

INDICI DI RIFRAZIONE DI MINERALI OPACHI

Se  $\lambda$  e  $\varrho$  sono gli angoli tra la direzione di un fascio monocromatico incidente e quelle dei fasci riflesso e rifratto, sarà  $\lambda = 180^\circ - 2i$ ,  $\varrho = i - r$  (fig. 1).

Per  $i$  sufficientemente grande, il fascio riflesso è più intenso del fascio rifratto e al tempo stesso  $\lambda < \varrho$ ; quando  $i$  è molto piccolo, l'intensità rifratta è maggiore di quella riflessa e al tempo stesso  $\lambda > \varrho$ .

Per  $\lambda = \varrho$  le due intensità sono eguali (ben inteso in cristalli limpidi e praticamente non assorbenti) e allora sarà

$$i = 60 + \frac{r}{3} \text{ (curva I).}$$

L'angolo  $\vartheta = \lambda + \varrho$  è crescente quando  $i$  decresce; quando  $\vartheta = 90^\circ$ , anche  $i + r = 90^\circ$ , e quindi  $n = \operatorname{tg} i$  (curva II).

Se ora consideriamo il fascio incidente come una fuga di fotoni <sup>(1)</sup>, e ciascuno di essi autopolarizzato, in quanto conserva costante la direzione di vibrazione, o pulsazione, trasversale rispetto alla propria traiettoria, ogni fotone che arriva alla superficie di un mezzo trasparente, omogeneo, devierà dell'angolo  $\lambda$  nella riflessione e dell'angolo  $\varrho$  nella rifrazione.

Attraversando il mezzo, subirà in esso una polarizzazione indotta che non ne varia il periodo, ma ne abbrevia la lunghezza d'onda; ed è connessa con la deviazione  $\varrho$ , in quanto l'una e l'altra sono dovute alle condizioni geometriche ed energetiche del campo.

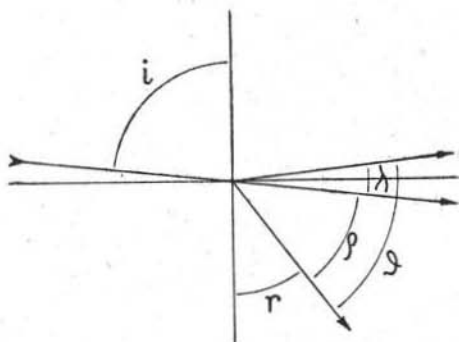


Fig. 1.

<sup>(1)</sup> P. A. M. DIRAC, *The principles of Quantum Mechanics*, 1947, pag. 5.

Ma un'espressione quantitativa dei legami fra tali condizioni e gli indici di rifrazione non risulta ancora raggiunta. Ed anche il Winchell recentemente (1) ha scritto che le ipotesi occorrenti per tentare di calcolare gli indici di rifrazione dei cristalli in base alla loro struttura, son così incerte, che « an application to the majority of minerals is non yet possible ».

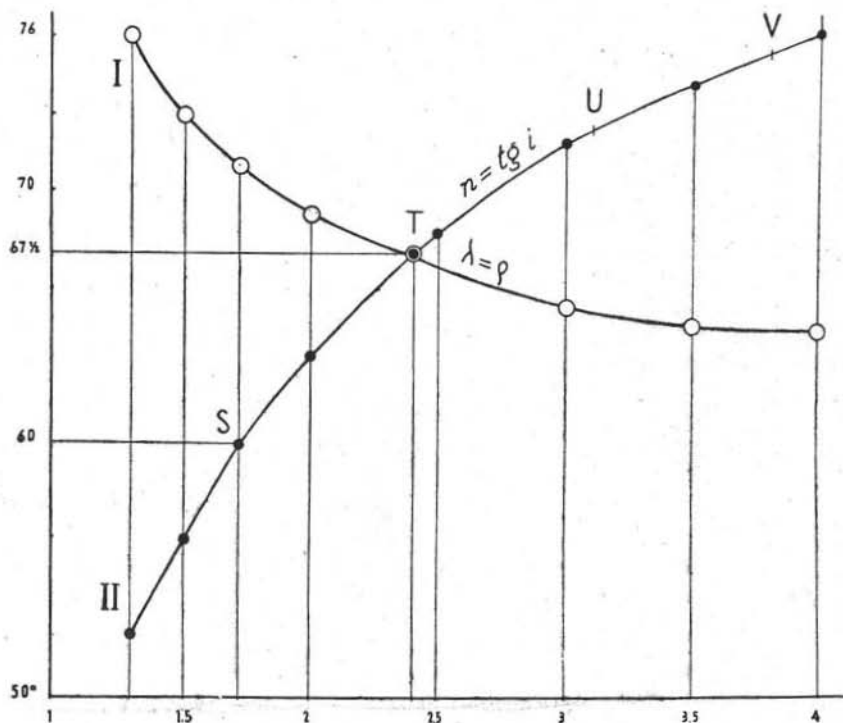


Fig. 2.

Tuttavia si hanno molte determinazioni sia di valori calcolati, sia, nel caso di opacità, di valori misurati indirettamente. Appartiene al primo genere il calcolo che, fin dal 1924, fu pubblicato dal Bragg riguardo agli indici di rifrazione della calcite e dell'aragonite (2). Sono invece del secondo genere le misure eseguite mediante fotometri o mediante celle fotoelettriche, del coefficiente

(1) A. WINCHELL, *Elements of optical mineralogy*, 1951, 4<sup>a</sup> ed. II., pag. 126.

(2) BRAGG, *Proc. Roy. Soc.* 1924, 105, e *Atomic Str. of Miner.*, 1937, pag. 123.

di riflessione e dell'indice  $x$  di assorbimento, luce per luce, onde ricavarne il potere riflettente  $R$ ; ed ammesso che sia

$$R = \frac{(n - 1)^2 + n^2 x^2}{(n + 1)^2 + n^2 x^2},$$

se ne deduce il valore approssimato di  $n$ . Questo secondo genere può venire applicato sia a cristalli più o meno opachi capaci di assorbire determinate luci, sia a cristalli totalmente opachi nel campo del visibile, ma più o meno trasparenti nell'infrarosso (<sup>1</sup>).

Quando la poca trasparenza di un mezzo omogeneo ostacola la misura dell'indice di rifrazione, l'angolo di Brewster (B) offre in vari casi la possibilità di determinazione almeno approssimata. Può tuttavia avvenire che, al variare di  $i$ , si abbia un campo di alcuni gradi, in cui la luce riflessa è più debole; ed allora occorrerà precisare se e fin quando si possa parlare di un angolo B. Già il Berek, cui si devono molte ricerche riguardo agli indici di rifrazione di cristalli più o meno assorbenti, introdusse il concetto di indice complesso ( $n'$ ), legato all'indice di assorbimento  $x$  dalla relazione  $n' = n(1 - x\sqrt{-1})$ ; e ne definì la superficie vettoriale complessa (<sup>2</sup>).

Per iniziare qualche osservazione ottica sopra cristalli al limite della trasparenza, ho utilizzato un goniometro a riflessione opportunamente modificato. La faccia riflettente (verticale) è girevole intorno all'asse verticale del goniometro; e siccome ruotandola di un angolo  $\alpha$ , occorre girare di  $2\alpha$  il cannocchiale che raccoglie il fascio riflesso affinché l'immagine della mira resti nel campo di osservazione, ho innestato sul goniometro il dispositivo rappresentato nella fig. 3.

Intorno ad un cilindro fisso C, coassiale col goniometro e solidale con l'anello dei noni, girano due pulegge, delle quali la inferiore è solidale col cannocchiale e gira insieme con questo e col disco graduato; l'altra ha il raggio doppio; ambedue, mediante sottili cinghie a tensione regolabile, sono collegate con una puleggia

---

(<sup>1</sup>) RENE BAILLI, *Infrared light for mineral determination*. The American Mineralogist, 1948, 33, pag. 519.

(<sup>2</sup>) Vedi H. SCHNEIDERHÖHN, *Erzmikroskopisches Praktikum*, 1952, Stuttgart., pag. 103. Sono citati, a pag. 261, i corrispondenti lavori del Berek.

avente due gole eguali, girevole intorno all'asse cilindrico C', parallelo al precedente (1).

La determinazione degli indici con questo apparecchio permette approssimazioni non oltre due cifre decimali, come media di più misure, perchè i minimi di luce che oltrepassano l'analizzatore sogliono sfumare entro angoli di qualche grado, anche osservando sostanze ben trasparenti. Ciò sarebbe dunque insufficiente per misure di indici con la consueta approssimazione alla 3<sup>a</sup> cifra decimale; ma può permettere di esaminare fin dove, data l'opacità di un mezzo, abbia reale significato il concetto di indice di rifrazione.

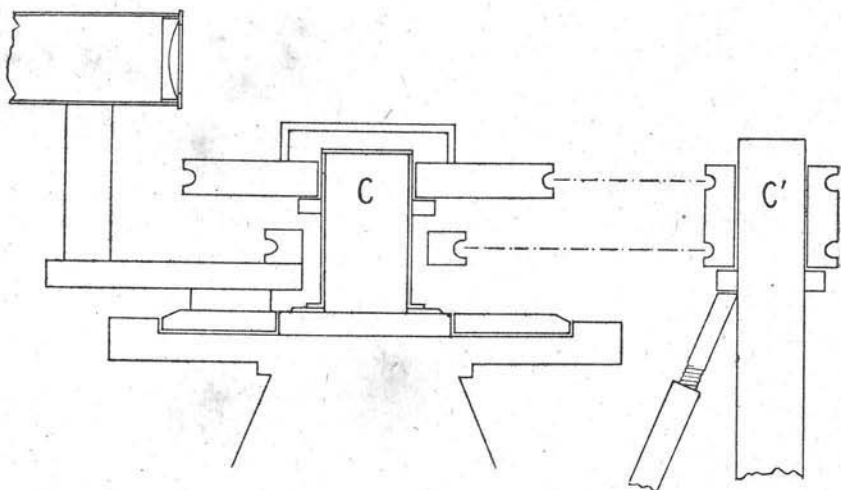


Fig. 3.

Ho sempre adoperato come sorgente una lampada elettrica a vapori di sodio.

*Magnetite - Franklinite.* Sopra un cristallo di magnetite ho fatto alcune determinazioni dell'angolo di riflessione sotto cui si ha minima luminosità attraverso all'analizzatore; qui alle oscillazioni nei valori misurati corrispondono variazioni della tangente, raggiungenti la prima cifra decimale; ho trovato valori fra  $65^\circ$  e  $67^\circ$  con una media di circa  $66^\circ.10'$ . Considerando questo valore come angolo di Brewster, gli corrisponde l'indice di rifrazione 2,26.

(1) Ringrazio cordialmente il Direttore dell'Istituto di Mineralogia di Pavia, prof. C. MINGUZZI, per la gentile premura con cui si interessò alla costituzione di questo dispositivo.

L'indice di rifrazione della magnetite era stato determinato da Larsen (1) su scaglie molto sottili, trasmettenti poca luce, trovando  $n = 2,42$  (Na), valore un poco superiore a quello trovato da me.

Confrontando poi l'indice della magnetite con quelli noti per vari membri della famiglia degli spinelli, ho segnato nella fig. 4 alcuni valori, che sono riportati dal Winchell (l. c.) insieme coi rispettivi pesi specifici; e cioè:

1. Spinello	Mg Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	G = 3.58	n = 1.715
2. Ercinite	Fe Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.39	1.83
3. Gahnite	Zn Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.62	1.805
4. Cromite	Fe Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5.09	2.12
5. Trevorite	Ni Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5.16	2.3
6. Magnetite	Fe Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5.20	(2.34)
7. Franklinite	Zn Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5.32	(2.4)

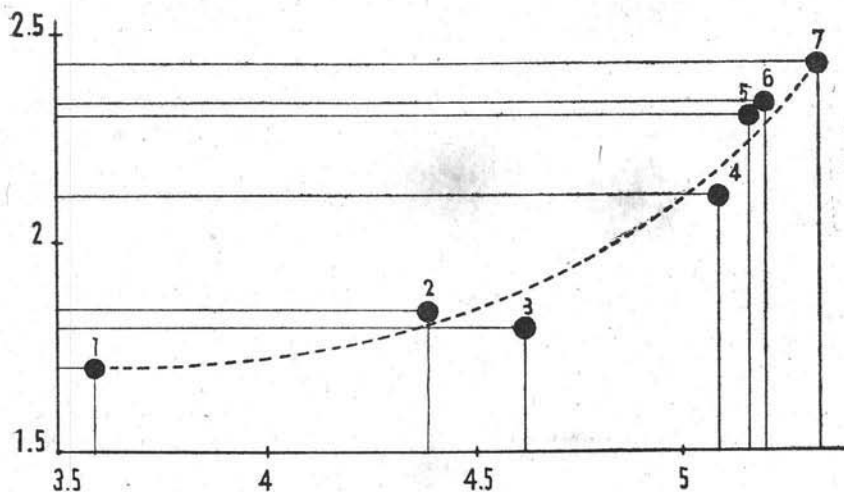


Fig. 4.

Per la magnetite ho posto (fra parentesi)  $n = 2.34$ , valore compreso tra quello di Larsen e quello misurato da me.

Per la franklinite il Winchell riporta il valore di circa 2.36 per il rosso; in base a questo valore ho segnato come approssimativo per il giallo  $n = 2.4$ .

(1) *Lehrbuch der Eramikroskopie* di SCHNEIDERHÖHN e RANDOHRN, pag. 578.

La curva, tracciata con libertà, vuol solo indicare come in questi termini, dotati di analoga struttura, i valori degli indici sono, grosso modo, crescenti coi valori dei pesi specifici. Ma le misure sopra un cristallo di franklinite mi han dato, a luce gialla, per l'angolo di minima luminosità, valori intorno a  $57^\circ$ , corrispondenti in media ad  $n = 2.35$ .

*Ematite.* Come la magnetite anche l'ematite può solo in particolari circostanze raggiungere una certa trasparenza. Sono note le sottilissime lamelle rosse del Vesuvio e del Somma, che ben raramente son trasparenti. Ma non risulta (<sup>1</sup>) che di queste lamine siano stati determinati gli indici di rifrazione.

Misure eseguite dal Berek, riportate anche dal Winchell (l. c.), assegnano all'ematite i valori  $\omega = 3.22$  (Na),  $\epsilon = 2.94$  (Na). I corrispondenti valori dell'angolo di Brewster sono perciò:  $B_\omega = 72^\circ.44'30''$ ,  $B_\epsilon = 71^\circ.13'$ .

Io ho esaminato un grosso opaco cristallo di oligisto dell'Elba, con facce a viva lucentezza metallica. Il campo di minore intensità riflessa è qui un poco più ampio di quello osservato nella magnetite. Ruotando la faccia nel proprio piano, variano un poco i limiti del campo; complessivamente gli angoli variano all'incirca fra  $69^\circ$  e  $74^\circ$ ; una media di circa  $71^\circ$  corrisponde ad un indice medio di circa 2.9, a sua volta vicino, ma un poco inferiore, al valor medio fra i suddetti indici  $\omega$  ed  $\epsilon$ , che è 3.08.

C'è quindi una discreta corrispondenza con essi.

Però non sembra evidente che l'indebolita luminosità riflessa possa identificarsi con l'estinzione brewsteriana.

*Galena.* Più netto è il caso della galena, sempre opaca e con piena lucentezza metallica. Il fascio riflesso presenta, attraverso all'analizzatore, un più debole abbassamento di luminosità; la polarizzazione ellittica della luce è più decisa.

Il Winchell riporta come indici di rifrazione della galena i seguenti valori:

$$4.015 \text{ (C) , } 4.912 \text{ (D) , } 3.796 \text{ (F) ,}$$

valori che non trovo nell'Erzmikroskopisches Praktikum dello Schneiderhöhn del 1952, in cui invece è riportato il solo valore 4.30 (Na), insieme con l'indice di assorbimento  $\alpha_{Na} = 0.40$ , misu-

---

(<sup>1</sup>) F. ZAMBONINI, *Mineralogia Vesuviana*, 2 ediz., pag. 63.

rati dal Drude <sup>(1)</sup>. Il Dana, nel volume del 1946, non dà per la galena alcun indice.

Ora i valori trovati da me sono soltanto approssimativi perchè dedotti da misure in un campo i cui estremi passano sfumati alla maggiore luminosità; essi vanno da circa  $2\frac{1}{2}$  a circa  $3\frac{1}{2}$ , con dominanza intorno al 3,2; e tale valore è molto più basso di quello determinato dal Drude.

Questa e le altre misure sopra riferite suggeriscono qualche osservazione; ed io mi riferisco alla curva II, lungo la quale, da sinistra a destra, i punti corrispondono a valori crescenti del rapporto  $i/r$ , mentre si passa dalle lucentezze vitree alle resinose e adamantine, alle submetalliche e metalliche.

Notiamo che nel punto S si ha:

$$\frac{i}{r} = 2, \quad \frac{\lambda}{\rho} = 2; \quad (\text{posto } \varphi = \frac{\pi}{18}, \text{ si ha } i = 6\varphi, r = 3\varphi);$$

e vi corrisponde l'indice  $n = 1,732$  (flint di Faraday).

Nel punto T (di incontro con la curva  $\lambda = \rho$ ), si ha:

$$\frac{i}{r} = 3, \quad \frac{\lambda}{\rho} = 1; \quad (\text{posto } \varphi = \frac{\pi}{24}, \text{ si ha } i = 9\varphi, r = 3\varphi);$$

e vi corrisponde l'indice  $n = 2,414$  (diamante) <sup>(2)</sup>.

Nel punto U si ha:

$$\frac{i}{r} = 4, \quad \frac{\lambda}{\rho} = \frac{2}{3}; \quad (\text{posto } \varphi = \frac{\pi}{30}, \text{ si ha } i = 16\varphi, r = 3\varphi);$$

e vi corrisponde l'indice  $n = 3,018$ .

Nel punto V si ha:

$$\frac{i}{r} = 5, \quad \frac{\lambda}{\rho} = \frac{1}{2}; \quad (\text{posto } \varphi = \frac{\pi}{36}, \text{ si ha } i = 15\varphi, r = 3\varphi);$$

e vi corrisponde l'indice  $n = 3,732$ .

Per quei minerali, come ad es. la magnetite e la franklinite, che per solito sono opachi, ma nei quali è anche possibile una certa trasparenza (sia pure in sottili schegge o lamine e limitata a certe lunghezze d'onda), sembra altresì possibile che il parziale assorbimento per parte del minerale, non sia tale da impedire misure di

<sup>(1)</sup> Wied. Ann., 39, 1890 pag. 481-554.

<sup>(2)</sup> U. PANICHI, Osservazioni sulla legge di Brewster, Rend. Acc. Lincei, 1947.

riflessione brewsteriana, da cui fornire un valore approssimato dell'indice di rifrazione; e che quindi tali sostanze possano effettivamente venir rappresentate sulla curva II, le cui ordinate sono angoli B. I punti corrispondenti a magnetite e franklinite risultano prossimi al punto T.

Anche il fascio riflesso dall'ematite, sebbene con minore abbassamento della luminosità ed in più ampio campo, può forse considerarsi come un'approssimata riflessione brewsteriana; e in tal caso il valore medio da me trovato corrisponderebbe ad un punto della curva assai vicino al punto U.

Ma la curva II ha solo un valore virtuale per sostanze dotate di forti indici di assorbimento che non solo non presentano discreta estinzione brewsteriana, ma neppure un campo dotato di una ristretta zona centrale di minore luminosità. Gli indici determinabili per altra via su tali sostanze sogliono aver valori elevatissimi: intorno ed oltre al 4 (stibina, galena) e perfino intorno al 5 (molibdenite). Sulla curva II non si trovano oltre il punto V punti rappresentativi di sostanze dotate di trasparenza, sia pur minima, per le lunghezze d'onda del visibile.

Riguardo dunque alla galena, per decidere se l'abbassamento di luminosità da me osservato attraverso all'analizzatore e sotto conveniente inclinazione del fascio monocromatico incidente, sia da considerarsi come corrispondente all'angolo di Brewster, noto anzitutto che in tal caso apparirebbe troppo elevato il valore di 4,3 determinato dal Drude, il che non sembra verosimile; noto inoltre che le formule di Fresnell hanno un valore quasi nullo per sostanze dotate di notevole assorbimento e di lucentezza metallica.

La polarizzazione ellittica del fascio riflesso, quando non c'è apprezzabile rifrazione, può esser considerata come l'insieme di tutte le polarizzazioni rettilinee dei singoli fotoni; e quanto maggiore sarà la quantità di fotoni che dopo la riflessione risulteranno polarizzati nel piano di incidenza, tanto più la polarizzazione ellittica complessiva del fascio si avvicinerà ad una polarizzazione rettilinea. Su questo concetto possiamo ammettere che, prescindendo da concomitanti fenomeni di assorbimento, l'effettiva diminuzione della luminosità del fascio riflesso visto attraverso il nicol (diminuzione variabile con l'angolo  $i$ ), risulti più sensibile nella direzione (e direzioni vicine) in cui è maggiore la quantità di fotoni, che, dopo l'urto sulla superficie, hanno subito una rotazione nel senso



a ciò favorevole. Ora tale rotazione avviene non soltanto secondo  $\lambda$  (angolo che dipende solo da  $i$ ), ma anche secondo l'angolo  $\gamma$ , che, fotone per fotone, indica l'inclinazione del piano di vibrazione del fotone sul piano di incidenza; e questa rotazione, che può avere due versi opposti, è altresì funzione della modalità dell'urto del fotone sulla superficie riflettente.

Ciò premesso, possiamo ammettere:

1°) che la quantità di fotoni riflessi aventi il piano di polarizzazione nel piano di incidenza sia variabile con  $i$ , crescendo in corrispondenza della minore luminosità osservabile oltre l'analizzatore;

2°) che tale minore luminosità raggiunga l'estinzione quando la sostanza è trasparente; e allora  $i = B$ .

Quanto alle sostanze, cui, per lucentezza metallica e composizione chimica, corrispondono forti valori di  $n$  (non però misurabili direttamente), l'angolo  $B$  non esiste più. Se però esiste una zona di minore luminosità, e quindi, con media approssimata, un valore virtuale di  $B$ , il valore di  $n$  corrispondente a  $\text{tg } B$  risulta minore (nei casi finora da me osservati) di quello fornito dalla misura del potere riflettente e dell'indice di assorbimento.