



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek
Mineraloško-petrografski zavod



OPTIČKA SVOJSTVA MINERALA

Mineralogija (ZOK)

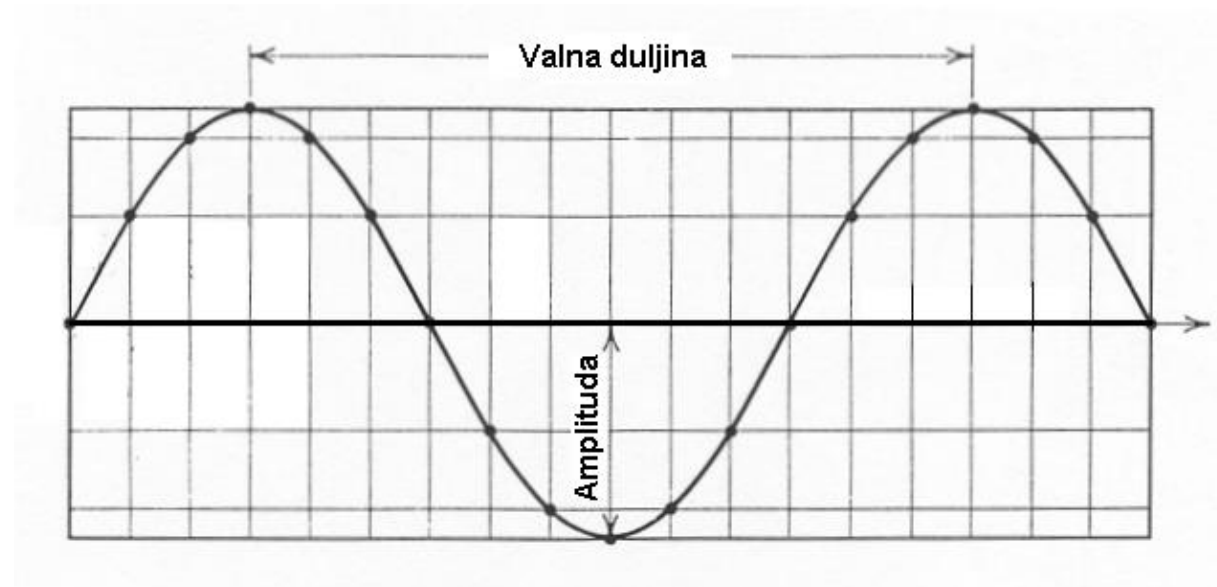
Prof. dr. sc. Nenad Tomašić

Sadržaj

- priroda svjetlosti
- podjela minerala prema optičkim svojstvima
- optički izotropni i anizotropni materijali
- dvolom
- indikatrisa
- jednoosni i dvoosni anizotropni materijali
- pozitivni i negativni
- reljef, boja, interferencijske boje, potamnjenje
- konoskopska opažanja

Priroda svjetlosti

- valno-čestični (korpuskularni) karakter
- za optička svojstva minerala bitan je valni karakter
- svjetlost se širi pravolinijski, vibrirajući okomito na smjer širenja (transverzalni val)
- transverzalne vibracije kod svjetlosti događaju se u svim smjerovima okomito na smjer širenja



Svojstva vala:

valna duljina (λ) = udaljenost između dva dola ili brijega (350-750 nm)

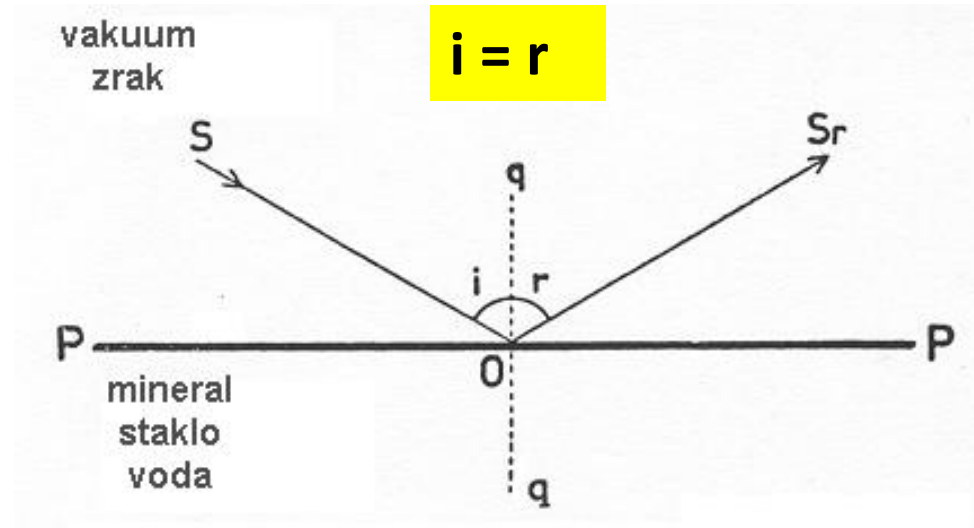
amplituda = maksimalna udaljenost (elongacija) od ravnotežnog položaja

frekvencija (ν) = broj valova koji u sekundi prolazi kroz promatranu točku

brzina (c) = $\lambda \nu$ (300 000 km/s u vakuumu)

Refleksija i lom svjetlosti

REFLEKSIJA

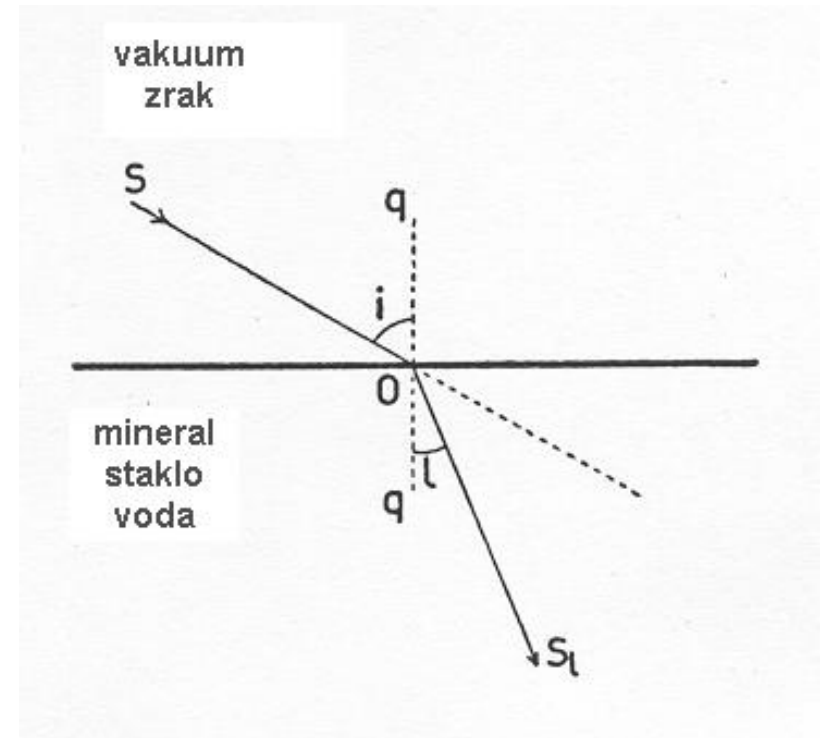


Zakon refleksije:

1. kut upadne zrake jednak kutu reflektirane zrake
2. upadna i reflektirana zraka nalaze se u istoj ravnini

LOM (REFRAKCIJA)

- pri prelasku iz jednog u drugo sredstvo mijenja se brzina svjetlosti, te zraka više ne slijedi pravac upadne svjetlosti, već se lomi



1. iz rjeđeg u gušće sredstvo ($c_1 > c_2$) zraka se lomi k okomici na ravninu upada
2. iz gušćeg u rjeđe sredstvo ($c_1 < c_2$) zraka se lomi od okomice na ravninu upada

Indeks loma

- brzina svjetlosti različita je u različitim materijalima, pa se i svjetlost u njima različito lomi (različiti kutovi)

manja brzina = optički gušće sredstvo

veća brzina = optički rjeđe sredstvo

- to svojstvo materijala naziva se **indeks loma (n)**

$$n = c_{\text{zrak}} / c_{\text{materijal}}$$

APSOLUTNI INDEKS LOMA

Snell-ov zakon: $n = \sin i / \sin r$

- apsolutni indeks loma = svjetlost prelazi iz vakuuma (ili zraka) u promatrano sredstvo
- relativni indeks loma = svjetlost prelazi između iz jednog sredstva u drugo, a niti jedno nije vakuum ili zrak

$$\sin i / \sin r = n_2 / n_1 = n_{\text{rel}}$$

PODJELA KRISTALA PREMA OPTIČKIM SVOJSTVIMA

Mogu biti:

1. optički **izotropni** = svjetlost se u njima u svim smjerovima širi jednakom brzinom, te imaju jedan indeks loma
(plinovi, tekućine, kubični materijali)
2. optički **anizotropni** = brzina ovisi o smjeru širenja, te takvi kristali imaju više indeksa loma (svi kristali osim kubičnih)

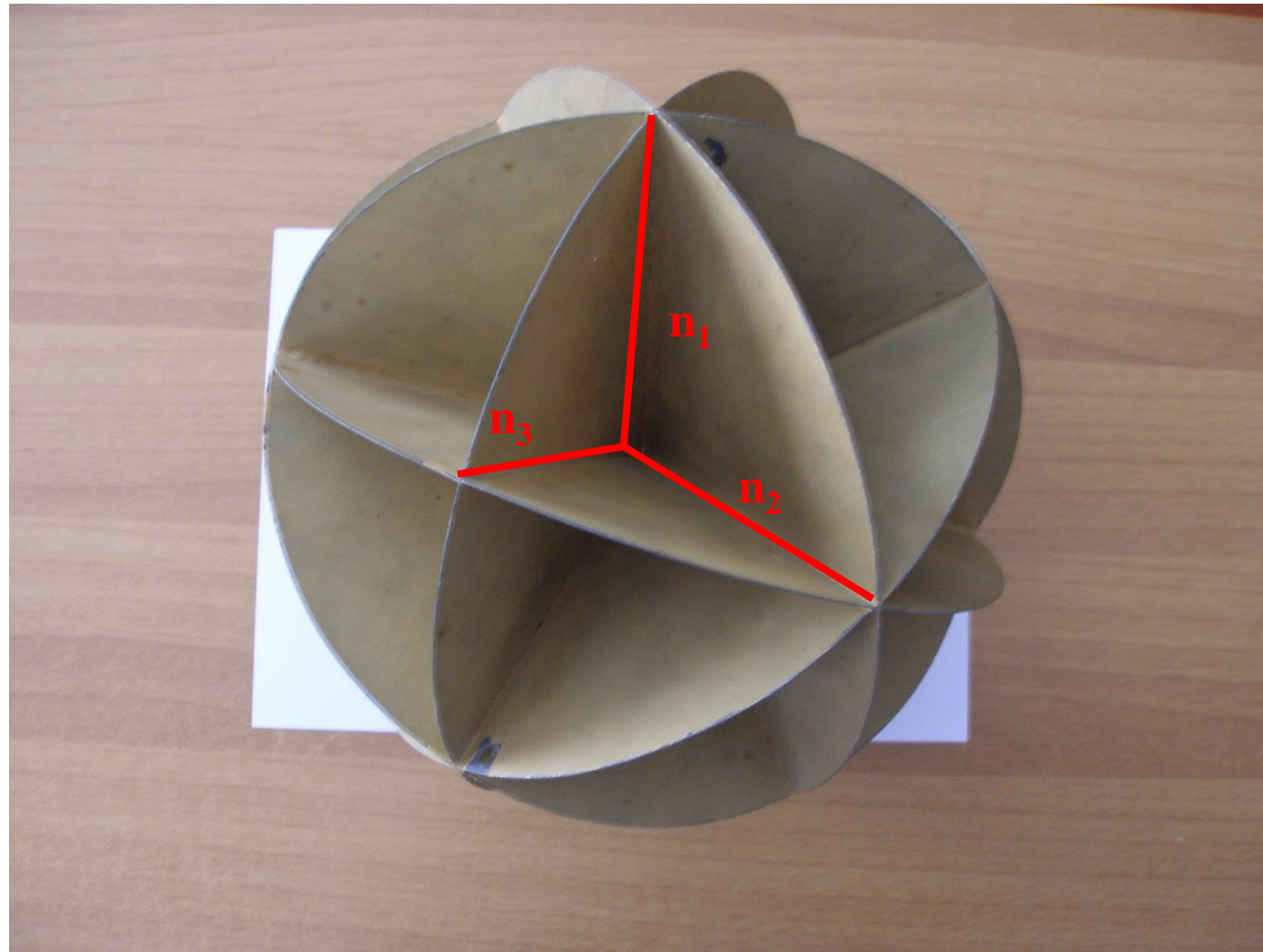
- pri ulasku svjetlosti u anizotropni materijal, svjetlost se lomi na dvije polarizirane zrake koje titraju u međusobno okomitim titrajnim ravninama = ta pojava se naziva **DVOLOM**
- postoje dvije vrste anizotropnih kristala:
 1. **jednoosni** – imaju jedan smjer duž kojih nema dvoloma (jedna optička os)- to su tetragonski i heksagonski kristali
 2. **dvoosni** – imaju dva smjera duž kojih nema dvoloma (dvije optičke osi) – to su triklinski, monoklinski i rompski kristali

OPTIČKA INDIKATRISA

- geometrijsko tijelo iz čijeg se središta u svim smjerovima nanosi pripadajuća vrijednost indeksa loma
- koristimo je da bismo si lakše predočili odnos između indeksa loma i pripadajućih titrajnih smjerova zraka svjetlosti
- to nam pomaže u razumijevanju optičkih svojstava minerala

IZOTROPNI MATERIJALI

- plinovi, tekućine, materijali koji kristaliziraju u kubičnom sustavu
- svjetlost se širi u svim smjerovima istom brzinom, pa je i indeks loma isti za sve smjerove → ti materijali imaju jedan indeks loma
- optička indikatrisa = kugla
- sve zrake titraju u kružnom presjeku



$$n_1 = n_2 = n_3 = \dots n_m$$

ANIZOTROPNI MATERIJALI

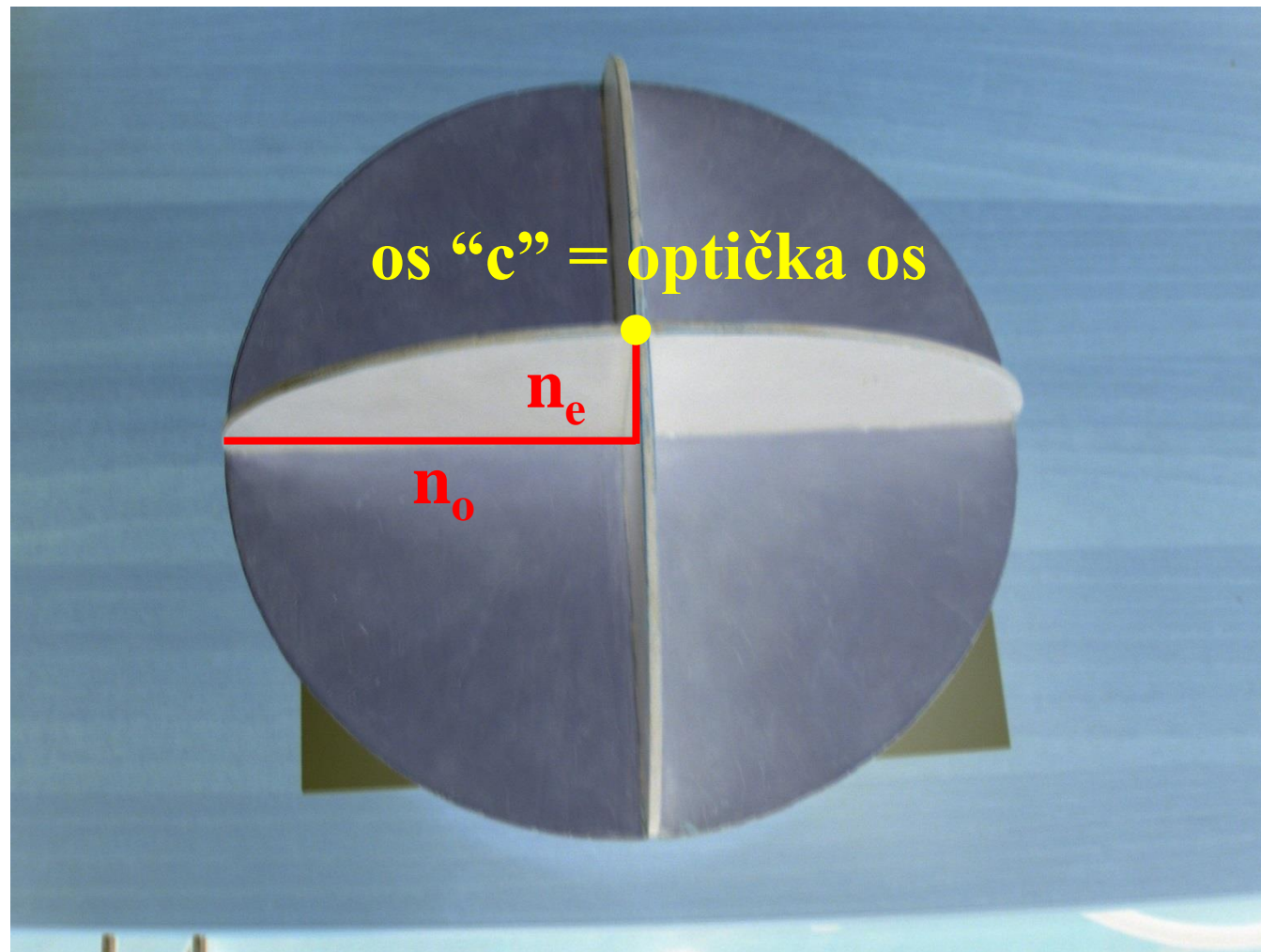
1. OPTIČKI JEDNOOSNI

- materijali koji kristaliziraju u tetragonskom i heksagonskom sustavu
- svjetlost se pri upadu u takve materijale dijeli na dvije zrake:
 1. ORDINARNU
 2. EKSTRAORDINARNU
- tu pojavu nazivamo **DVOLOM**
- dvoloma nema samo u slučaju kada svjetlost upada u mineral duž kristalografske osi c

- taj smjer duž osi c se naziva OPTIČKA OS
- kako postoji samo jedna optička os, takvi materijali se nazivaju *jednoosnima*
- ako svjetlost upada duž bilo kojeg drugog smjera, doći će do dvoloma
- optička indikatrisa jednoosnih materijala je ROTACIJSKI ELIPSOID, a os c (optička os) je njegova os rotacije

Kako titraju ordinarna i ekstraordinarna zraka?

1. ORDINARNA – titra u kružnom presjeku rotacijskog elipsoida (\perp o.o.), te se uvijek širi istom brzinom
2. EKSTRAORDINARNA – titra okomito na ordinarnu, te u glavnom presjeku indikatriše (sadrži opt. os), a brzina joj ovisi o smjeru upadne zrake



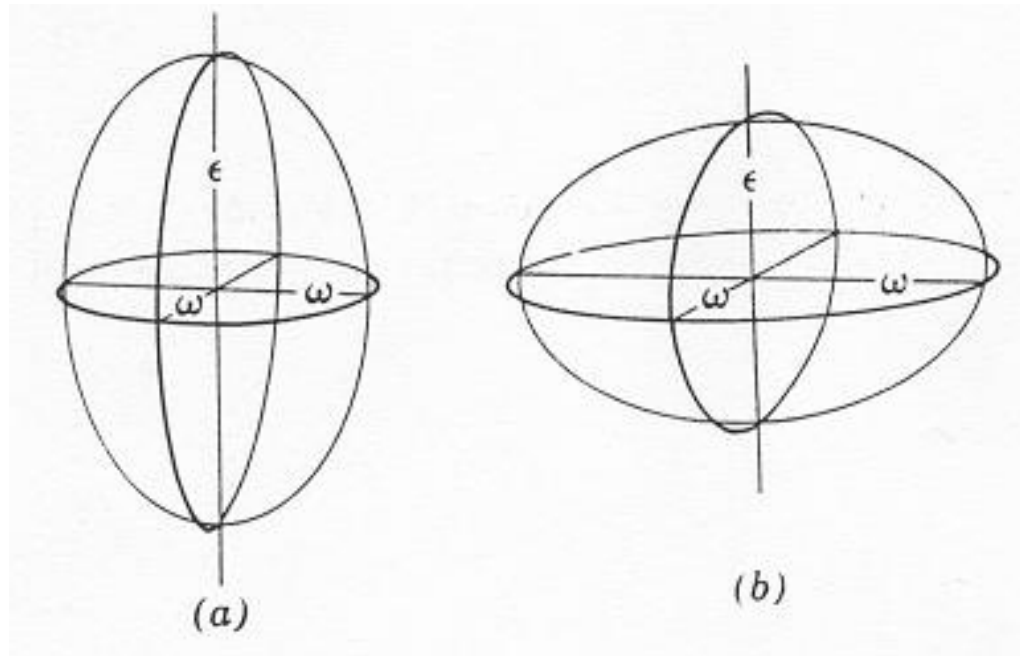
Optički jednoosni materijali se dijele na:

a) Pozitivne: $v_o > v_e$ tj. $n_o < n_e$

indikatriza: izduženi rotacijski elipsoid

b) Negativne: $v_o < v_e$ tj. $n_o > n_e$

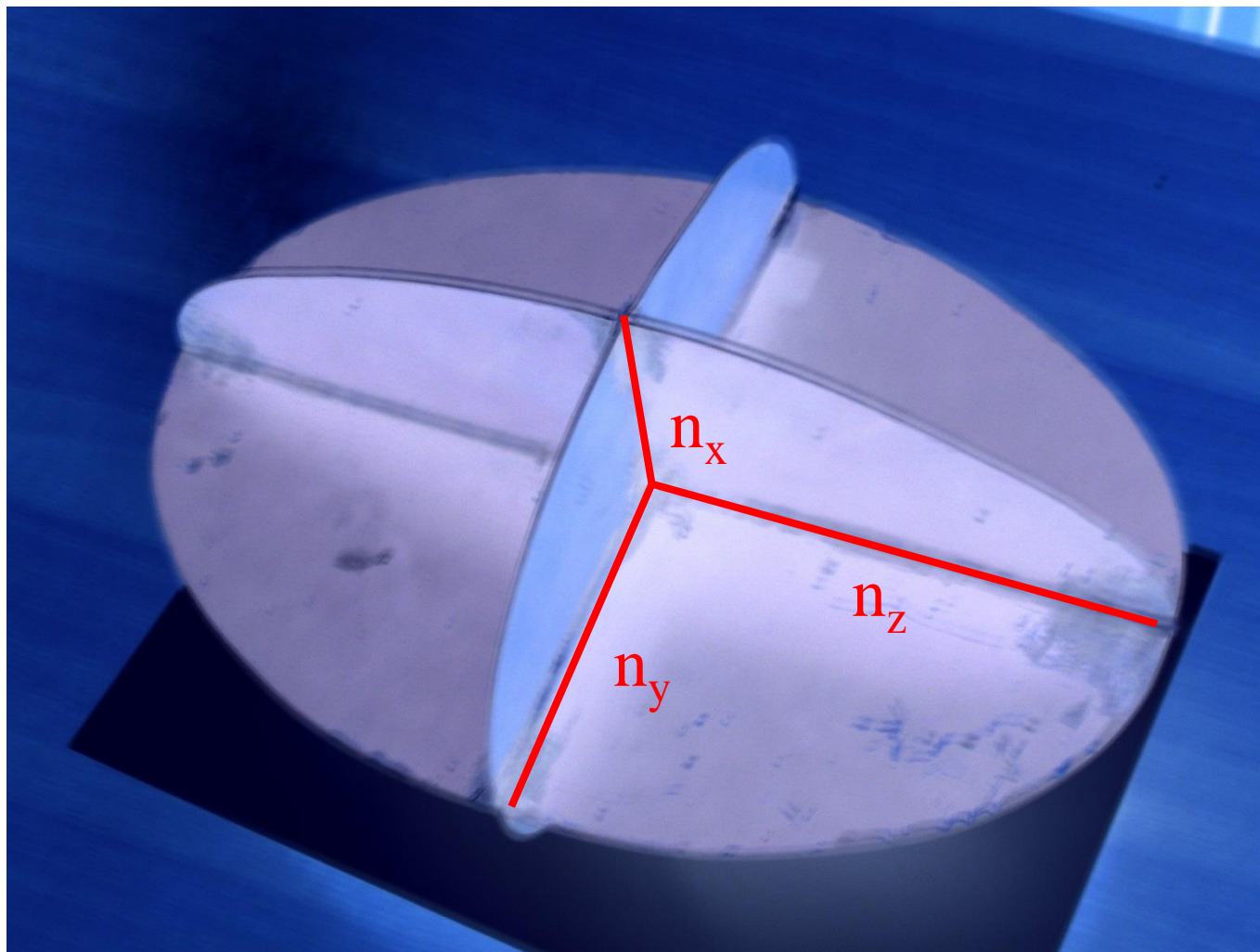
indikatriza: spljošteni rotacijski elipsoid



2. OPTIČKI DVOOSNI MATERIJALI

- materijali koji kristaliziraju u triklinskom, monoklinskom i rompskom sustavu
- pri ulasku u takve minerale, svjetlost se dijeli na dvije zrake, koje titraju u međusobno okomitim ravninama, a brzina im se mijenja ovisno o smjeru upadne zrake
- dvoloma nema samo duž smjera optičkih osi (2. optičke osi = dvoosni materijali)

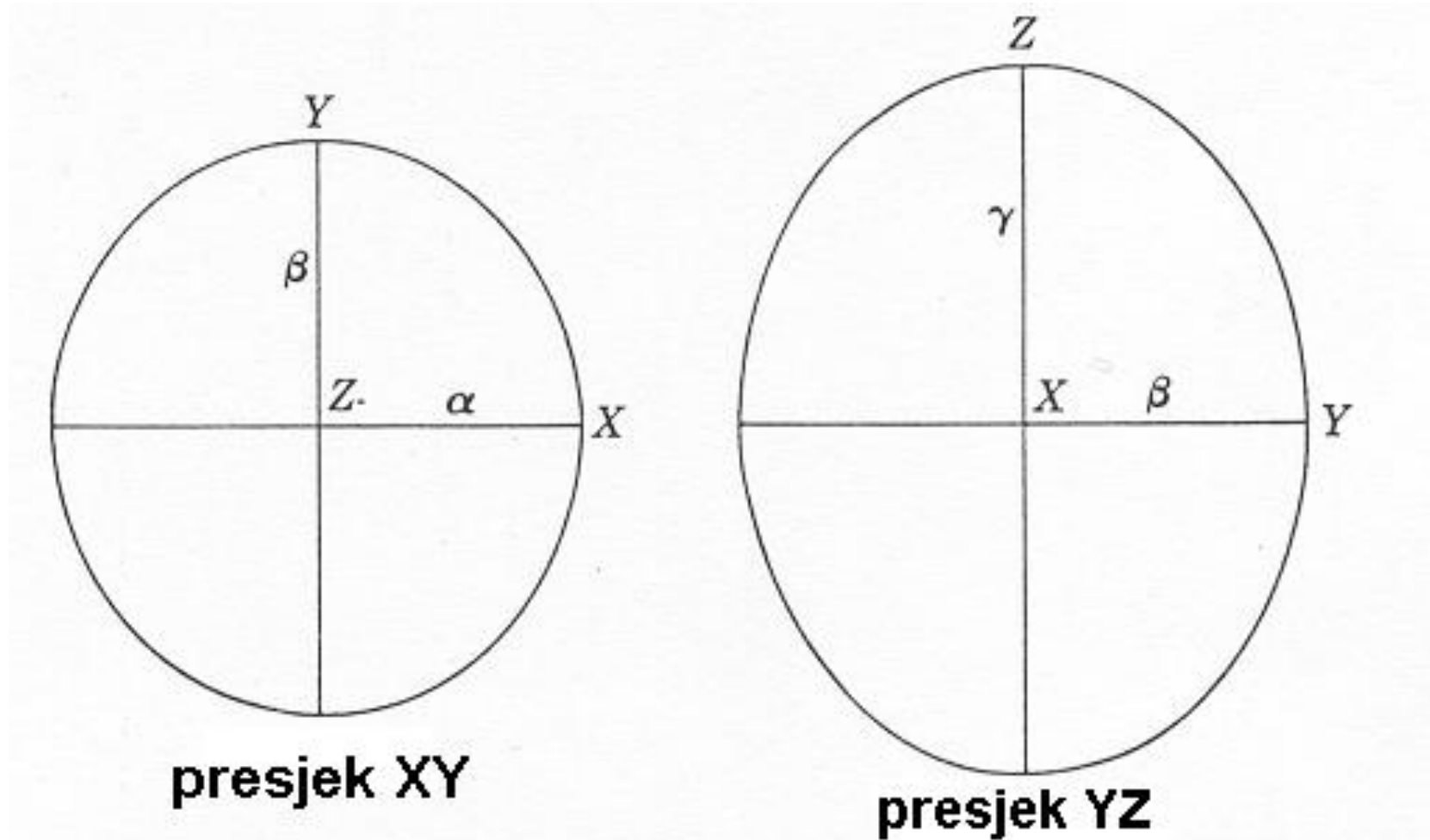
- postoje tri glavna titrajna smjera/pravca (X, Y, Z), koji definiraju optičku indikatrixu dvoosnih materijala = TROOSNI ELIPSOID
- titrajni smjerovi se razlikuju po veličini indeksa loma:
 n_z = najveći indeks loma
 n_x = najmanji indeks loma
 n_y = indeks loma ima vrijednost između n_x i n_z

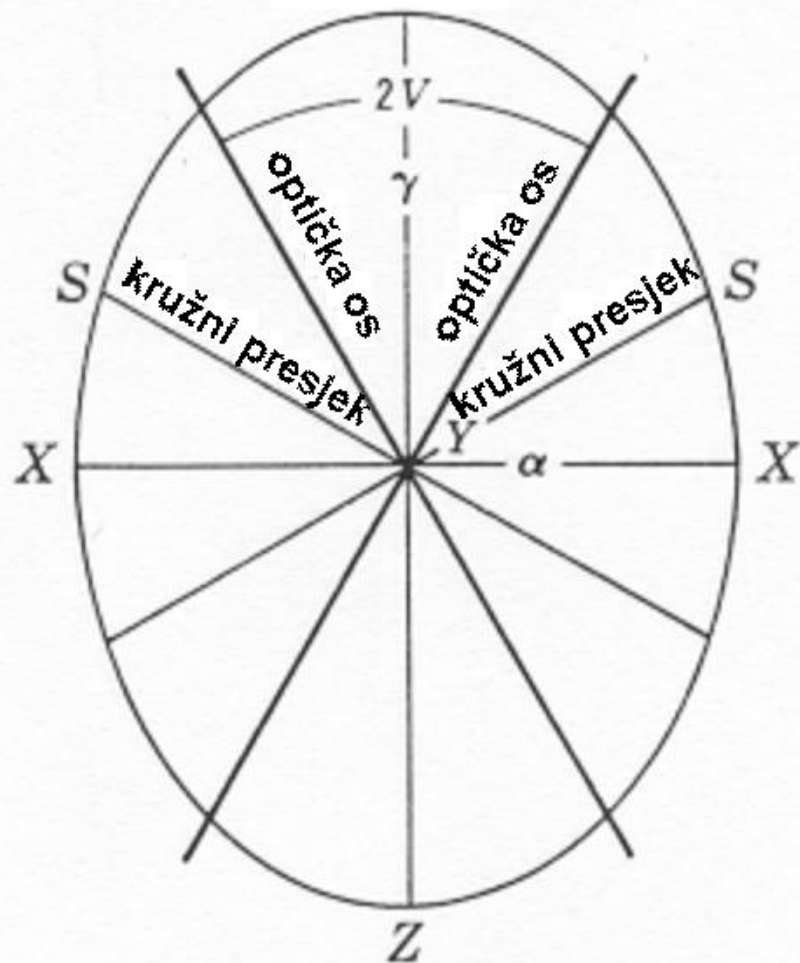


$$\mathbf{n}_z > \mathbf{n}_y > \mathbf{n}_x$$

- titrajni smjerovi X , Y i Z definiraju tri glavna presjeka optičke indikatriše:

XY , YZ i XZ





- u presjeku XZ nalaze se optičke osi
- optičke osi su okomite na kružne presjeke, čiji radijus iznosi n_y
- okomito na presjek XZ nalazi se smjer Y , koji se naziva i **OPTIČKA NORMALA**

- kut između optičkih osi označava se kao $2V$, te je karakteristika svakog dvoosnog materijala

Dvoosni materijali se dijele na:

1. POZITIVNE = smjer Z je oštra raspolovnica kuta $2V$
2. NEGATIVNE = smjer X je oštra raspolovnica kuta $2V$

Kakav je odnos glavnih titrajnih smjerova X, Y i Z prema kristalografskim osima?

1. ROMPSKI SUSTAV – svaki titrajni smjer se podudara s nekom od kristalografskih osi
2. MONOKLINSKI SUSTAV – jedan titrajni smjer se podudara s osi b
3. TRIKLINSKI SUSTAV – nema podudaranja titrajnih smjerova s kristalografskim osima

Polarizacija svjetlosti

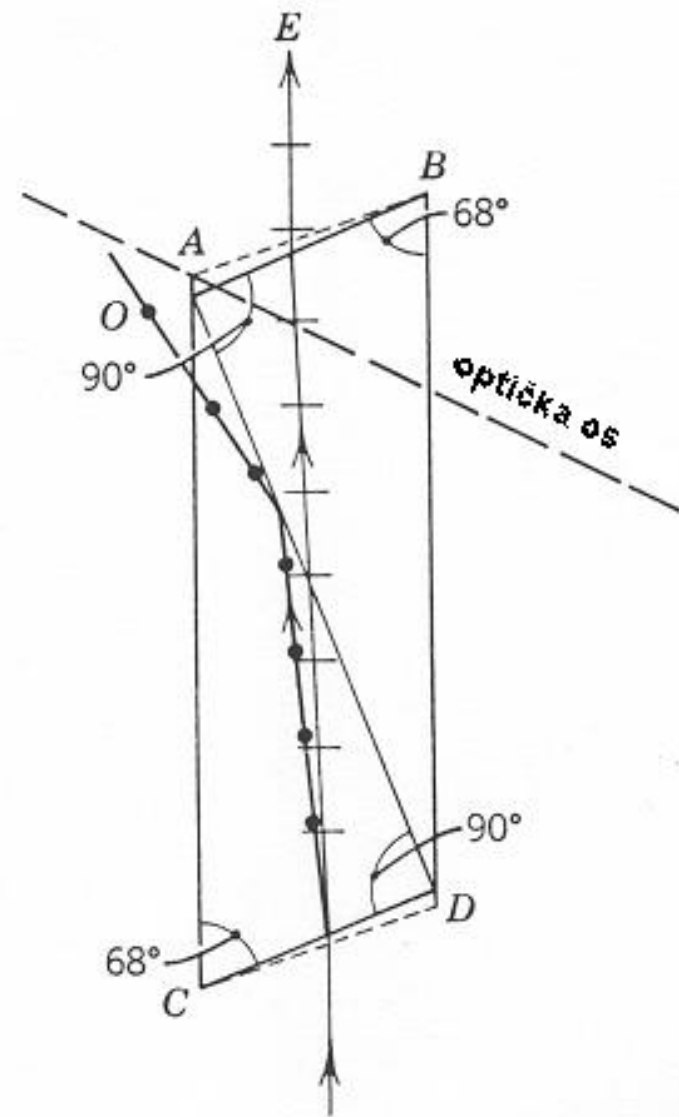
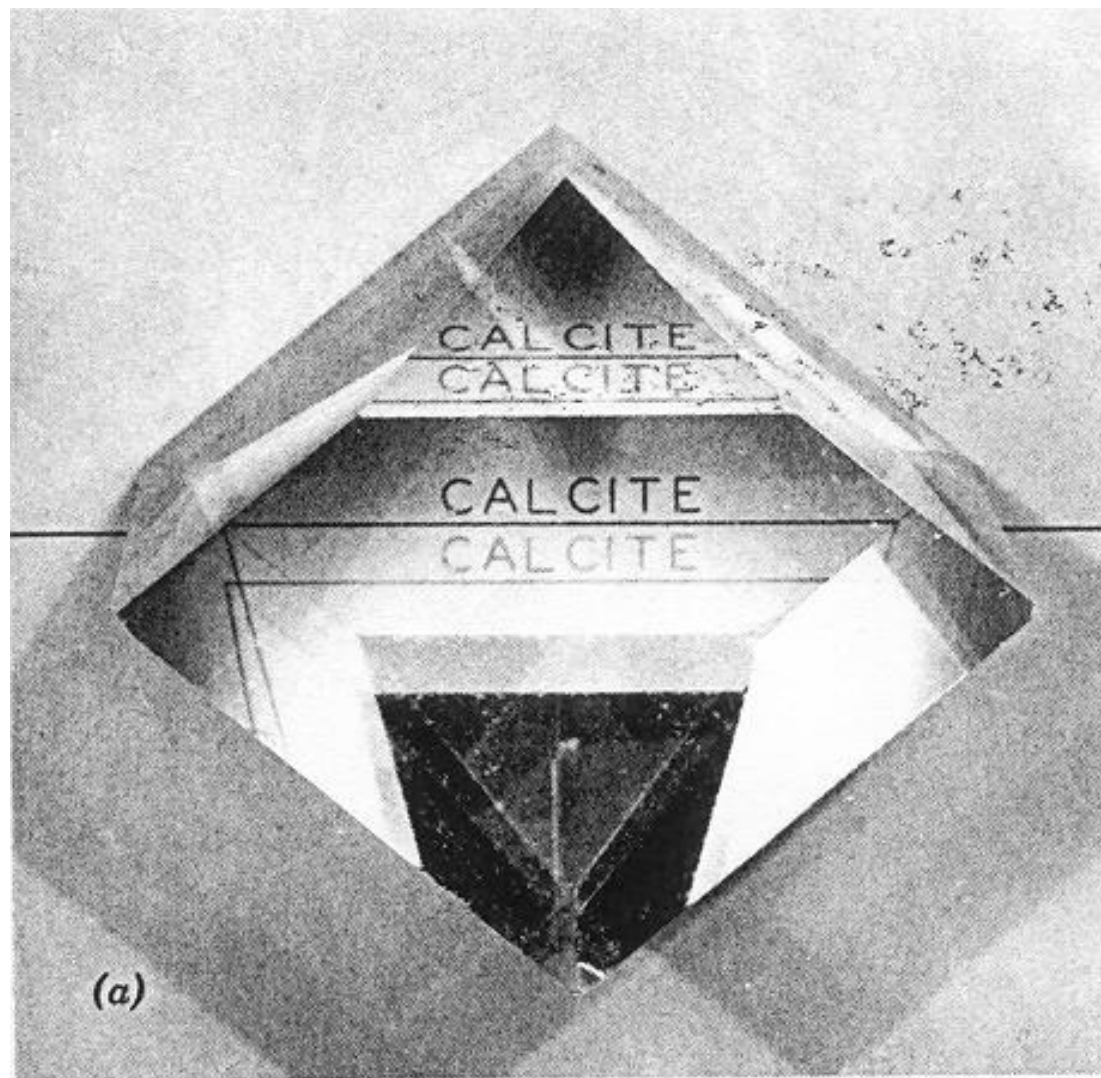
- valovi svjetlosti se šire s transverzalnim titrajima u svim smjerovima okomito na smjer širenja svjetlosti
- ako se titraji svjetlosti ograniče tako da titraju samo u jednoj ravnini, govorimo o linearno polariziranom svjetlu

Kako polarizirati svjetlost?

1. Dvostruki lom = dvolom

Nicol-ova prizma (William Nicol)

- proziran kristal kalcita (romboedrijski habitus) prerezan je pod određenim kutom, te su ta dva komada ponovno spojena kanadskim balzomom (smola, $n = 1,54$), a krajnje plohe su izbrušene tako da su pod pravim kutom u odnosu na spojnu plohu između dva komada kalcita
- svjetlo pri ulasku u Nicolovu prizmu se dijeli na dvije zrake = ordinarnu (O) i ekstraordinarnu (E)
- na spoju s kanada balzomom, ordinarna zraka se totalno lomi te je eliminirana, dok ekstraordinarna nastavlja pravolinijski budući da joj je indeks loma za danu orijentaciju jednak indeksu kanadskog balzama
- ekstraordinarna zraka je ***linearno-polarizirana***



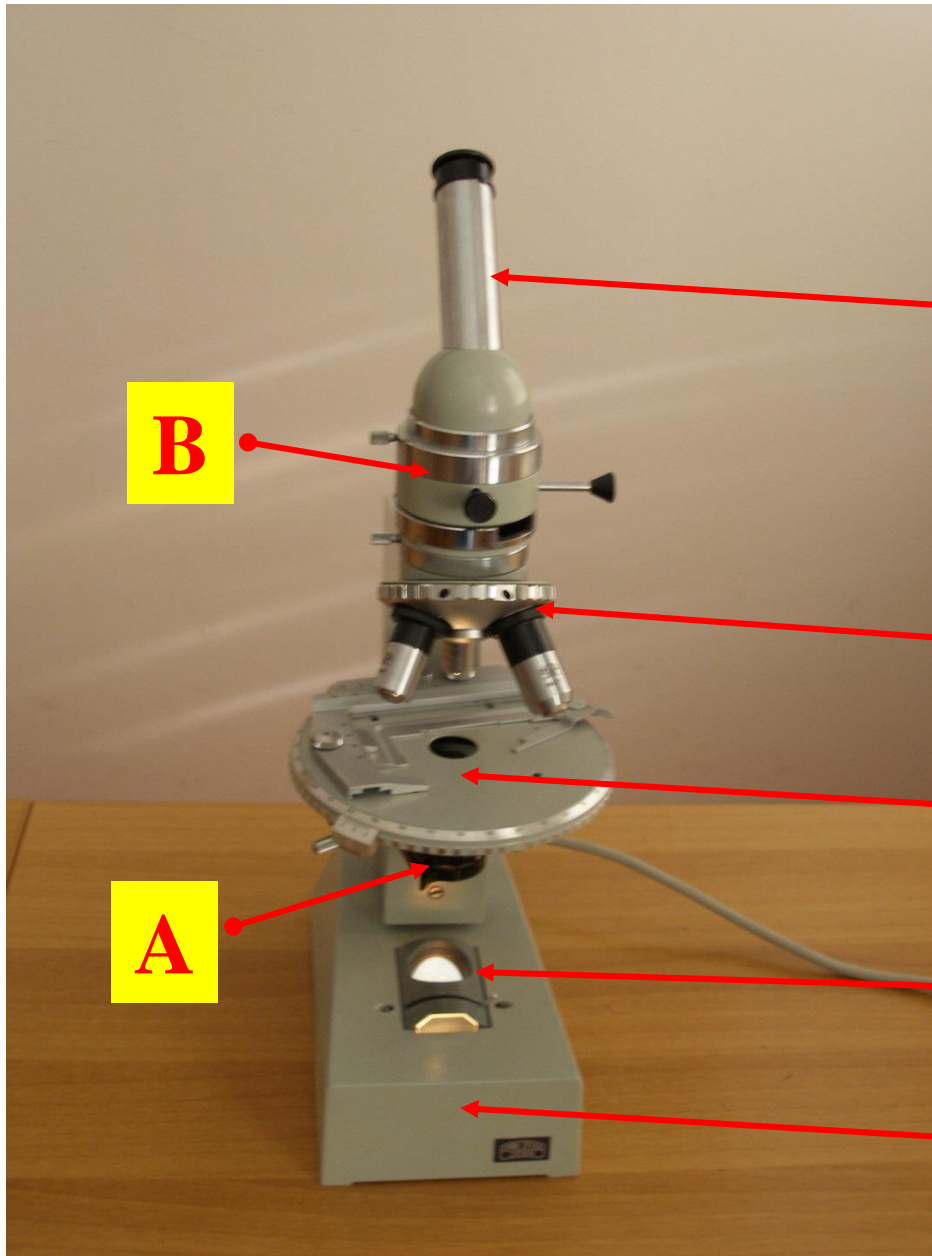
POLARIZACIJSKI MIKROSKOP

- služi za određivanje optičkih svojstava kristala

Dijelovi:

1. okular(i)
2. Amici-Bertrand-ova leća
3. analizator (drugi polarizator)
4. otvor za akcesornu pločicu
5. kružni nosač za objektivne (obično 3)
6. objektivni

7. mikroskopski rotirajući stolić s vodilicama i kutnom skalom
 8. kondenzorska leća
 9. polarizator
 10. iris (blenda)
 11. mikro- i makro vijak
 12. rasvjeta
 13. stativ
- specifičnost polarizacijskog mikroskopa su polarizatori (polarizacijski filteri), koji omogućavaju promatranje kristala u linearno polariziranom svjetlu



TUBUS S OKULAROM

B

**KRUŽNI NOSAČ S
OBJEKTIVIMA**

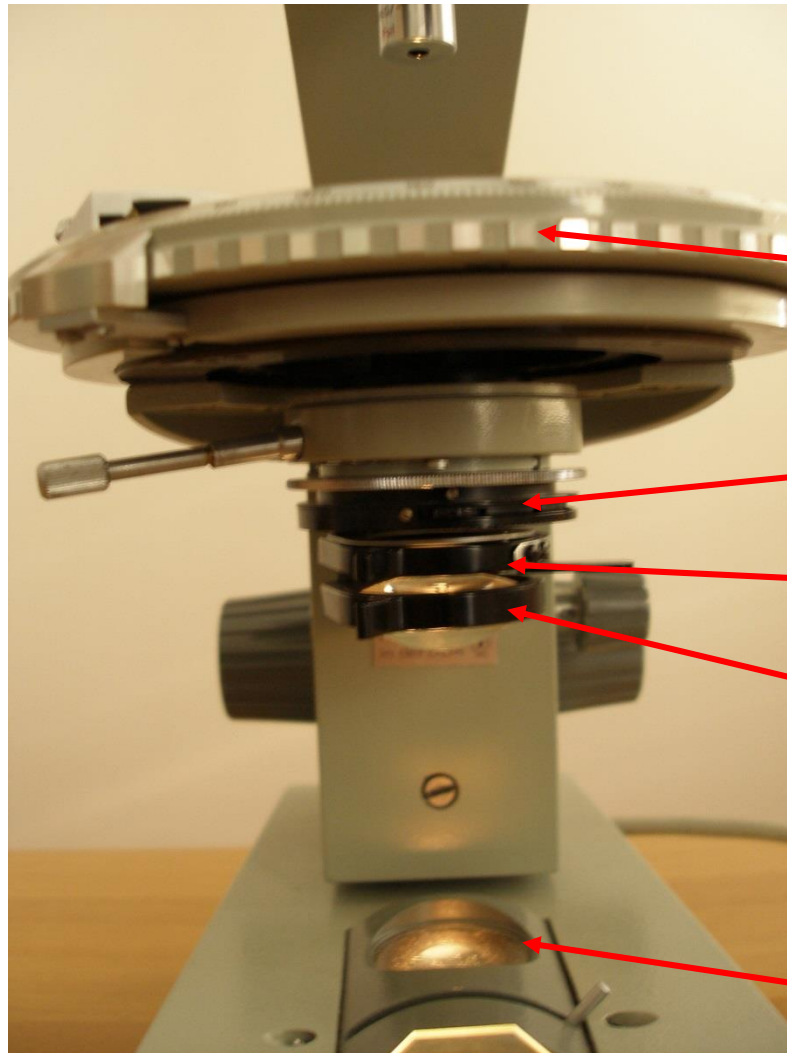
**OKRETNI STOLIĆ (mjerna
skala + hvataljke, vodilice)**

A

IZVOR SVJETLA

POSTOLJE

A



OKRETNI STOLIĆ

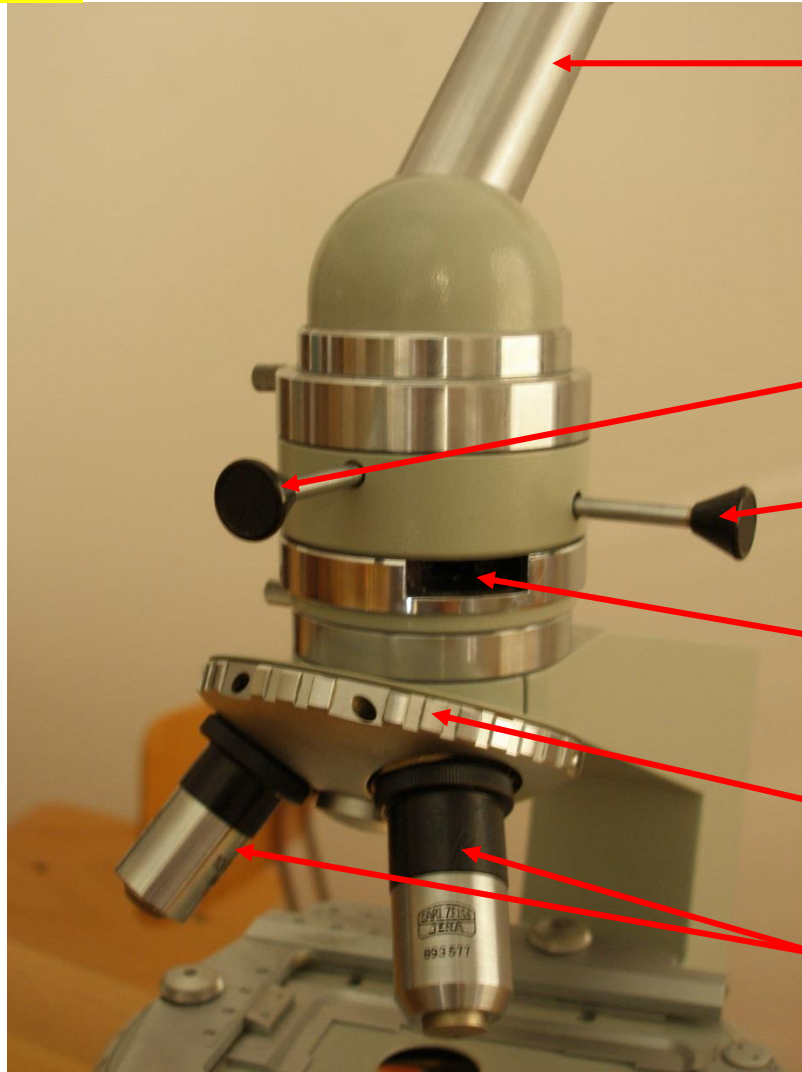
IRIS ("blenda")

POLARIZATOR

KONDENZORSKA LEĆA

IZVOR SVJETLOSTI

B



TUBUS S OKULAROM

AMICI-BERTRANDOVA LEČA

ANALIZATOR

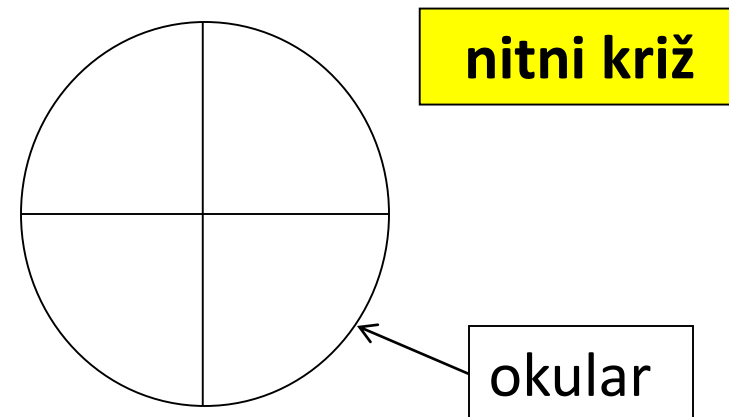
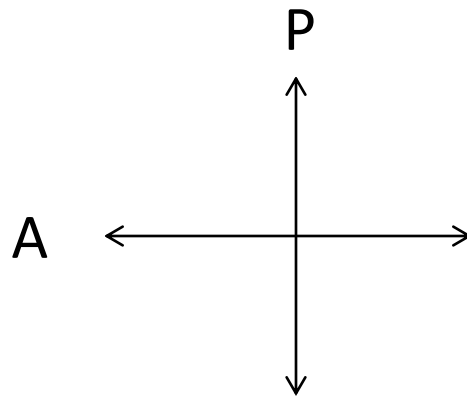
**UTOR ZA KOMPENZACIJSKE
PLOČICE**

**KRUŽNI NOSAČ OBJEKTIVA
(“revolver)**

OBJEKTIVI

Polarizatori

- polarizator polarizira svjetlost koja dolazi od izvora svjetlosti do mikroskopskog preparata
- analizator je identičan polarizatoru, samo je zakrenut za 90° . To znači da svjetlo koje propusti polarizator, neće propusti analizator



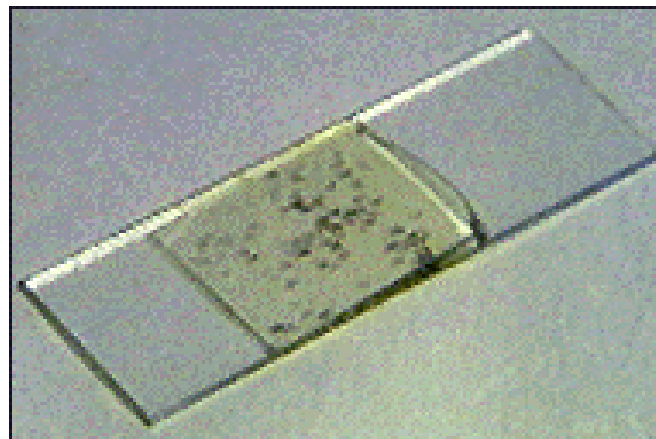
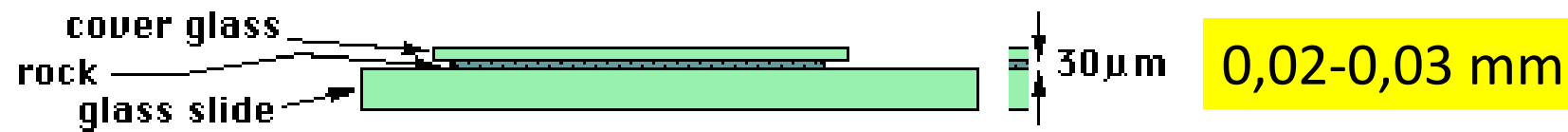
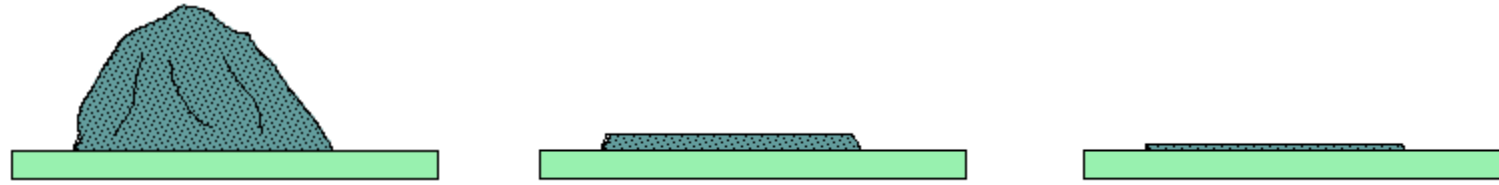
- polarizator je fiksiran, no analizator se može uključiti i isključiti

POVEĆANJE mikroskopa:

povećanje objektiva × povećanje okulara

- obično postoje 3 objektiva: za malo (2×), srednje (10×) i veliko povećanje (50×)
- okulari mogu biti povećanja 5×, 7× i 10×

Mikroskopski preparat



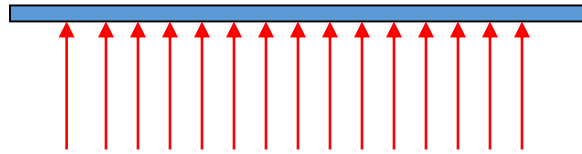
KANADSKI BALZAM

$n = 1,54$

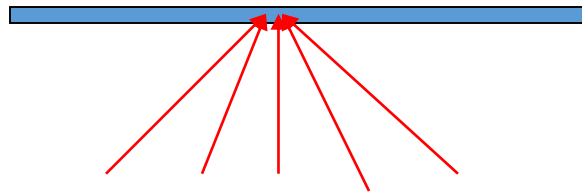
OPTIČKA ISTRAŽIVANJA KRISTALA

Kristali (minerali) mogu se promatrati u:

1. ORTOSKOPSKIM UVJETIMA



2. KONOSKOPSKIM UVJETIMA



PROMATRANJE UZORAKA U ORTOSKOPSKIM UVJETIMA

1. Bez analizatora
2. S analizatorom

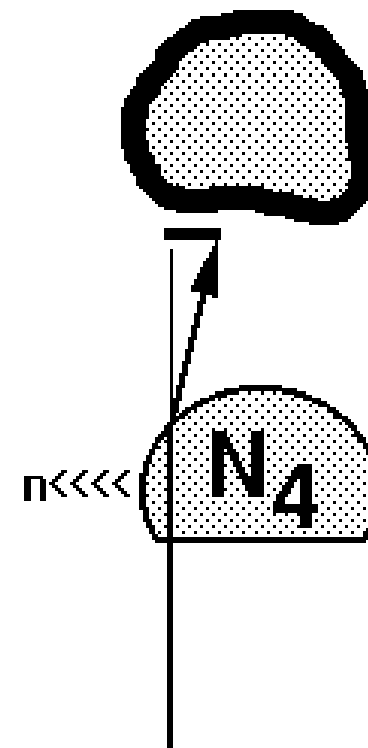
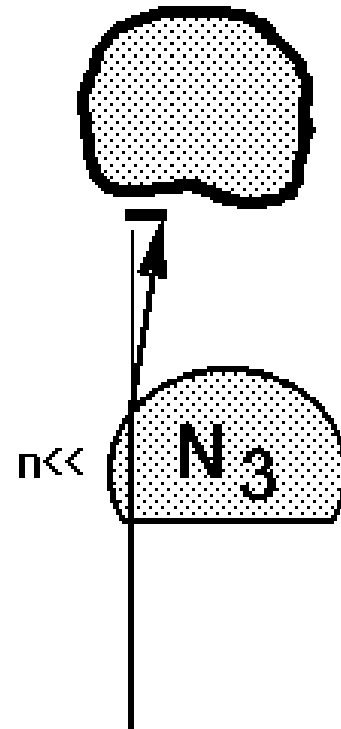
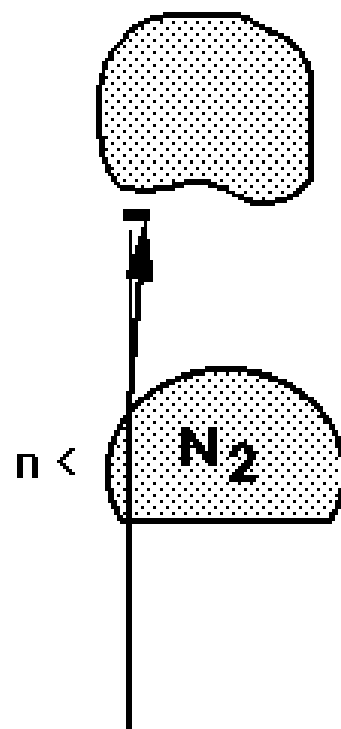
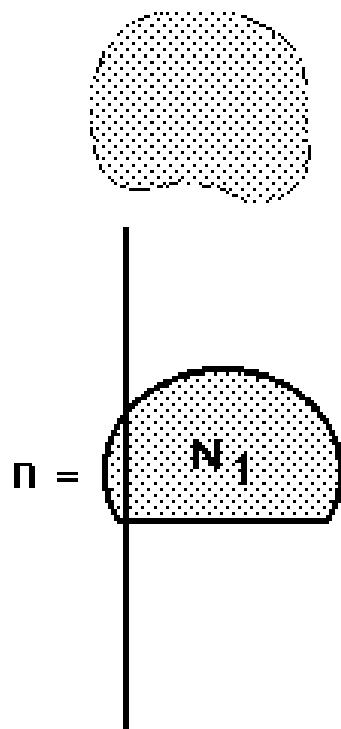
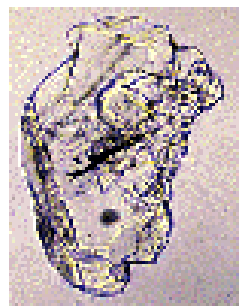
1. Ortoskopska promatranja bez analizatora

Što promatramo?

1. oblik presjeka minerala, kalavost
2. reljef minerala
3. vlastita boja minerala

RELJEF MINERALA

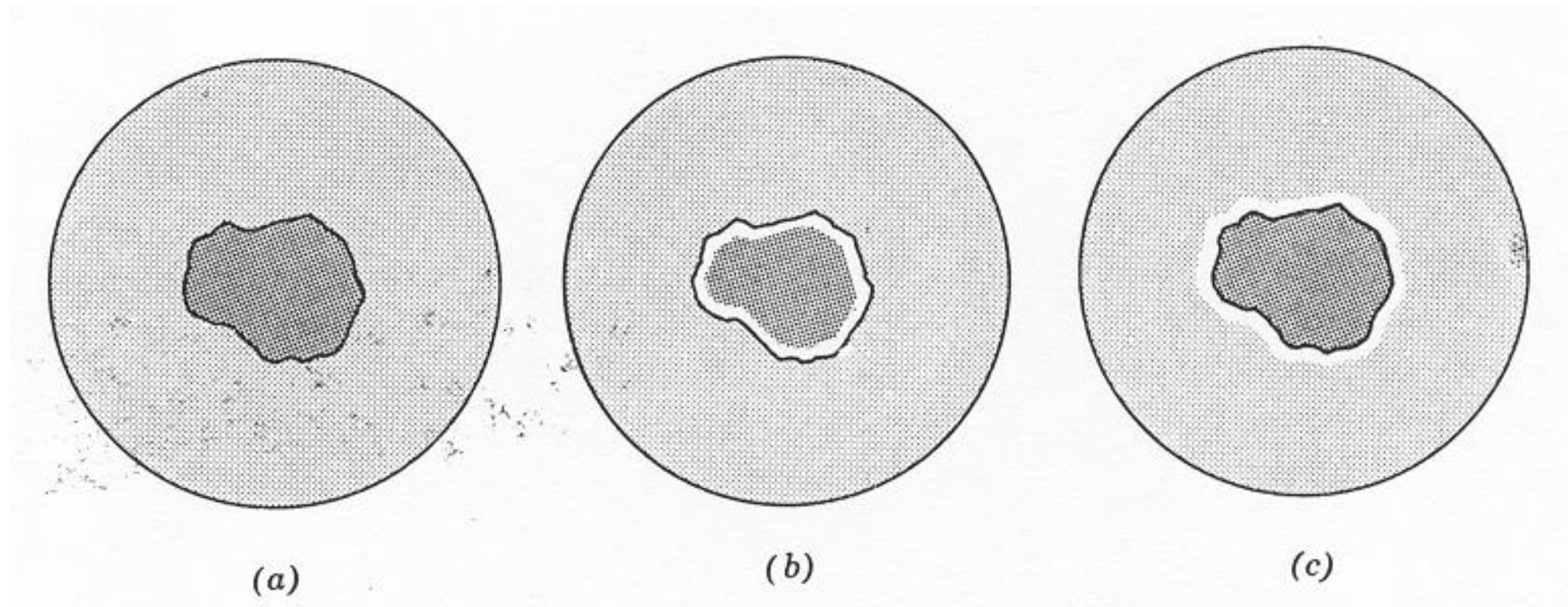
- doživljaj izraženosti granica među mineralnim zrnima, odnosno granice mineralnih zrna i kanadskog balzama, kao i pukotina na mineralu
- ako je razlika u indeksima loma između minerala i kanadskog balzama velika, jače su izražene granice (konture) zrna, te mineral ima **VISOKI RELJEF**
- ako je ta razlika mala, mineral ima **NISKI RELJEF**
- ako je indeks loma minerala jednak onome kanadskog balzama ($n_{kb} = 1,54$), onda mineral **nema reljef**



Becke-ova linija

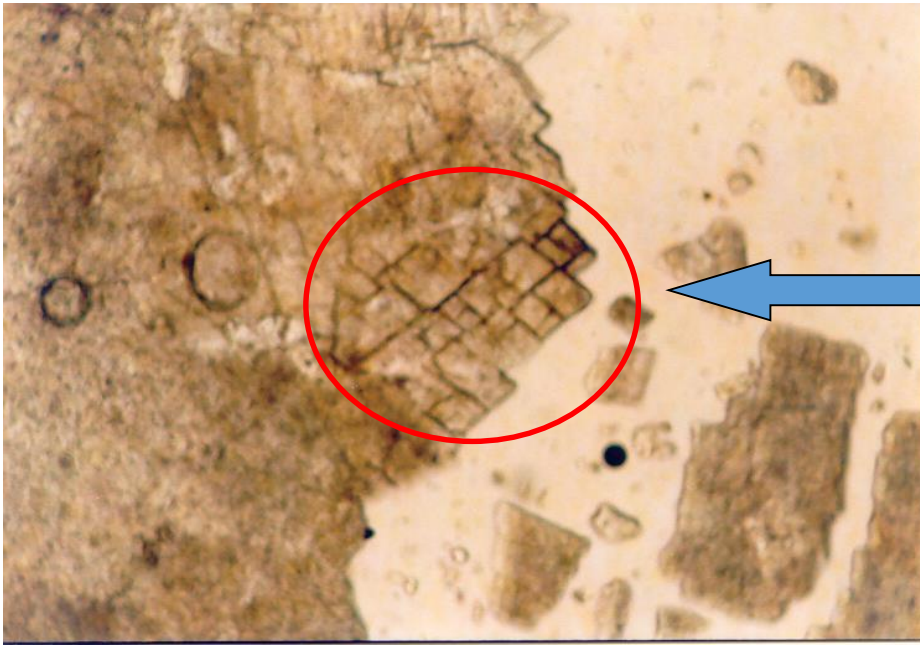
- to je tanka svjetla linija na granici mineralnog zrna i kanadskog balzama
- može se odrediti je li indeks loma minerala veći ili manji od indeksa loma kanadskog balzama
- udaljavanjem preparata od objektiva Beckeova linija bježi u sredstvo **većeg indeksa loma**

BECKE-OVA LINIJA

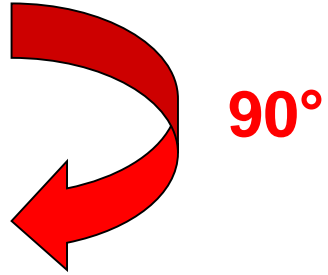


PSEUDOAPSORPCIJA

- kod anizotropnih minerala može se dogoditi da se indeksi loma dviju zraka nastalih dvolomom međusobno dosta razlikuju
- u pojedinim takvim slučajevima za vibracijskih smjer jedne zrake reljef može biti nizak, a za smjer druge zrake visok
- npr. kalcit: $n_o = 1,658$, $n_e = 1,486$

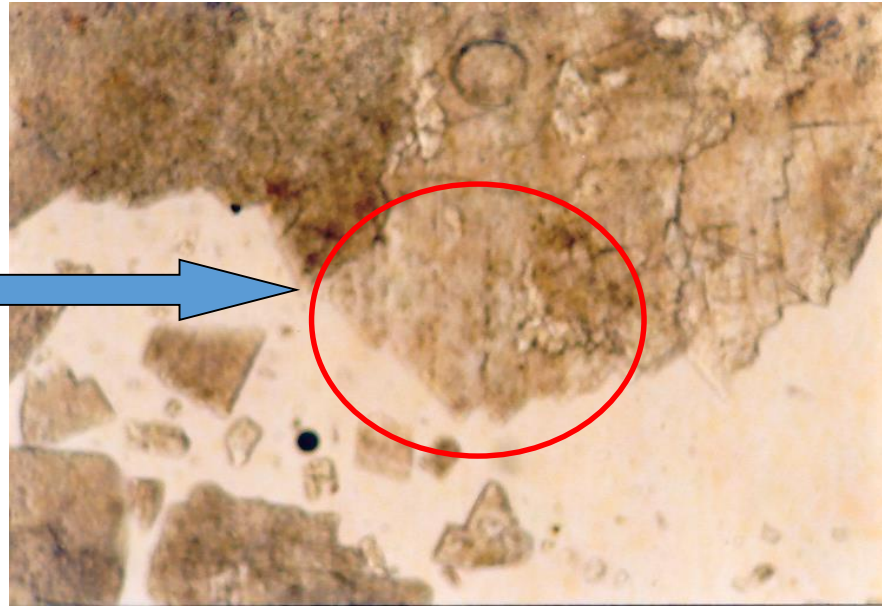
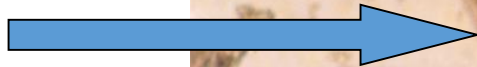


$n_o = 1,648$



90°

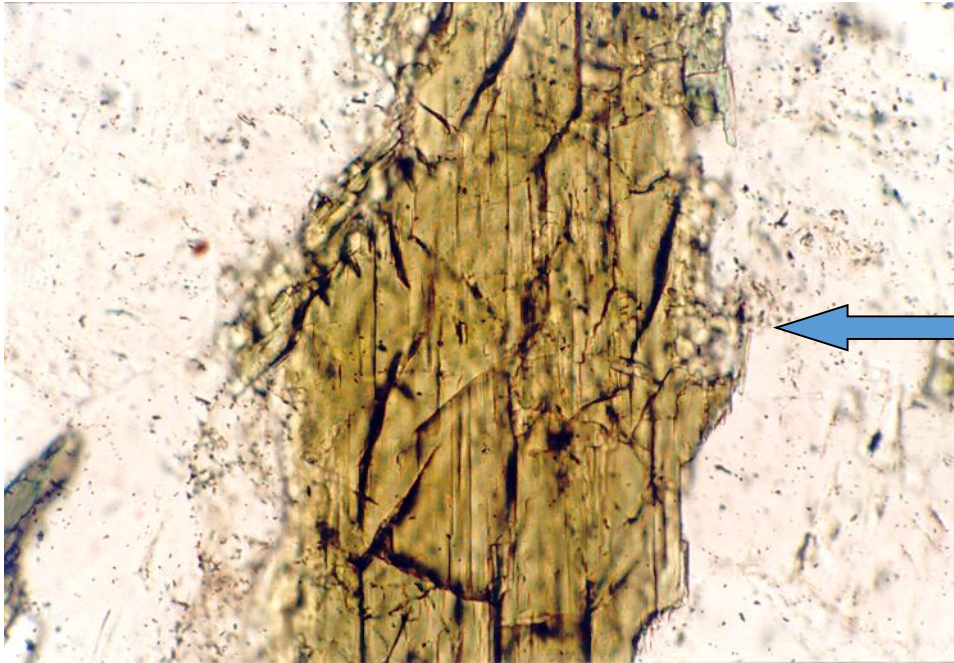
$n_e = 1,486$



VLASTITA BOJA

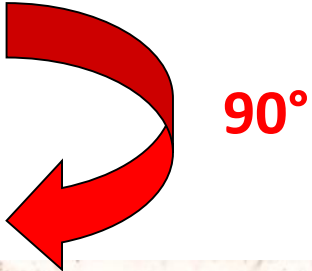
- posljedica apsorpcije bijele svjetlosti u mineralu
- kod anizotropnih minerala, apsorpcija ovisi o smjeru širenja svjetlosti
npr. turmalin (heks.) $a_o > a_e$
- stoga je mineral različito obojen u različitim smjerovima (POLIKROIZAM, PLEOKROIZAM)

- optički jednoosni imaju DIKROIZAM = pokazuju dvije boje (za O i E)
- najbolje se očituje u presjeku paralelno s optičkom osi = presjek najvećeg dvoloma
(pazi! u presjeku okomito na optičku os nema pleokroizma!)
- optički dvoosni minerali imaju TRIKROIZAM (za smjerove X, Y i Z)



HORNBLENDA

Z = smeđa



X = zelenkastosmeđa



2. ORTOSKOPSKA PROMATRANJA S UKLJUČENIM ANALIZATOROM

Promatramo:

1. Potamnjenja
2. Interferencijske boje

PODSJETIMO SE!

Vibracijske ravnine polarizatora su međusobno okomite.

POTAMNJENJA

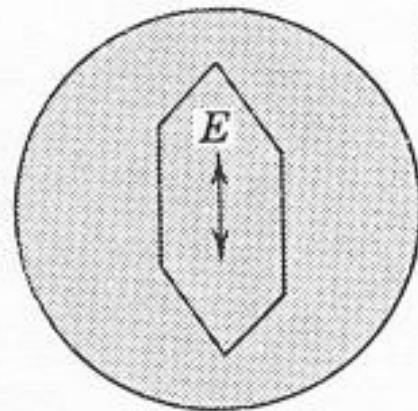
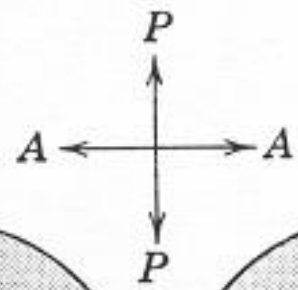
1. IZOTROPNI MINERALI

S uključenim analizatorom uvijek su tamni, bez obzira na orijentaciju!

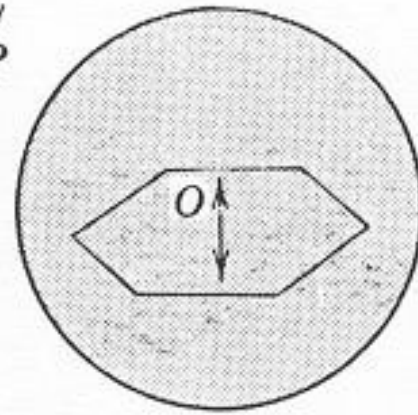
2. ANIZOTROPNI MINERALI

a) presjeci izbrušeni okomito na optičku os = ostaju stalno tamni pri rotaciji m. stolića

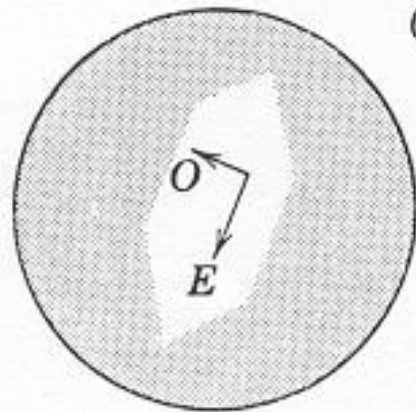
b) ostali presjeci potamne **četiri** puta tijekom rotacije za 360° (svakih 90°)



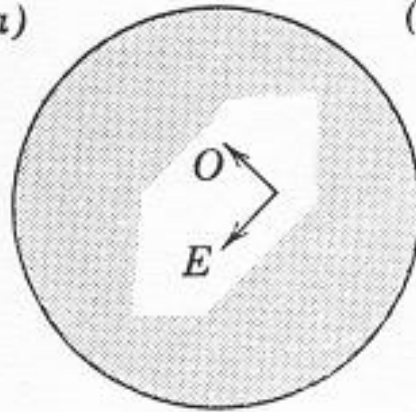
(a)



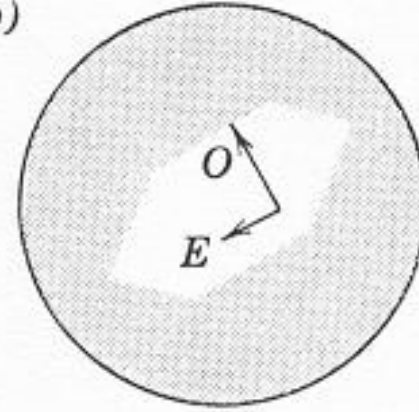
(b)



(c)



(d)



(e)

• potamnjenje može biti

a) paralelno

b) koso

c) simetrijsko

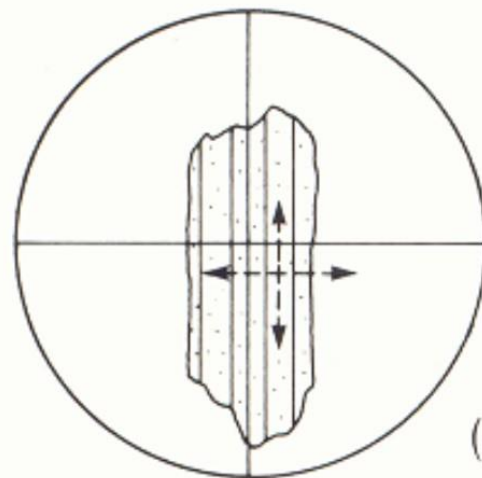
d) ne može se odrediti

ako na mineralnom

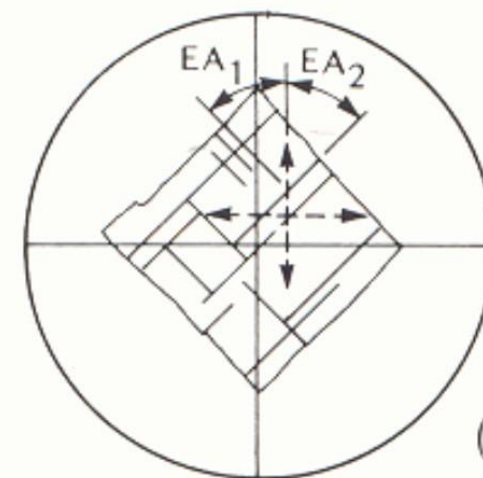
presjeku nisu vidljivi

geometrijski elementi

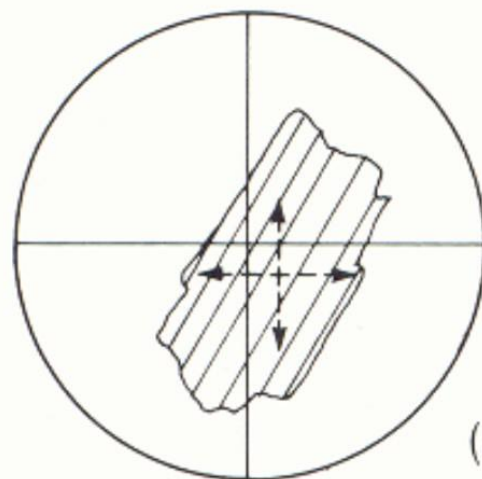
(npr. kalavost, konture)



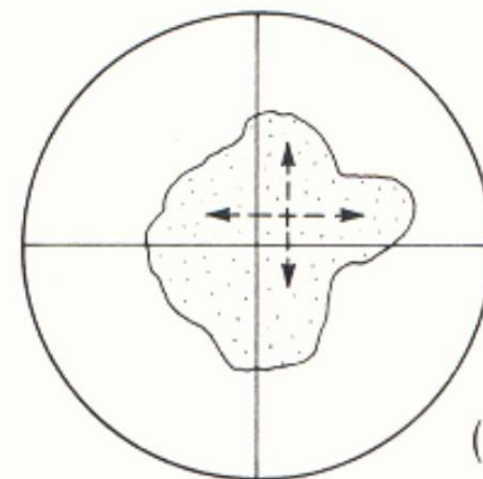
(a)



(c)



(b)



(d)

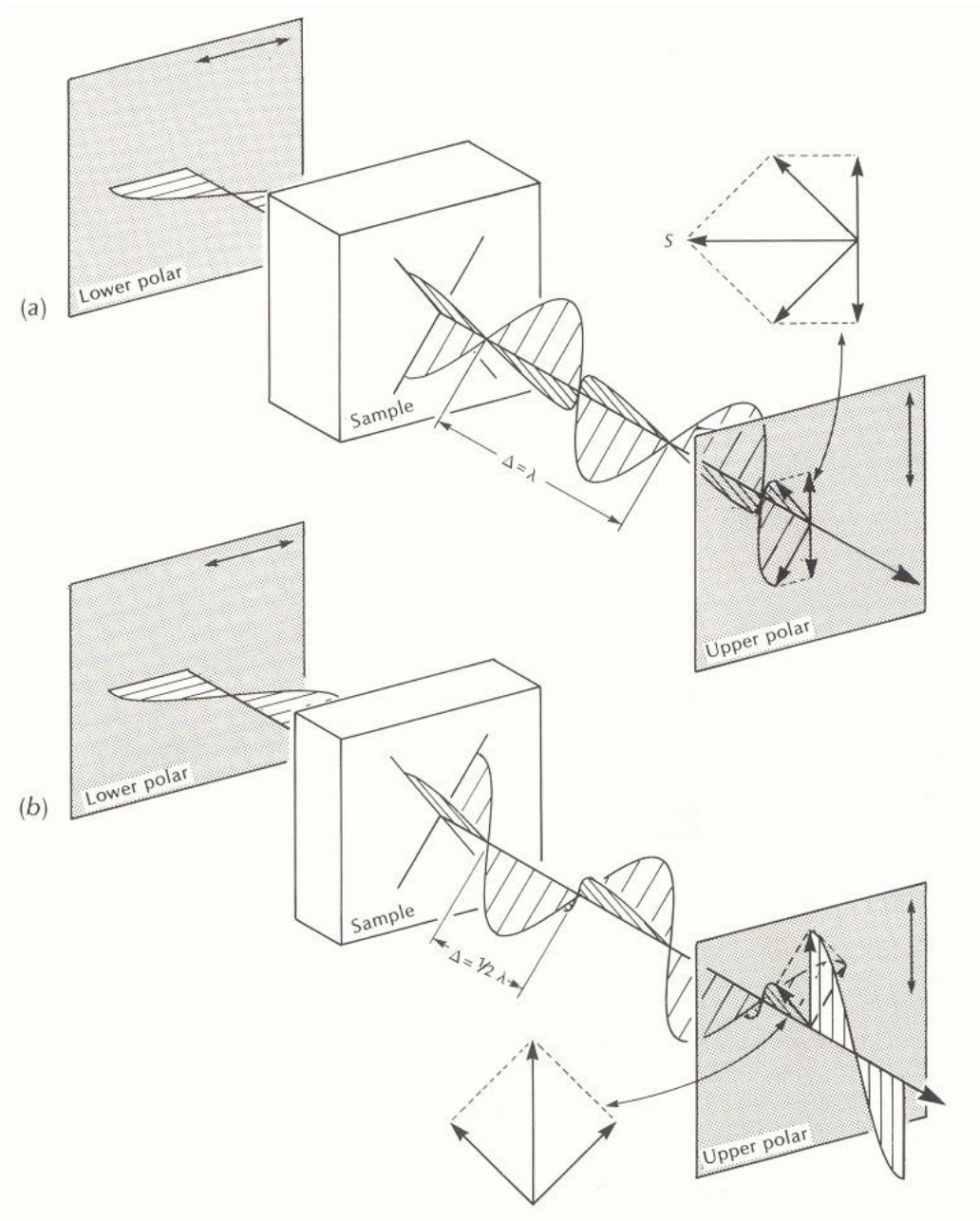
INTERFERENCIJSKE BOJE

- ako mineral iz položaja potamnjenja zakrenemo za 45° , dovest ćemo ga u položaj maksimalne rasvjete
- tada se opažaju interferencijske boje
- interferencijske boje nisu vlastite boje minerala, nego boje nastale interferencijom komponenata zraka svjetlosti nastalih dvolomom u anizotropnom mineralu, a prilikom njihovog prolaska kroz analizator

- zrake nastale dvolomom u anizotropnom mineralu imaju različite brzine, pa prilikom izlaska iz minerala ostvaruju tzv. razliku u hodu (Δ)

$$\Delta = d (n_2 - n_1)$$

- te zrake kada dođu do analizatora razlažu se na komponente, te samo one komponente paralelne s vibracijskom ravninom analizatora mogu kroz njega proći
- pri prolasku te komponente interferiraju



Dva ishoda interferencije:

A. Razlika u hodu među zrakama je $n\lambda$

PONIŠTAVANJE

B. Razlika u hodu među zrakama je

$$(2n - 1)\lambda/2$$

Pojačanje =

INTERFERENCIJ.

BOJE

- postoje različiti redovi interferencijskih boja, ovisno o tome koliko iznosi n :

1λ = interf. boje 1. reda (0-550 nm)

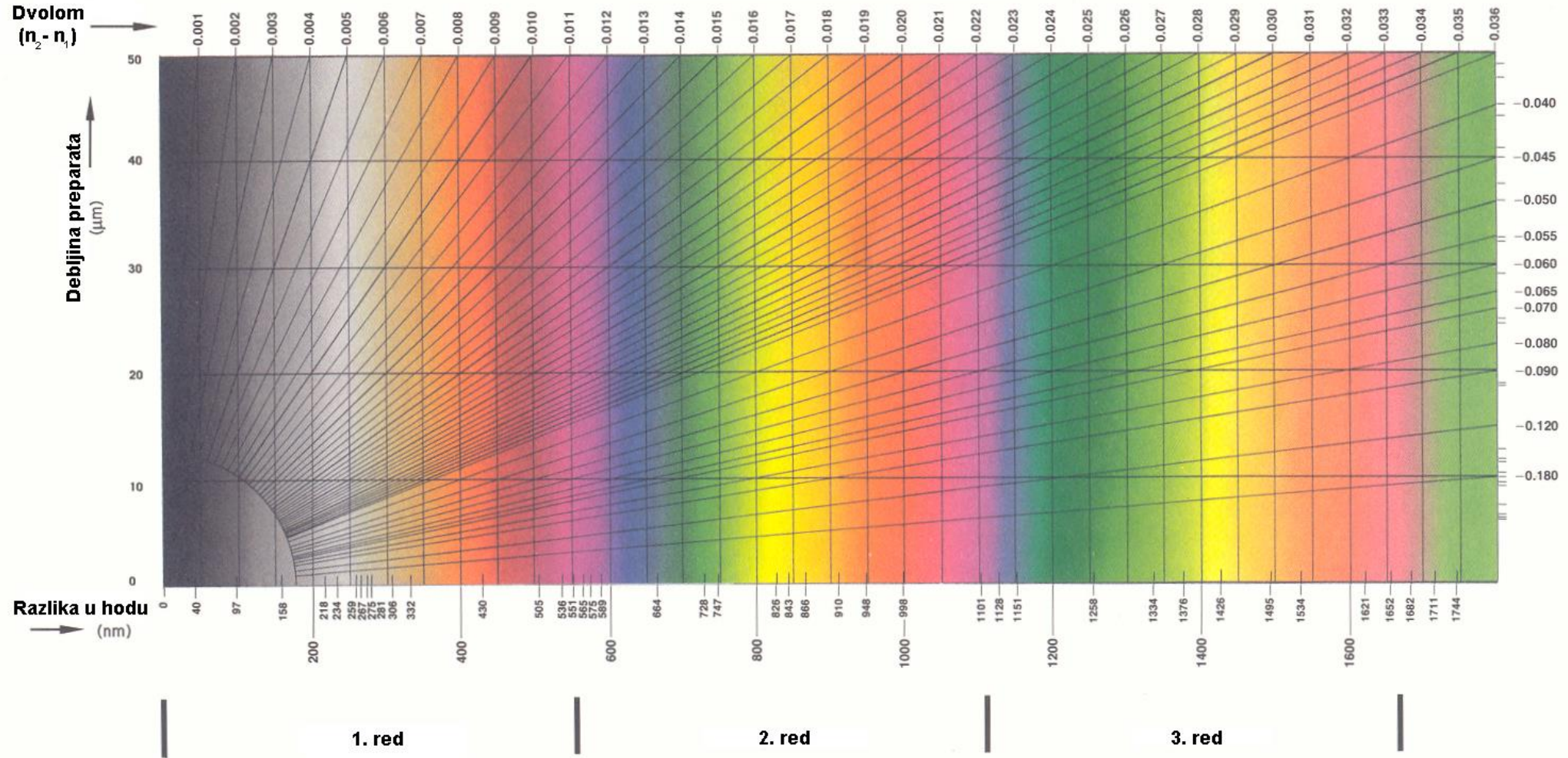
2λ = interf. boje 2. reda (550-1100 nm)

3λ = interf. boje 3. reda (1100-1650 nm)

$n\lambda$ = interf. boje n -tog reda

- interferencijske boje pregledno su prikazane na Michél-Levy tablici

Michel-Levy tablica (nomogram)

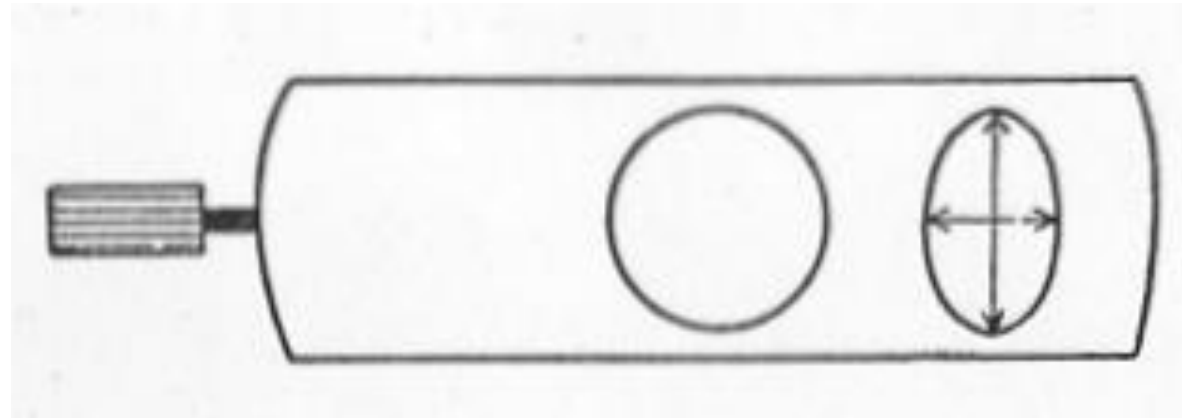


Kompenzacijske (akcesorne) pločice = kompenzatori

- proizvode interferenciju poznate razlike u hodu, dakle i poznate boje
- pomoću tih pločica možemo našem istraživanom mineralnom presjeku dodati (adicija) ili oduzeti (suptrakcija) poznatu razliku u hodu

Postoje tri kompenzacijske pločice:

1. gipsni listić (λ) = 532 nm, osjetljiva crvena boja
2. tinjčev listić ($\lambda/4$) = 133 nm, žuta boja
3. kvarcni klin ($\lambda/2-3\lambda$)



KONOSKOPSKA OPAŽANJA

Za prebacivanje mikroskopa iz ortoskopskih u konoskopske uvjete rada potrebno je:

1. Uključiti kondenzorsku leću
2. Odabrati objektiv s najvećim povećanjem
3. Uključiti analizator
4. Uključiti Amici-Bertrand-ovu leću

Što promatramo u konoskopskim uvjetima

1. Konoskopsku figuru
2. Optički karakter (+/-)

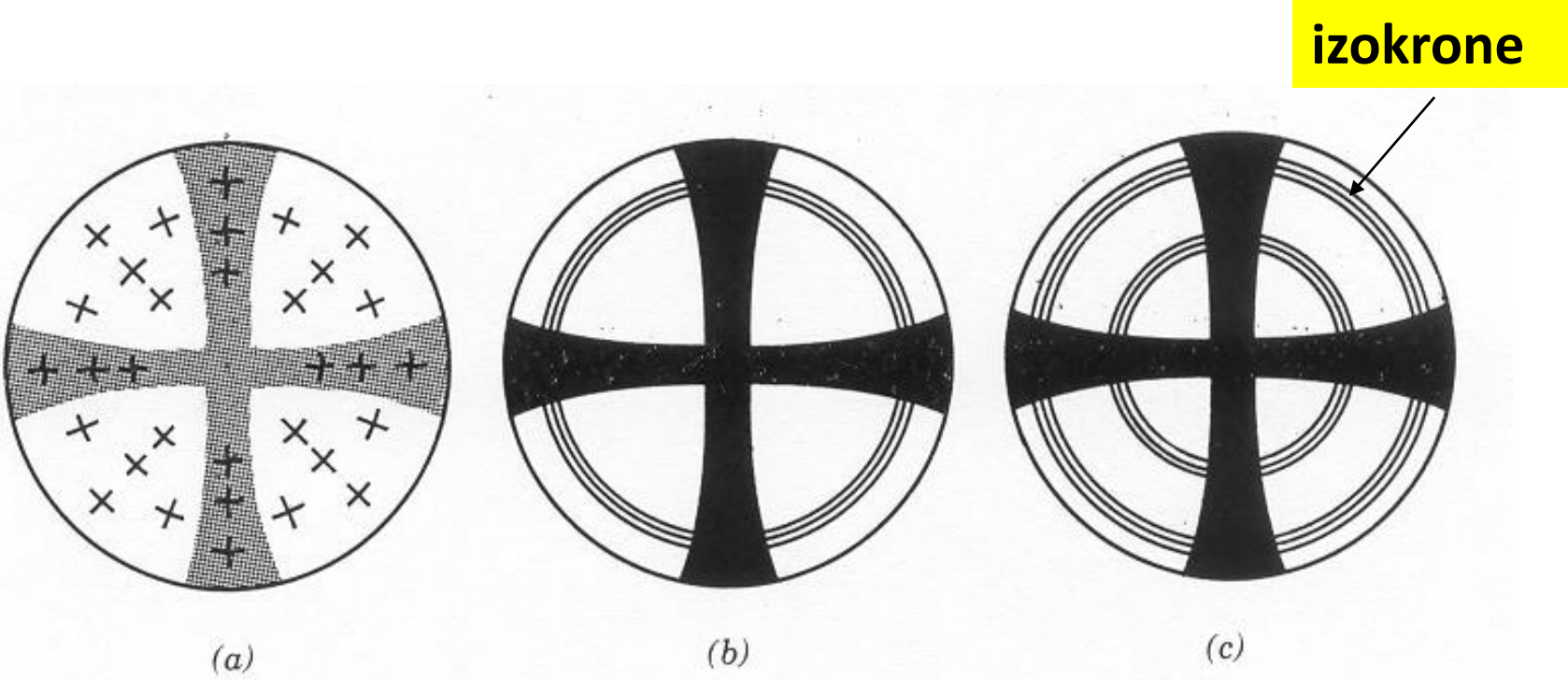
Zapamtiti: IZOTROPNE materijale **ne promatramo** konoskopski budući da su oni stalno tamni pri uključenom analizatoru

Promatraju se samo ANIZOTROPNI materijali, jer oni i u svojim izotropnim presjecima (okomito na optičku os) pokazuju konoskopsku figuru.

Jednoosni materijali u konvergentnom svjetlu

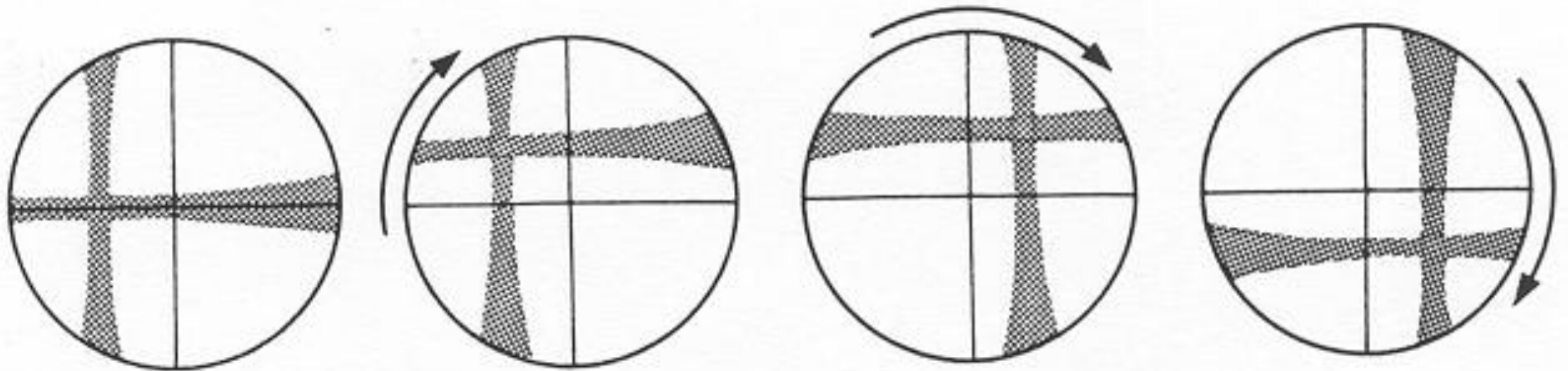
- najpogodnije je proučavati presjeke okomito na optičku os = os c
- konoskopska figura ima oblik crnog križa, oko kojeg se koncentrično nižu interferencijske boje

Konoskopska figura opt. jedonoosnih minerala



Što su debljina preparata i dvolom veći, više je i interferencijskih boja.

- ako presjek nije izbrušen točno okomito na optičku os (os c), križ će pri rotaciji mikroskopskog stolića opisivati kružnicu

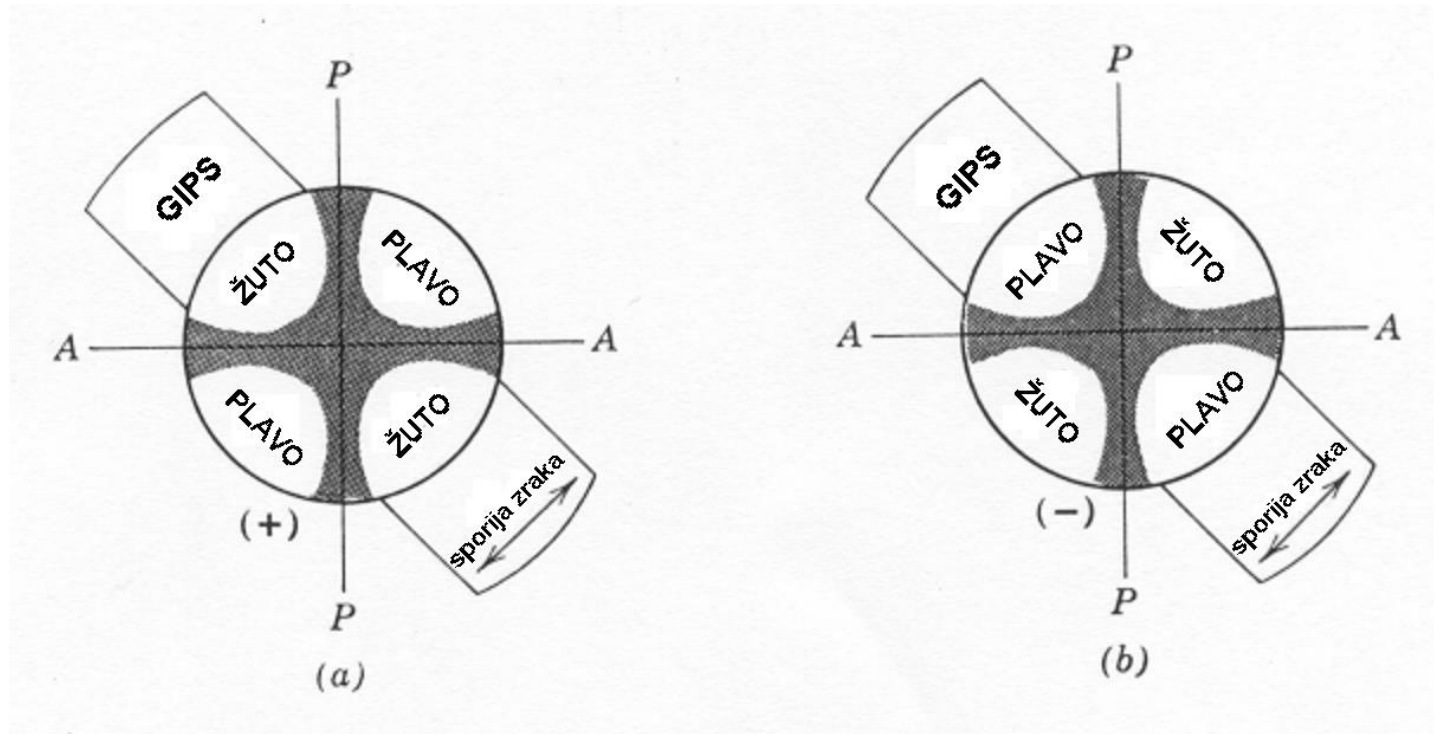


Optički karakter

- za određivanje se koriste kompenzacijske pločice (=kompenzatori)
 - najčešće se koristi gipsna pločica (532 nm)
 - umeće se pod kutem od 45°
 - promatramo promjene u interferencijskim bojama kod konoskopske figure
1. Crni križ pocrveni (razlika u hodu = $0+532\text{nm} = 532 \text{ nm}$)

2. uočimo da križ dijeli konoskopsku figuru na 4 kvadranta
– promatramo NW i SE kvadrant te umetnemo gipsni kompenzator
- a) ako bijelo-siva boja neposredno uz križ požuti = optički pozitivan
- b) ako bijelo-siva boja neposredno uz križ poplavi = optički negativan

Optički karakter opt. jedoosnih minerala

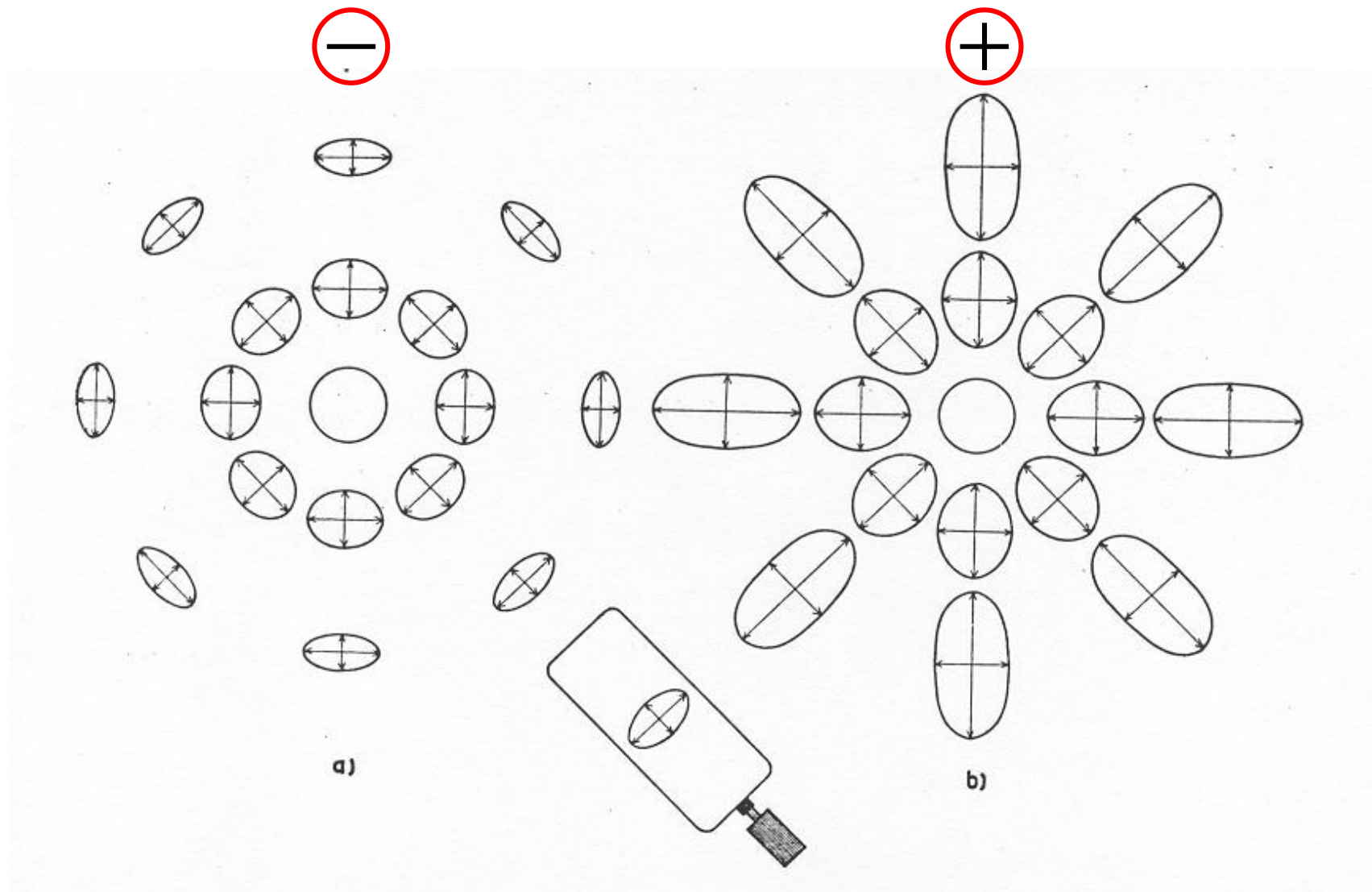


$(532-230)\text{nm}=302\text{ nm}$

SUPTRAKCIJA

$(532+230)\text{nm}=762\text{ nm}$

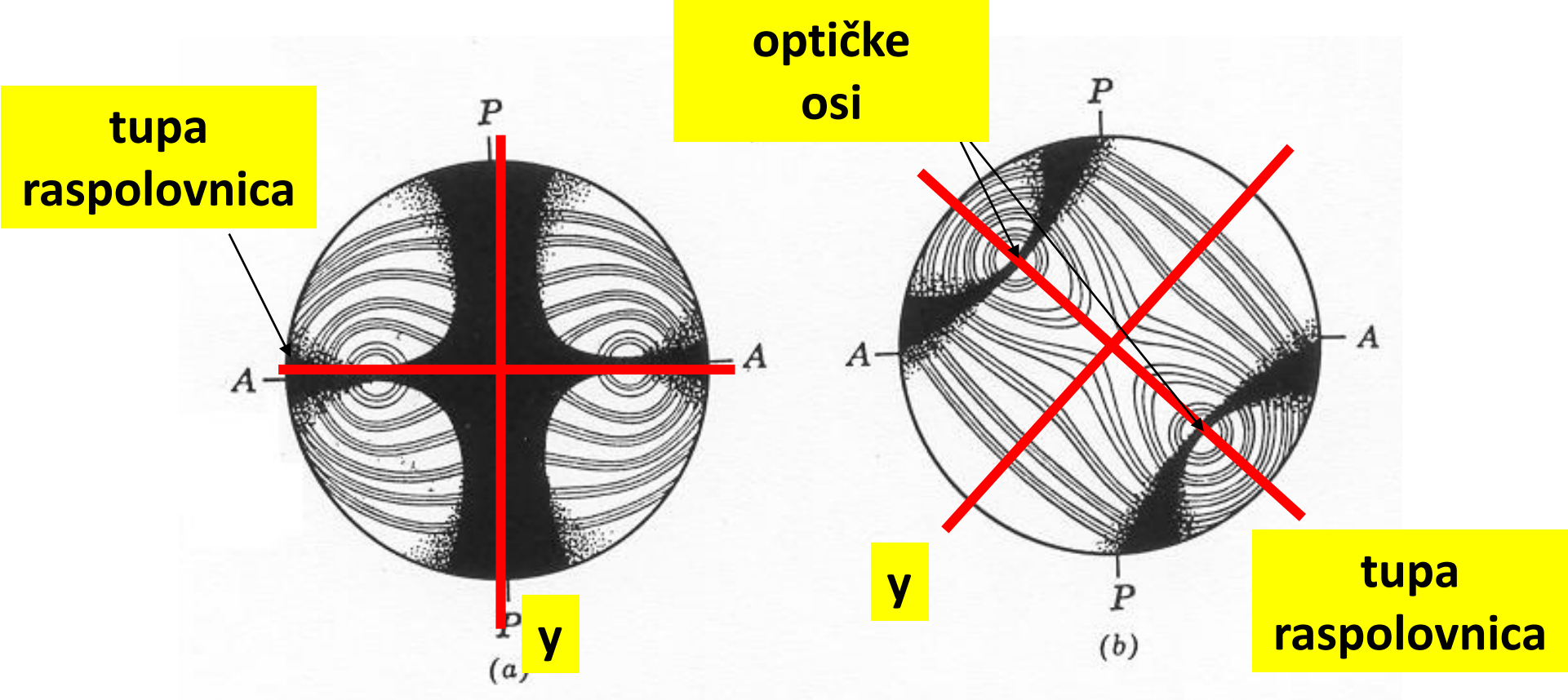
ADICIJA



Dvoosni materijali u konoskopskom svjetlu

- najpogodniji (najinformativniji) su presjeci okomiti na oštru raspolovnicu
- konoskopska figura je crni križ, oko kojega se koncentrično nižu interferencijske boje u obliku linija koje nazivamo LEMNISKATE
- zakretanjem stolića križ se rastavlja na dvije hiperbole, koje su najviše udaljene pri zakretanju stolića za 45°

Konoskopska figura

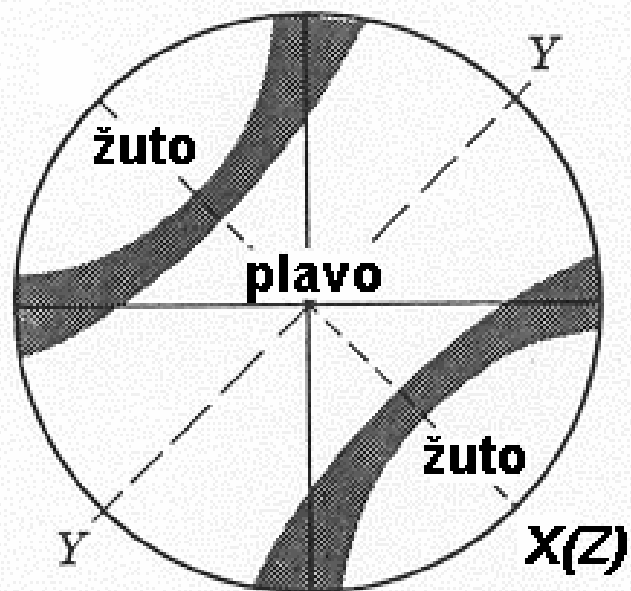


Optički karakter

- zakrenemo stolić za 45° tako da se križ rastavi na dvije hiperbole, koje dovedemo u NW i SE kvadrant
- umetne se gipsna kompenzatorska pločica, te se promatra promjena bijelo-sive interferencijske boje smještene neposredno uz hiperbole (hiperbole pocrvene)

Optički karakter

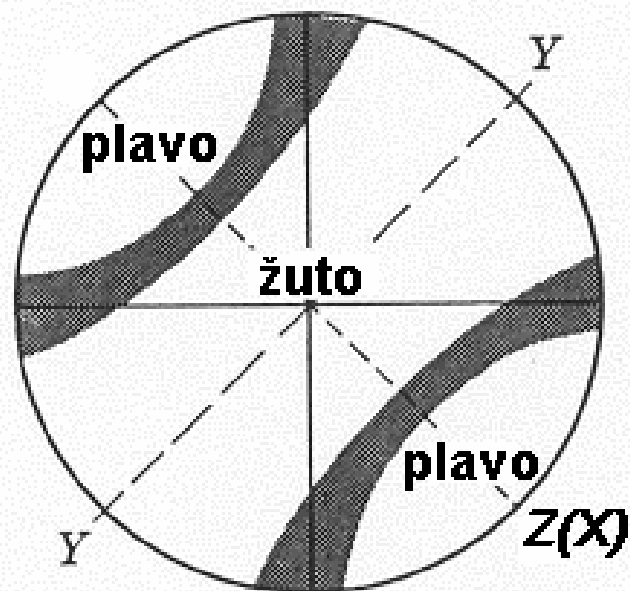
POZITIVNI



(a)



NEGATIVNI



(b)

