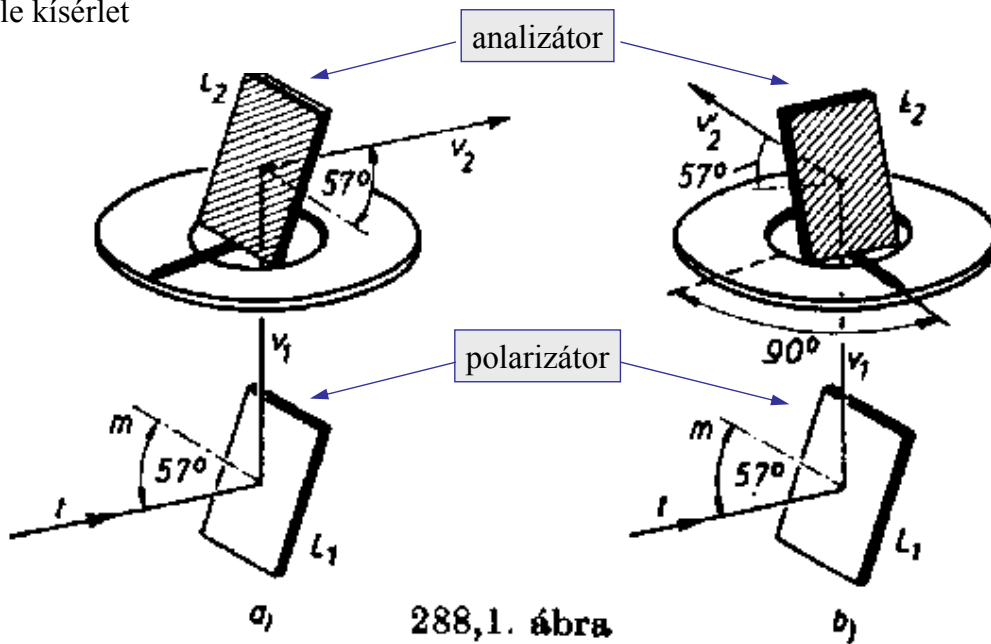


Polarizáció. Kettőtörés, dikroizmus, optikai aktivitás. Polarizátorok, a fény polarizációján alapuló eszközök

A fény polarizációja, polarizáció visszaverődésnél

- Malus-féle kísérlet

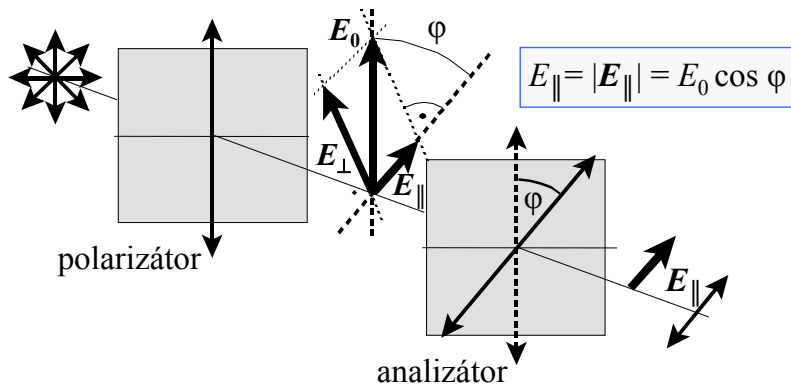


288,1. ábra

Az analizátorra beeső J_0 és a kilépő J_φ és fényintenzitások közötti viszonyt a **Malus-féle törvény** írja le:

$$J_\varphi = J_0 \cos^2 \varphi$$

Magyarázata:



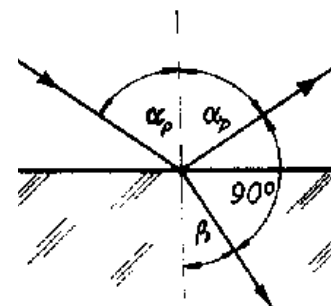
- A **polarizátor** csak egy **adott** rezgési síkba eső fényhullámot engedi át, azaz a természetes fény rendezetlen rezgési síkjai közül **kiválaszt egyet** (vagyis polarizálja a fényt).
- A polarizátorhoz képest φ szöggel elforgatott **analizátor** ugyancsak az általa kijelölt síkba eső térerősség komponensét engedi át. Az átengedett térerősségből az intenzitás már kiszámítható:

$$J_\varphi = \frac{E_\parallel^2}{2Z} = \frac{(E_0 \cos \varphi)^2}{2Z} = \frac{E_0^2}{2Z} \cos^2 \varphi = J_0 \cos^2 \varphi$$

Brewster-féle szög (polarizációs szög)

- A tapasztalat szerint, ha egy átlátszó közegre természetes fény esik, és a megtört és a visszavert sugarak egymásra merőlegesek, akkor a visszavert fény lineárisan poláros, és a rezgési síkja merőleges a beesési síkra (**Brewster törvénye**).
- Ezt a beesési szöget nevezik Brewster-féle (vagy polarizációs) szögnek.

$$n = \frac{\sin \alpha_p}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha_p}{\sin(90^\circ - \alpha_p)} = \frac{\sin \alpha_p}{\cos \alpha_p} = \operatorname{tg} \alpha_p$$



$$\operatorname{tg} \alpha_p = n$$

- A Malus-féle kísérletnél használt üveglemezre a polarizációs szög 57° . Éppen ezért 57° -os a beesési szög a kísérletnél!

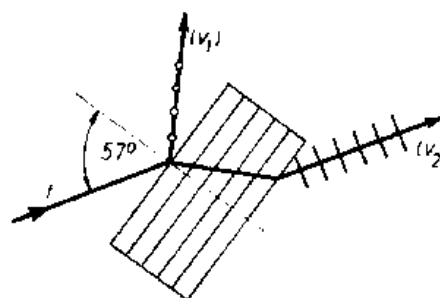
Polarizáció törésnél

- Brewster-törvénye alapján azt várhatnánk, hogy a közegbe behatoló fény is olyan lineárisan poláros lesz, amelynek a rezgési síkja a beesési sík.
- A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy a polarizációs szög alatt beeső természetes fény esetén a közegbe behatoló fény csak **részlegesen poláros**. Egy analizátort forgatva maximális fényintenzitást kapunk a beesési síkkal párhuzamos állásnál, míg minimális intenzitást erre merőleges állású (kereszttezett) analizátorra.
- Az átmenő fény polarizációjának fokát a Q **polarizációs fokkal** jellemezzük:

$$Q = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}},$$

ahol J_{\max} és J_{\min} az analizátor forgatásakor mért maximális és minimális intenzitás. Látható, hogy $0 \leq Q \leq 1$, és természetes fényre $Q = 0$, lineárisan poláros fényre $Q = 1$.

- Az átmenő fény polarizációs foka további töréseknél mindig növekszik, így egyre inkább megközelíti az 1 értéket.
- Így az ábrán látható üveglemez-sorozattal gyakorlatilag az átmenő fény is lineárisan polárossá tehető.



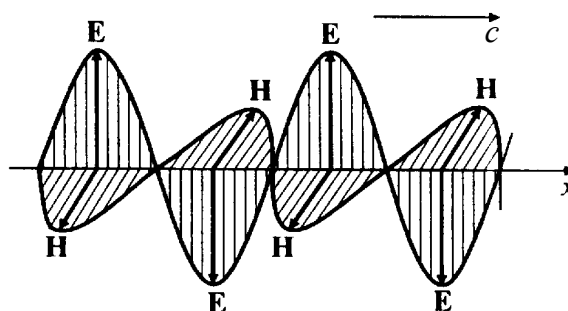
- A Malus-féle kísérlet azt mutatja, hogy a fény polarizálható.
- A fény polarizálhatósága azt mutatja, hogy a fény transzverzális hullám.
- A fényhullámok **transzverzális természete** a Maxwell-féle egyenletekből levezethető, ami azt mutatja, hogy az **elektromágneses fényelmélet számot ad a polarizációról** is.

Példák poláros fényhullámra (síkhullámok)

- **Lineárisan poláros fény**

$$\vec{E} = E_0 \sin \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) + \alpha \right] \cdot \vec{e}_y$$

$$\vec{H} = H_0 \sin \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) + \alpha \right] \cdot \vec{e}_z$$



az elektromos és mágneses térerősségek merőlegesek egymásra és a terjedési irányra, és két egymásra merőleges, a terjedési irányon átfektetett síkban rezegnek.

rezgési sík: az a sík, amelyben az E vektor rezeg.

polarizációs sík: a rezgési síkra merőleges sík (H vektor síkja).

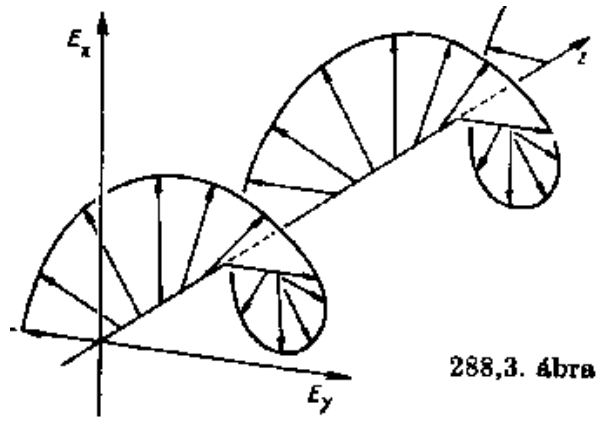
Két egymásra merőleges rezgési síkú, 0° vagy 180° fáziskülönbségű ($\delta = 0; \pi$) lineárisan poláros fény összege szintén lineárisan poláros fényt eredményez.

• **Ellipszisben poláros fény**

Az E és H vektorok a terjedési irányra merőleges síkokban lévő ellipszis mentén körbe forog.

A különböző síkokban a forgásban a síkok távolságának megfelelően fáziskülönbség van.

Két egymásra merőleges rezgési síkú lineárisan poláros fény összegének tekinthető.



288,3. ábra

• **Körben poláros fény poláros fény**

Az ellipszisben poláros fény speciális esete: az ellipszis kis- és nagy tengelye egyenlő ($a = b$).

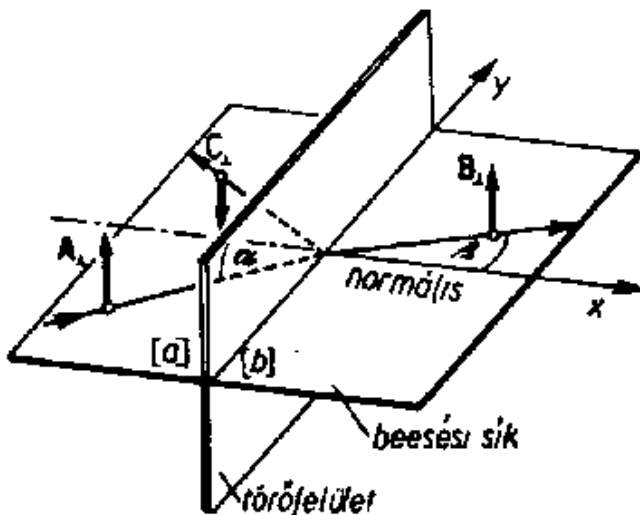
Két azonos amplitúdójú és 90° vagy 270° fáziskülönbségű és egymásra merőleges rezgési síkú lineárisan poláros fény összege ($A_x = A_y$ és $\delta = \pi/2 ; 3\pi/2$).

Természetes fény

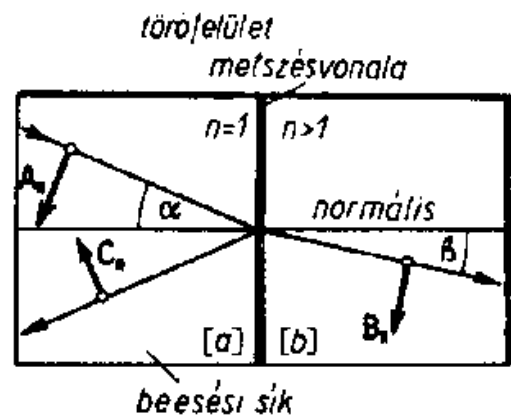
- A fényforrások egy jelentős részének a közvetlen fénye nem poláros.
- Az ilyen fényt természetes fénynek nevezik.
- *Magyarázata:* A fényforrást alkotó nagy számú atom egyenként ugyan poláros hullámvonulatot sugároz, azonban ezek rezgési síkja teljesen **rendezetlenül**, igen **gyorsan** változik, így a lehető legrövidebb mérési időre is egyetlen sík sem lehet kitüntetett.

Fresnel-féle formulák

A beesési síkra merőleges komponens
(s polarizáció)



A beesési síkban lévő komponens
(p polarizáció)



$$r_{\perp} = \frac{C_{\perp}}{A_{\perp}} = \frac{\cos \alpha - n \cdot \cos \beta}{\cos \alpha + n \cdot \cos \beta} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

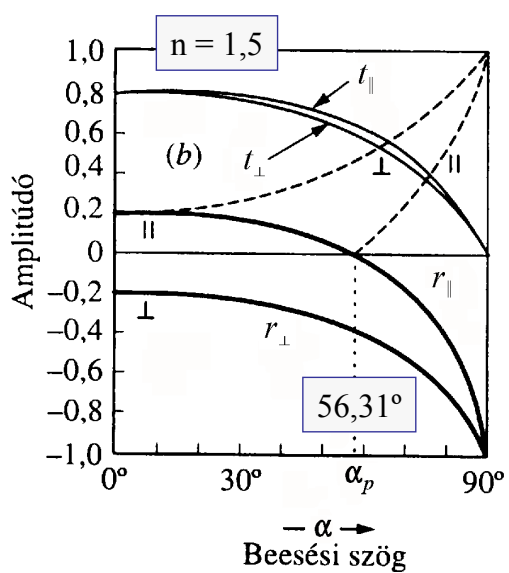
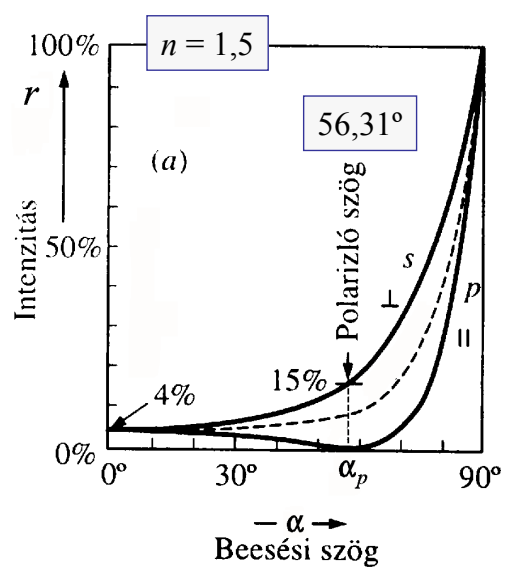
$$t_{\perp} = \frac{B_{\perp}}{A_{\perp}} = \frac{2 \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha + n \cdot \cos \beta} = \frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$r_{\parallel} = \frac{C_{\parallel}}{A_{\parallel}} = \frac{n \cdot \cos \alpha - \cos \beta}{n \cdot \cos \alpha + \cos \beta} = \frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg}(\alpha + \beta)}$$

$$t_{\parallel} = \frac{B_{\parallel}}{A_{\parallel}} = \frac{2 \cdot \cos \alpha}{n \cdot \cos \alpha + \cos \beta} = \frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}$$

Következmények

$$n > 1$$



$$r_{||} = \frac{\text{tg}(\alpha - \beta)}{\text{tg}(\alpha + \beta)} = 0$$

$$\updownarrow$$

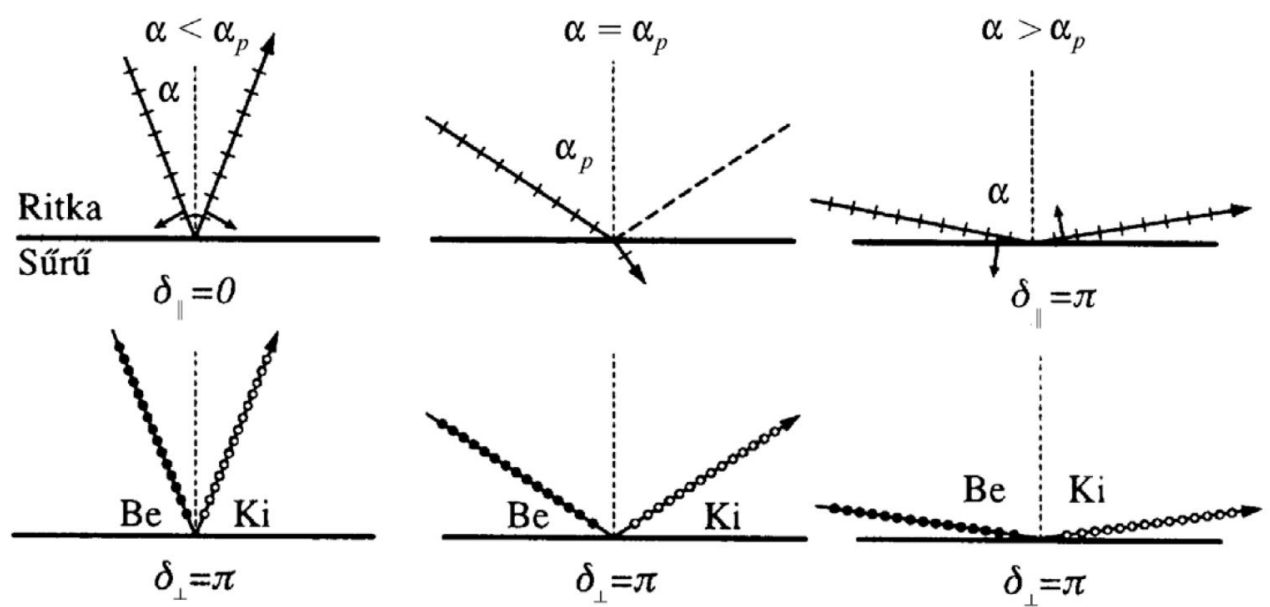
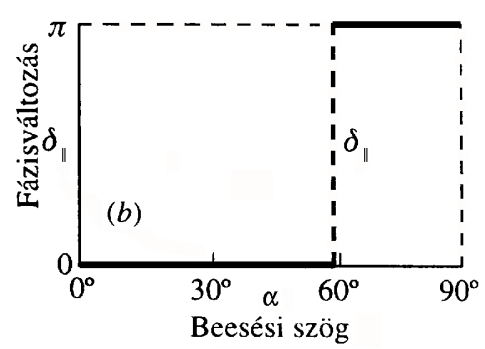
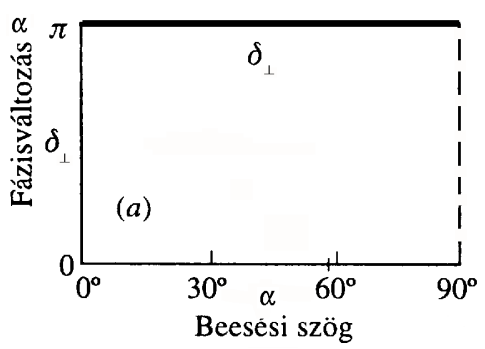
$$\text{tg}(\alpha + \beta) = \infty$$

$$\updownarrow$$

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

$$\updownarrow$$

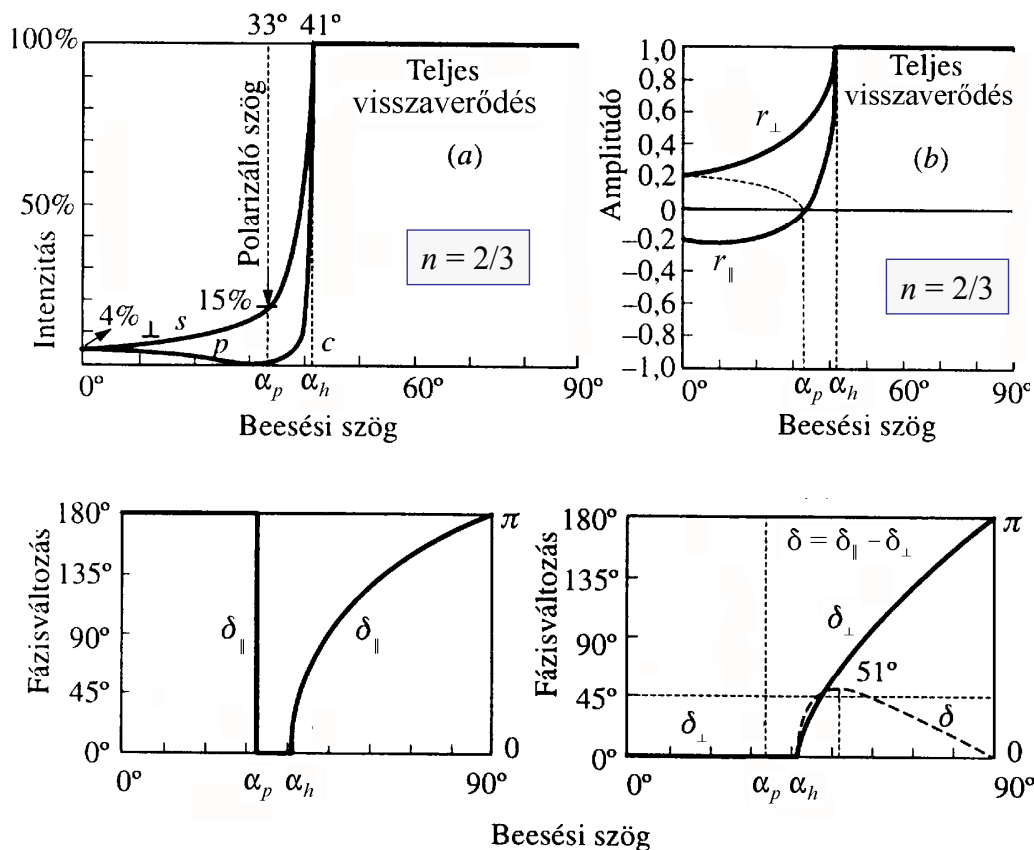
$$\text{tg } \alpha_p = n$$



Optikailag ritkább közegből sűrűbb közegbe való terjedés során

- a visszavert fénynél 180° -os fázisugrás lép fel,
- a Brewster-szög (α_p) alatt beeső fényből csak a beesési síkra merőleges komponens verődik vissza, azaz lineárisan poláros a visszavert fény.

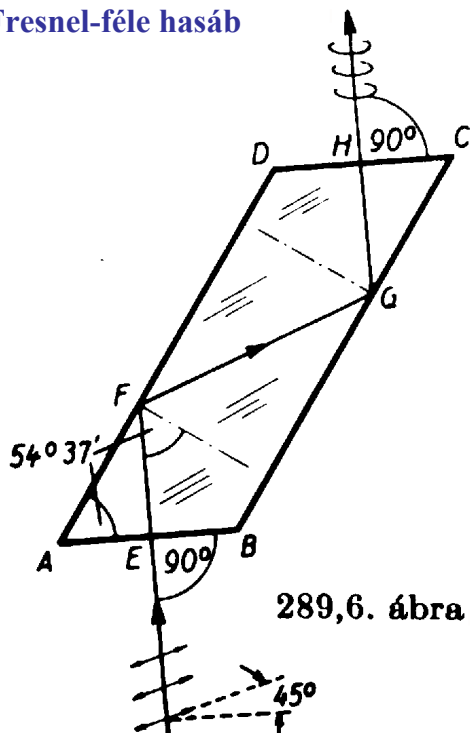
$$n < 1$$



Teljes visszaverődésnél az s és a p komponensek között fáziskülönbség lép fel!

- Ezt felhasználhatjuk elliptikusan és cirkulárisan poláros fény előállítására.
- Ezen az elven alapul a **Fresnel-féle hasáb**, amely megfelelően beállítva lineárisan poláros fényből cirkulárisan poláros fényt állít elő.

Fresnel-féle hasáb

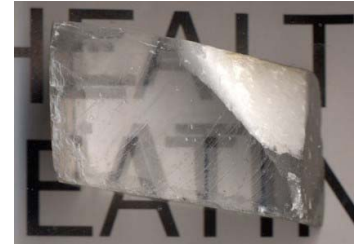


Körben poláros fényhez az s és a p komponenseknek

- azonos amplitúdójúaknak kell lenniük, és
- a két komponens között 90° -os fáziskülönbségnek kell fennállni.
- A 90° -os fáziskülönbség üveg hasábot használva csak két visszaverődéssel valósítható meg.

Kettős törés

- Bizonyos átlátszó kristályos anyagon (például mészpát [CaCO_3] kristályon) keresztül nézve kettős képet látunk.
- A jelenséget *kettős törésnek* nevezzük, és úgy magyarázzuk, hogy a tárgy bármely pontjából kiinduló fénysugár a kristályon való áthaladáskor, két különbözőképpen megtört sugárra bomlik.
- Egy polarizátorral könnyen megmutatható, hogy a két különböző irányba megtört sugár mentén terjedő fény **egymásra merőleges rezgési síkokban lineárisan poláros**.
- A kettős törés mélyebb oka a kristályok szerkezetében rejlő *anizotropia*, amely azt jelenti, hogy a fizikai tulajdonságok szempontjából az irányok nem egyenértékűek, így bizonyos fizikai mennyiségek irányfüggőek lehetnek.
- Anizotrop kristályban a hullámfront elemi hullámforrásnak tekinthető pontjai két egymásra merőlegesen poláros elemi fénycsugárra bomlanak ki, melyek terjedési sebessége – az anizotropia miatt – függ a rezgés irányától és a terjedési iránytól is.



Ordinárius és extraordinárius sugarak

- A kísérletek azt mutatják, hogy a két különbözőképpen törő sugár nem minden esetben követi a szabályos törést leíró *Snellius-Descartes-féle törvényt*!
- A Snellius-Descartes-féle törvényt **követő** sugarakat *rendes* vagy *ordinárius* sugaraknak nevezzük. Ezek sugarak szabályosan viselkednek, terjedési sebességük nem irányfüggő.
- A Snellius-Descartes-féle törvényt **nem követő** sugarakat *rendellenes* vagy *extraordinárius* sugaraknak nevezzük. Ezek terjedési sebessége irányfüggő.

Optikai tengely és főmetszet

- Bizonyos irányokra a kristályban terjedő két egymásra merőlegesen poláros hullámok terjedési sebessége megegyezik. Ezekkel az irányokkal párhuzamos bármely egyenest *optikai tengelynek* nevezzük. Bármely az optikai tengelyt tartalmazó síkot *főmetszetnek* nevezünk.
- A tapasztalat szerint a kettősen törő anyagoknak optikailag két fajtája van:

Az u.n. *egytengelyű kristályoknak* egy, a fenti tulajdonsággal rendelkező irány található. Ezekre *a két sugár közül az egyik ordinárius, míg a másik extraordinárius sugár*.

Az u.n. *kéttengelyű kristályoknál* kettő, a fenti tulajdonsággal rendelkező irány található. Ekkor *mindkét sugár extraordinárius*.

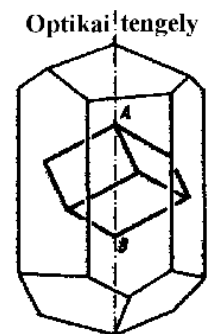
- A példaként említett mészpát kristály egytengelyű. A hexagonális kristálytani rendszerbe tartozó mészpát könnyen hasítható romboéderekre. Az ábrán *A* és *B* jelöli azokat a csúcsokat, ahol a rombuszlapok élei tompaszögben találkoznak. A mészpát kristály esetén az optikai tengely irányát az *AB* egyenes jelöli ki.
- Mind az ordinárius, mind az extraordinárius sugarakra definiálhatjuk a törésmutatót a szokásos definícióval:

$$n_o = c/v_o,$$

$$n_{eo} = c/v_{eo},$$

ahol v_o és v_{eo} a fázissebesség az ordinárius és extraordinárius sugarakra, c a vákuumbeli fázissebesség. Mivel az extraordinárius sugarakra a fénysugár terjedési sebessége irányfüggő, így az ezekre vonatkozó törésmutató szintén irányfüggő.

- Nyilván az optikai tengely irányában a két fajta sugárra vonatkozó törésmutató megegyezik.



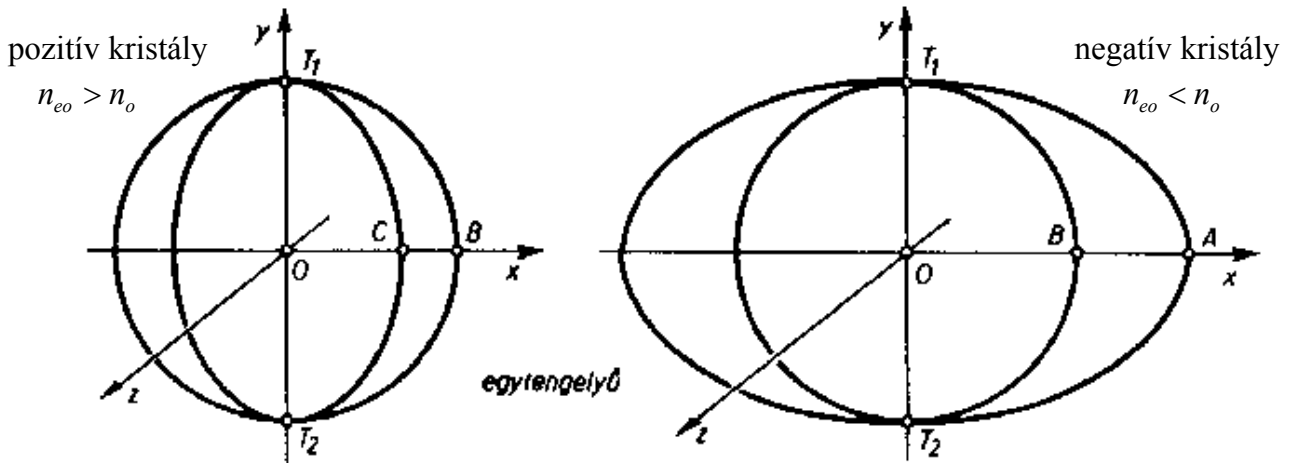
A kettős törés magyarázata Huygens elve alapján

- Az kristálybeli O pontban lévő hullámforrásból két egymásra merőlegesen lineárisan poláros fényhullám indul ki, ezek közül legalább az egyiknek a terjedési sebessége irányfüggő!
- Az egyszerűség kedvéért tekintsünk egytengelyű kristályt!

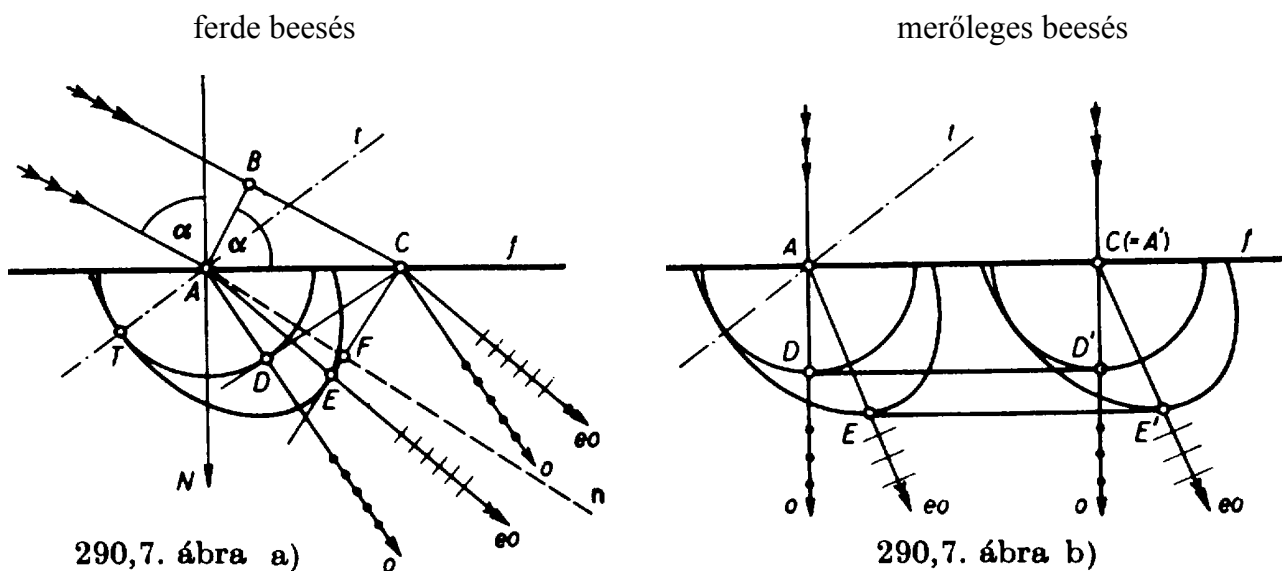
Ekkor az **ordinárius** sugarakra a terjedési sebesség nem irányfüggő, így az O pontban keltett zavar egy adott idő alatt az OB sugarú gömbfelületre ér.

Az irányfüggő terjedési sebességű **extraordinárius** sugarakra, az O pontból kiinduló zavar ugyanezen idő alatt – itt nem részletezett elméleti megfontolásokkal indokolhatóan – egy forgási ellipszoidra jut el. Az ellipszoid forgástengelye a kristály optikai tengelye.

A két fajta hullámfelület az optikai tengelyen érintkezik (T_1 és T_2 pontok).



Síkhullám kettős törése egytengelyű kristályban



290,7. ábra a)

290,7. ábra b)

- A sugarak és hullámfelület normálisa különböző irányú, így az energia és a hullámfelületek eltérő irányban terjednek!
- Ha a fény az **optikai tengelyre merőlegesen** esik be, akkor a két sugár nem válik ketté, így ekkor **látszólag nincs kettős törés!** Azonban a fény az o és az eo sugarak mentén **eltérő** sebességgel terjed, így a két hullám között **fáziskülönbség** lép fel!

- Az előbb tárgyalt „természetes” kettős törésen kívül más esetekben is felléphet kettős törés. Ekkor az eredetileg izotrop anyag valamilyen külső fizikai hatásra anizotróppá válik.

A kettős törés egyéb esetei

- Feszültségi kettős törés (mechanikai feszültség)
- Elektromos kettős törés (Kerr-féle effektus)

$$n_{eo} - n_o = K_\lambda \cdot \lambda \cdot \vec{E}^2$$

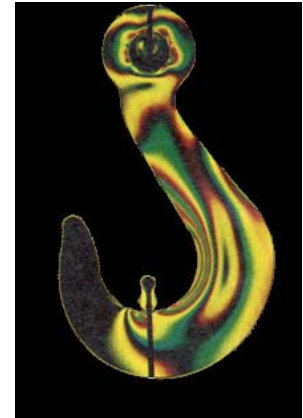
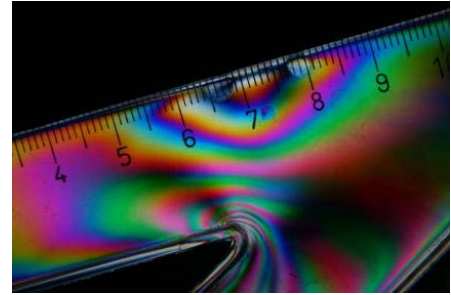
- Mágneses kettős törés (Cotton-Mutton-féle effektus)

$$n_{eo} - n_o = C_\lambda \cdot \lambda \cdot \vec{H}^2$$

- Áramlási kettős törés

- Pockel-effektus

Néhány egytengelyű kristály (pl. KDP) az optikai tengelyével azonos elektromos tér hatására kéttengelyű válik.

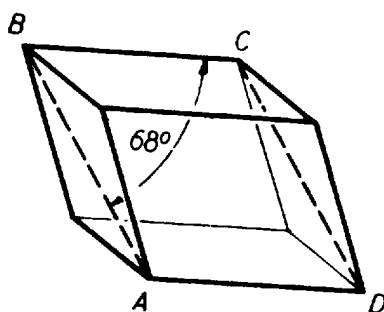


Polarizációs készülékek

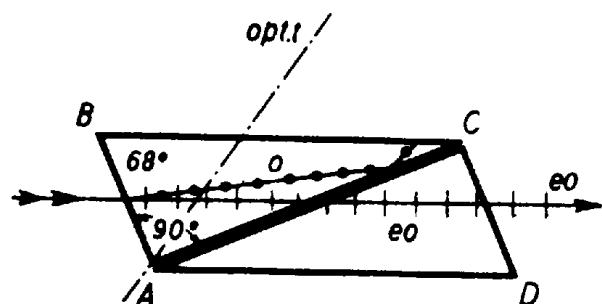
Lineárisan poláros fény előállítás

- Visszaverődés Brewster-féle szög alatt
- Üveglemez-sorozat
- Kettős törés felhasználásával

Nicol-féle prizma



291,1. ábra

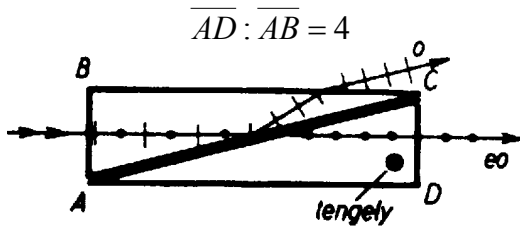


291,2. ábra

Hátrányai:

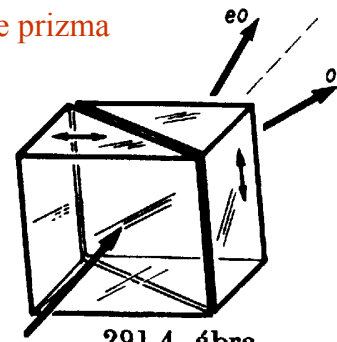
- A csiszolt lapokon nem merőlegesen halad át a sugár, ezért sík-párhuzamos lemezhez hasonlóan a fénysugár eltolódik. Így a prizma forgatásakor a látómező elmozdul.
- A ferde beesés és a diszperzió nem monokromatikus fénynél kromatikus hibát okoz.

Glan-Thomson-féle prizma



291,3. ábra

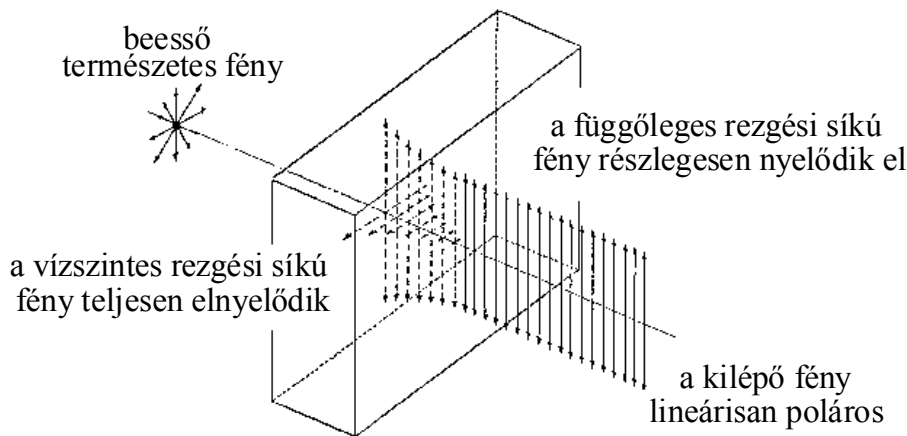
Wollaston-féle prizma



291,4. ábra

Polarizációs szűrők

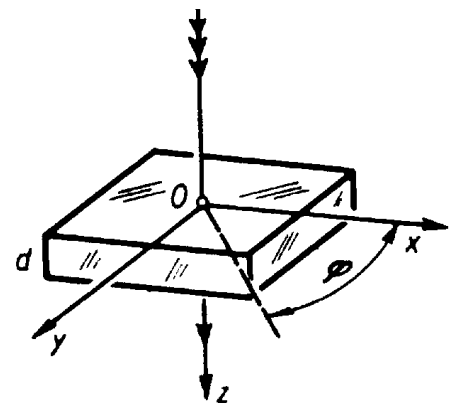
Működésük azon alapul, hogy bizonyos kettősen törő anyagok a két sugár közül az egyiket a másiknál sokkal erősebben nyelik el (**dikroizmus**).



Ellipszisben és körben poláros fény előállítása

- Az optikai tengellyel párhuzamosan csiszolt d vastagságú kristálylapra lineárisan poláros fény merőlegesen esik be, akkor látszólag nem lép fel kettős törés, azonban a kristályban terjedő két egymásra merőlegesen, lineárisan poláros (o és eo) hullám között

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eo} - n_o) \cdot d \quad \text{fáziskülönbség lép fel.}$$



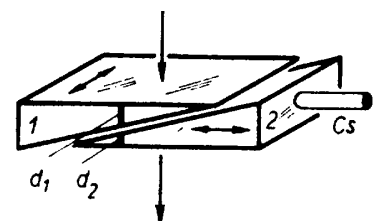
Ekkor a lemezből elliptikusan poláros fény lép ki. Az ellipszis helyzetét és alakját a két hullám amplitúdója (E_o és E_{eo}) és a δ fáziskülönbség határozza meg.

- Ha a beeső fény rezgési síkja a kristályban terjedő kétféle hullám rezgési síkjával 45° -os szöget zár be, akkor $E_o = E_{eo}$ teljesül, valamint d -t úgy választjuk meg, hogy $\delta = \pi/2$ vagy $3\pi/2$ legyen, akkor a lemezből cirkulárisan poláros fény lép ki.

Mivel a $\delta = \pi/2$ -nek $\lambda/4$ útkülönbség felel meg, az ilyen lemezt **$\lambda/4$ -es lemeznek** nevezik.

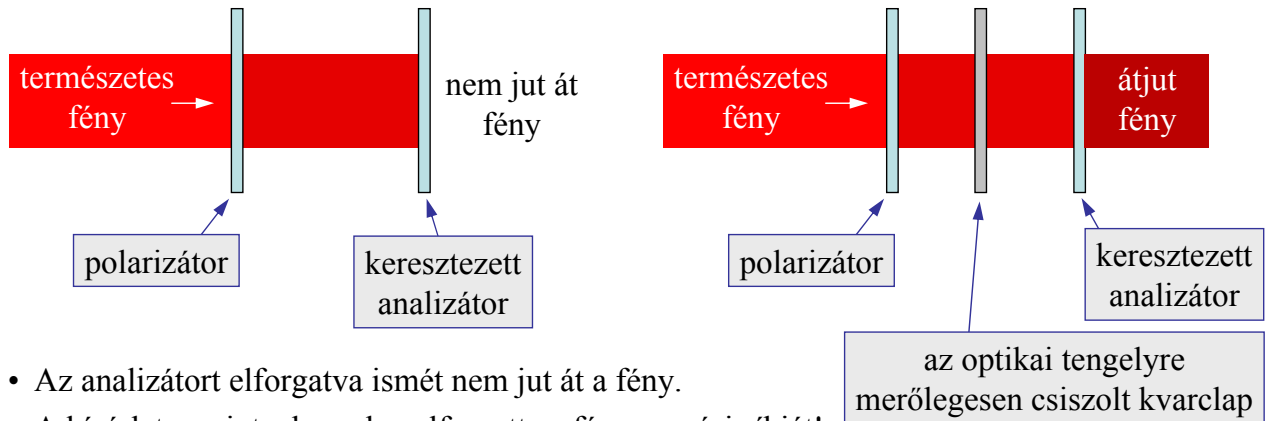
- A kettős ék alkalmazásával a lemez d vastagsága folytonosan változtatható. Ezek a berendezések az u.n. **kompensátorok**. Ezek segítségével a δ fáziskülönbség tetszőleges értékre beállítható.

A kompensátor vastagságának megfelelő beállításával a lineárisan és elliptikusan poláros fény egymásba kölcsönösen átalakíthatók.

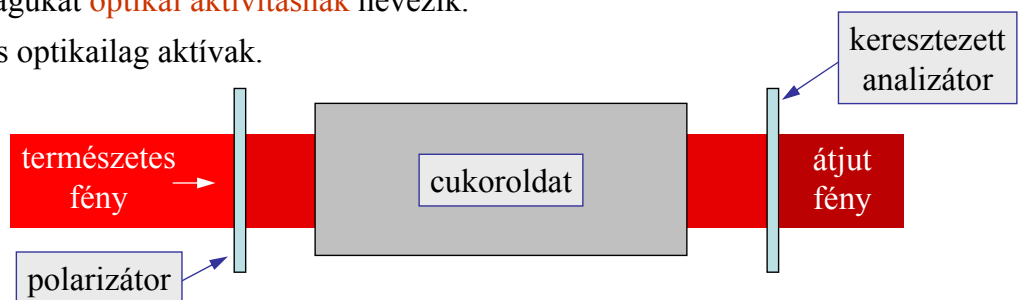


Optikai aktivitás

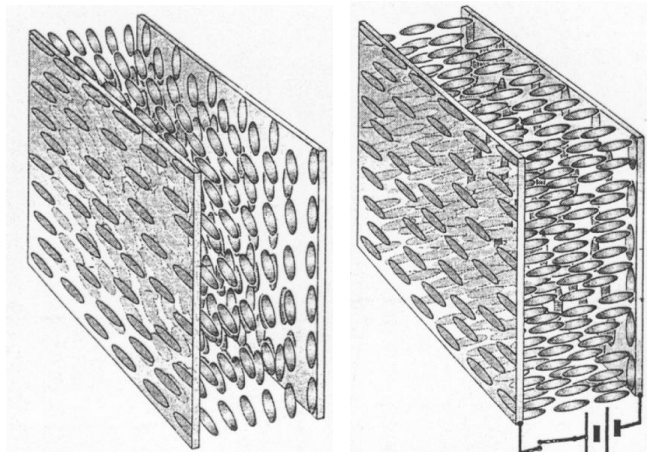
- Két keresztezett polarizátoron nem jut át fény.
- Ha közéjük az optikai tengelyre merőlegesen csiszolt kvarclapot teszünk a fény átjut!



- Az analízátort elforgatva ismét nem jut át a fény.
- A kísérlet szerint a kvarclap elforgatta a fény rezgési síkját!
- Bizonyos anyagok a kvarchoz hasonlóan elforgatják a fény rezgési síkját, Ezt a tulajdonságukat **optikai aktivitásnak** nevezik.
- Cukoroldatok is optikailag aktívak.



- A folyadékkristályos kijelzők (LCD) működése is az optikai aktivitáson alapul.
- A folyadékkristályokat az jellemzi, hogy bár folyadék halmazállapotúak, a bennük levő pálcika alakú molekulák úgy helyezkednek el, hogy hossz tengelyük egy irányba mutat (ezért „kristályok”).
- Amennyiben a tartó üveglap felületén mikroszkopikus karcolások vannak, akkor a felület közelében a molekulák ezekkel a karcolásokkal párhuzamosan állnak be.
- Ha a folyadékkristályt egy olyan cellában helyezük el, melynek alap-, és fedőlapján a karcolatok egymáshoz képest 90° -al el vannak forgatva, akkor a molekulák orientációja is ennek megfelelően elcsavarodik.
- Az így kialakított folyadékkristály réteg a fény rezgési síkját 90° -al elforgatja.
- Ezért, ha egy ilyen cellát két keresztezett polarizátor közé helyezünk, akkor az egész rendszer átlátszó lesz.
- A molekulák beállítását kellően erős elektromos térrel megváltoztathatjuk. Ekkor a réteg optikai aktivitása megszűnik.
- Ezért, elektromos tér hatására az egész rendszer átlátszatlan lesz.



Folyadékkristályos kijelző - LCD (liquid crystal display)

