

od matične otopine. Preostala matičnica vraća se u prihvatnik kristala, a višak izlazi iz sustava. Takva se kristalizacija obično izvodi u postrojenjima sa tri ili više međusobno povezanih kristalizatora.

Kristalizacija hlađenjem. Hlađenje se više ili manje primjenjuje u skoro svim operacijama industrijske kristalizacije. Međutim, postoje i postupci u kojima se za stvaranje prezasićenja primjenjuje samo hlađenje. U zatvorenu posudu kristalizatora (sl. 29) stavlja se zasićena otopina. Unutar posude smještena je miješalica i cijevi za hlađenje kojima protječe voda. Miješanje pospješuje nukleaciju, a time i stvaranje sitnozrnatog produkta. Postupak se vodi diskontinuirano, ali je ekonomičan za manju proizvodnju, pogotovo ako voda za hlađenje nije skupa. Glavni je nedostatak izlučivanje kristala na hladnim stijenkama cijevi hladila. To se može djelomično spriječiti postavljanjem gumenih otirača na miješalicu. Za kristalizaciju hlađenjem može se upotrijebiti i rotirajući bubanj (sl. 26), koji će tada biti zatvoren na oba kraja. Hladi se preko stijenke, a struja zraka nije potrebna.

LIT.: H. E. Buckley, *Crystal growth*. John Wiley and Sons New York 1951. — В. Д. Кузнецов, *Кристаллы и кристаллизация*. Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва 1954. — W. D. Lawson, S. Nielsen, *Preparation of single crystals*. Butterworths Scientific Publications, London 1958. — B. Honigmann, *Gleichgewichts- und Wachstumsformen von Kristallen*. Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt 1958. — J. J. Gilman, ed., *The art and science of growing crystals* John Wiley and Sons, New York 1963. — J. C. Brice, *The growth of crystals from the melt*, Vol. 5 of Selected topics in solid state physics. North-Holland, Amsterdam 1965. — A. W. Bamforth, *Industrial Crystallization*. Leonard Hill, London 1965. — A. G. Walton, *The formation and properties of precipitates*. Interscience Publishers, New York 1967. — Т. Г. Истров и др., *Выращивание кристаллов из растворов*. Издательство Недра, Ленинград 1967. — R. F. Strichland-Constable, *Kinetics and mechanism of crystallization*. Academic Press, London 1968. — A. C. Zettlemoyer, ed., *Nucleation*. M. Dekker, New York 1969. — I. Tarjan, M. Matrai, *Laboratory manual on crystal growth*. Akadémiai Kiadó, Budapest 1972. — K. Th. Wilke, *Kristallzüchtung*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1973. — J. W. Mullin, ed., *Industrial crystallization*. Plenum Press, New York 1976.

M. Topić

KRISTALNA OPTIKA, grana optike koja obuhvaća sve pojave što se opažaju pri prolazu svjetlosti kroz optički anizotropne kristale ili, još općenitije, sve pojave svjetlosti koje nastaju na kristalima (npr. pojave pri totalnoj refleksiji). Brzina širenja svjetlosti u kristalima je u različitim smjerovima različita, zbog čega nastaje pojava dvoloma. Od jedne se upadne zrake u kristalu pojavljuju dvije zrake različitoga smjera, koje se mogu razlikovati i po apsorpcijskoj sposobnosti u vidljivom dijelu spektra (v. *Optika*). Posljedica toga je *pleohroizam*, ovisnost boje kristala o smjeru titranja svjetlosti.

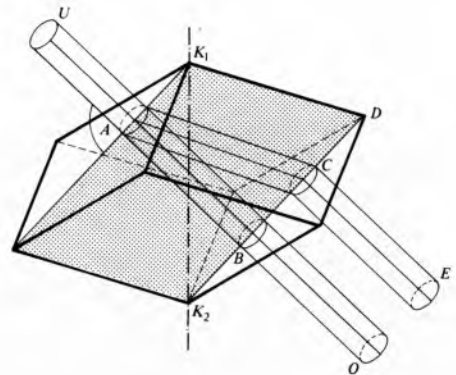
Različite pojave koje se pri tom opažaju toliko su karakteristične za pojedine tvari da se one po njima mogu prepoznati. U određenim slučajevima može se iz samo optičkih opažanja na temelju tih pojava u izomorfnim smjesama točno odrediti njihov kemijski sastav, tj. udio pojedinih komponenata u smjesi. Umjetno pobuđenim dvolomom, zbog nejednolikog naprežanja, mogu se kontrolirati deformacije tehničkih konstrukcija (v. *Fotoelasticimetrija*, TE5, str. 525).

LOM I DVOLOM SVJETLOSTI

Lom svjetlosti poznat je već odavna. U starohelenskom razdoblju o lomu se nalaze zapisi u Katoptrici, koja se pripisuje Euklidu. Ptolemej je obavljao i mjerenja. Zakon prema kojemu se svjetlost lomi pronašao je 1621. godine Holandancin W. Snellius (Snel van Royen, 1580. ili 1591—1626); današnji oblik tog zakona objavio je 1637. godine R. Descartes (1596—1650) u djelu *La Dioptrique*. Prema tom zakonu, pri prolazu iz jednoga sredstva u drugo (npr. iz uzduha u vodu, staklo, sol itd.) svjetlost se lomi tako da se upadna zraka, okomica na granicu između sredstava na mjestu upada i slomljena zraka nalaze u istoj ravnini (ravnina upada) te da je omjer sinusâ kutova upada i loma za ista dva sredstva stalna veličina za svaki kut upada

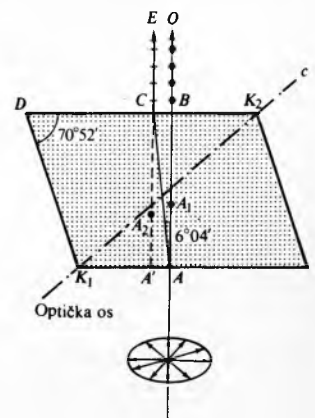
(v. *Optika*). Ch. Huygens je pokazao da je omjer tih sinusa jednak omjeru brzine svjetlosti u sredstvu iz kojega ona dolazi i brzine u sredstvu u koje svjetlost ulazi. Huygensovi izvodi vrijede za longitudinalno i za transverzalno valovito gibanje. Prema tom zakonu loma od jednoga snopa upadnih zraka nastaje jedan snop lomljenih zraka. Posebno, ako svjetlost pada okomito na granicu dvaju sredstava, ona nepromijenjenim smjerom nastavlja dalje svoj put u drugom sredstvu.

Otkriće dvoloma. Sredinom XVII st. bili su iz Islanda u Kopenhagen dopremljeni veliki, potpuno prozirni kristali kalcita (CaCO_3). Na njima je E. Bartholinus (Bartholin; 1629—1698) opisao 1669. godine nove pojave koje se prema Snelliusovu zakonu loma nisu mogle očekivati niti protumačiti. Pojava dvoloma može se razmotriti na romboedar sasma prozirnoga kalcita, koji se može iskalati zbog odlične kalavosti kalcita smjerom romboedarskih ploha u romboedar omeđen sa šest istovrsnih romba (sl. 1). Pada li snop svjetlosti U okomito na jednu od tih ploha u točki A , pojavit će se u kalcitu dva snopa O i E . Snop O će nepromijenjenim smjerom nastaviti svoj put kroz kalcitni romboedar, izaći iz njega u točki B na suprotnoj paralelnoj plohi i nastaviti okomito na nju nepromijenjenim smjerom širenje uzduhom. Snop će E unatoč okomitom upadanju u točki A izmijeniti svoj smjer širenja u kalcitu od točke A prema točki C ; izašavši u točki C , širit će se u uzduhu smjerom paralelno s prvim snopom. Od jedne zrake, kako se obično kaže, nastale su na taj način dvije zrake jednakoga intenziteta. Ovu, do 1669. godine sasma nepoznatu pojavu nazvali su *dvolom*, a prozirne kristale kalcita s Islanda *islandski dvolomac*.



Sl. 1. Razdvajanje snopa svjetlosti U u dvolomnom kristalu na ordinarni snop O i ekstraordinarni snop E

Na sl. 2 predložen je presjek K_1DK_2 sa sl. 1. U njegovoj se ravnini šire kroz kalcit obje zrake AB i AC , koje su u njemu nastale zbog dvoloma. Ako se u točki A nalazi otvor kroz koji svjetlost okomito pada na kalcit, oko, koje se nalazi s druge strane kalcita, vidjet će taj otvor dvostruko. Oko u koje dolaze zrake vidjet će otvor u protivnom smjeru od smjera zraka. Vidjet će dakle otvor u točki A , jer je ona u produžetku jedne zrake u suprotnom njenom smjeru; isto tako vidjet će oko sliku tog otvora i u točki A' , jer je ona u produžetku druge zrake. Slično će se vidjeti udvostručeno sve što se kroz kalcit



Sl. 2. Zbog dvoloma u kalcitu vidi se točka A dvostruko, u A_1 i A_2 , točnije u A_1 i A_2

promatra, npr. tekst u knjizi ako se romboedar postavi na njega. Vrijednosti kutova na sl. 2 odnose se na kalcit.

Jedan od dva snopa svjetlosti koji upada okomito u točki A na plohu romboedra proći će i izaći nepromijenjenim smjerom kroz B iz kalcita, kako to prema Snelliusovu zakonu loma i mora biti. Zraka u tom snopu ponaša se u skladu s tim zakonom i zbog toga se ona zove *ordinarna, redovna* ili *obična zraka*.

Za druge zrake to ne vrijedi. Usprkos okomitom upadanju svjetlosti u A , one se u kalcitu otklone od smjera ordinarne zrake za $6^\circ 04'$ i, izašavši u točki C iz kalcita, nastavljaju svoj put kroz uzduh paralelno sa smjerom ordinarnih zraka. Zraka iz toga drugog snopa vlada se, s obzirom na do tada poznati zakon loma, neočekivano ili neobično pa se zbog toga naziva *ekstraordinarna, izvanredna* ili *neobična zraka*.

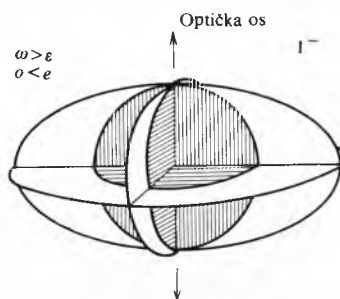
Od svake zrake koja ulazi u kristal nastaju, izuzevši posebne okolnosti, dvije zrake različitih smjerova u kristalu. Izašavši u uzduh, šire se one odvojeno, međusobno paralelnim smjerovima bez obzira na to da li svjetlost upada okomito ili koso, ako je ploha kroz koju svjetlost ulazi paralelna s izlaznom plohom.

Dvije slike predmeta, koje se pri promatranju kroz dvolomac vide, nalaze se na dijagonali romba koja raspolavlja tupi kut romba. Položi li se dvolomac jednom svojom plohom na ravnu podlogu (sl. 2) i na toj podlozi zakreće, ostat će jedna od dviju slika, i to ona u A , na miru, kako bi to bilo pri promatranju te slike kroz staklo. Druga slika A' , koja odgovara ekstraordinarnoj zraci E , okretat će se pri tom po kružnici sa središtem u A . Odatle se mora zaključiti da njezin položaj ovisi o obliku i o položaju kristala. Ona stalno ostaje u ravnini koja je na sl. 1 osjenčena, a to je ravnina u kojoj se nalazi os c romboedra (smjer K_1K_2 na sl. 1 i 2) i ordinarna zraka AB . Ona se zove glavni presjek ekstraordinarne zrake. Prema tome, ekstraordinarna zraka se otklanja u kristalu u svom glavnom presjeku, i to na stranu prema tupom ovršnom bridu K_1D romboedra.

Huygensovo tumačenje dvoloma

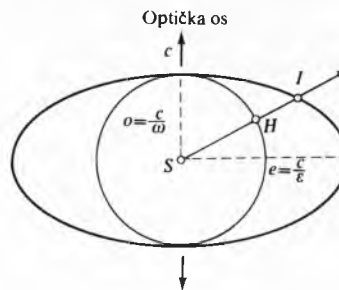
Ubrzo nakon Bartholinusovih opažanja, koja označuju početak kristalne optike uz prilično oskudne i netočne eksperimentalne podatke, C. Huygens (1629—1695) uspio je objasniti neobično ponašanje svjetlosti pri prolazu kroz kalcit. Prvi put je on o tom izvjestio 1678, a 1690. objavio u svojem djelu *Traité de la lumière*. Prema svojoj zamisli o valnoj prirodi svjetlosti, rastumačio je on zakon refleksije i loma za tijela u kojima se svjetlost širi na sve strane istom brzinom (optički izotropna tijela). Uzme li se da se u takvu tijelu, npr. u vodi, staklu itd., iz jedne točke u njegovoj nutрини počne širiti svjetlost na sve strane, proširit će se ona nakon određenoga vremenskoga razmaka do plohe kojoj su točke jednako udaljene od izvora svjetlosti. Dakle, u optički izotropnim sredstvima kugla je ploha koja prikazuje brzinu zraka ili *ploha brzina zrakā* (ili još jednostavnije *ploha zrakā*); kadšto se govori i o *valnoj plohi*. Budući da u kalcitu zbog dvoloma nastaju dvije zrake, to, osim kugle kao plohe zraka za ordinarnu zraku, mora postojati još i ploha druge vrste za ekstraordinarnu zraku. Ona ne može biti kugla druge veličine, što bi predstavljalo drugačiju, ali uvijek stalnu brzinu te zrake, bez obzira na njezin smjer. Ona bi se, naime, tada opet morala ponašati kao ordinarna zraka, odnosno lomiti se u skladu s običnim zakonom loma i ne bi smjela ovisiti o položaju kristala prema dolaznoj svjetlosti, a baš to ne vrijedi za ekstraordinarnu zraku. Huygens je zbog toga zaključio da za ekstraordinarne zrake ta ploha mora imati drugačiji oblik, zamislivši da se ekstraordinarna zraka širi kroz kalcit elipsoidnim a ne kuglastim valovima. Ploha zrakā treba da bude rotacioni elipsoid, tj. tijelo koje nastaje rotacijom elipse oko jedne od njenih osi. Kasnije je utvrđeno točnim mjerenjima da za širenje ekstraordinarne zrake ne dolazi u obzir nikakva ploha osim rotacione plohe, jer se ta zraka u svim smjerovima, jednako nagnuti prema osi c kalcita, širi jednako brzo. Prema Huygensu, splošteni je rotacioni elipsoid ploha zrakā za ekstraordinarnu zraku u kalcitu. Treba zamisliti da je on u kristalu zgradu kalcita uloženi u sasvim određenom položaju, njegova se os rotacije podudara sa smjerom osi c kalcita. U tom smjeru

je brzina njezina širenja u kalcitu najmanja; što su smjerovi njena širenja više nagnuti prema toj osi, brzina te zrake biva postepeno sve veća, kako to odgovara sve većoj duljini radijusov-vektora rotacionog elipsoida uz sve veći nagib prema njegovoj kraćoj osi rotacije. Najveću brzinu imat će ta zraka kad prolazi kroz kalcit okomito na os c kristala, odnosno okomito na kraću os elipsoida. U smjeru osi c kalcita, odnosno u smjeru osi rotacije elipsoida, brzina te zrake jednaka je brzini ordinarne zrake. Kugla kao ploha zrakā za ordinarnu zraku nalazi se, prema tome, u rotacionom elipsoidu kao plohi zrakā za ekstraordinarnu zraku; one se dotiču na krajevima osi rotacije elipsoida. Ploha koja prikazuje brzine širenja svjetlosti u kalcitu sastavljena je, dakle, od dviju luskunika onako kao na sl. 3, u kojoj su presjeci kugle osjenčeni. Općenito uzevši, kroz kalcit se u svakom smjeru šire dvije zrake. Jedna je sporija, s većim indeksom loma ω , njezina brzina ne ovisi o smjeru svjetlosti. To je ordinarna zraka. Brzina druge, ekstraordinarne zrake, ovisi o smjeru širenja, a najmanja je (jednaka brzini ordinarne zrake)



Sl. 3. Tri okomita presjeka dvoljuskaste plohe zrakā svjetlosti za optički jednoosni negativni kristal. o brzina ordinarne, e brzina ekstraordinarne zrake, ω indeks loma ordinarne, ε indeks loma ekstraordinarne zrake

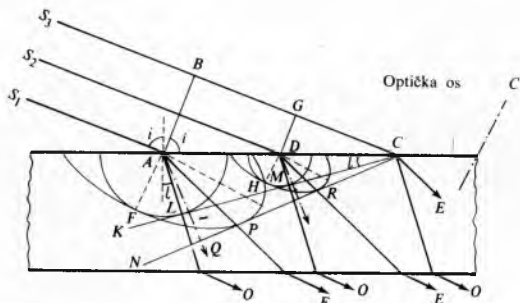
ako se svjetlost širi u smjeru osi rotacije elipsoida, odnosno u smjeru kristalne osi c . U kristalu postoji (sl. 3) samo jedan takav smjer. Pri širenju svjetlosti u tom smjeru postoji u kalcitu, zapravo, samo jedna zraka minimalne brzine o (maksimalnoga indeksa loma ω). U tom jedinom smjeru ne pojavljuje se dvolom. Taj se smjer, s obzirom na optičko ponašanje kristala, zove *optička os*, a svi takvi kristali optički jednoosni. To su kristali tetragonskoga i heksagonskoga sustava. U svakom drugom smjeru brzina ekstraordinarne zrake je veća od brzine ordinarne zrake, ali je jednaka za sve njene smjerove jednako nagnute prema optičkoj osi. Dok ordinarna zraka stigne do plohe kugle, ekstraordinarna će u istom smjeru kao brža istodobno doći dalje, sve do plohe rotacionoga elipsoida. To se vidi na sl. 4, koja predstavlja bilo koji od središnjih presjeka dvoljuskaste plohe zrakā (sl. 3) kroz optičku os. On je predstavljen kružnicom i elipsom. Dok ordinarna zraka dođe od središta S do H , ekstraordinarna će se u istom smjeru proširiti do I . Najveća brzina ekstraordinarne zrake u smjeru okomito na optičku os (sl. 3 i 4) označuje se slovom e (i njoj pripadni najmanji indeks loma sa ε). S te dvije brzine o i e određen je u potpunosti izgled dvoljuskaste plohe za optički jednoosni kristal.



Sl. 4. Središnji presjek dvoljuskaste plohe zrakā kroz optičku os

Brzina o predstavlja, naime, polumjer kugle kao plohe zrakā za ordinarnu zraku; pomoću o i e kao dvaju međusobno okomitih polumjera može se konstruirati elipsa i rotacioni elipsoid rotacijom elipse oko kraće osi. Zbog toga se brzine o i e zovu *glavne brzine kristala*, a pripadni indeksi loma ω i ε *glavni indeksi loma*.

Pomoću dvoljuskaste plohe zraká Huygens je objasnio dvostruki lom u kalcitu. Neka se od njega izbrusi i polira plan-paralelna ploča koso prema optičkoj osi (odnosno kristalnoj osi c) i neka se pusti snop paralelnih zraka S_1, S_2, S_3 da pada na nju koso u ravnini paralelnoj s optičkom osi (sl. 5). Razmatranjem ordinarne zrake, kojoj su valovi kuglasti, dobiva se smjer slomljenih zraka. Dok zamišljena zraka S_3 dođe, šireći se u uzduhu (ili što je gotovo isto u vakuumu), od B do C , zraka će S_1 , koja je pala na površinu kristala, oko A kao središta, uzbuditi elementarni val s polumjerom AF u kristalu; svjetlosni će se podražaj, dakle, prenijeti u kristalu do neke određene točke na kružnici polumjera AF . Pri tom je uzeto da je brzina svjetlosti u kristalu znatno manja; to se vidi po tome što je AF kraće od BC . Slično se razmatraju zrake S_2 i S_3 . U trenutku kad je S_2 dotakla u D površinu kristala, zraka S_3 došla je do točke G . Dok se ona uz veću brzinu proširi do točke C na površini kristala, zraka će se S_2 uz manju brzinu širiti u kristalu i uzbuditi oko D kao središta elementarni val s polumjerom DH . Uz te elementarne kuglaste valove s polumjerima AF, DH moraju se zamisliti valiči sa sve kraćim polumjerima do polumjera jednakog nuli u točki C , jer se opisana Huygensova konstrukcija mora u mislima provesti ne samo za tri zrake (S_1, S_2, S_3 na sl. 5) nego i za svaku međuzraku iz toga snopa. Zajednička ovojnica ili anvelopa vrlo brojnih, postepeno sve manjih elementarnih kuglastih valova jest nova fronta CK slomljenih ordinarnih zraka u kristalu koje idu od točaka A, D, C (i svih međutočaka) okomito na zajedničku tangentu (CK , sl. 5) kroz dirališta tih valova L, M, C (i svih dirališta između njih). Kako su u uzduhu zrake S_1, S_2, S_3 (i sve međuzrake) napredovale svojom frontom ili čelom AB brzinom c od 300000 km/s, tako će se one u kristalu, gdje je brzina ordinarne zrake c_1 manja, širiti izmijenjenim smjerovima AL, DM, \dots okomito na novu frontu CK .



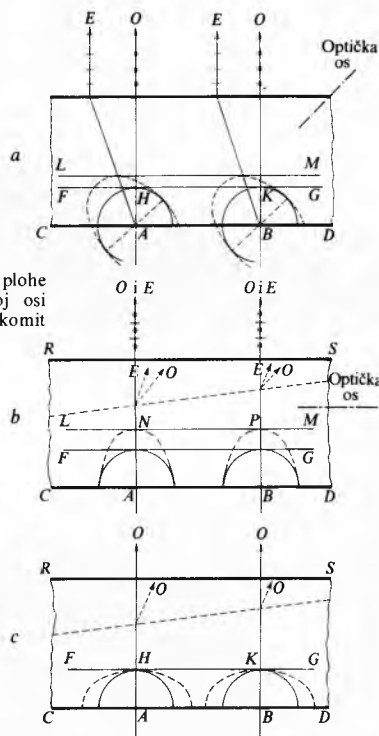
Sl. 5. Huygensov model za pojavu dvoloma u kalcitu. c optička os kristala

U isto se vrijeme, međutim, prema Huygensovoj zamisli u dvolomnom kristalu iz točaka A, D, C (i, naravno, iz svih međutočaka) šire ne samo kuglasti nego i elementarni rotaciono-elipsoidni valovi. Njihova je zajednička ovojnica CN . Kroz njezina dirališta P, R, C idu iz točaka A, D, C smjerovi AP, DR itd. ekstraordinarnih zraka koje nisu okomite na svoju frontu CN . Izašavši iz kristala ordinarne (O) i ekstraordinarne (E) zrake nastaviti će paralelno, ali odvojeno svoj put kroz uzduh.

Pomoću ove konstrukcije može se protumačiti što će se dogoditi pri prolazu svjetlosti kroz kalcit uz okomito upadanje na plan-paralelno priređene kalotine ili ploče različitog nagiba prema optičkoj osi kristala. Plohe tih ploča mogu biti kose prema optičkoj osi (sl. 6a), paralelne s njom (sl. 6b) i okomite na optičku os (sl. 6c).

Ako snop paralelnih zraka svjetlosti okomito upada na plohu ploče (točke A i B na sl. 6a), oko upadnih točaka pojavljuju se elementarni valovi ordinarnih i ekstraordinarnih zraka (kružnice i elipse). Tada se mogu konstruirati (kao na sl. 5) zajedničke ovojnice: za ordinarnu zraku FG , a za ekstraordinarnu LM . Njihova dirališta H i K za ordinarnu, a N i P za ekstraordinarnu zraku, određuju uz točke A i B smjer objiju zraka u kalcitu. Smjer je ekstraordinarne zrake u kristalu nagnut prema smjeru upadne zrake usprkos okomitom upadu svjetlosti (sl. 6a). Na gornjoj strani ploče obje zrake izlaze odvojeno, međusobno paralelno, iz kalcita okomito na gornju plohu ploče.

Ako je plan-paralelna ploča izbrušena paralelno s optičkom osi (sl. 6b), svjetlost se kroz kristal širi okomito na optičku os, i razlika brzina o i e (i pripadnih indeksa loma ω i ε) bit će maksimalna za tu tvar, ali će obje zrake nastaviti svoj put kroz kristal, pa i nakon izlaska iz kristala, istim putem. Prividno će izgledati kao da je jedna zraka. Da su to dvije zrake, najlakše se uvjeriti ako se umjesto plan-paralelne ploče načini ploča s nagnutim stranama. Uz okomiti upad svjetlosti na donjoj strani upadat će svjetlost na gornjoj strani (na sl. 6b označena crtkano) koso prema okomici na mjestu upada i nakon izlaza iz kristala pojaviti će se dvije zrake. Više će se otkloniti ordinarna zraka (O), zbog njene manje brzine, a manje ekstraordinarna (E), jer ima maksimalnu brzinu e u kristalu.



Sl. 6. Tri osnovna položaja plohe kristalne ploče prema optičkoj osi kristala: a kos, b paralelan i c okomit

Kad je plan-paralelna ploča izbrušena okomito na optičku os (os c kristala) (sl. 6c), postojat će zajednička tangenta na kružnici i elipsi. Kroz kristal će se širiti i iz njega izaći samo jedna, ordinarna zraka minimalne brzine o . Izbrusi li se gornja ploha koso prema optičkoj osi (crtkano na sl. 6c), izaći će (za razliku od primjera na sl. 6b) iz kristala samo jedna zraka. U tom jedinom smjeru nema dvoloma, jer se zrake šire paralelno s optičkom osi.

Valna normala i ploha normala. Da se razluči ponašanje ordinarnih i ekstraordinarnih zraka, odvojeno je nacrtan lom za ordinarne zrake na sl. 7, a za ekstraordinarne na sl. 8. Dovoljno je crtati samo krajnje lijeve presjeka dvoljuskaste plohe zraká. Zbog toga što je ordinarna zraka prešla put BC i AL u istom vremenu t , brzinom c u vakuumu i brzinom o u kalcitu, mogu se iz pravokutnih trokuta ABC i ALC postaviti relacije za sinuse upadnog kuta i i lomnog kuta l :

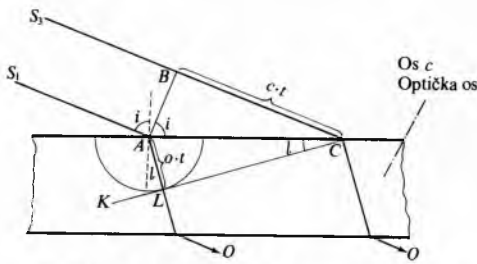
$$\sin i = \frac{ct}{AC}, \quad \sin l = \frac{ot}{AC}. \quad (1)$$

Iz njihova omjera dobiva se indeks loma

$$\omega = \frac{c}{o} = \frac{\sin i}{\sin l}. \quad (2)$$

Iz Huygensove konstrukcije neposredno slijedi zakon loma za ordinarnu zraku svjetlosti u optički izotropnim sredstvima. Za svaki kut upada i mora se kut loma l izmijeniti toliko da omjer njihovih sinusa bude stalnog iznosa i jednak indeksu loma ω ordinarne zrake (2). Iz konstrukcije se ujedno razabire

da do loma svjetlosti dolazi zbog drugačije brzine svjetlosti u sredstvu u koje svjetlost ulazi. Pri prijelazu svjetlosti iz uzduha u kalcit, za D-liniju Sunčeva spektra indeks je loma $\omega = 1,6583$.

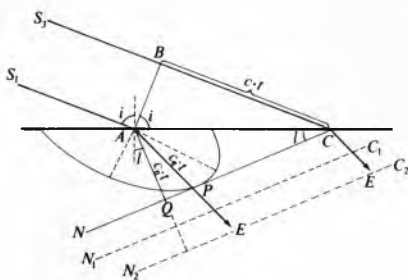


Sl. 7. Lom ordinarne zrake u dvolomnom kristalu

Za ekstraordinarnu zraku (sl. 8) ne može se postaviti sličan odnos, jer uz pravokutni trokut ABC u uzduhu ne postoji pripadni pravokutni trokut u kalcitu; slomljena zraka AP nije okomita na tangentu elipse NC u diralištu P . Za ekstraordinarnu zraku AP , nastalu lomom, i upadnu zraku S_1 ne može se, prema tomu, zakon loma izraziti u obliku omjera sinusa kuta upada i sinusa kuta loma kao za optički izotropna sredstva. Povučemo li se, međutim, iz točke A okomica AQ (sl. 5 i 8) na valnu frontu CN ekstraordinarne zrake i njezin kut s okomicom na mjestu upada A označi sa l , opet će biti

$$\frac{\sin i}{\sin l} = \frac{c}{c_n} = \epsilon'. \quad (3)$$

Prema sl. 8 može se zaključiti što znače veličine c_n i ϵ' . Snop se ekstraordinarnih zraka u kristalu proširio do ovojnice, odnosno valne fronte tih zraka CN . Šireći se brzinom c_e smjerom AP , DR , ... u kristalu, ekstraordinarne zrake dolaze u određenom trenutku do valne fronte CN . U daljem vremenskom odsječku ekstraordinarne zrake će doći, ne mijenjajući smjer u kristalu, do ovojnice, odnosno do valne fronte C_1N_1 (na sl. 8 crtkano), paralelne sa CN , pa dalje do C_2N_2 itd. Kako odmiču zrake, tako odmiču i valna fronta, odnosno ovojnica. Iz slike se vidi da c_n označuje brzinu kojom se pokreće valna fronta ekstraordinarnih zraka. Frontna normala AQ svojim smjerom, zapravo, određuje smjer u kojemu se, u obliku elipsoidnih valova, pokreće svjetlosni podražaj koji je najprije došao do CN , zatim do C_1N_1 , pa do C_2N_2 itd. Dakle, brzina c_n je brzina kojom se to kretanje širi; o njoj ovisi dokle će se u određenom trenutku proširiti područje uzbuđeno elipsoidnim valovima. Valna normala AQ , prema tome, predstavlja svojim smjerom smjer širenja valova ekstraordinarne zrake brzinom c_n koja je manja od c_e . U optički anizotropnim sredstvima smjer zraka AP , tj. smjer u kojemu se prenosi svjetlosna energija, razlikuje se općenito od smjera AQ kojim se šire valovi. Budući da je smjer širenja valova okomit na valnu frontu, brzina c_n zove se *valnonormalna brzina* (ili *brzina valnih normala*).

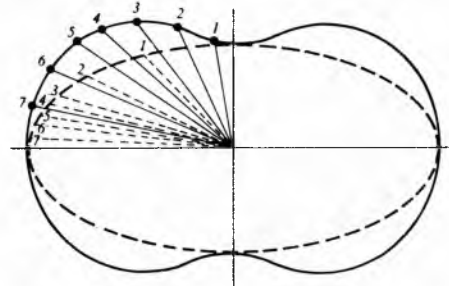


Sl. 8. Lom ekstraordinarne zrake u dvolomnom kristalu

Iz toga slijedi da se Snelliusov zakon loma za optički izotropna sredstva može primijeniti i na optički anizotropna sredstva, ako se za brzinu svjetlosti ne uzmu brzine zraka nego valnonormalne brzine. Samo se te brzine mogu na temelju Snelliusova zakona loma fizikalno mjeriti.

Postupak kojim se iz brzine zraka c_e dobije valnonormalna brzina c_n vidi se na sl. 8. Na zajedničku ovojnicu (valnu frontu) svih elipsoidnih valova, čijim je diralištima P, R , ... određen smjer ekstraordinarnih zraka AP, DR , ..., povučemo se okomica iz točke A koja presijeca valnu frontu u točki Q . Ta se točka zove *nožište*.

Ploha valnih brzina, prema spomenutom, znatno je veća značenja od brzine zraka. Ploha valnih brzina prikazuje dokle su, od neke točke u kristalu iz koje se počela širiti svjetlost, doprle valne normale. Ta se ploha zove *ploha valnonormalnih brzina* ili kraće *ploha normala*. Ona se može dobiti iz plohe zraka tako da se na tangentu bilo koje zrake konstruira pripadno joj nožište. U prostoru to znači: konstruiraju se nožišta tangencijalnih ravnina u bilo kojoj točki plohe zraka. Umjesto elipse (u prostoru: elipsoida) dobit će se na taj način pripadna nožišna krivulja, oval (ovaloid) (sl. 9). Prema mjerenjima koja je god. 1948. izvršio Bailly, molibdenit (MoS_2) je optički jednoosan poput kalcita, ali mu je razlika među glavnim indeksima loma ($\omega = 4,336, \epsilon = 2,03$, za infracrvenu svjetlost valne duljine 852 nm) veća nego u ikojeg dosad poznatoga minerala. Konstruiraju li se za točke 1 do 7 na elipsi (na sl. 9 crtkano) prema opisanom postupku njima pripadna nožišta, dobit će se oval normala. On je, dakle, nožišna krivulja elipse; njime su predložene brzine valova za ekstraordinarnu zraku u različitim smjerovima. Zakrenu li se elipsa i oval oko svojih kraćih osi, dobit će se rotacioni elipsoid kao ploha zraka za ekstraordinarnu zraku u molibdenitu i njemu pripadni ovaloid (kao nožišna ploha elipsoida) kao ploha normala. Kako se vidi iz sl. 9, ploha zrakâ i ploha normala podudaraju se samo za zrake okomite na optičku os i paralelne s njom.



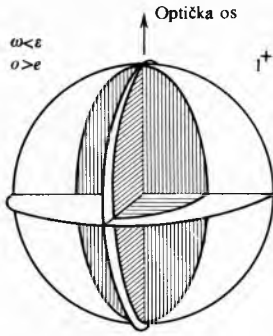
Sl. 9. Međusobni odnos plohe zrakâ i plohe valnih normala za optički jednoosni negativni kristal

Za ordinarnu zraku ploha je valnih normala ista kugla kao i za plohu zrakâ, jer je svaka kugla ujedno svoja nožišna ploha. Između smjera širenja zraka i valnih normala ordinarne zrake nema razlike, kao ni u optički izotropnim sredstvima. Poput ploha zraka i ploha normala je također dvoljuskasta ploha.

Brzine, odnosno indeksi loma, za ordinarnu i ekstraordinarnu zraku, odnosno valnu normalu jesu različite. Za kalcit je $\omega = 1,6583, \epsilon = 1,4864$ (za D-liniju). Zbog toga će obje slike koje se pri gledanju kroz kalcit opažaju izgledati izdignute (sl. 2). Slika u točki A , koja odgovara ordinarnoj zraci, bit će jače izdignuta do točke A_1 zbog većeg indeksa loma ω nego slika u točki A' , koja će zbog manjeg indeksa loma ϵ' biti nešto slabije izdignuta do tačke A_2 .

Optički pozitivni i negativni kristali. U optički jednoosnim kristalima, kao što su kalcit i molibdenit, brzina ordinarne zrake je manja od brzine ekstraordinarne zrake, razlika $o - e$ je negativna, pa se takvi kristali nazivaju optički negativnima. Postoji i drugi tip optički jednoosnih kristala u kojima je brzina ekstraordinarne zrake za različite smjerove u kristalu ne sve veća, nego, obratno, sve manja za smjerove sve više naginute prema optičkoj osi, da bi najveća razlika u brzinama (odnosno u indeksima loma) između te zrake i ordinarne zrake bila opet za smjer okomit na optičku os. U dvoljuskastoj plohi zrakâ radijus-vektori su za brzine ekstraordinarne zrake uz sve veće nagibe prema optičkoj osi sve kraći, da bi okomito na tu os poprimali najmanju vrijednost e , a indeks

loma ε najveću moguću vrijednost za istu kristaliziranu tvar. Rotacioni je elipsoid za brzine ekstraordinarnih zraka (sl. 10) u ovom primjeru izdužen i umetnut u kuglu. Za takve kristale kaže se da su optički jednoosni pozitivni.



Sl. 10. Tri okomita presjeka dvoljuskaste plohe zraka svjetlosti za optički jednoosni pozitivni kristal (oznake kao na sl. 3)

Razlika maksimalnih indeksa loma ekstraordinarne i ordinarne zrake $\varepsilon - \omega$ naziva se *maksimalni dvolom*. Indeksi loma i maksimalni dvolom za različite kristalne tvari znatno se razlikuju (tabl. 1).

Tablica 1
OSNOVNE KARAKTERISTIKE NEKIH OPTIČKI JEDNOOSNIH KRISTALA

Kristal	Indeks loma		Maksimalni dvolom $\varepsilon - \omega$	Optička karakteristika
	ordinarne zrake ω	ekstraordinarne zrake ε		
Kalomel, Hg_2Cl_2	1,973	2,656	+0,683	pozitivan
Rutil, TiO_2	2,6124	2,8993	+0,2869	pozitivan
Led, H_2O	1,30907	1,31052	+0,00145	pozitivan
Molibdenit, MoS_2	4,336	2,03	-2,306	negativan
Čilska salitra, NaNO_3	1,5874	1,3361	-0,2513	negativan
Kalcit, CaCO_3	1,6583	1,4864	-0,1719	negativan
Beril, $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$	1,577	1,572	-0,005	negativan

Polarizacija svjetlosti pri dvolomu

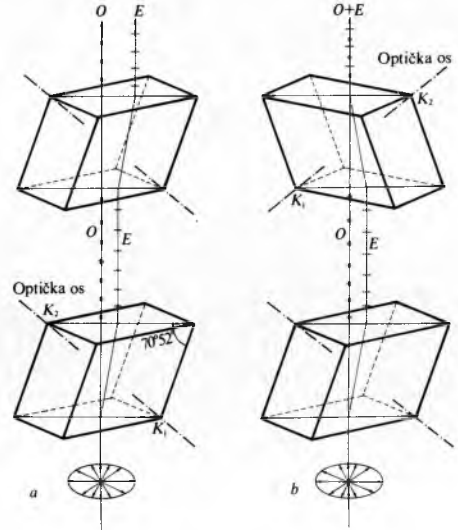
Svjetlost obiju zraka nastalih zbog dvoloma je potpuno linearno polarizirana. Na temelju zamisli o dvoljuskastoj plohi zraka Huygens je uspio objasniti odstupanje ekstraordinarne zrake u kalcitu s obzirom na Snelliusov zakon loma. On je, uz to, pri pokusima s dva komada kalcita opazio da se obje zrake, koje su zbog dvoloma izašle iz kalcita, ne ponašaju više kao obična svjetlost koja je pala na kalcit. Ako na plohu kalcitnoga romboedra (sl. 11) dolazi okomito odozdo, slično kao na sl. 2, obična svjetlost, u kalcitu će nastati od nje dvije zrake E i O . Povrh donjega romboedra u određenom razmaku stavi se paralelno namješten gornji, isto takav romboedar. Kad se kaže paralelno namješten, tad se pod tim misli da su bridovi obaju romboedara međusobno paralelni. Nijedna od dviju zraka koje su izašle iz donjega romboedra neće se u gornjem romboedru opet rastaviti u dvije zrake. Ordinarna zraka nastavit će svoj put nepromijenjeno dalje kroz gornji romboedar; ekstraordinarna će se otkloniti kao i u donjem romboedru i nastaviti put nakon izlaska iz gornjega romboedra paralelno s ordinarnom zrakom, ali udaljenija od nje nego pri izlazu iz donjega romboedra (sl. 11a).

Zakrene li se gornji kristal oko okomice na plohu na kojoj svjetlost u nj ulazi ili na plohu kroz koju svjetlost iz njega izlazi za 180° , sjedinit će se obje zrake (ako su oba romboedra jednako debela); iz gornjega romboedra će izaći samo jedna zraka (sl. 11b).

Zakrene li se gornji kristal samo za 90° , tako da su glavni presjeci obaju romboedara međusobno okomiti, tad će se ordinarna zraka iz donjeg romboedra u gornjemu ponašati kao ekstraordinarna i ekstraordinarna zraka iz donjeg romboedra u gornjemu kao ordinarna.

U svakomu između ovih položaja, dakle u svim međupoložajima kad glavni presjeci nisu paralelni niti međusobno oko-

miti, razdijelit će se svaka od dvije zrake iz donjega romboedra u gornjemu opet u dvije zrake, pa će od jedne zrake koja je ušla u donji romboedar nakon izlaska svjetlosti iz gornjega romboedra nastati četiri zrake. One su sve jednako svijetle samo uz one međusobne položaje obaju romboedara kad njihovi glavni presjeci čine kut od 45° . U svakome drugom položaju dvije su zrake svjetlije, a dvije manje svijetle, sve dok uslijed postepenoga slabljenja potpuno ne nestanu, a one svjetlije postanu najsvjetlije. To se događa kad su glavni presjeci u oba romboedra paralelni ili okomiti.



Sl. 11. Polarizacija svjetlosti pri dvolomu; a rastavljanje i b sastavljanje ordinarne O i ekstraordinarne zrake E

Takvo ponašanje svjetlosti bilo je za Huygensa sasama neočekivano i zagonetno. On za to nije mogao dati nikakva objašnjenja, jer se u ono vrijeme valovito gibanje zamišljalo isključivo kao longitudinalno. Prema Newtonu, takvo ponašanje pokazuje da zrake svjetlosti u različitim smjerovima okomitim na smjer širenja (u različitim azimutima) imaju različita svojstva, odnosno da svjetlost ima strane, kako se obično govorilo. Objašnjenje je bilo dano otprilike stoljeće i po kasnije, kad je E. L. Malus (1808) otkrio da se i pri refleksiji svjetlosti dobivaju zrake istih svojstava kao one koje izlaze iz kalcita, i kad je T. Young 1817. god. iznio misao o transverzalnemu, a ne longitudinalnom titranju u zrakama svjetlosti. Nakon toga je J. A. Fresnel u potpunosti objasnio ponašanje svjetlosti pri prolazu kroz kalcit. U zrakama obične, nepolarizirane svjetlosti, kakva dolazi na kalcit (sl. 2), titraje treba zamisliti u svim mogućim smjerovima okomitima na smjer zrake; nijedan od tih smjerova nije ni u čemu različit ili bilo čime istaknut prema drugim smjerovima. U zrakama svjetlosti izišlim iz kalcita titraji su samo u jednom pravcu, okomitom na smjer širenja svjetlosti (sl. 2, sl. 6a,b). Takva se svjetlost zove linearno polarizirana svjetlost. Kad zraka obične svjetlosti (sl. 11) uđe u kalcit, nastanu od nje dvije, u potpunosti linearno polarizirane zrake. Titraji ordinarne zrake okomiti su na glavni presjek (sl. 2, sl. 6a,b, sl. 11). Budući da je u glavnom presjeku sađržana optička os, odnosno os c kristala, može se također reći: kojim god smjerom svjetlost prolazi kroz kristal, titraji ordinarne zrake okomiti su na optičku os kristala. Titraji ekstraordinarne zrake okomiti su na titrajni smjer ordinarne zrake; oni su paralelni s glavnim presjekom kristala (sl. 2, sl. 6a,b, sl. 11). Za raznoliko usmjerene ekstraordinarne zrake u kristalu njihovim smjerovima ispunjen je sav prostor, izuzev smjerove okomite na os c . Samo ako se svjetlost širi okomito na optičku os (sl. 6b), smjerovi su titraja ekstraordinarne zrake paralelni s optičkom osi. Na sl. 2, sl. 6a,b i sl. 11 titraji su ordiniranih zraka, okomiti na ravninu crtnje, označeni točkama, a ekstraordinarnih crtama.

Kad obje zrake uđu u gornji kristal, one nastavljaju svoj put dalje, uz iste titrajne smjerove. Zakrene li se gornji kristal

za 90° iz početno paralelnog položaja prema donjem kristalu, bit će i njihovi glavni presjeci međusobno okomiti. Titrajni ordinarne zrake, okomiti na glavni presjek donjeg kristala, bit će nakon ulaza svjetlosti u gornji kristal paralelni s njegovim glavnim presjekom, tj. ordinarna zraka donjeg kristala ponašat će se i širiti u gornjemu kao ekstraordinarna. Zbog sasama istih razloga ekstraordinarna zraka donjeg kristala širit će se kroz gornji kao ordinarna; u donjem se kristalu, usprkos okomitom upadanju, ona otklonila od smjera dolazne svjetlosti, a kroz gornji će ona nastaviti svoj put dalje neizmijenjenim smjerom.

Ako se gornji kristal, međutim, zakrene prema donjemu za neki drugi kut, tad će u tom općem položaju titrajni smjerovi obiju zraka, izašlih iz donjeg kristala, biti kosi prema titrajnim smjerovima gornjega. One neće zbog toga s tim titrajnim smjerovima moći da prolaze kroz gornji kristal. Titrajni smjerovi svake od tih dviju zraka bit će u gornjem kristalu rastavljeni u dva komponentna titraja, paralelno glavnom presjeku gornjeg kristala i okomito na taj presjek, prema zakonima za rastavljanje vektora u komponente. Svaka će zraka zbog toga u gornjem kristalu biti tada rastavljena iznova u dvije zrake.

Ponašanje svjetlosti kroz dva kalcitna kristala, koje je za Huygensa izgledalo neobjašnjivo, moglo se, shvativši svjetlost kao transverzalno valovito gibanje, lako i jednostavno objasniti. Velika poteškoća u objašnjenju bila je i činjenica da ljudsko oko ne može, općenito uzevši, razlikovati običnu od polarizirane svjetlosti. Pčele to mogu svojim okom. Ljudi mogu utvrditi tu razliku samo ako upotrijebe koji pomoćni instrument, npr. turmalinsku pločicu, Nicolovu prizmu, polaroid itd. (v. *Optika*; v. *Optički instrumenti*).

Optička indikatriša

Na temelju zamisli o dvoljuskastoj plohi zrakā uspio je Huygens objasniti lom ekstraordinarne zrake u optički jednoosnim kristalima. Nakon toga je kristalnu optiku znatno unaprijedio u prvoj polovici XIX st. Fresnel, pokazavši da se pojave pri prolazu svjetlosti kroz kristale mogu objasniti i uz zamisao jednostavne, a ne dvoljuskaste plohe.

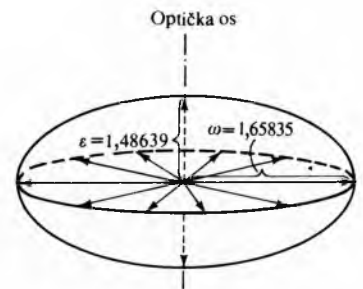
Brzine se svjetlosti u kristalima ne mjere. Umjesto toga lako se i jednostavno određuju njihove recipročne vrijednosti, indeksi loma, iz kojih se brzine lako mogu izračunati. Samo valnonormalne brzine, odnosno njima pripadni indeksi loma ekstraordinarnih zraka mogu se neposredno mjeriti. Dvije zrake, odnosno dva vala, koji nastaju zbog dvoloma, razlikuju se ne samo po svojim indeksima loma nego i po smjerovima titranja, koji su uvijek međusobno okomiti. Prikladno je radi toga zamisliti jednu plohu u čiju će geometrijsku konstrukciju biti uneseni spomenuti podaci. Ako se neka točka u dvolomnom kristalu uzme kao izvor iz kojeg se širi svjetlost na sve strane, uz sve moguće smjerove zraka i njima pripadnih valnih normala, bit će tada ostvareni i svi mogući titrajni smjerovi. Nanese li se sad u određenom mjerilu u svakom smjeru dužina koja odgovara veličini indeksa loma vala homogene svjetlosti koja u tom smjeru titra, tad će tako dobivenim krajnjim točkama biti određena prostorna ploha koja se zove *optička indikatriša*.

Za konstrukciju indikatriše optički jednoosnih kristala važi činjenica da su titrajni smjerovi raznoliko usmjerenih ordinarnih valova uvijek okomiti na optičku os. Za kalcit, npr., treba radi toga za žutu natrijevu svjetlost, okomito na optičku os, konstruirati kružnicu s polumjerom 1,65835, jednakim indeksu loma ω pri 15°C . Indeks loma ekstraordinarne zrake je najmanji ($\epsilon = 1,48639$) ako svjetlost prolazi kroz kalcit okomito na optičku os, tj. kad je titranje paralelno s optičkom osi. Zbog toga se mora na smjeru, okomitom na spomenutu kružnicu, od njezina središta nanesti razmak 1,48639 (sl. 12). Za ekstraordinarne zrake bit će, približuju li se one svojim smjerom sve više optičkoj osi, njihovi titrajni smjerovi sve udaljeniji od optičke osi. Na te titrajne smjerove trebat će, uz postepeno sve veći njihov nagib prema optičkoj osi, nanositi sve veće vrijednosti indeksa loma, počevši od 1,48639 pa do 1,65835. Tako će se dobiti splošteni rotacioni elipsoid

(sl. 12), u čijem će se kružnom presjeku nalaziti titrajni smjerovi svih mogućih ordinarnih zraka, a sav će ostali prostor elipsoida biti ispunjen titrajnim smjerovima ekstraordinarnih zraka.

Indikatriša, ta jednoljuskasta ploha, daje iscrpniji podatak o pojavama pri prolazu svjetlosti kroz neki optički jednoosni kristal nego što ga daje dvoljuskasta ploha zrakā. U tu svrhu mora se zamisliti središnji presjek indikatriše okomito na smjer dolazne, odnosno iz kristalnog presjeka izašle svjetlosti. Taj je presjek, općenito uzevši, elipsa; samo ako se svjetlost širi u smjeru optičke osi, prolazit će ona kroz kristal okomito na kružni presjek indikatriše. Ako je dolazna svjetlost okomita na bilo koji eliptički presjek, tad slijedi nekoliko činjenica. Taj kristalni presjek je dvoloman. Titrajni su smjerovi obiju zbog dvoloma nastalih zraka predočeni smjerovima međusobno okomitih polumjera eliptičkoga presjeka. Za onu od obje zrake koja, šireći se okomito na taj presjek, titra paralelno s kraćim polumjerom elipse indeks loma je manji. Ona prolazi kroz presjek većom brzinom od druge zrake koja, uz isti smjer širenja, titra paralelno s dužim polumjerom elipse, te ima veći indeks loma, odnosno manju brzinu pri prolazu kroz kristal.

Ako svjetlost prolazi okomito na optičku os indikatriše, bit će eliptičnost presjeka najveća: okomito na optičku os, tj. u kružnom presjeku indikatriše titrat će tada ordinarna zraka maksimalnog indeksa loma ω (za kalcit 1,65835), a paralelno s optičkom osi ekstraordinarna zraka s minimalnom vrijednosti ϵ svojega indeksa loma (za kalcit 1,48639); to je u potpunom skladu s onim što vrijedi za dvoljuskastu plohu zrakā.



Sl. 12. Rotacioni elipsoid sa smjerovima titraja ordinarnih i ekstraordinarnih valova za optički negativne jednoosne kristale

Kad svjetlost prolazi u smjeru optičke osi, tj. okomito na kružni presjek indikatriše, u kojemu su svi polumjeri jednaki, neće se pojaviti dvolom. Tada nastaje samo jedna zraka maksimalnog indeksa loma; svjetlost će proći kroz taj kristalni presjek u onom titrajnom stanju u kojemu je to njega došla. Na taj se način u kristalnom presjeku neće izmijeniti svojstva svjetlosti.

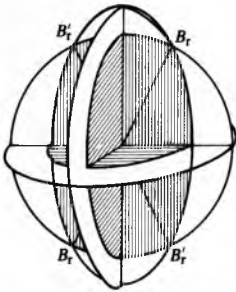
S obzirom na indikatrišu optički jednoosnih pozitivnih kristala može se ponoviti sve spomenuto. Njihova indikatriša konstruira se jednako kao i za kalcit; ona će tada biti izduljeni rotacioni elipsoid.

Indikatriša optički izotropnih tvari. U optički izotropnim (jednolomnim) tvarima, kao što su voda, staklo, natrij-klorid, fluorit itd., ne opaža se dvolom. Za svaki središnji presjek indikatriše mora se, prema tome, uzeti da je to krug istoga polumjera. Tijelo takvih presjeka je kugla. Istim polumjerom kugle, bez obzira na smjer, označen je jednaki indeks loma za sve moguće titrajne homogene svjetlosti, tj. i za sve njima pripadne raznoliko usmjerene valove (zrake) u takvim tvarima. Za optičku karakteristiku je uz određenu temperaturu i tlak dosta navesti samo jedan indeks loma za svjetlost određene valne duljine. U njima pri lomu svjetlosti nastaje od upadne zrake samo jedna slomljena zraka. S obzirom na to da im je brzina širenja svjetlosti ista za svaki smjer, nazivaju se također optički izotropnim tvarima. Između smjera zraka i smjera valnih normala nema tada nikakve razlike.

Optički dvoosni kristali

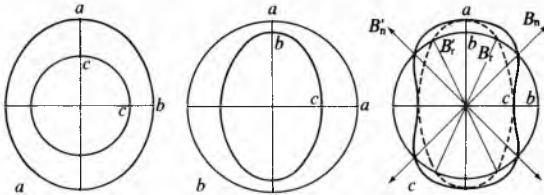
Osim dvolomnih jednoosnih kristala postoje i dvoosni kristali. U njima postoje dvije optičke osi, tj. dva smjera bez dvoloma. Nijedna od obiju zraka koje nastaju dvolomom ne

ponaša se više kao ordinarna. Svaka od njih otklanja se, i uz okomito upadanje svjetlosti, u kristalu od okomice na mjestu upada. Taj otklon može biti različit: na istu stranu od okomice ili na različite strane od nje. Ni za jednu od tih dviju zraka nije brzina u svim smjerovima jednaka. Takve kristale otkrio je J. B. Biot (1812) ispitujući tinjce i neovisno o njemu D. Brewster (1813) na topzue. Zakone za širenje svjetlosti u takvim kristalima postavio je Fresnel nakon svoje zamisli o zamjeni dvoljuskastih ploha u optički jednoosnim kristalima jednostavnijim jednoljuskastim rotacionim ploham. On je, uzevši u obzir da su u optički izotropnim (jednolomnim) tvarima te plohe kugle, preko rotacionih elipsoida jednoosnih kristala, zaključio da bi za optički dvoosne kristale to trebao biti troosni elipsoid. Iz takva elipsoida izveo je on dvoljuskastu plohu zrakâ za optički dvoosne kristale. Ta je ploha tako komplicirana da se njezin oblik posve eksperimentalno (određivanjem brzina, odnosno indeksa loma za raznosmjernu svjetlost u kristalima) vjerojatno ne bi mogao onako brzo odrediti kako je to Fresnel intuitivno pretpostavio. Pitanje je da li bi se njezin oblik uopće mogao odrediti eksperimentalno.



Sl. 13. Tri međusobno okomita presjeka dvoljuskaste plohe zrakâ za optički dvoosne kristale

Tri međusobno okomita presjeka dvoljuskaste plohe zvide se na sl. 13; oni su posebno prikazani i na sl. 14. Sa a (ili c_x), c (ili c_z) i b (ili c_y) označena je najveća, najmanja i međuvrijednosna brzina zrakâ svjetlosti u tri međusobno okomita smjera pravokutnoga, prostornoga koordinatnog sustava x, y, z . One su glavne brzine svjetlosti, a njima pripadni indeksi loma N_x (najmanji), N_y (međuvrijednosni) i N_z (najveći) glavni indeksi loma; često se za njih uzimaju redom oznake α, β i γ .



Sl. 14. Tri izdvojena presjeka dvoljuskaste plohe zrakâ iz sl. 13

Za dalja razmatranja osobito je važan presjek na sl. 14c. U tom presjeku šire se kroz kristal dvije zrake: jedna kojoj se brzina mijenja prema zakonu elipse između a i c (prikazana crtkano) i druga kojoj je brzina za svaki smjer u tom presjeku ista i jednaka b ; njezino je širenje zbog toga predočeno kružnicom polumjera b . Očito je da se kružnica i elipsa moraju sjeći u četiri točke koje određuju ona dva smjera B_r i B_r' u kristalu u kojima se obje zrake, nastale zbog dvoloma, šire jednakom brzinom b . Ta se dva smjera zovu *biradijale* ili *sekundarne optičke osi*.

Konstruirana li se za elipsu njoj pripadna nožišna krivulja, dobit će se oval (izvučen punom linijom na sl. 14c). Njegovi presjeci s kružnicom određuju ona dva smjera B_n i B_n' u kojima je brzina za obje valne normale ista. Ta se dva smjera zovu *binormale* ili *primarne optičke osi* ili, kratko, optičke osi. Opažaju se kad se kristalni presjeci promatraju konoskopski u polarizacionom mikroskopu i veličina njihova kuta može se točno izmjeriti. Taj kut nije isti kao kut među biradijalama, ali se obično od njega vrlo malo razlikuje, jer se i tri glavna indeksa loma, odnosno pripadne im glavne brzine svjetlosti,

u kristalu najčešće vrlo malo među sobom razlikuju. Prema tome da li oštri kut optičkih osi, koji se označuje sa $2V$, raspolavlja glavni titrajni smjer zraka najmanjega ili najvećega indeksa loma, optički dvoosni kristali mogu biti optički negativni i optički pozitivni kristali. To su kristali rompskoga, monoklinskoga i triklinskoga sustava.

LIT.: E. Mach, Die Prinzipien der physikalischen Optik. Historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt. Verlag J. A. Barth, Leipzig 1921. — H. Rosenbusch, Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien; Band I, erste Hälfte: Untersuchungsmethoden, 5., völlig umgestaltete Aufl. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Erwin Nagele) GmbH, Stuttgart 1921/24. — H. Bouasse, Optique cristalline: Double réfraction. Librairie Delagrave, Paris 1925. — H. Bouasse, Optique cristalline: Polarisation rotatoire. États mesomorphes. Librairie Delagrave, Paris 1925. — G. Szivessy, Kristaloptik — Handbuch der Physik, herausgegeben von H. Geiger und K. Scheel, Bd. 20: Licht als Wellenbewegung. Redigiert von H. Kronen. Verlag J. Springer, Berlin 1928. — M. Born, Optik. Verlag J. Springer, Berlin 1933. — E. Buchwald, Einführung in die Kristaloptik. Sammlung Göschen, Bd. 619, Berlin 1952. — W. H. Bragg, U svetu svetlosti (prijevod). Novo pokolenje, Beograd 1952. — D. S. Beljankin, W. P. Petrov, Kristaloptik. VEB Verlag Technik, Berlin 1954. — A. V. Шубников, Основы оптической кристаллографии. Издат. Академии Наук СССР, Москва 1958. — Lj. Barić, M. Tajder, Mikrofiziolija petrogenih minerala. Školska knjiga, Zagreb 1967. — Lj. Barić, O nagibu ordinarnih i ekstraordinarnih zrakâ u raznoliko orijentiranim presjecima optički jednoosnih kristala. Geološki vjesnik 24/1970, Zagreb 1971.

Lj. Barić

KRISTALOGRAFIJA, znanost koja proučava kristale i kristalno stanje uopće, istražujući vanjski geometrijski oblik kristala (*morfologija*), prostorni periodički raspored čestica — atoma, iona, molekula — od kojih je kristal izgrađen (*kristalna struktura*), te fizička svojstva kristala (*kristalofizika*). Osim toga, kristalografija proučava rast kristala, defekte u realnim kristalima, površinska svojstva, tekuće kristale i dr. Kako je većina čvrstih tijela kristalne građe, kristalografija je usko povezana s nizom drugih znanstvenih oblasti, što je shematski prikazano na sl. 1. Veza s matematikom ima jednostran karakter. Kristalografija mnogo uzima od matematike, ali bitno ne utječe na njen razvoj. Dvostrana veza postoji s metalurgijom, mineralogijom i petrologijom, fizičkom kemijom, biologijom. Međutim, tim oblastima kristalografija daje više nego što od njih prima. Osobito tijesan i uzajamni odnos postoji između kristalografije i fizike kondenzirane tvari (tj. fizike čvrstog stanja) i kristalokemije.



Sl. 1. Kristalografija i njen odnos prema drugim granama znanosti i tehnike

Budući da su pojedini dijelovi kristalografije djelomično prikazani u drugim člancima (v. Čvrsto stanje TE 3, str. 128; Elektronski mikroskop TE 5, str. 6; Kristalizacija; Kristalna optika; Mineralogija), ovaj članak u prvom redu govori o principima simetrije i istraživanju kristalnih struktura i mikrostrukturnih parametara metodama difrakcije rendgenskih zrakâ.