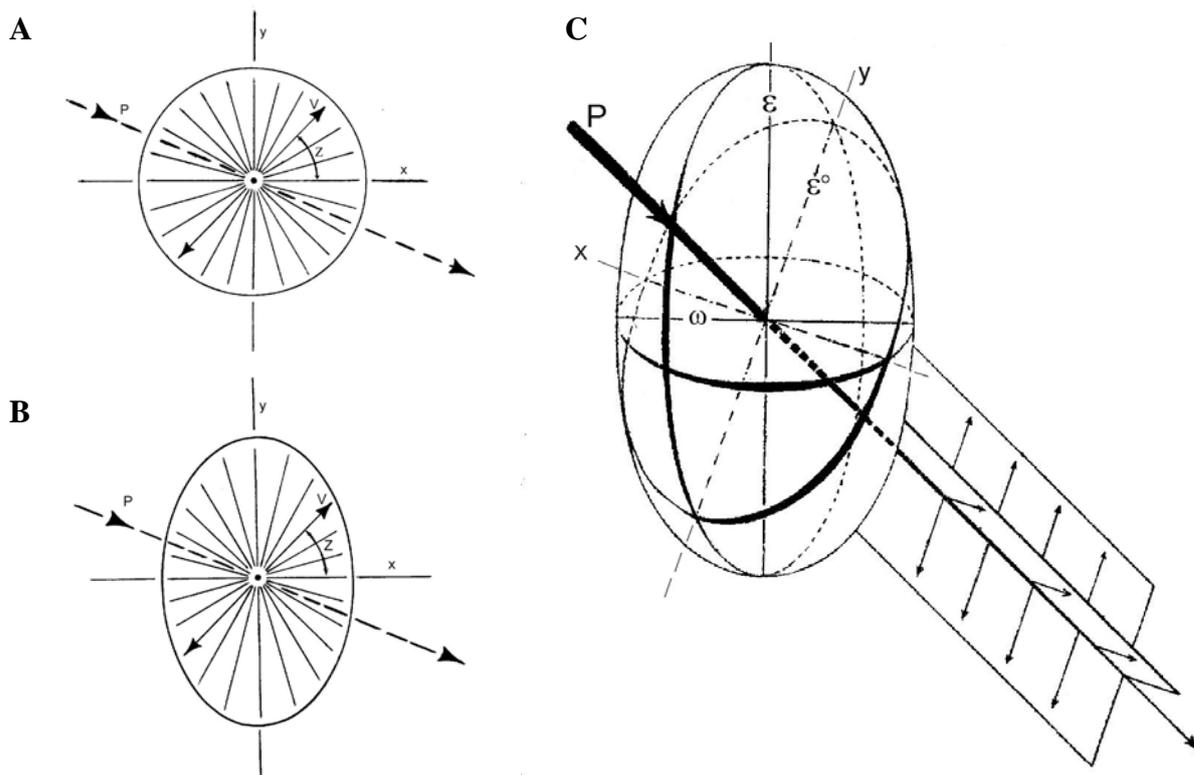


Fig. 160 - Propagazione di un raggio di luce in un materiale isotropo (A) ed anisotropo (B e C). In A e B il raggio incidente, indicato con P, è disegnato con una retta inclinata rispetto ad una sezione del cristallo (rappresentata nel piano del disegno con un cerchio od un'ellisse), ma si tratterebbe di una retta perpendicolare al disegno e quindi andrebbe rappresentata con un punto. (Fig. 160 C da: C. Andreatta - Mineralogia - UniBo, 1943, modif.).

<sup>83</sup> Si osserverà che, per ogni giro completo, le singole laminette scompaiono ogni 90°; in queste quattro posizioni "di estinzione", infatti, le direzioni privilegiate dell'oggetto sono parallele a quelle dei Nicol. Vedi pag. 84.

<sup>84</sup> cosiddetti poiché la loro forma elementare è un cubo, cioè un parallelepipedo con tre lati uguali e perpendicolari fra loro.

Si veda la fig 160 A: la retta P, disegnata di scorcio, indica la direzione di propagazione di un ipotetico raggio che si propaga in una sfera di materiale isotropo, passando per il suo centro; qualunque sia la sua direzione, il raggio viaggia con lo stesso indice. Se il raggio è polarizzato e consideriamo le infinite direzioni di vibrazione che esso può assumere attorno alla stessa direzione di propagazione (per es. quella indicata dalla freccia V), avremo ancora lo stesso indice costante. Se la lunghezza di tutti i possibili vettori come V viene disegnata in proporzione al valore dell'indice, tutte le frecce saranno di pari lunghezza ed il loro inviluppo sarà un cerchio.

Se ripetiamo il ragionamento con un corpo anisotropo (fig. 160 B), partendo sempre da una direzione di propagazione qualunque P, il valore dell'indice dipenderà dalla direzione di vibrazione, e la freccia V varierà di lunghezza secondo l'angolo  $z$  che quella freccia forma con una direzione di riferimento tracciata nel piano del disegno (es.  $x$  oppure  $y$ )<sup>85</sup>. L'inviluppo di tutte le frecce V appare ora come una figura non circolare, generalmente un'ellisse.

Ma ora le cose si complicano. In un corpo otticamente anisotropo, l'indice dipende ANCHE dalla direzione di propagazione. Nelle figure 160 A e B abbiamo considerato una sola direzione di propagazione P ed i valori dell'indice in un piano perpendicolare a P. Ma, se ripetiamo il ragionamento (ed il disegno) nello spazio, in tre direzioni, possiamo tracciare un solido in cui ogni punto della superficie dista dal centro di una lunghezza proporzionale all'indice: l'indice relativo a quella direzione di vibrazione, perpendicolare alla direzione di propagazione del raggio. Tale solido si chiama **indicatrice degli indici** ed ha la forma di un ellissoide<sup>86</sup>.

Conclusione: ciò che avviene alla luce polarizzata che attraversa un corpo anisotropo dipende dalla direzione di propagazione nonché da quella di vibrazione. Ecco perché influisce sia l'orientamento delle lamine di gesso o mica attorno ad un asse verticale (nel nostro modellino di fig. 156), cioè rispetto al piano di vibrazione del polarizzatore, sia la loro inclinazione, cioè rispetto alla direzione di propagazione, che è verticale nel nostro modello.

Nella fig. 160 C è schematizzata come un ellissoide a due assi l'indicatrice degli indici di un cristallo anisotropo (uniasse); P è ancora una generica direzione di propagazione, ed un piano perpendicolare ad essa passante per il centro dell'ellissoide taglia l'ellissoide stesso secondo un'ellissi, i cui assi sono indicati ancora con  $x$  ed  $y$ . I segmenti  $\omega$  ed  $\varepsilon$  rappresentano i raggi minimo e massimo dell'ellissoide, quindi i valori estremi dell'indice; il segmento  $\varepsilon^\circ$  rappresenta il massimo indice nell'ellissi  $x - y$ , cioè relativo a quella particolare direzione di propagazione. Se cambia l'inclinazione di P rispetto all'ellissoide, è ovvio che anche la lunghezza di  $\varepsilon^\circ$  varia; invece l'asse dell'ellisse indicato con  $\omega$  è sempre costante.

In questo modo, al variare della direzione di propagazione e di vibrazione, risulta un valore di indice variabile ( $\varepsilon^\circ$  varia fra  $\omega$  ed  $\varepsilon$ ) per onde oscillanti nel piano P - y, ed un indice costante ( $\omega$ ) per le onde nel piano P - x. Se il raggio P si propaga in direzione dell'asse dell'ellissoide ( $\varepsilon$ ), nel piano perpendicolare ad esso, l'ellissoide ha una sezione circolare; questo significa che, per qualunque piano di vibrazione, l'indice ha un valore costante pari ad  $\omega$ . La direzione di  $\varepsilon$  vede quindi il cristallo comportarsi con indice costante, vale a dire come isotropo. In quella direzione (chiamata "asse ottico") non si ha birifrazione.

Abbiamo in poche righe riassunto il comportamento degli oggetti anisotropi<sup>87</sup>, non con la pretesa di spiegare tutti i fenomeni collegati, ma per chiarire le ragioni della variabilità dell'indice (e quindi dei colori d'interferenza) al variare delle direzioni di propagazione e di vibrazione.

La ragione di questa variabilità dell'indice risiede nella disposizione ordinata delle particelle (atomi o ioni) all'interno del cristallo; considerando tre direzioni all'interno di esso, direzioni legate alla simmetria della forma esterna o di altre proprietà del cristallo, si può dimostrare che le particelle sono distribuite a distanze regolari in modo da formare file diritte, piani (contenenti file parallele) e sovrapposizioni di piani paralleli. Questa struttura a tre dimensioni, dotata di periodicità nella natura e nella disposizione delle particelle, si chiama "reticolo cristallino". Ebbene, nelle varie direzioni all'interno del reticolo, il campo elettrico della luce incontra una differente natura o una differente densità di particelle; l'interazione fra campo e materia è differente e perciò anche l'indice, che dipende dalla velocità di propagazione, varierà con la direzione.

Dobbiamo ora far notare che la struttura del reticolo cristallino è una caratteristica essenziale

<sup>85</sup> L'angolo  $z$  si può chiamare "azimut", come si fa in astronomia.

<sup>86</sup> Tale ellissoide sarà "a due assi" se almeno una sua sezione perpendicolare ad uno degli assi è circolare, come avviene nei cristalli "dimetrici"; sarà "a tre assi" se la sezione può essere circolare solo se inclinata rispetto agli assi.

<sup>87</sup> in particolare, di quelli uniassici, visto che in altri casi l'ellissoide è a tre assi e gli assi ottici sono due.

dello stato cristallino, ed è indipendente dalla forma esterna. In altre parole, se prendiamo un cristallo dalla forma esterna perfetta, assimilabile ad un solido geometrico ideale, e lo facciamo a pezzi, non sarà più riconoscibile la natura del cristallo dal suo aspetto, ma resterà in ogni frammento la disposizione regolare delle particelle in tre direzioni dello spazio ed ogni frammento mostrerà gli stessi fenomeni (birifrazione, colori d'interferenza, ecc.) del cristallo iniziale. Questo vale quindi anche per un aggregato di frammenti cristallini, incoerenti (sabbia, ad es.) o coerenti (rocce).

In fig. 160 C si osserva anche che, emergendo dal cristallo, il raggio è composto da due raggi che vibrano in piani rispettivamente perpendicolari; è questa la causa della birifrazione: per il "principio di Fermat", un'onda che si propaghi nello spazio sceglie sempre i percorsi minimo e massimo possibile, quelli corrispondenti alla velocità minima e massima, e solo quelli. Poiché l'indice di rifrazione è legato alla velocità della luce (tanto più bassa quanto più alto è l'indice), se vi è una variabilità dell'indice in relazione alla direzione di vibrazione, come avviene in un corpo anisotropo, in esso ogni raggio si sdoppia in due raggi, uno col massimo indice ed uno col minimo. In fig. 160 B, il raggio P non può propagarsi con una qualunque direzione di vibrazione, come V, con qualunque valore di indice compreso fra il massimo (y) ed il minimo (x), ma solo nelle due direzioni, y ed x appunto, secondo i valori estremi dell'indice. Qualunque raggio che attraversi un corpo anisotropo, anche se non polarizzato, emerge dal corpo sdoppiato in due raggi polarizzati che vibrano in piani reciprocamente perpendicolari.

Se invece il corpo è isotropo, come il vetro (fig. 160 A), l'indice è costante, per qualunque direzione di vibrazione, il principio di Fermat non interviene e nel corpo non può avvenire birifrazione.

Tornando ai nostri materiali anisotropi, possiamo consigliare l'osservazione di altri materiali cristallini come la sabbia o detriti di altre rocce o sostanze chimiche sintetiche allo stato cristallino (a volte, basta lasciar asciugare su un vetrino una goccia di soluzione di qualche sale o di qualche medicamento). Ma raramente si avranno colori decisi come nel caso della selenite o della muscovite, o perché il granulo è troppo grande (colori biancastri), o perché è troppo piccolo (grigio-neri), o perché irregolare, o perché poco anisotropo (come nel caso del quarzo, principale costituente della sabbia), o addirittura isotropo (come nel caso del sale da cucina).

#### Birifrazione indotta

Finora si è parlato della birifrazione primaria legata alla struttura intima dell'oggetto, cioè alla disposizione ed all'orientamento delle sue particelle costituenti (atomi, molecole ecc.). Ma la birifrazione può essere provocata, almeno temporaneamente, anche da fattori esterni all'oggetto, anche in corpi isotropi.

Per es., se un corpo qualunque, anche non birifrangente (cioè "monorifrangente")<sup>88</sup>, viene sottoposto a pressione o stiramento, la disposizione o distribuzione degli atomi o molecole al suo interno non è più del tutto isotropa; esso diviene così più o meno birifrangente e questa birifrazione indotta viene chiamata "**fotoelasticità**". Il grado di birifrazione dell'oggetto, che si osserva e si valuta attraverso un polariscopio, fornisce misure anche precise sullo stato di tensione interna dell'oggetto. Questa tecnica ha importanti applicazioni nell'industria, quando si realizzano modelli in scala di strutture meccaniche o architettoniche eseguite con materiale trasparente e monorifrangente; il modello viene poi "caricato", cioè sottoposto alle forze ed alle sollecitazioni previste nel suo utilizzo normale (in scala anche quelle) e si studia la birifrazione indotta da quelle forze; in quel modo si ha la chiara visione di come le sollecitazioni esterne si distribuiscono all'interno della struttura e cosa si può fare per migliorare la distribuzione delle tensioni interne.

Nell'industria meccanica, si può esaminare il comportamento di un utensile (fig. 161). Nell'ingegneria edile, il comportamento di una struttura portante, come la gabbia in cemento armato di un palazzo o di un ponte. Durante questi esami, il modello in plastica viene osservato fra Nicol incrociati e, per questi usi industriali, si costruiscono polariscope di grandi dimensioni.

Finché le sollecitazioni esterne agiscono su un corpo in regime elastico, cioè le deformazioni

---

<sup>88</sup> Come detto sopra, la birifrangenza proviene dal fatto che il corpo non è otticamente isotropo e mostra un diverso valore dell'indice nelle diverse direzioni. I corpi birifrangenti sono otticamente anisotropi.

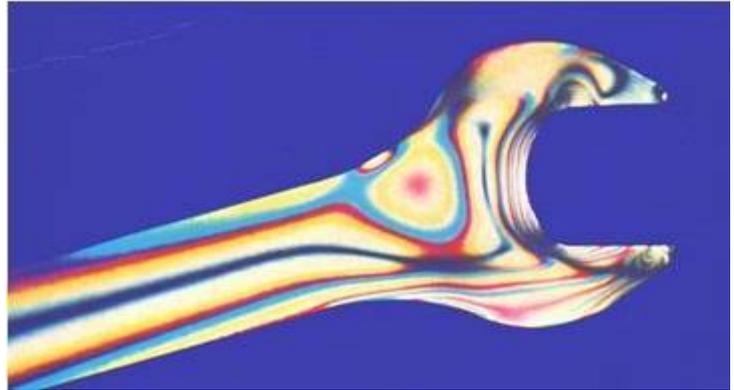
Non si confonda il concetto di isotropia con quello di omogeneità: un corpo omogeneo ha le stesse proprietà in tutti i punti, almeno se si considera la stessa direzione (per le grandezze vettoriali). Un corpo isotropo può non essere omogeneo (per es. un vetro tritato), mentre un corpo anisotropo (es. un cristallo) può essere omogeneo (se è perfetto) oppure inomogeneo se contiene imperfezioni del reticolo, impurezze o inclusi di altri minerali.

indotte sono reversibili e cessano al cessare della sollecitazione, anche la birifrazione indotta è reversibile. Questa è la fotoelasticità in senso stretto.

Fig. 161.

Modello di chiave fissa realizzato in plastica omogenea ed isotropa. Sottoposto allo sforzo previsto, come nel serraggio di un bullone, il modello in plastica viene compresso o stirato, la sua densità varia da punto a punto in relazione a queste “tensioni interne” e ciò lo rende anisotropo. Le linee “isocromatiche”, di pari colore, indicano la distribuzione delle tensioni nel modello ed aiutano a calcolare la forma più resistente.

Da: Jena Review, Ed. Zeiss 1965, N° 5, pag. 291. Modif.



Se però si supera un certo limite, dipendente dalla natura e dalla forma dell’oggetto, la deformazione diviene “plastica”, vale a dire (almeno in parte) irreversibile ed il corpo appare stabilmente deformato. In queste condizioni, anche la birifrazione indotta s’instaura stabilmente ed indica il riassetto modificato nella struttura intima dell’oggetto. In questo caso, si dovrebbe parlare di **foto-plasticità**.

Con un qualunque polariscopio, è facile osservare bacchette o lastre di vetro o di plastica, che possono apparire “estinte” finché non sollecitate; appena si incurva o si comprime l’oggetto con un mezzo qualunque, appariranno zone chiare o colorate rivelanti uno stato di birifrazione indotta. Si può osservare anche la reversibilità di questi fenomeni (fig. 162). Se invece la deformazione diviene plastica, le zone chiare o colorate rimangono “congelate” nel materiale (fig. 163).

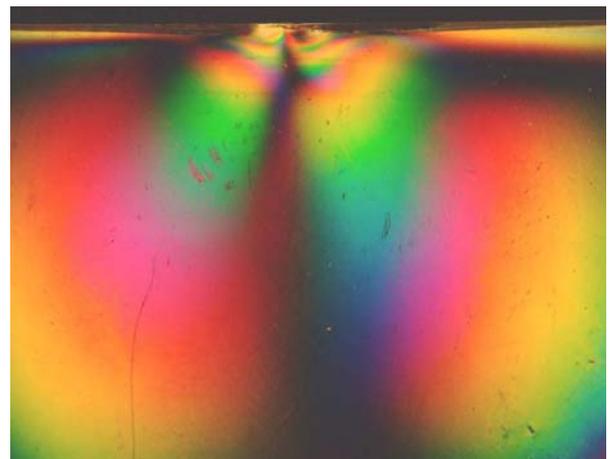
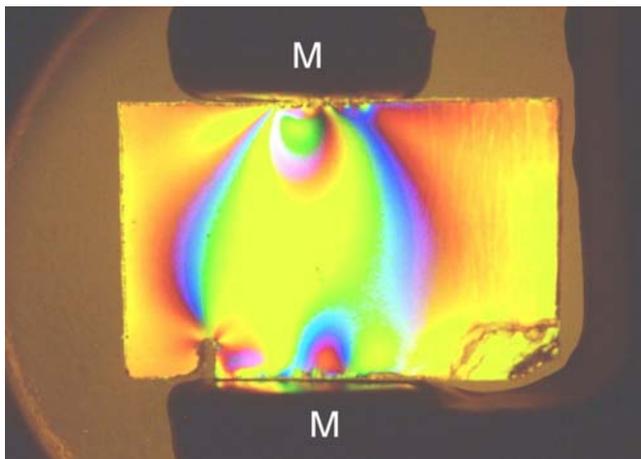


Fig. 162 (foto-elasticità)

e

163 (foto-plasticità da compressione)

A sinistra: blocchetto di Plexiglas stretto fra le ganasce (M) di un morsetto. Sono evidenti le linee isocrome che collegano i punti sottoposti alla stessa pressione. Allentando il morsetto, la figura d’interferenza scompare ed il blocchetto ritorna invisibile (isotropo) poiché la deformazione è elastica, vale a dire reversibile.

A destra, un altro materiale, simile al polistirolo, ha conservato la deformazione (e l’anisotropia indotta) anche dopo che è stato tolto dal morsetto; la deformazione si è rivelata di tipo plastico, irreversibile. È ben visibile, in alto, il punto di massima compressione.

Se poi si opera con fogli di materiale plastico tenero (può bastare un normale sacchetto in politene trasparente, tipo quelli per indumenti), se ne può ritagliare una striscia larga circa un centimetro e tenerla stesa all’interno del polariscopio. Si abbia cura di orientare la striscia in varie direzioni per non correre il rischio di lavorare in una delle posizioni d’estinzione. All’inizio, la striscia apparirà piuttosto scura (fig. 164), per essere più o meno isotropa; stirandola, si vedranno le caratteristiche frange d’interferenza che uniscono i punti di pari tensione e si estendono gradualmente. In fig. 164 e 165 la deformazione è lieve ed ancora in regime elastico; in fig. 166 e 167 la deformazione è irreversibile ed il materiale si “snerva”, cioè si deforma plasticamente: siamo nel caso della fotoplasticità (da stiramento). Simili fenomeni si possono spesso osservare anche stirando un pezzo di scotch trasparente.

Un altro caso di fotoplasticità si presenta quando un materiale plastico, riscaldato fino a

liquefarlo, viene colato in una “forma” metallica per ottenerne oggetti di forma definita: a contatto colla “forma”, la plastica si raffredda bruscamente, ma spesso in maniera non omogenea, e solidifica.

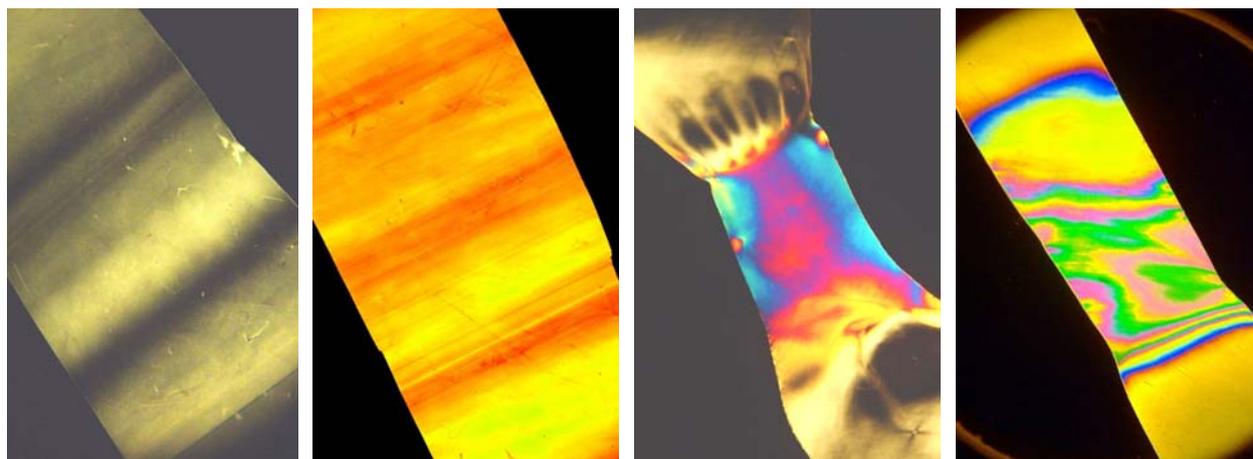


Fig. 164 - Striscia in polietene, non stirata. Il colore grigio denota una debolissima birifrazione iniziale, derivata dal processo di estrusione del materiale (estremo sinistro della Tavola di Lévy, fig. 153).

Fig. 165 - La medesima dopo lieve stiramento (reversibile). La debole birifrazione corrisponde al colore visibile sul primo sesto (da sinistra) della tavola di fig. 153.

Fig. 166 - Stirando ancora, la birifrazione aumenta ed i colori “salgono” verso il primo terzo (da sinistra) della Tavola di Lévy. La striscia di polietene si è nel frattempo ristretta nel punto più stirato.

Fig. 167 - Stirando fino al limite della rottura, la birifrazione aumenta (fino al 4° ordine) e si possono riconoscere, soprattutto in basso, tutti i colori della Tavola di Michel Lévy.

Il raffreddamento ineguale provoca delle tensioni interne nel materiale che non possono riassetarsi, poiché nel frattempo il materiale è indurito, e rimangono quindi “congelate” nel pezzo. Ancora una volta, osservando il materiale fra Nicol incrociati si osservano sistemi di linee isocromatiche che indicano le posizioni di pari tensione (fig. 168). Un oggetto in plastica che nell’uso può andare soggetto ad urti (un recipiente per liquidi, ad es.) non dovrebbe presentare tensioni interne, che faciliteranno le rotture.

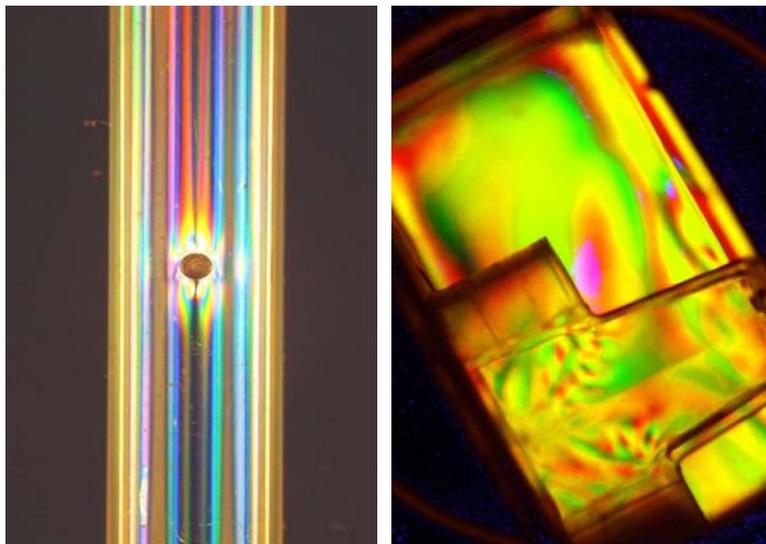
Analoghi fenomeni si osservano nelle fibre sintetiche, già ad occhio nudo nei fili più spessi, come la “bava” da pescatori, al microscopio per le fibre tessili, che sono più sottili.

Fig. 168

Esempi di fotoplasticità da raffreddamento. A sinistra, la cannucina di una “biro”, dopo tolto il tubetto dell’inchiostro. Oltre alle righe verticali, dovute allo stiramento del polistirolo durante l’estrusione, si noti un colore più chiaro (maggiore birifrangenza) attorno al foro per lo sfiato dell’aria.

A destra, il cardine di una scatoletta di polistirolo, ottenuta ancora per pressofusione della resina calda e liquida in una forma metallica.

Fotografie riprese fra Nicol incrociati.



Dobbiamo ricordare che, per effetto del loro metodo di fabbricazione, le direzioni privilegiate (pag. 84) di molti oggetti in plastica di forma allungata sono parallele o perpendicolari al loro allungamento; ciò comporta che, se essi vengono disposti parallelamente alla direzione di vibrazione di uno dei due Nicol si trovano in posizione di estinzione e diventano quasi invisibili. È bene metterli circa a 45° da quelle direzioni.

## LA POLARIZZAZIONE IN NATURA

L’occhio umano non è sensibile alla polarizzazione della luce per cui, volendo rivelare la

presenza di radiazione polarizzata, si deve utilizzare un filtro polarizzatore: ruotandolo attorno alla direzione d'osservazione, se il fascio che incide sul filtro ed arriva poi al nostro occhio è più o meno polarizzato, si noterà una variazione continua di luminosità; la luminosità sarà minima per due orientamenti del filtro, a  $180^\circ$  l'uno dall'altro.

Osservando il cielo sereno, si noterà una parziale polarizzazione della luce diffusa; è questo fatto che consente a certi insetti (come le api) di orientarsi nei loro voli e consente ai fotografi di "scurire" il cielo applicando un polarizzatore ruotante davanti all'obiettivo. La polarizzazione della radiazione ottica per diffusione potrebbe in linea di principio essere totale, ma non lo è mai in realtà a causa di vari fenomeni disturbanti. Essa in ogni modo è conseguente al fatto che l'oscillazione ottica è trasversale rispetto alla direzione di propagazione ed induce l'oscillazione trasversale di qualunque particella carica (elettrone, ione, ecc.) su cui incida, purché la particella sia sufficientemente piccola. La presenza di polveri nell'aria disturba, infatti, la polarizzazione per diffusione a causa delle dimensioni troppo grandi di qualunque particella solida.

Per quanto riguarda gli oggetti birifrangenti in natura, abbiamo già citato le rocce ed i cristalli, tranne quelli del sistema monometrico (come il sale da cucina). Anche molte sostanze sintetiche producono cristalli birifrangenti.

Ma abbiamo anche accennato a certi componenti dei tessuti e delle cellule viventi. Si tratta di materiali formati da molecole ordinate secondo uno schema simile a quello di un reticolo cristallino oppure di molecole allungate, orientate secondo una direzione costante o almeno prevalente. Ancora una volta, in diverse direzioni si verifica una diversa densità di materia e quindi un diverso indice. Spesso, sostanze organiche a molecole allungate, come l'amido, vengono sintetizzate in granuli con apposizione di strati successivi concentrici, ed in ogni strato le molecole hanno un orientamento preferenziale, radiale o tangenziale a seconda dei casi. Si tratta quindi di "cristalli sferici" in cui le proprietà ottiche, come l'orientamento delle direzioni privilegiate, seguono l'andamento del singolo strato. Al microscopio polarizzatore, una goccia di liquido ottenuto grattando una patata, ad es., mostra uno spettacolo pieno di colori e di informazioni sulla struttura intima di ogni singolo granulo ("Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata", pag. 12).

Esempi di sostanze organiche birifrangenti sono, oltre l'amido, la cellulosa, la lignina, quindi sezioni sottili di fusti carnosì di sedano, finocchio, ecc., scaglie papiracee dei bulbi di aglio o di cipolla, lamine sottili di legno, certe proteine, la cheratina dei capelli, delle unghie e dei corni, lamine di tessuto corneo, la chitina nell'esoscheletro degli artropodi, il DNA, le proteine fibrillari nel tessuto muscolare, ecc., senza contare le sostanze inorganiche presenti in certi tessuti, come il carbonato di calcio nei gusci, conchiglie, ecc., i fosfati delle ossa ("Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata", pag. 12), i cristallini di varia natura nel sedimento urinario, gli ossalati nelle cellule vegetali ("Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata", pag. 10), e così via.

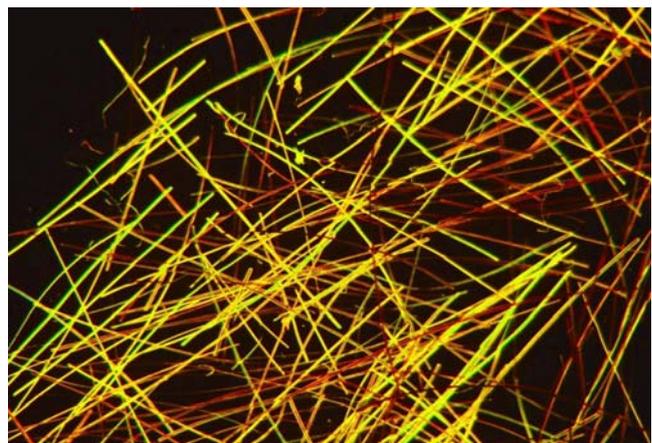
Fig. 169

Capelli maschili fra Nicol incrociati. Il diverso colore dipende dal potere birifrangente della cheratina (la proteina speciale dello strato corneo della pelle, delle unghie e dei peli) e dal diametro del capello.

La cheratina, come le fibre connettivali, la cellulosa, la lignina, l'amido, ecc. è formata da molecole allungate, disposte in fasci sub-paralleli. Un ordinamento disordinato delle molecole toglierebbe a questi oggetti l'anisotropia e quindi il potere birifrangente ed i colori d'interferenza.

Le fibre di vetro, isotrope, risulterebbero invisibili se osservate in queste condizioni.

I "tricologi" studiano i capelli dal punto di vista medico e l'osservazione in polarizzazione può fornire ulteriori informazioni



Ed ancora: piccoli insetti e loro parti (cercate qualche pulce o pidocchio addosso al vostro animale domestico); sezioni sottili di pelle ed unghie; peli animali e capelli (fig. 169); fibre tessili vegetali (cotone, canapa, ecc.) o animali (lana, ecc.); sezioni sottili di ossi e denti ("Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata", pag. 12); strutture del nucleo cellulare; cellule vegetali in genere, legno, cortecce; peli vegetali; organi amiliferi (come una sezione sottile di tuberi, rizomi e molti semi); farine, e via dicendo.

Fra Nicol incrociati appaiono quindi visibili, e spesso colorati per i soliti colori d'interferenza, alcuni oggetti trasparenti o non colorati, facilmente reperibili, di cui abbiamo dato qualche esempio; l'unico inconveniente è che spesso si tratta di strutture assai fini ed occorre un microscopio, perlomeno stereoscopico, munito anche solo di due Nicol.

Luce polarizzata viene anche prodotta in natura dalla riflessione su strutture particolari come le scaglie delle ali di certe farfalle, e di riflessione parliamo subito qui sotto.

#### La polarizzazione per riflessione

La polarizzazione della radiazione ottica, oltre che con un filtro apposito, cioè con un organo trasparente, si può ottenere anche per semplice riflessione su un corpo preferibilmente dielettrico (non conduttore, non metallico): ciò si può verificare osservando, attraverso il solito polarizzatore rotante, il fascio riflesso da un tavolino lucido, da un pezzo di plastica lucida, da una lastra di vetro, dalla superficie dell'acqua, ecc. Il vettore elettrico della radiazione riflessa oscilla prevalentemente (o totalmente, come detto oltre) in direzione "normale" (= perpendicolare) al piano d'incidenza<sup>89</sup>.

La polarizzazione per riflessione è generalmente parziale, ma vi è un valore dell'angolo d'incidenza, detto "angolo di Brewster", la cui tangente è pari all'indice del materiale riflettente, per il quale la polarizzazione per riflessione è totale. L'"angolo d'incidenza" di cui si tratta è tracciato fra il fascio incidente (LS in fig. 170) e la perpendicolare alla superficie riflettente passante per il punto d'incidenza (Sn).

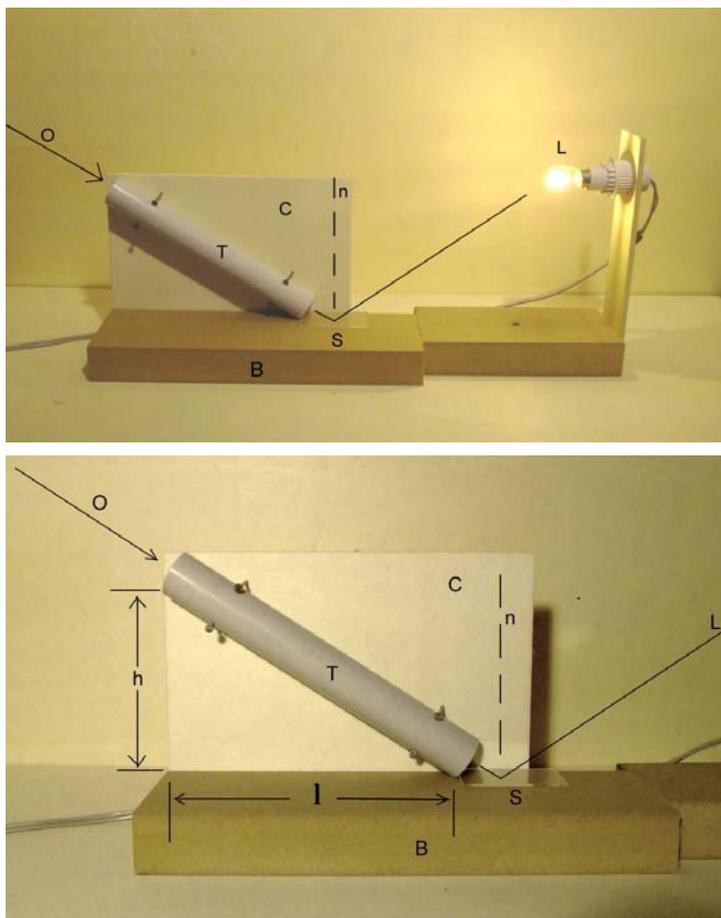
Per verificare questo fenomeno, si costruisca l'apparecchio di fig. 170: con i valori indicati nella didascalia, si realizza un angolo d'incidenza di circa  $57^\circ$ , che è proprio l'angolo di Brewster per i vetri normali.

Fig. 170 - Dispositivo per realizzare la polarizzazione della luce nella riflessione e per verificare l'angolo di Brewster.

Una basetta in legno o truciolare (B) porta una tavoletta verticale in compensato o faesite (C). Su questa, appoggiato su qualche chiodino, si fissi un tubo in plastica o cartone (T) di 1 - 2 cm di diametro. L'inclinazione del tubo è corretta quando l'altezza di un'estremità (h, nella parte inferiore della figura) è  $\frac{2}{3}$  della proiezione in orizzontale (l, sempre in basso, nella fig. 170). Nel nostro esempio,  $h = 10$  cm,  $l =$  poco più di 15 cm.

Di fronte alla basetta B si appoggi il portalampada, già descritto in OI ("La rifrazione", pag. 6, fig. 8 - 9), con la lampadina per auto da 12 V, 21 W (L).

Guardando dentro il tubo secondo l'asse di questo, nella direzione O, si osserva il punto S sulla basetta. Qui si poggia una lastrina di vetro qualunque. La lampadina L si dispone in modo che, guardando da O, se ne vede il riflesso sulla lastrina S. L'angolo d'incidenza sarà  $\angle L S n$  e sarà pari all'angolo di riflessione  $\angle n S O$ .



Ora, si guardi lungo la direzione di O (cercando di tenere l'occhio sull'asse del tubo, e la parete interna del tubo apparirà allora come un anello regolare); si sposti la lampadina L finché anch'essa si veda, riflessa, al centro del campo che si vede in fondo al tubo. Ora si prenda uno dei polarizzatori di fig. 155, lo si appoggi sull'orlo superiore del tubo T e lo si ruoti attorno alla

<sup>89</sup> è il piano che contiene il raggio incidente (LS in fig. 170) e la normale alla superficie riflettente (Sn); tale piano è normale alla superficie riflettente stessa. Nel dispositivo di fig. 170, il piano d'incidenza è verticale e contiene le rette OS, Sn ed SL. La superficie riflettente (S) è orizzontale.

direzione O, sempre tenendolo poggiato sull'orlo del tubo. Ogni giro completo del filtro farà vedere l'immagine della lampadina che si attenua due volte fino quasi a scomparire. Quel "quasi" vuole tener conto della qualità dei polarizzatori reali, che non danno mai l'estinzione ideale, totale. Inoltre, il valore dell'angolo di Brewster varia leggermente con la lunghezza d'onda, per cui il riflesso non è perfettamente neutro.

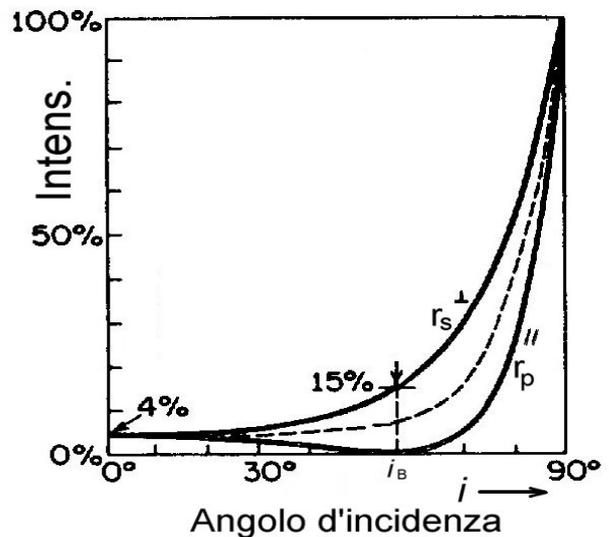
Andiamo adesso ad analizzare meglio cosa succede al momento della riflessione: Si può dire che, su una superficie lucida, si ha una "biriflessione", qualcosa di simile alla birifrazione sopra citata, nel senso che il fascio incidente si suddivide in due fasci riflessi, che sono polarizzati in piani reciprocamente perpendicolari. Uno di essi vibra in un piano parallelo al piano d'incidenza, e viene chiamato "componente parallela" (p), l'altro vibra in un piano perpendicolare al precedente, e si chiama "componente perpendicolare" (s)<sup>90</sup>.

Ebbene, quando la riflessione avviene secondo l'angolo di Brewster, la componente **p** scompare, rimane solo la **s** e perciò il fascio riflesso è totalmente polarizzato, e vibra col vettore elettrico orizzontale. Ecco perché la rotazione del polarizzatore posto sopra al tubo T porta all'estinzione del riflesso non appena la direzione di vibrazione del nostro polarizzatore si trova verticale. Per inciso, questo è un ottimo metodo per identificare la direzione di vibrazione di un filtro polarizzatore sconosciuto.

Fig. 171

Diagramma che indica l'intensità delle due componenti di un fascio riflesso da una superficie lucida. La componente perpendicolare (s) è indicata con  $r_s^\perp$ ; quella parallela (p) con  $r_p^\parallel$ . Si noti che la componente p diminuisce d'intensità dal 4% a 0% quando l'angolo d'incidenza passa da 0 ad  $i_B$  (angolo di Brewster), ma poi risale rapidamente. La componente s ( $r_s^\perp$ ) cresce invece gradualmente.

La linea tratteggiata compresa fra le curve  $r_s^\perp$  ed  $r_p^\parallel$  indica l'intensità media del fascio riflesso, inteso come somma dei due fasci parziali. Si vede come tale fascio totale cresce d'intensità al crescere dell'angolo d'incidenza, prima lentamente, poi sempre più velocemente; con incidenza tendente a 90° (incidenza radente), il fascio riflesso tende a contenere il 100% dell'energia di quello incidente.



Facciamo notare che il diagramma qui sopra si riferisce alla riflessione su un mezzo (vetro) con un indice pari ad 1,5. Se la superficie riflettente appartiene ad un corpo con un altro indice, il punto  $i_B$  della curva si sposta. Nella disposizione di fig. 170, sostituendo la lastrina di vetro con una scodellina piena d'acqua o d'alcool, non sarà più possibile l'estinzione completa.

Si tenga presente che l'angolo di Brewster è circa 53° per l'acqua e circa 57° per i normali vetri (un po' di più per i cristalli al piombo, che sono più rifrangenti).

Ricordiamo anche che quanto detto sopra: "la componente **p** si annulla per un angolo d'incidenza pari a quello di Brewster ( $i_B$ )" vale solo se il corpo riflettente è un "dielettrico" (un isolante elettrico), come il vetro, la plastica, un liquido, ecc. Se invece a riflettere è un metallo, la componente **p** non diviene mai nulla, per cui il fascio riflesso non è mai totalmente polarizzato; esiste ancora un angolo di Brewster, per il quale la polarizzazione è massima, ma mai totale. Nel dispositivo di fig. 170, ponendo in luogo del vetro un normale specchio argentato o una lastrina di metallo lucido (per es. un pezzo di foglio d'alluminio per alimenti, ben spianato), il riflesso verrà indebolito ruotando il polarizzatore, ma non "estinto".

#### Applicazioni alla fotografia

La polarizzazione per riflessione viene sfruttata dai fotografi, quando si fotografa obliquamente davanti ad una lastra di vetro od alla superficie di un lago: quanto più ci si avvicina all'angolo di Brewster, tanto più il riflesso sul vetro o sull'acqua può essere attenuato<sup>91</sup> e, quando è estinto completamente per opportuna rotazione del polarizzatore, si fotografa al di là del vetro o al di sotto del pelo dell'acqua senza l'effetto disturbante del fascio riflesso. La polarizzazione per riflessione non si verifica per incidenza normale (perpendicolare alla

<sup>90</sup> dal tedesco "senkrecht".

<sup>91</sup> È sottinteso che il polarizzatore è montato sull'obiettivo e può ruotare attorno all'asse di questo.

superficie riflettente) ed in questo caso il filtro polarizzante è inutile: mai usare il flash davanti ad una vetrina! Il riflesso abbaglierà la fotografia.

Come si è detto sopra, un fascio riflesso può essere polarizzato totalmente solo per riflessione su una superficie non metallica: quindi il polarizzatore per uso fotografico, per l'attenuazione del riflesso, funziona ben poco nel caso di superfici metalliche.

Con un filtro polarizzatore di quelli usati in fotografia, oppure con un pezzetto di Polaroid, ruotandolo continuamente attorno alla direzione perpendicolare al suo piano, è poi facile rilevare la polarizzazione parziale del fondo del cielo, di cui si è parlato sopra (cielo sereno, guardando a circa 90° dalla direzione di provenienza della radiazione solare). I fotografi usano infatti il polarizzatore anche per "scurire il cielo". Come si è detto sopra, la polarizzazione della luce diffusa dal cielo dipende dal fatto che le onde ottiche sono trasversali e tendono a venir diffuse dalle molecole dell'aria continuando ad oscillare secondo una direzione perpendicolare alla direzione di provenienza.

Vogliamo descrivere un'altra facile osservazione: di giorno, si attacchi ad un vetro della finestra un pezzo di plastica trasparente; va bene un pezzo di una custodia in polistirolo per CD o DVD. A questo punto, ci si metta ad almeno un paio di metri dalla finestra e si guardi in basso il riflesso della finestra prodotto dal pavimento; si suppone che, in questa direzione, nella finestra appaia il cielo, le nuvole o simili. Se il pavimento non è ben lucido (moquette, parquet, piastrelle ruvide, cotto, ecc.), si poggia sul pavimento una lastra di vetro o di marmo lucido. Il riflesso della finestra mostrerà il cielo ma, in corrispondenza del pezzo di plastica, si vedranno vari colori, anche vivaci. Si tratta ancora di colori d'interferenza creati dal potere polarizzante del pavimento (per riflessione) e della plastica (fotoplasticità, sempre presente in questi manufatti, vedi la fig. 168); in più, l'eventuale polarizzazione parziale della luce diffusa dal cielo.

Comprendiamo dunque come è possibile esaminare fenomeni di polarizzazione con un semplice polarizzatore: come si è visto, guardando in direzione di una sorgente sospetta di essere almeno parzialmente polarizzata (cielo blu, un riflesso su un oggetto trasparente, per es.), si ponga un polarizzatore davanti all'occhio e lo si ruoti attorno alla direzione di osservazione. Se l'intensità varia, il fascio in arrivo è almeno parzialmente polarizzato.

I fenomeni più appariscenti si osservano però ponendo gli oggetti birifrangenti fra due polarizzatori, generalmente "incrociati", in modo da avere estinzione, come detto sopra.

### La conoscopia

Finora, come si può capire osservando il semplice polariscopio di fig. 156, il nostro sistema ottico era costituito da una sorgente di modesta estensione (la lampadina "opale"), nessuna lente interposta, due filtri a superfici piane e parallele, l'occhio dell'osservatore, di ben modesto diametro. Fra sorgente ed occhio si ha dunque un fascio costituito da raggi quasi paralleli. L'oggetto che abbiamo osservato era a forma di lamina o, in ogni caso, privo di potere convergente.

Un'osservazione di questo tipo viene quindi chiamata "**ortoscopica**" (dal greco = "vedere diritto") o "a luce parallela".

Ma è possibile illuminare l'oggetto birifrangente con un fascio convergente in modo che i raggi che l'attraversano abbiano un'inclinazione variabile, nel senso che sono contenuti all'interno di un fascio conico di forte apertura. Parleremo di osservazione "**conoscopica**" o "in luce convergente".

Poiché il comportamento della radiazione polarizzata in un corpo birifrangente dipende, l'abbiamo spiegato sopra, dalla direzione di propagazione, i fenomeni osservabili in conoscopia saranno assai più vari di quelli in ortoscopia: ogni raggio, in funzione della sua inclinazione, produrrà effetti diversi.

In concreto: una lamina cristallina in ortoscopia, se di spessore uniforme, produce un'immagine di colore o luminosità ugualmente uniforme; in conoscopia si avranno colori diversi a seconda dell'inclinazione dei singoli raggi che provengono dalla sorgente.

Il dispositivo pratico per osservare quanto detto si può schematizzare come in fig. 172 e costruire come nella figura successiva. Come oggetto di facile reperibilità e molto adatto ad un'osservazione in conoscopia, indichiamo una lamina di muscovite limpida, di almeno uno o due mm di spessore; cercarla in un negozio di minerali. Se ne monti un pezzo, di almeno un cm<sup>2</sup>, fra i vetri di un telaietto per diapositive o fra un porta-oggetti ed un copri-oggetti da microscopio (parte inferiore della fig. 173).

La muscovite possiede due "assi ottici", cioè due direzioni in cui non avviene la birifrazione,

ed in quelle direzioni i colori d'interferenza scompaiono. In tutte le altre direzioni si avranno colori diversi, ma uguali per tutti i raggi che attraversano il cristallo in direzioni di pari birifrazione<sup>92</sup>. Quello che si vede può essere del tipo di ciò che risulta in fig. 174. Possiamo garantire che la figura non rende onore alla brillantezza dei colori che si osservano ad occhio.

Fig. 172 (a destra)

Schema di dispositivo addizionale da interporre fra polarizzatore ed analizzatore. Una prima lente convergente forte ( $L_2$ ) rende convergente il fascio quasi-parallelo che proviene dalla lampadina, posta inferiormente ("Sorg."). Nel fuoco  $F$  di  $L_2$  si pone l'oggetto ("Ogg"), che sarà così traversato da un fascio conico. Al di là di  $F$  il fascio diviene divergente. Sopra  $F$  si pone una seconda lente convergente forte ( $L_1$ ) ad una distanza pari alla focale di essa. Il punto  $F$  diviene allora il secondo fuoco di  $L_2$  ed il primo fuoco di  $L_1$ . Da  $L_1$  emerge allora un fascio sub-parallelo, che si può osservare come nella normale "ortoscopia". Ciò che appare sarà il risultato della birifrazione all'interno di un fascio di raggi di diversa inclinazione.

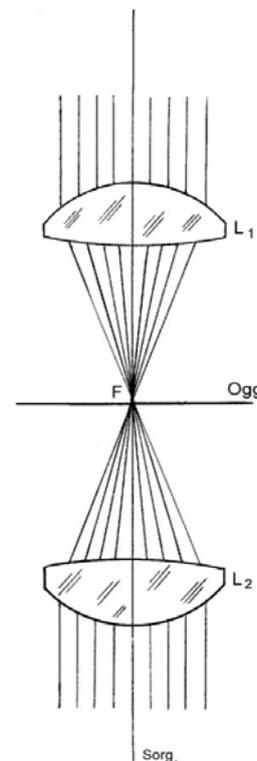
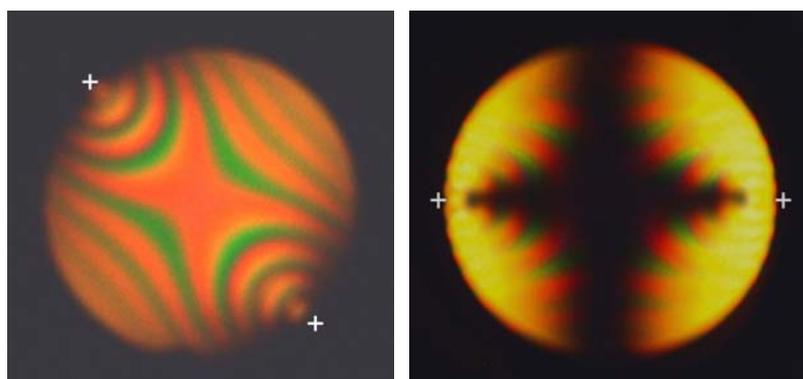


Fig. 173 (sopra) - In pratica, occorre una coppia di forti lenti d'ingrandimento, del tipo di quelle usate dai filatelici, spesso semi-sferiche. Occorreranno due anelli metallici per sostenere le due lenti, un anello per l'oggetto, ed uno per funzionare da base. Il tutto tenuto fermo da un pezzo di barra filettata M3 o M4, reperibile in ferramenta. La distanza fra le due lenti deve essere la somma delle loro focali. Questo dispositivo va inserito in mezzo ai due polarizzatori di fig. 156, naturalmente purché la distanza fra essi sia stata prevista di valore sufficiente.

Fig. 174

Immagini conoscopiche di una lamina di sfaldatura di muscovite di 2 mm di spessore. Le "linee isocromatiche", che riuniscono i punti d'ugual colore, indicano le direzioni dei raggi che, nel traversare la mica, hanno subito lo stesso grado di birifrazione. Le due crocette bianche indicano i due assi ottici. Fra l'una e l'altra figura, la lamina di mica è stata ruotata di  $45^\circ$  attorno alla verticale. Le due barre nere incrociate della figura a destra indicano le "direzioni principali" della lamina le quali, essendo in quel caso parallele alle direzioni dei Nicol, producono estinzione.



#### Attività ottica o "polarizzazione rotatoria"

Il termine apparentemente generico "attività ottica" indica invece un fenomeno assai particolare: il potere di certi materiali di ruotare il piano di polarizzazione di un raggio eventualmente polarizzato che li attraversa. In fig. 175 è schematizzato il fenomeno.

Questo comportamento è legato alla disposizione degli atomi nello spazio, all'interno del reticolo cristallino, ma esso può verificarsi anche con sostanze liquide o in soluzione, in cui le molecole sono caoticamente disposte, purché le singole molecole posseggano una struttura "a

<sup>92</sup> Dicendo "di pari birifrazione" intendiamo le direzioni in cui i due raggi birifratti escono dall'oggetto con una pari differenza di fase reciproca, ossia un pari ritardo relativo. (Vedi in questo sito: "Introduzione alla Microscopia in Radiazione Polarizzata").

vite”.

Fig. 175

Un raggio polarizzato proveniente da sinistra oscilla in un piano verticale, in direzione  $d_1$ . Traversando un cristallo “attivo”, esso viene ruotato attorno alla direzione di propagazione, come una vite nel legno. La rotazione può avvenire in senso orario (come nel disegno) o antiorario; si parla infatti di sostanze “destrogire” o “sinistrogire” (“levogire”)<sup>93</sup>. Emergendo dal cristallo, il raggio oscilla in una nuova direzione ( $d_2$ ), ma è sempre polarizzato.



Fig. 176

Contenitore tubolare per liquidi dotati di attività ottica. Si procuri un tubo in Plexiglas, reperibile presso un buon negozio di materiali plastici, del diametro di 2 - 4 cm. Se ne ricavi un troncone di 8 - 10 cm di lunghezza. Gli orli vengano ben lisciati. Si incollì sull'orlo inferiore (con attaccatutto o resine epossidiche o silicone) una lastrina in vetro. Si riempia il tubo con una soluzione il più concentrata possibile di zucchero; occorrerà un po' di pazienza, poiché, aumentando la concentrazione dello zucchero, la sua dissoluzione diviene sempre più lenta; si deve arrivare ad una consistenza sciropposa. Ora si metta in azione il polariscopio di fig. 156; senza oggetto interposto, si ruoti l'analizzatore in modo da ottenere la massima estinzione; poi si ponga il tubo in mezzo ai due polarizzatori. L'estinzione scomparirà e si vedrà una figura come quella qui sotto. Il disco centrale, indicato con  $d$ , non è più “estinto”. Per riottenere l'estinzione, occorrerà ruotare un poco l'analizzatore in senso orario. L'angolo di cui si è ruotato il filtro misura appunto l'attività ottica dell'oggetto la quale dipende dal suo spessore e dalla sua concentrazione (se si tratta di una soluzione) e, naturalmente, dalla sua natura.

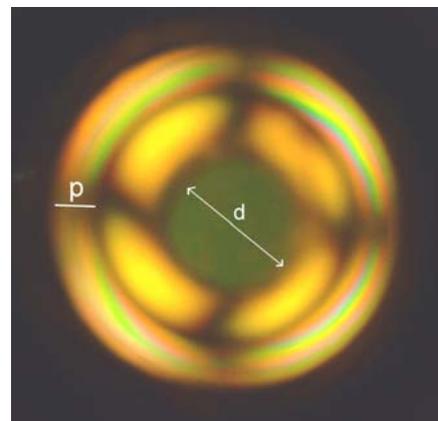


Per verificare questo fenomeno c'è un semplice mezzo: una soluzione concentrata dello zucchero comune o saccarosio. Le didascalie delle figure 175-177 spiegano come operare utilizzando un recipiente cilindrico posto verticalmente nel nostro polariscopio. Anche qui, la distanza fra i due polarizzatori deve essere tale da poter accogliere il tubo di fig. 176.

Fig. 177

Il tubo pieno di soluzione zuccherina, come appare fra Nicol incrociati, da sopra. L'anello periferico, indicato con  $p$ , è l'immagine sfocata della parete del tubo; trattandosi di resina sintetica estrusa, è naturale che sia birifrangente in maniera imprevedibile (fotoplasticità). L'anello intermedio, con quattro bracci scuri inclinati, rappresenta il riflesso sulla superficie interna del tubo, che subisce la rotazione del piano di polarizzazione via via che attraversa lo spessore di liquido. Il disco centrale ( $d$ ) rappresenta il fondo del tubo e mostra un grigio di fondo, cioè un'incompleta estinzione per effetto dell'attività ottica dello zucchero. In realtà, il “grigio di fondo” è leggermente colorato poiché il potere rotatorio dipende dalla lunghezza d'onda e non tutti i colori sono ruotati alla stessa maniera (più ruotato il blu-viola).

Come detto sopra, si riottiene l'estinzione ruotando l'uno o l'altro dei due Nicol.



## I display a cristalli liquidi (LCD)

Per finire, ricordiamo che la luce polarizzata viene utilizzata anche in dispositivi elettronici, come i “display a cristalli liquidi” (LCD). I “cristalli liquidi” sono soluzioni o liquidi in cui le molecole hanno una forma allungata o irregolare ed una distribuzione interna non simmetrica di cariche elettriche. La forma allungata conferisce ad ogni singola molecola un potere birifrangente ma, poiché in un liquido le molecole sono caoticamente disposte, il liquido non risulta globalmente birifrangente. Se però si sottopone tale liquido ad un campo elettrico, anche di pochi Volt, le molecole subiscono l'influenza del campo, si possono disporre secondo una direzione prevalente ed il corpo liquido diviene a questo punto anisotropo e quindi birifrangente. Otticamente, tale corpo si comporta come un cristallo, d'onde il nome: rimane liquido, ma con

<sup>93</sup> Lo zucchero normale (saccarosio) è destrogiro; per idrolisi, per es. durante la digestione, si scinde in due zuccheri semplici: il glucosio, il più diffuso zucchero nel mondo vivente (destrogiro, chiamato anche “destrosio”) ed il fruttosio, comune nei frutti (levogiro o sinistrogiro, chiamato anche “levulosio”).

qualche proprietà da cristallo. Qualcosa di simile a quanto avviene nella fotoelasticità delle materie plastiche.

Ora, in un LCD, si usa per lo più una struttura con un foglio polarizzatore verso l'esterno, lo strato di cristalli liquidi in mezzo ed uno specchio leggermente diffondente in fondo.

Lo strato di cristalli liquidi è a contatto con sottilissimi elettrodi conduttori di elettricità ma trasparenti. Quando tali elettrodi applicano allo strato liquido un'opportuna tensione, le molecole si orientano in direzione preferenziale e tutto è calcolato affinché ogni raggio che traversa il liquido venga sdoppiato in due raggi sfasati fra di loro di mezza lunghezza d'onda; lo strato liquido diviene un "ritardatore mezz'onda" o " $\lambda/2$ "<sup>94</sup>.

Un raggio che incide sul sistema viene polarizzato dal primo strato; se al sistema non è applicata tensione, lo strato liquido è isotropo ed il raggio viene riflesso indietro senza essere stato modificato e di nuovo attraversa quasi indisturbato il polarizzatore (oscillando sempre nello stesso piano): il display appare biancastro. Se invece allo strato liquido viene applicata l'opportuna tensione, tale strato produce due raggi sfasati di  $\lambda/2$  ed in queste condizioni si può dimostrare che, emergendo dallo strato sfasatore, i due raggi interferiscono e ricostruiscono un nuovo raggio il cui piano di vibrazione è ruotato di  $90^\circ$  rispetto a prima. Dopo la riflessione sullo strato di fondo, il raggio viene bloccato dal polarizzatore poiché incide su esso oscillando in direzione ortogonale rispetto alla direzione privilegiata del polarizzatore stesso. Il display a questo punto diviene scuro.

Poiché gli elettrodi sopra citati sono disposti secondo lettere, numeri o piccole figure, sul display appariranno lettere, numeri, ecc. in scuro su fondo biancastro.

Per realizzare un sistema simile occorre un polarizzatore, di cui già disponiamo, uno specchio coperto di carta "da lucidi", con potere diffondente<sup>95</sup>, ma anche una lamina birifrangente, un "ritardatore", che non è facile realizzare. Pertanto ci limitiamo alla descrizione teorica, ma almeno un'esperienza è possibile: si può "disturbare" in vario modo lo strato a cristalli liquidi comprimendo il display con un dito, scaldandolo con aria calda, piegandolo se è flessibile, ecc. In tal caso è probabile che appaiano delle macchie o delle frange colorate, segno di una birifrazione indotta (questa volta non da un campo elettrico), cioè di una fotoelasticità.

---

<sup>94</sup> Si tratta di una semplificazione: in realtà, il "ritardatore" utilizzato produce un ritardo di  $\lambda/4$  ma, essendo traversato due volte (prima e dopo la riflessione sullo specchio), il ritardo globale è di  $\lambda/2$ .

<sup>95</sup> Qualunque tipo di carta, se non altro per il suo potere diffondente, è "depolarizzante", nel senso che altera lo stato di polarizzazione della luce che incide su di esso. In pratica però, il sistema proposto può funzionare abbastanza bene.