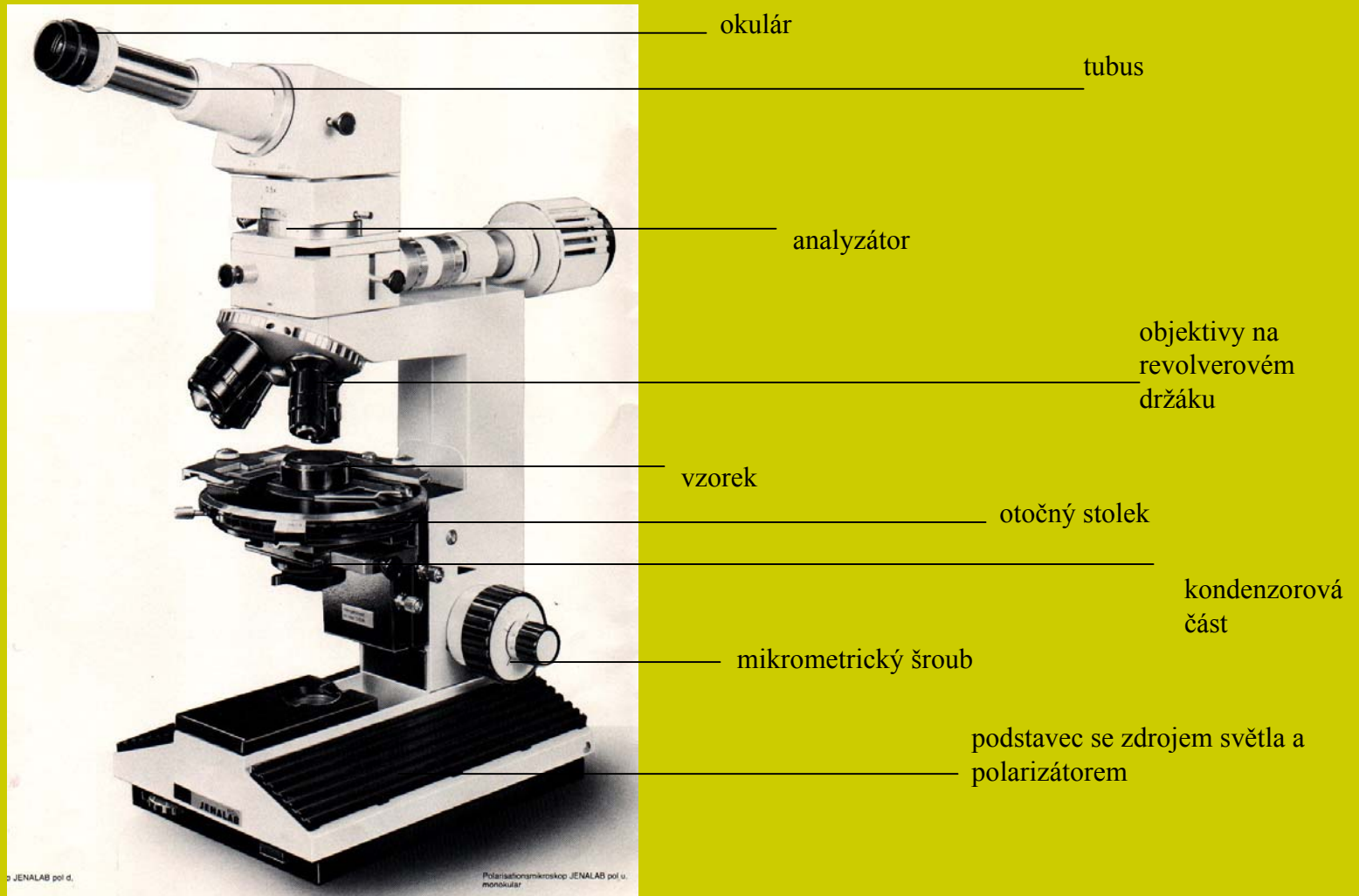


Optická mikroskopie v geologii

Pro studenty odborné geologie
přednáší Václav Vávra, Nela Doláková

Polarizační mikroskop

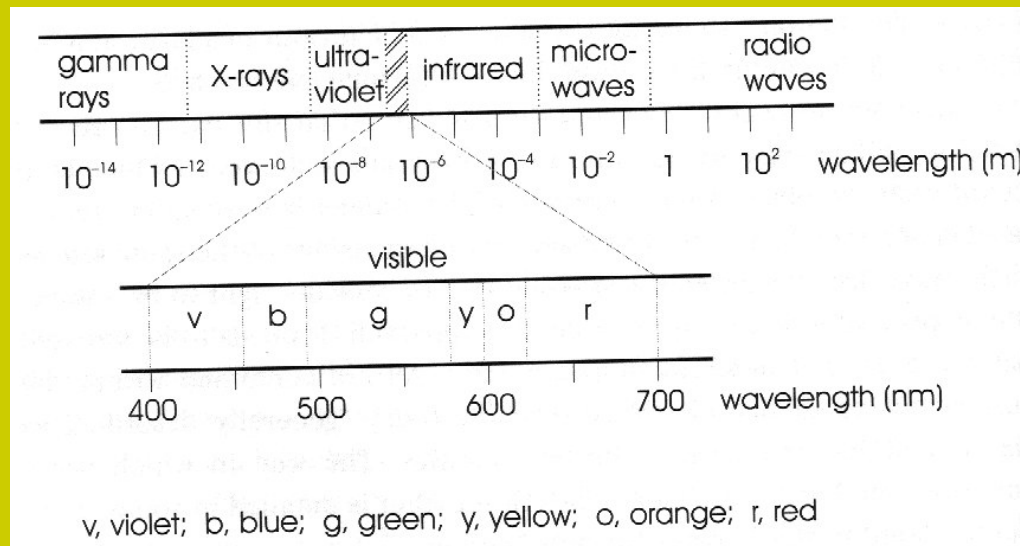


Vlnová délka světla

Viditelné světlo tvoří v elektromagnetickém spektru oblast od asi 700 nm (červené světlo) po asi 400 nm (fialové světlo).

Bílé světlo je složeno ze všech vlnových délek udaného rozpětí - tzv. **polychromatické světlo**.

Světlo tvořené jedinou vlnovou délkou se označuje jako **monochromatické**.



Lom světla a odraz světla

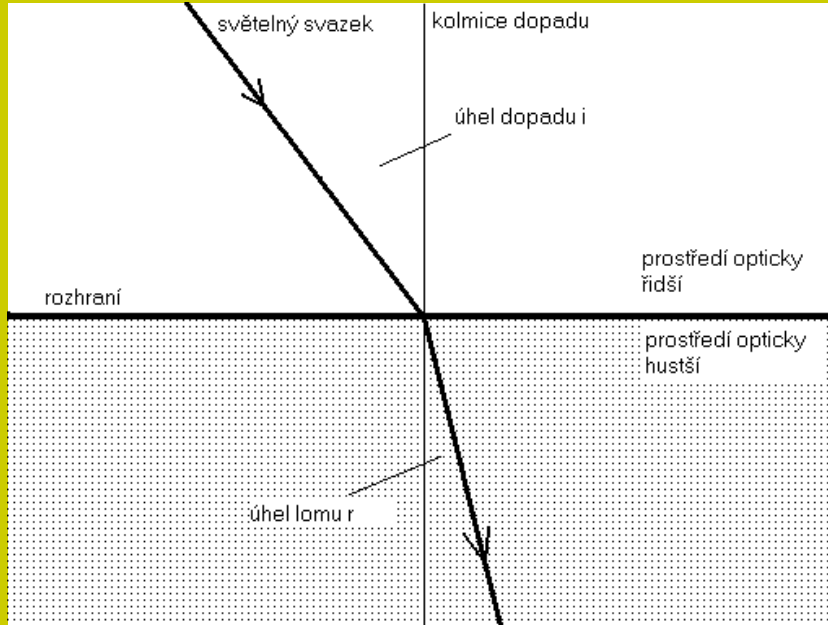
Na rozhraní dvou opticky rozdílných prostředí nastává:

- ✓ lom a odraz světla
- ✓ změna rychlosti světla.

V opticky hustším prostředí se světlo šíří pomaleji (má menší rychlost) než v prostředí opticky řidším.

Principy chování světelných paprsků (lom nebo odraz) se řídí podle toho, ve kterém směrem vzhledem k optickému rozhraní paprsek postupuje.

Lom ke kolmici I



Lom ke kolmici nastává v případě, že světlo prochází z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího.

Obecně platí Snelliův zákon

$$\sin i / \sin r = \text{konst.}$$

Pokud je jedním z prostředí vzduch (pro přesná měření vakuum) je tato konstanta označována jako **index světelného lomu** a značí se symbolem n .

Potom platí:

$$\sin i / \sin r = n$$

Lom ke kolmici II

Pro rychlost paprsků v jednotlivých prostředích rovněž platí

$$V / v = n,$$

kde V je rychlost paprsku ve vzduchu a v rychlost paprsku ve srovnávaném optickém prostředí.

Kombinací rovnic dostaneme vztah:

$$V / v = \sin i / \sin r = n,$$

z kterého plyne:

- ✓ čím větší je rychlost paprsku v prostředí, tím menší je index lomu tohoto prostředí
- ✓ čím menší je úhel lomu v daném prostředí, tím větší je jeho index lomu
- ✓ velikost úhlu lomu závisí i na vlnové délce (λ) použitého světla. Čím kratší je vlnová délka monochromatického světla, tím menší je úhel lomu.

Lom od kolmice

Při průchodu paprsku z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího dochází k lomu jen po určitý úhel dopadu. Při dosažení tohoto **mezního úhlu** je velikost úhlu lomu $r = 90^\circ$.

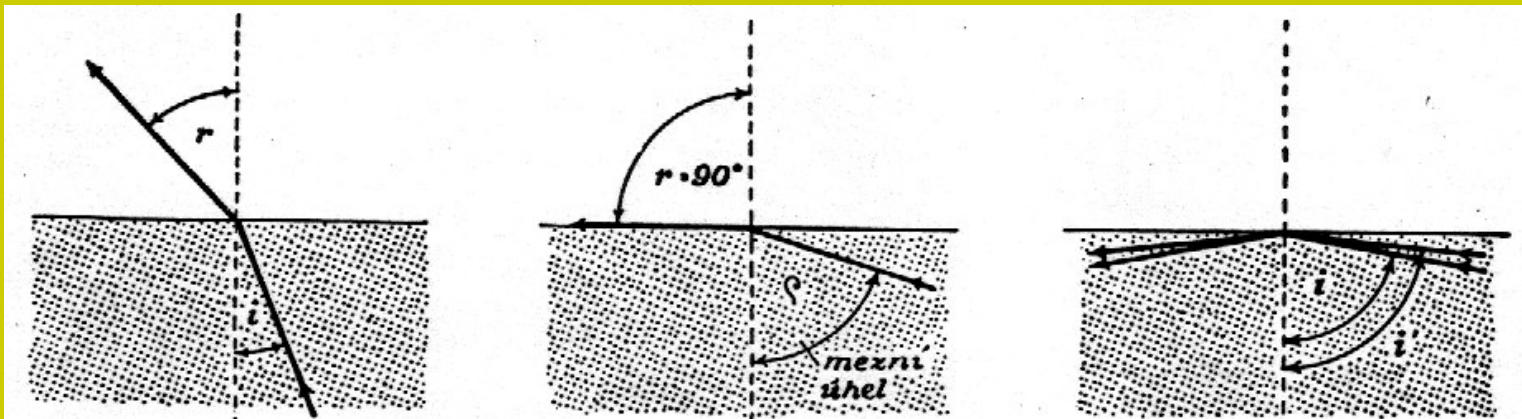
Je-li **mezní úhel** překročen, dochází na rozhraní k úplnému odrazu (totální reflexi). Pokud je opticky řidším prostředím vzduch nebo vakuum, pak platí rovnice:

$$\sin i / \sin r = 1 / n$$

Pokud ani jedno z prostředí není speciální, platí obecnější tvar rovnice:

$$\sin i / \sin r = n_1 / n_2$$

n_1 je index lomu prostředí opticky řidšího a n_2 je index lomu prostředí opticky hustšího.

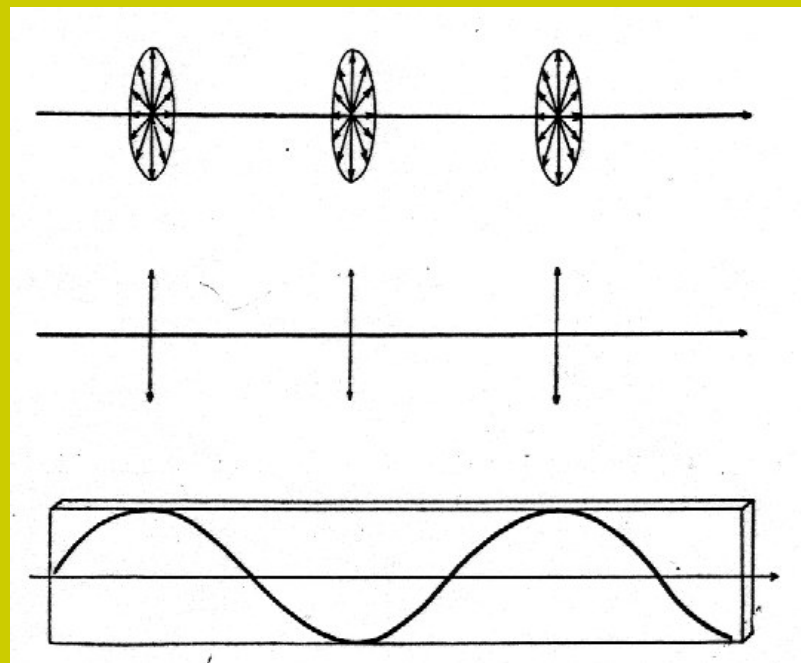


Polarizace světla

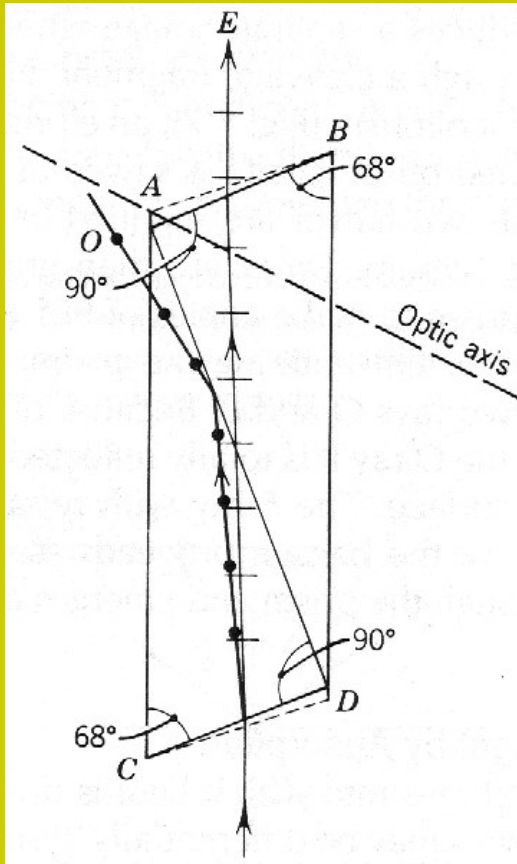
Jako obyčejné (nepolarizované) světlo se označují světelné vlny, které kmitají ve všech rovinách proložených směrem jejich dráhy. Pro studium minerálů a hornin se používá světlo, které kmitá pouze v jedné rovině - světlo *lineárně polarizované*.

K polarizaci světla může docházet několika způsoby:

- odrazem
- dvojlomem
- absorpcí



Polarizace světla dvojlomem



V látkách anizotropních se vstupující světelný paprsek rozdělí na dva k sobě kolmo polarizované svazky. Aby vycházelo z látky světlo polarizované v jednom směru, musí se druhý paprsek odstranit. To se provádí pomocí tzv. nikolu.

Nikol se zhotovuje z islandského kalcitu zbrúšením jeho štěpného tvaru a následným diagonálním rozříznutím a slepením pomocí kanadského balzámu.

Vstupující paprsek se dělí na paprsek *řádny* (*o*) a *mimořádny* (*e*).

Každý z těchto paprsků má jiný index lomu, takže na vrstvičce kanadského balzámu je paprsek řádný odražen a následně absorbován. Paprsek mimořádny vychází ven jako **lineárně polarizované světlo**.

Rozdělení látek podle optických vlastností

Podle povahy chování paprsku v dané látce rozlišujeme:

- ❑ **látky izotropní** - při průchodu krystalem izotropní látky v libovolném směru nedochází k dvojlomu světelného paprsku (jsou to všechny látky s kubickou symetrií a látky amorfní)
- ❑ **látky anizotropní** - při průchodu světelného paprsku anizotropním krystalem dochází k jeho dvojlomu. V každé anizotropní látce existuje jeden nebo dva směry, ve kterých se procházející paprsek chová jako v látkách izotropních. Rozlišujeme potom anizotropní látky jednoosé a dvojosé.

Látky (minerály) anizotropní jednoosé I

Všechny látky s krystalografickou symetrií tetragonální, hexagonální a trigonální.

Existuje jediný směr, ve kterém nedochází k dvojlomu vstupujícího světelného paprsku. Tento směr je směrem optické osy (osa z).

V libovolném jiném směru dochází k dvojlomu paprsku a vznikají dva na sebe kolmo polarizované paprsky šířící se různou rychlostí a mající pro danou látku i různé indexy lomu. Největší rozdíly v rychlostech a indexech lomu obou paprsků jsou ve směru kolmém na optickou osu.

Paprsky se označují jako **řádny** (ordinární, označení o) a **mimořádný** (extraordinární, označení e).

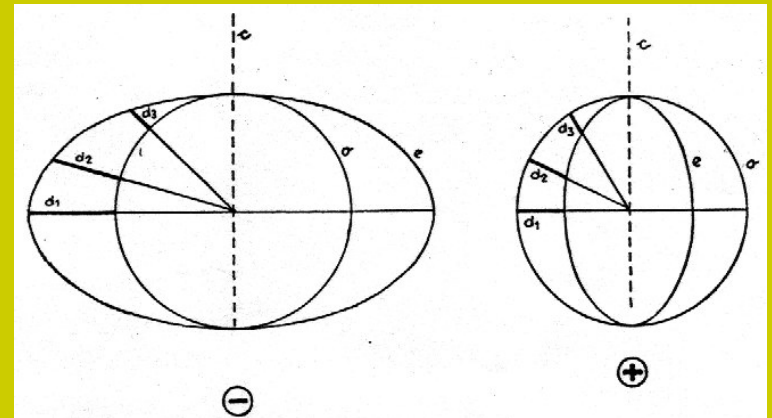
Látky (minerály) anizotropní jednoosé II

Podle rychlostí paprsků rozdělujeme jednoosé minerály do dvou skupin:

- **látky opticky negativní** - rychlost paprsku mimořádného je větší než řádného ($e > o$)
- **látky opticky pozitivní** - rychlost paprsku mimořádného je menší než řádného ($e < o$).

Rychlost paprsku a jeho index lomu jsou v nepřímém poměru a proto platí:

- **látky opticky negativní** $e > o$ a $\varepsilon < \omega$
- **látky opticky pozitivní** $e < o$ a $\varepsilon > \omega$



Látky (minerály) anizotropní jednoosé III

Označení pozitivní a negativní charakter látky souvisí s hodnotou **dvojlomu** (D), který je vyjádřen jako $D = \varepsilon - \omega$.

Pro označování indexů lomu se často používá symbolů α a γ . Větší index lomu je vždy γ , menší je α . Jednoosé minerály je pak možno charakterizovat:

- ❑ **látky opticky negativní** - $\omega = \gamma$, $\varepsilon = \alpha$, *ve směru optické osy je index α*
- ❑ **látky opticky pozitivní** - $\omega = \alpha$, $\varepsilon = \gamma$, *ve směru optické osy je index γ*

Toto značení lépe odpovídá značení u minerálů dvojosých (viz dále).

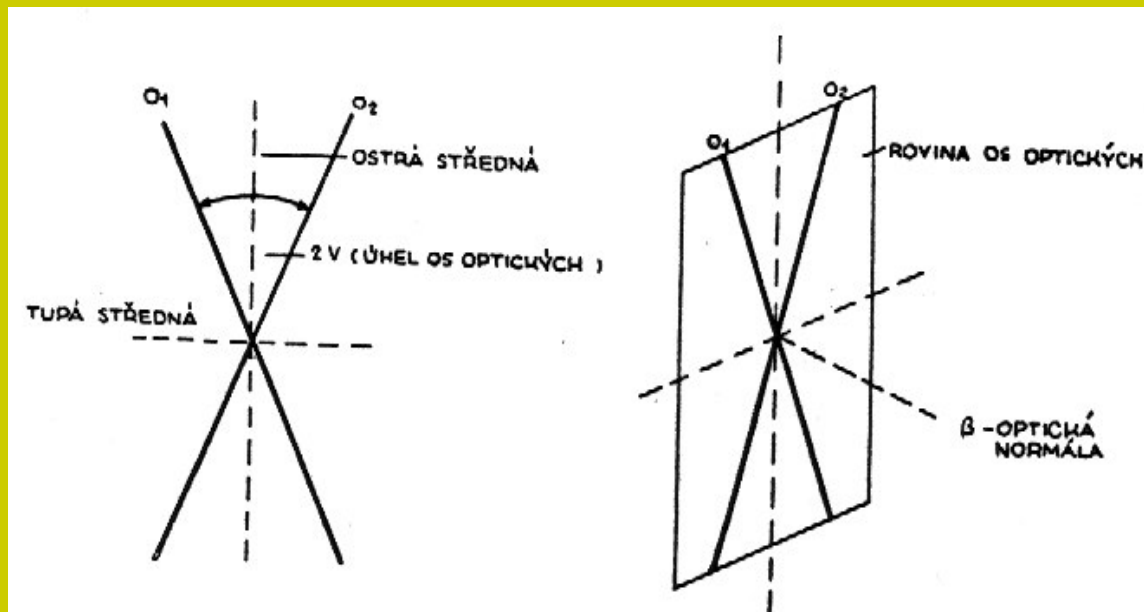
Látky (minerály) anizotropní dvojosé I

Do této skupiny patří látky z krystalografických soustav rombické, monoklinické a triklinické.

Existují v nich dva směry, ve kterých se světelná vlna šíří bez dvojlomu.

Optické osy spolu svírají *úhel optických os* ($2V$). Rovina proložená optickými osami se označuje jako *rovina optických os*.

Tři hlavní indexy lomu se označují α , β , γ , index β (optická normála) je vždy kolmý k rovině optických os. Zbylé dva indexy lomu α a γ leží v rovině optických os - jeden z nich pólí ostrý úhel optických os a označuje se jako *ostrá středná*, druhý z nich pólí tupý úhel optických os a označuje se jako *tupá středná*.



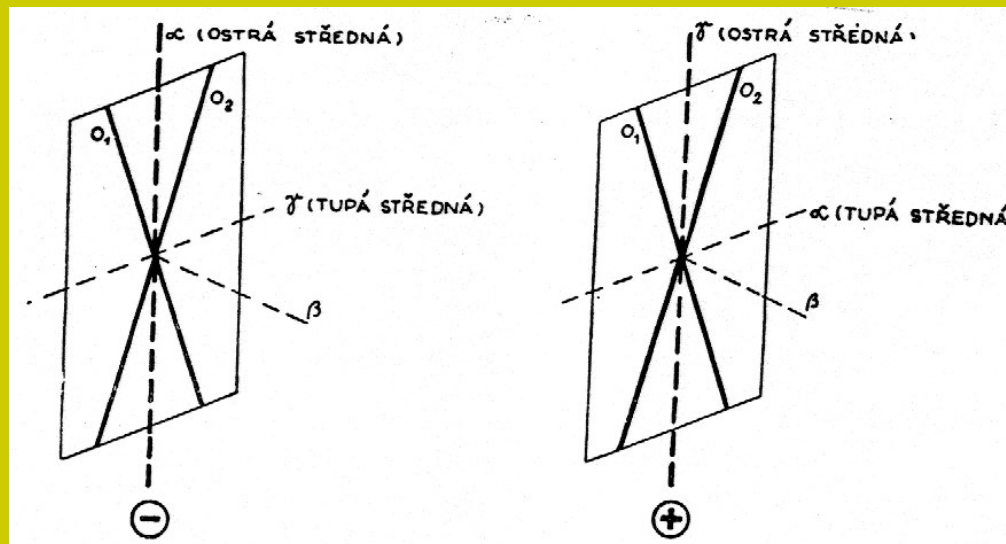
Látky (minerály) anizotropní dvojosé II

Pokud ostrou střednou tvoří index α , označuje se dvojosý minerál jako **opticky negativní**, je-li ostrá středná tvořena indexem γ , je minerál **opticky pozitivní**.

Důležitým údajem je tzv. **maximální dvojlom D** , který se vypočte jako

$$D = \gamma - \alpha.$$

Protože oba indexy leží v rovině optických os, mají právě tyto řezy nejvyšší dvojlom. Index lomu β není aritmetickým průměrem ostatních dvou indexů lomu.



Pozorování minerálů v polarizačním mikroskopu

Minerály můžeme pozorovat ve dvou pracovních režimech:

1. při pozorování s **jedním nikolem (PPL)** pozorujeme v lineárně polarizovaném světle, zasunut je pouze polarizátor, zatímco analyzátor je vyjmut z dráhy světelného svazku. Tímto způsobem můžeme u minerálů pozorovat barvu, pleochroismus, tvar, štěpnost, uzavřeniny, reliéf a Beckeho linku.
2. při pozorování ve **zkřížených nikolech (XPL)** je spolu s polarizátorem zasunut i analyzátor. Roviny kmitu obou nikolů jsou navzájem kolmé – polarizátor propouští světlo polarizované v rovině předozadní a analyzátor propouští světlo kmitající v rovině pravolevé. Při tomto pozorování lze rozlišovat izotropní a anizotropní minerály, sledovat zhášení, stanovovat výši dvojlomu, určovat charakter minerálu a ráz délky.

PPL - barva a pleochroismus I

Barva je pro látky v polarizovaném světle velmi často důležitým diagnostickým znakem.

Látky bezbarvé absorbují všechny vlnové délky viditelného spektra přibližně stejně. Látky vykazující barevnost v polarizovaném světle absorbují různým způsobem různé vlnové délky.

Barva látek (absorpce světla) může být u anizotropních minerálů závislá na krystalovém směru. Existence různých odstínů a intenzit barev při různé orientaci krystalu jsou zahrnovány do obecného pojmu **pleochroismus**.

Tento jev je v mnoha případech velmi důležitý při identifikaci minerálů. Intenzita tohoto efektu klesá s klesající tloušťkou preparátu.

PPL - barva a pleochroismus II

Typ pleochroismu závisí na optických vlastnostech látky:

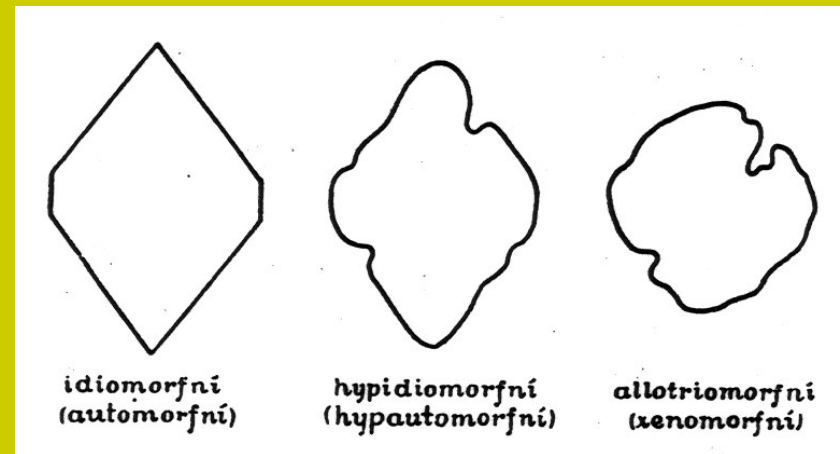
- **izotropní barevné látky** jsou nepleochroické (příkladem je granát)
- u **jednoosých** barevných látek je jiná absorpce ve směru ε a jiná ve směru ω . Objevují se dvě charakteristické barvy v polohách po 90° . Tento jev se označuje jako ***dichroismus***. Maximální rozdíly v pleochroických barvách jsou v řezech maximálního dvojlomu. Řezy rovnoběžné s (001) pleochroismus nejeví.
- **dvojosé** barevné látky mají různou absorpci světla podle tří základních optických směrů. Lze je tedy označovat jako ***trichroické***. Řezy kolmé k libovolné optické ose pleochroismus nejeví.

PPL – tvar minerálů

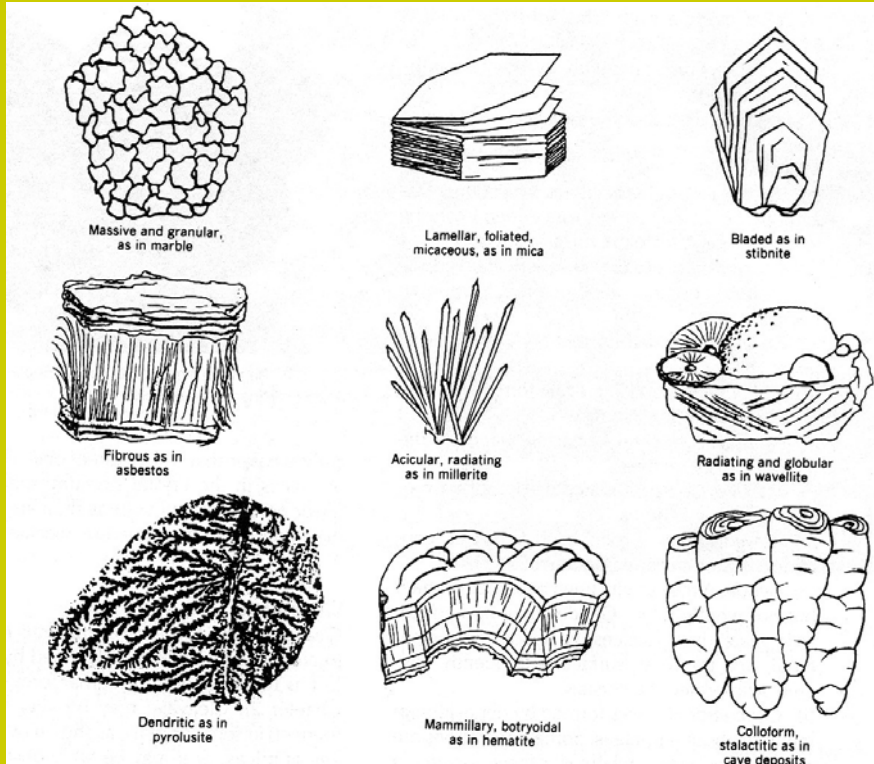
Omezení a tvar minerálu mohou být důležitým diagnostickým znakem.

Podle tvaru průřezu rozlišujeme omezení:

- *automorfni* (dokonalé omezení krystalovými plochami)
- *hypautomorfni* (částečné omezení krystalovými plochami)
- *xenomorfni* (nepravidelné omezení)



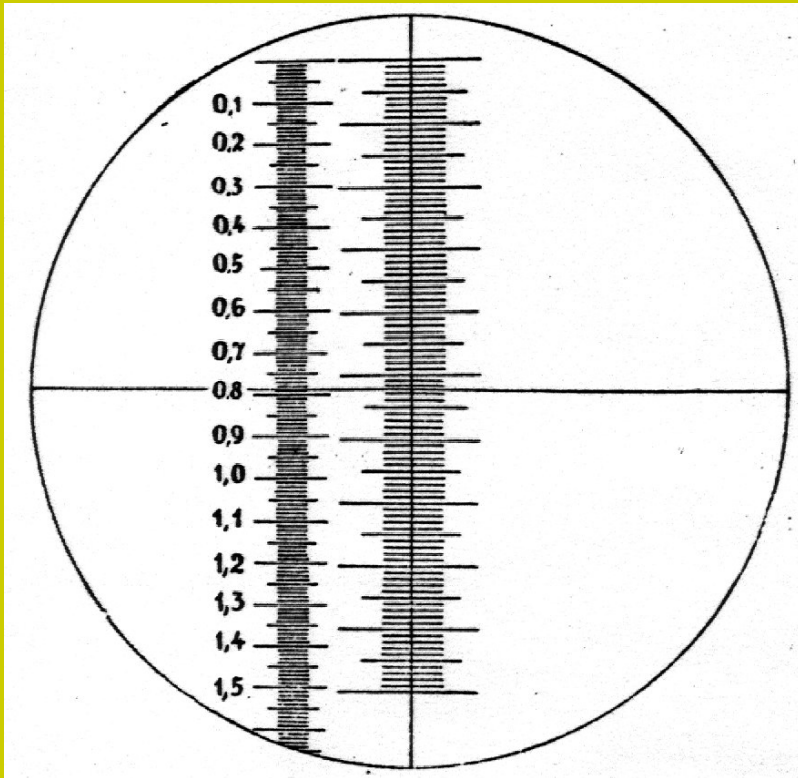
PPL – stavba minerálních zrn



Některé výviny a stavby krystalových zrn jsou velmi nápadné a pro řadu látek charakteristické např.:

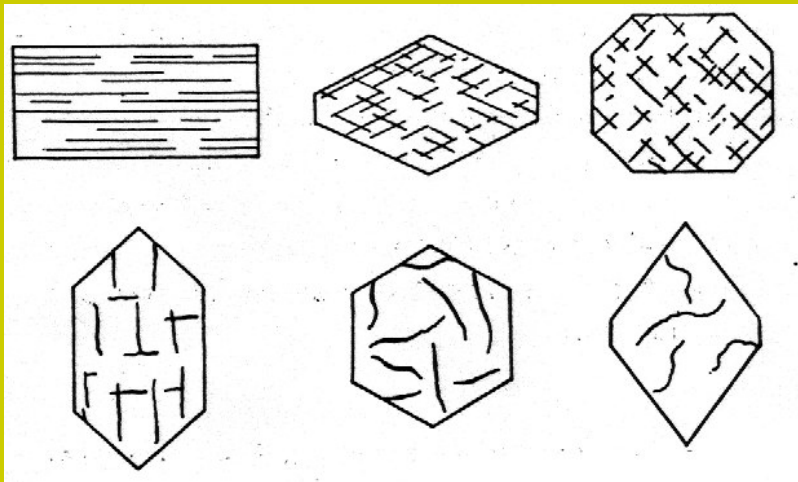
- ✓ kostrovitý vývin
- ✓ vláknitá stavba
- ✓ sférolitická stavba zrna s radiálně paprsčitým uspořádáním vláknitých krystalků
- ✓ kolomorfní stavba zrna

PPL – velikost zrna



Velikost zrna nebývá zpravidla významným diagnostickým znakem, ale u sedimentárních hornin je tato informace nezbytná pro klasifikaci horniny. K měření se používá mikrometrický okulár, který má vyrytou škálu po 100 dílcích. Pro určení velikosti musíme stanovit, jakému zlomku milimetru odpovídá jeden dílek (pro objektivy s různým zvětšením je to různé).

PPL – štěpnost



Štěpnost je jedním z nejdůležitějších diagnostických znaků. Štěpnost minerálů definujeme jejím směrem (zpravidla vyznačujeme Millerovými indexy) a kvalitou:

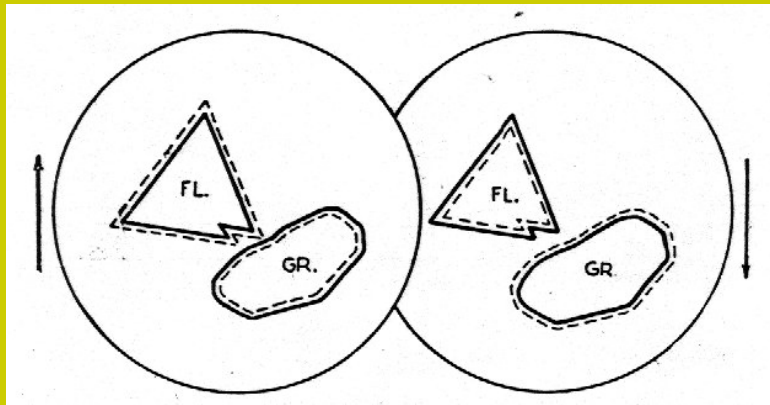
- velmi dokonalá štěpnost
- dokonalá štěpnost
- dobrá štěpnost
- nedokonalá štěpnost
- špatná štěpnost
- zcela chybějící štěpnost

Důležitým vodítkem při určování minerálů je i počet štěpných systémů a jejich vzájemný vztah.

PPL – reliéf a povrch

Reliéf je projevem rozdílných indexů lomu dvou sousedících zrn různých látek. Pokud má látka vyšší, resp. nižší index lomu než okolní látky, je její reliéf vůči okolí pozitivní (vystupující), resp. negativní (propadající). Má-li látka a její okolí velmi blízké indexy lomu, reliéf nepozorujeme.

PPL – Beckeho linka

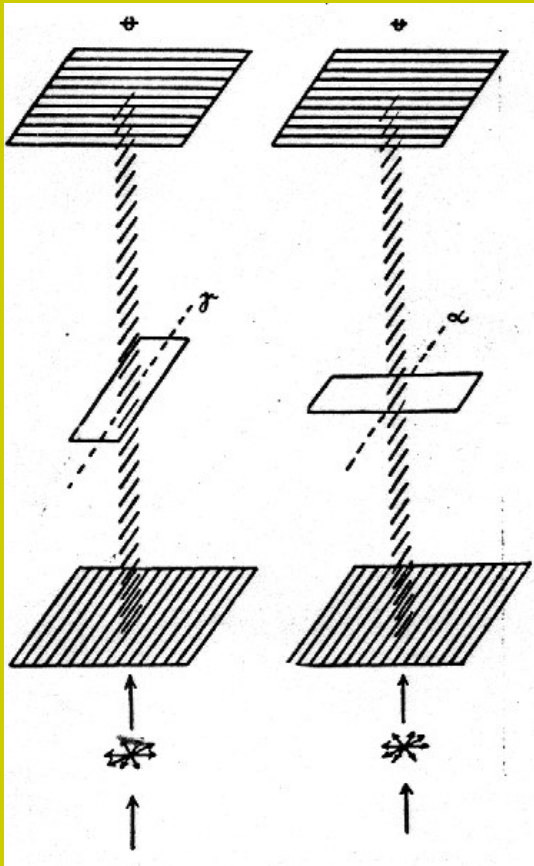


granát a fluorit v kanadském balzámu

Beckeho linka je jev, který se používá pro určení optického prostředí s vyšším resp. nižším indexem lomu na hranici zrn dvou látek

- ✓ pozorování se provádí se sníženým kondenzorem bez kondenzorové čočky a za použití clonky
- ✓ na rozhraní dvou různě lomivých látek (minerálů) se při jemném rozostření objeví tzv. *Beckeho linka*
- ✓ platí pravidlo, že při zvedání tubu (snižování stolku) vstupuje Beckeho linka do prostředí opticky hustšího (s větším indexem lomu)

XPL – zhášení I



Stanovením způsobu zhášení lze určit minerál blíže definovat z hlediska krystalové soustavy.

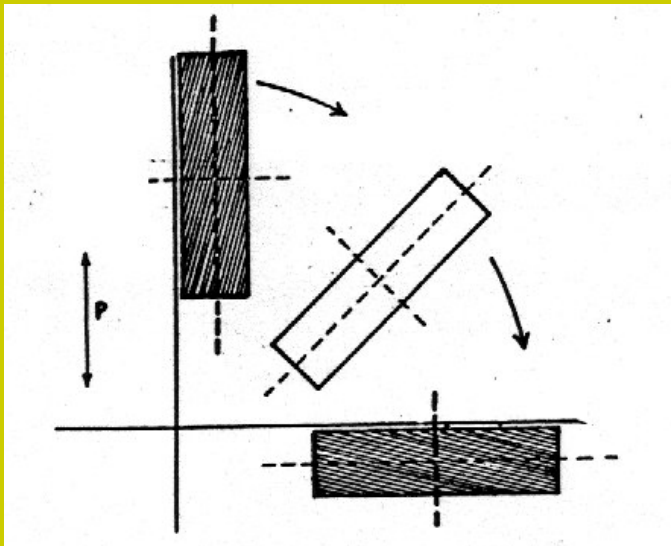
Izotropní látkou polarizované světlo prochází beze změny a na analyzátoru je zrušeno, takže při otáčení stolcem je zrno této látky stále tmavé.

U **anizotropních** látek jsou v ploše obecného řezu dva směry (u jednoosých minerálů ω nebo ε , u dvojosých minerálů α , β nebo γ), kterými paprsek prochází beze změn, takže při otáčení stolcem o 360° se každý tento směr ocitne v uvedené orientaci dvakrát. V těchto směrech dojde k vyhasnutí zrna, tj. průřez ztmavne.

XPL – zhášení II

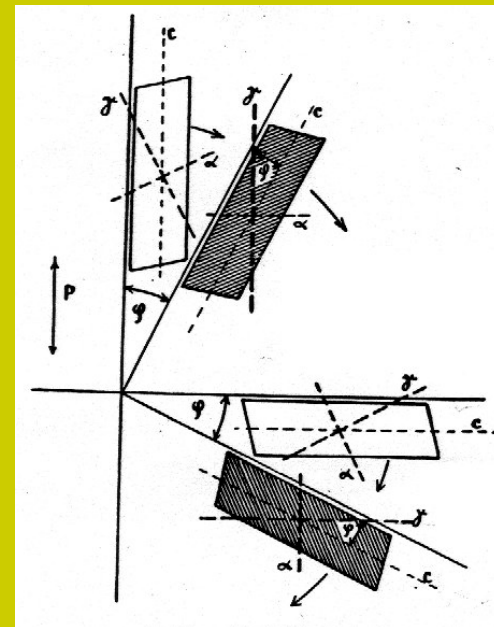
Zhášení rovnoběžné (přímé)

nastává, když minerál zháší tehdy, jsou-li jeho štěpné trhliny nebo omezení orientovány rovnoběžně s rovinou kmitu polarizátoru nebo analyzátoru.



Zhášení šikmé

je případ, kdy poloha zhášení je vzhledem ke krystalovému omezení nebo štěpným trhlinám orientována šikmo. Důležitou veličinou tzv. *úhel zhášení* φ , tj. odchylka polohy zhášení od roviny polarizátoru



XPL – zhášení III

Minerály isotropní		Minerály anisotropní				
		jednoosé		dvojosé		
amorfní látky	krychlová s.	šesterečná (+ trigonální) s.	čtverečná s.	kosočtverečná s.	jednoklonná s. pásma (100) : (001)	trojklonná s.
všechny řezy stále tmavé		← zhášení rovnoběžné →				zhášení šikmé

- rovnoběžné zhášení vykazují všechny látky, u kterých jednotlivé optické směry souhlasí se směry krystalografickými tzn. patří do soustavy hexagonální, trigonální, tetragonální nebo rombické
- u soustavy monoklinické zhášejí rovnoběžně pouze řezy v pásmu (100) : (001)
- všechny ostatní řezy monoklinických minerálů a látky triklinické zhášejí šikmo

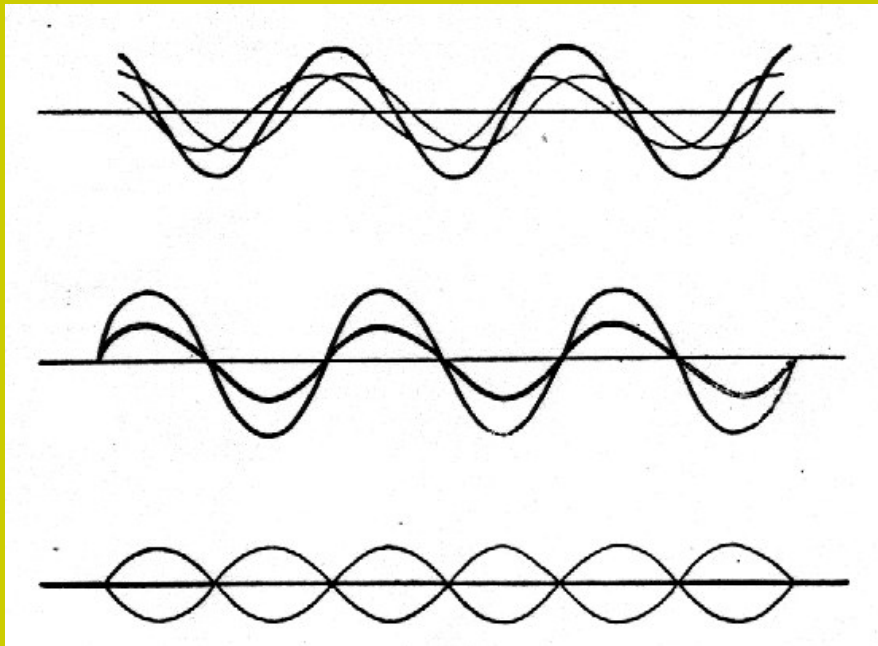
XPL – interferenční barvy I

Vychýlíme-li minerál ve zkřížených nikolech z polohy zhášení, můžeme pozorovat **interferenční (polarizační) barvy**. Nejcharakterističtější jsou při otočení minerálu z polohy zhášení o 45° .

V anizotropních látkách prochází světelný svazek v různých směrech různou rychlostí. Světelný svazek je rozštěpen na dvě kolmo polarizované vlny (kromě směru rovnoběžného s optickou osou), které mají různý index lomu a tedy i různou rychlost.

Tento jev se označuje jako **dvojlom** a maximální rozdíl mezi indexy lomu obou paprsků se označuje jako **maximální dvojlom**.

XPL – interferenční barvy II



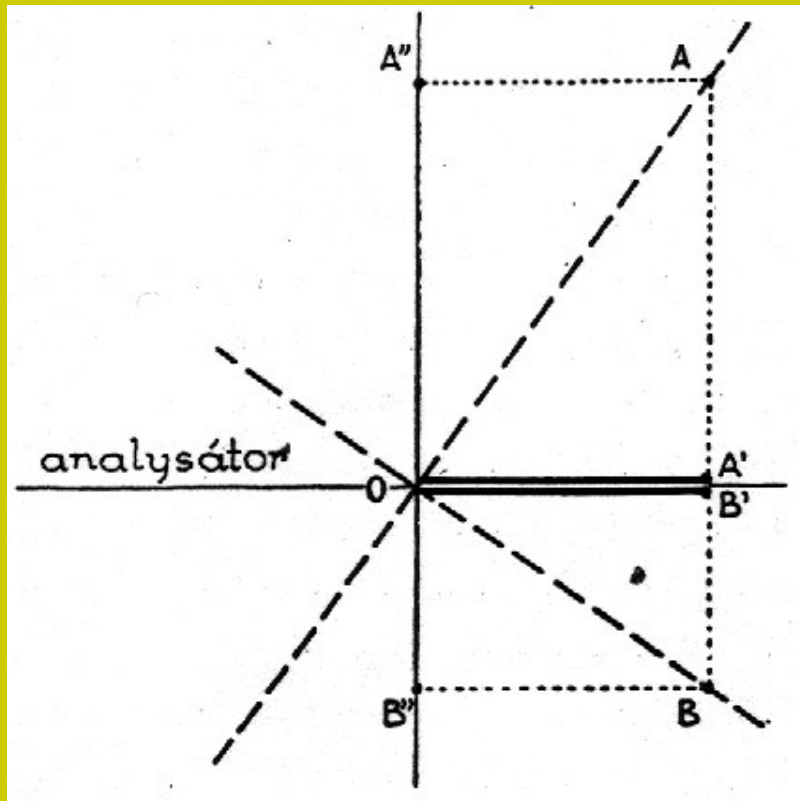
Skládání elektromagnetických vln ve stejném směru a se stejnou rychlostí se označuje jako **interference**.

Pokud jsou interferující vlny ve fázi, dochází při jejich skládání k zesílení amplitudy.

Při fázovém posunu vln o polovinu vlnové délky, dojde při interferenci k vzájemnému vyrušení.

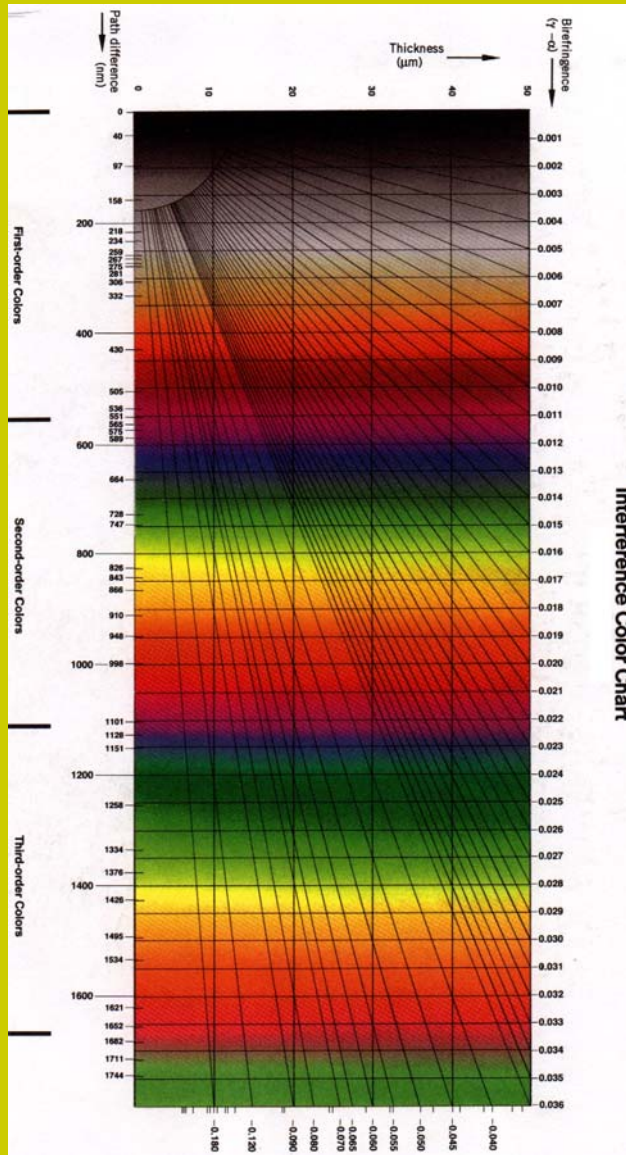
Při zcela obecném fázovém posunu interferujících vln je amplituda výsledné vlny dána součtem amplitud skládajících se vln v daném bodě.

XPL – interferenční barvy III



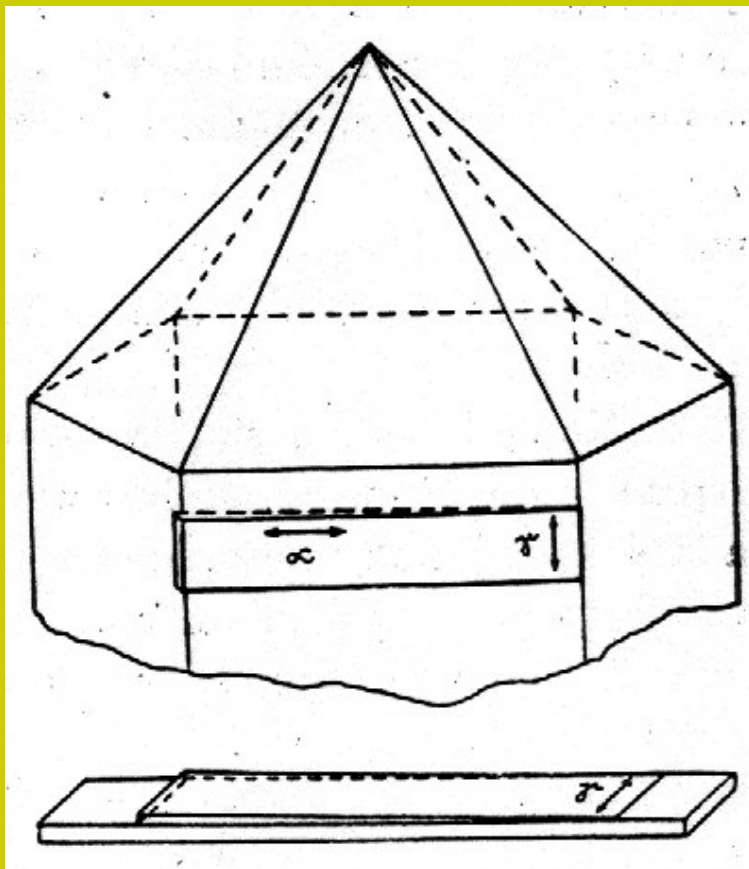
- polarizované světlo je při průchodu anizotropním preparátem rozloženo na dvě kolmo orientované složky s různými rychlostmi (indexy lomu)
- navzájem zpožděné paprsky dopadají na analyzátor a rozkládají se opět na dvě složky z nichž jedna je k rovině kmitu analyzátoru kolmá a druhá je s ní rovnoběžná
- kolmo kmitající paprsky se zruší, rovnoběžné projdou
- konečná **interferenční barva** je pak výsledkem interference různě zpožděných svazků

XPL – interferenční barvy IV



- Interferenční barvy se rozdělují podle Newtonovy barevné škály do řádů:
- ✓ nízké interferenční barvy jsou barvy I. řádu [podle stoupajícího zpoždění černá (0 nm), šedomodrá (158 nm), bílá (259 nm), žlutá (332 nm), červená (536 nm)]
 - ✓ jako střední se označují barvy II. a III. řádu
 - ✓ vysoké interferenční barvy jsou IV. a vyššího řádu
 - ✓ výška interferenční barvy závisí i na tloušťce preparátu

XPL – kompenzátory



Kompenzační destičky se používají pro stanovení některých optických vlastností.

- nejvíce používaná je sádrovcová destička, která má zpoždění 560 nm,
- slídová destička („čtvrtundulační“) má zpoždění 150 nm (šedá barvy) tj. jedna čtvrtina vlnové délky natriového světla
- křemenný klín je destička zhotovená z křemene a její síla v jednom směru vzrůstá

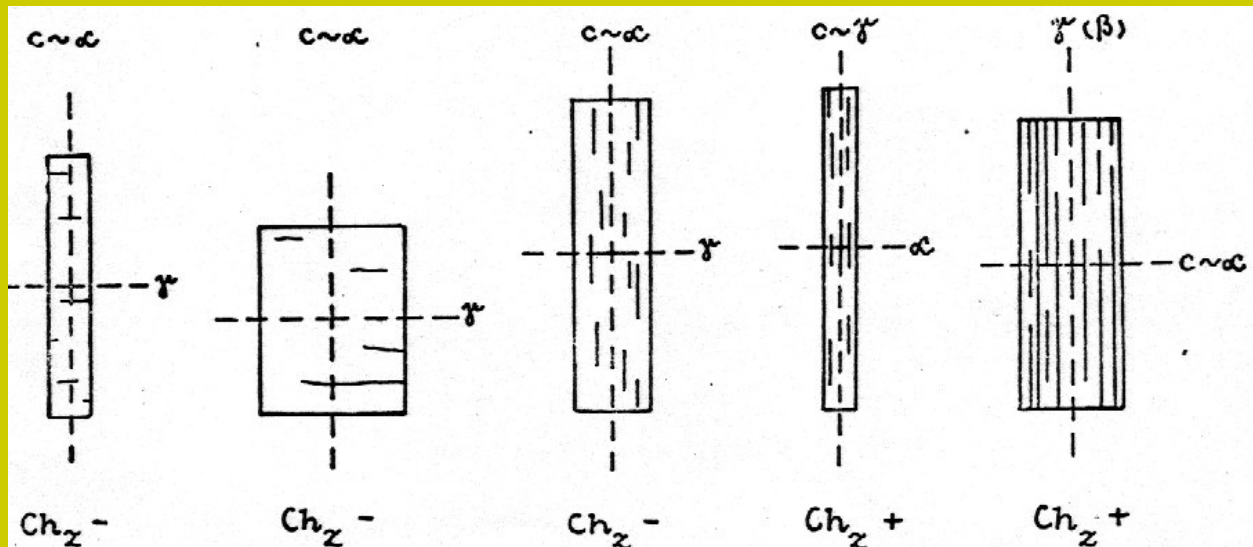
Optická orientace všech destiček je shodná, po délce mají menší index lomu, napříč mají větší index lomu.

XPL – charakter zóny (ráz délky)

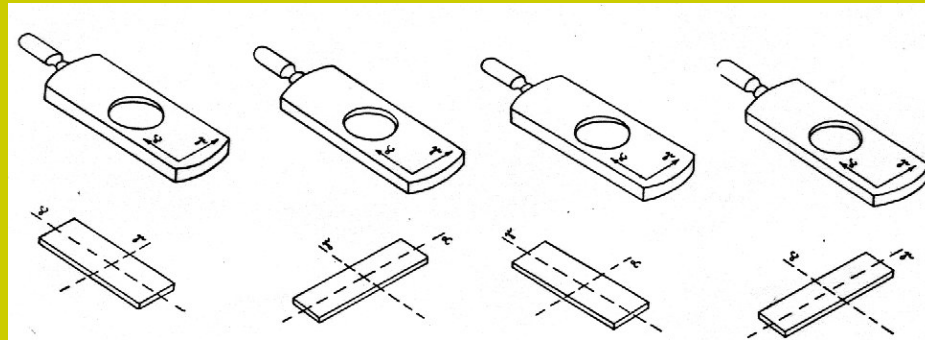
Tato vlastnost může být sledována pouze u minerálů protažených podle některé krystalové osy kdy určíme, zda je podél protažení orientován menší nebo větší index lomu.

Má-li průřez zrnem po své délce větší index lomu, je jeho charakter zóny (ráz délky) pozitivní (Chz+).

Je-li po délce menší index lomu, je charakter zóny negativní (Chz-).



XPL – stanovení rázu délky



Sloupcovitý minerál natočíme protažením ve směru SZ – JV (směr zasouvání kompenzátoru) a zasuneme sádrovcovou destičku.

Pokud je orientace indexů lomu kompenzační destičky a látky shodná (tj. u destičky i látky jde vyšší, resp. nižší index lomu stejným směrem) interferenční barvy se skládají směrem k vyšším řádům.

Je-li orientace vyšších, resp. nižších indexů lomu látky a kompenzační destičky navzájem opačná, interferenční barvy klesnou k nižšímu řádu.

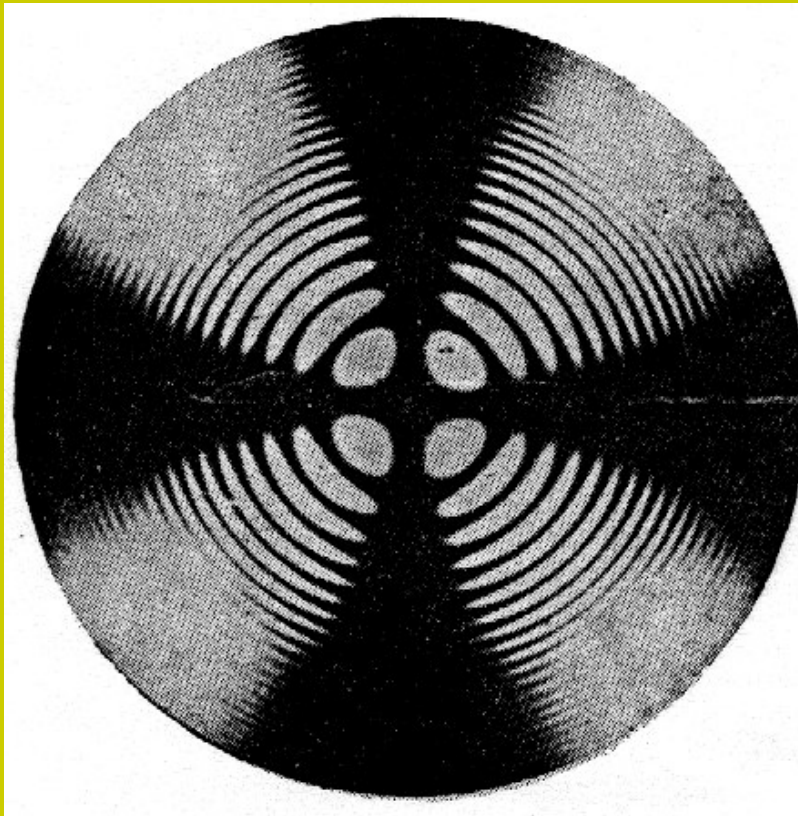
XPL – optický charakter

Optický charakter označujeme symbolem Chm+ nebo Chm-. Jeho stanovení provádíme pomocí tzv. **konoskopického** obrázku.

Postup při přípravě mikroskopu pro toto pozorování je následující:

- ✓ najdeme vhodný řez zrnem minerálu
- ✓ nastavíme silnější objektiv (nejčastější 50x zvětšující) a zaostříme
- ✓ přesvědčíme se, že objektiv je dobře zcentrovaný a kondenzor pod stolkem
v poloze zcela nahoře
- ✓ pro pozorování konoskopického obrázku zkřížíme nikoly a zasuneme Bertrandovu čočku, popř. u mikroskopů kde není, můžeme pozorovat konoskopický obrázek po vyjmutí okuláru.

Optický charakter – látky jednoosé



Pro přípravu konoskopického obrázku jednoosých látek jsou nejvhodnější řezy kolmé na optickou osu.

Světelné paprsky procházející zrnem pod různými úhly. Uprostřed zorného pole jdou paprsky ve směru optické osy a jsou na preparát téměř kolmé.

Čím dále od středu tím více šikmo paprsky dopadají a tím větší mají hodnotu dvojlomu. Soustředné kružnice s konstantním dvojlomem se označují jako **izochromáty**.

Optický charakter – látky jednoosé



Vzdálenost mezi izochromátami je dána výškou dvojlomu resp. tloušťkou řezu – čím větší dvojlom nebo silnější preparát, tím hustší je uspořádání izochromát.

Kromě soustředných izochromát se v konoskopickém obrázku jednoosých látek objevuje černý kříž, jehož směry ramen souhlasí s rovinami kmitu nikolů.

Ramena kříže se směrem od středu rozšiřují. Na rozdíl od dvojosých látek se tento kříž při otáčení stolek nemění.

Není-li řez kolmý k optické ose, je kříž konoskopického obrázku vychýlen ze středu, případně jsou vidět jen jeho ramena.

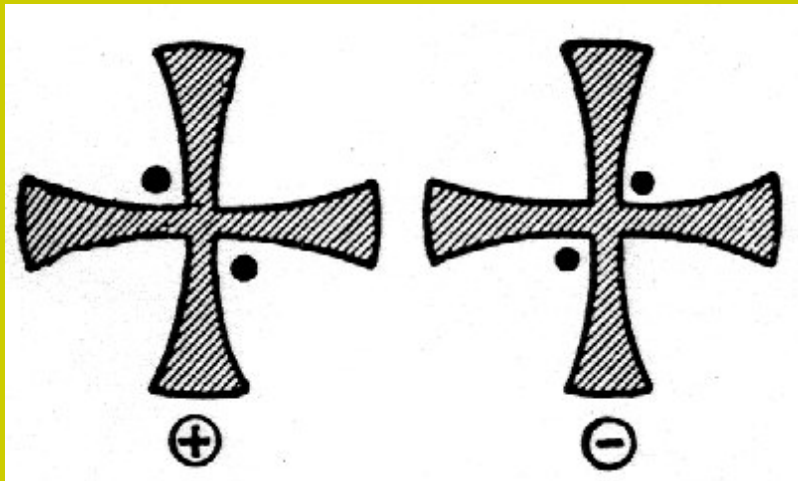
Optický charakter – látky jednoosé

Pro určení optického charakteru látky používáme kompenzačních destiček. Použijeme-li sádrovcovou destičku, objeví se po jejím zasunutí do výřezu v tubu v zorném poli modré a žluté skvrny. Podle umístění jednotlivých barevných skvrn v kvadrantech provedeme stanovení optického charakteru minerálu.

Jsou-li modré skvrny v I. a III. kvadrantu (žluté jsou ve II. a IV. kvadrantu) je **optický charakter látky pozitivní (+)**. Při opačném uspořádání barevných skvrn (modré skvrny ve II. a IV. kvadrantu) je **optický charakter látky negativní (-)**.

V tomto případě se často uvádí zjednodušené pravidlo: Spojnice modrých skvrn dává se směrem zasouvání sádrovcové destičky znaménko pro charakter minerálu (pro pozitivní minerál se tyto linie kříží).

Optický charakter – látky jednoosé



U minerálů s vysokým dvojlomem je vhodnější použít slídové destičky.

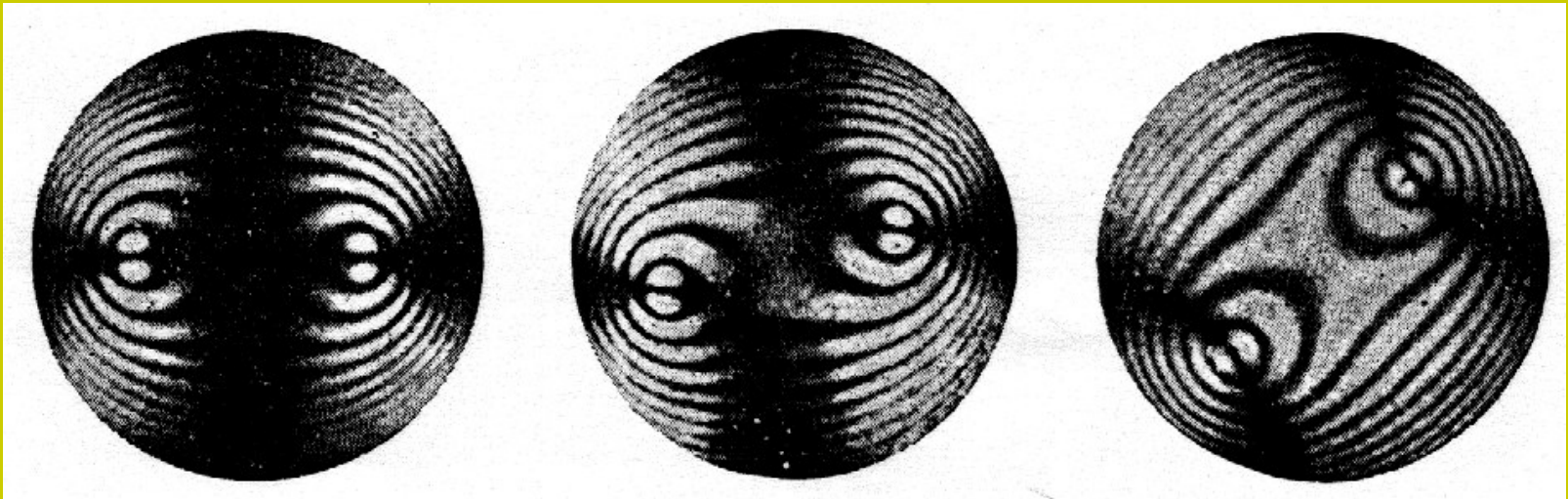
Po jejím zasunutí s objeví ve dvou protilehlých kvadrantech černé skvrny, které vlastně odpovídají žlutým skvrnám u destičky sádrovcové.

Jsou-li tyto skvrny v II. a IV. kvadrantu, má látka pozitivní optický charakter.

Optický charakter – látky dvojosé

Vyhledání řezu vhodného pro konoskopický obrázek je u dvojosých látek mnohem obtížnější. Ideální řez je kolmý k ostré středné a ten se od ostatních řezů liší dvojlomem, který je relativně nízký (uplatňují se v něm optické směry α , β nebo β , γ).

Samotný konoskopický obrázek vypadá tak, že souhlasí-li optické směry s orientací nikolů, objeví se černý kříž, jehož ramena jsou v jednom směru (podle optické normály) široká a kolmo úzká. Na úzkém rameni jsou výchozy optických os. Pootočíme-li výbrusem o 45° , kříž se rozestoupí na dvě ramena hyperboly.

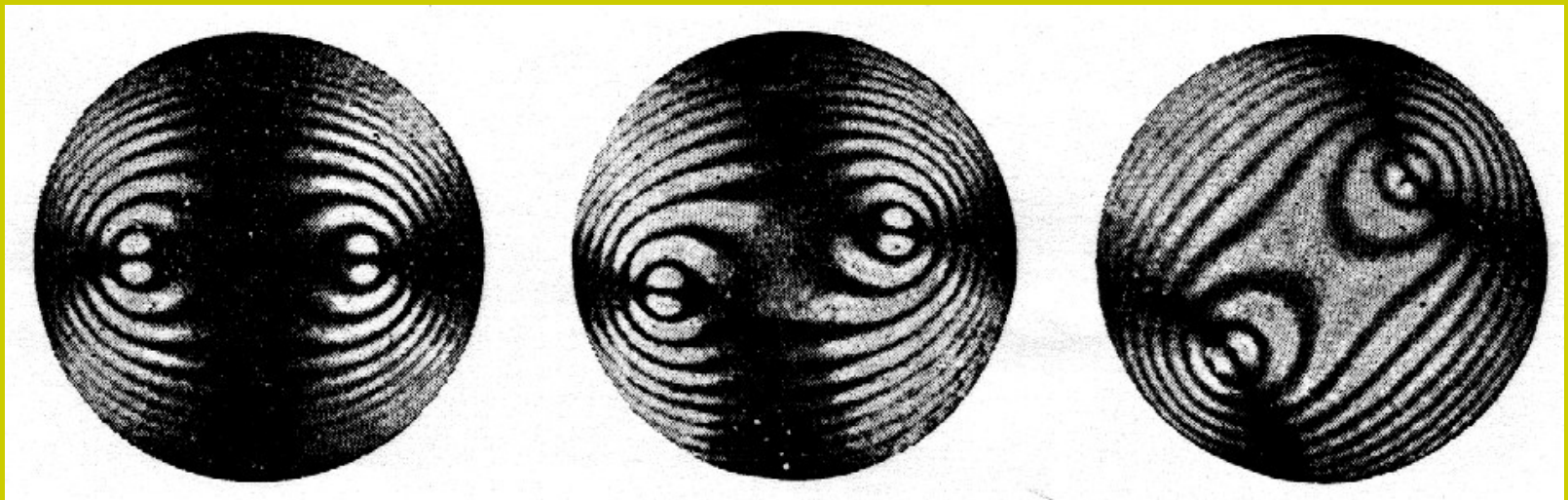


Optický charakter – látky dvojosé

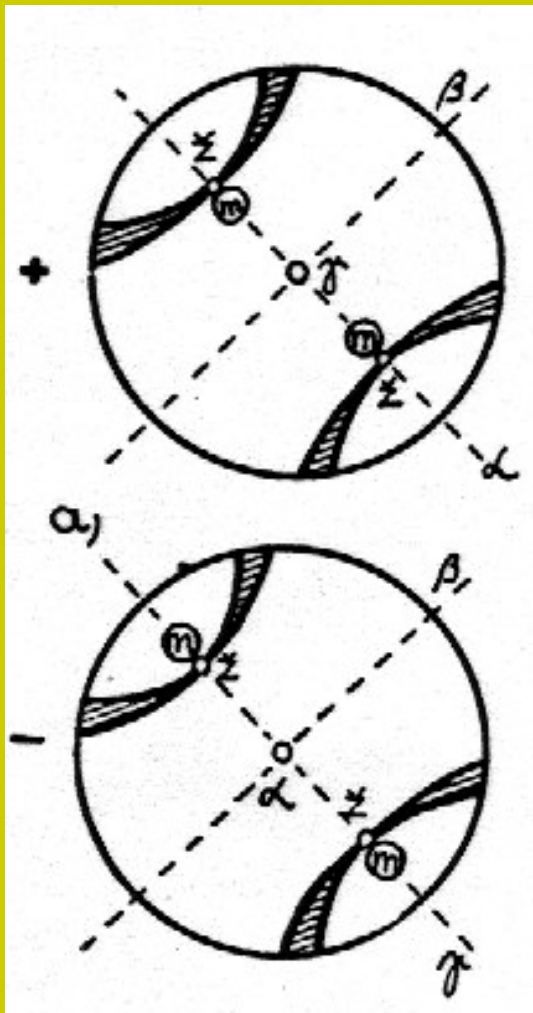
Na vrcholech obou křivek jsou výchozy optických os - čím jsou obě křivky od sebe vzdálenější, tím je větší úhel optických os.

Ramena hyperbol se směrem od výchozů optických os rozšiřují.

Izochromáty zde nejsou kruhové, ale tvoří jakési „vrstevnice“ kolem dvou středů (výchozů optických os). Interferenční barvy se zvyšují směrem od optických os. Hustota izochromát závisí na dvojlomu a tloušťce preparátu.



Optický charakter – látky dvojosé III

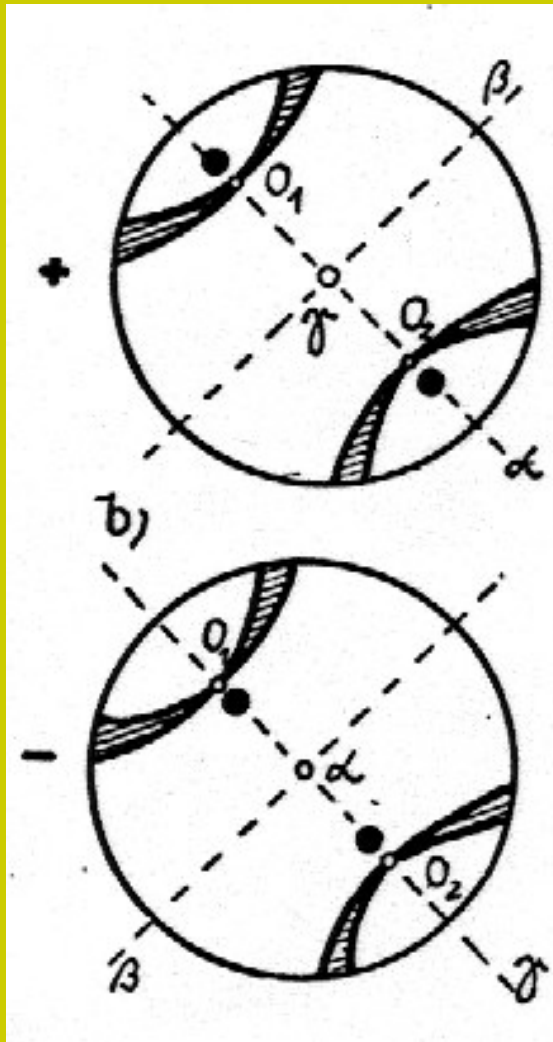


Pro určení optického charakteru stočíme výbrus tak, aby spojnice výchozů optických os souhlasila se směrem zasouvání kompenzační destičky.

Zasuneme-li sádrovcovou destičku, objeví se opět modré a žluté skvrny, podobně jako u jednoosých minerálů.

Zde platí pravidlo: jsou-li modré skvrny na vnější (vypuklé) straně ramen hyperbol, je minerál opticky pozitivní. Jsou-li modré skvrny na vnitřní straně ramen hyperbol, je minerál opticky negativní.

Optický charakter – látky dvojosé



Také u slídrové destičky je princip shodný
s jednoosými minerály tj. černé skvrny odpovídají žluté barvě při použití destičky sádrovcové tzn., že jsou-li černé skvrny na vnitřní straně hyperbol je optický charakter látky pozitivní.