

40-2 ábra

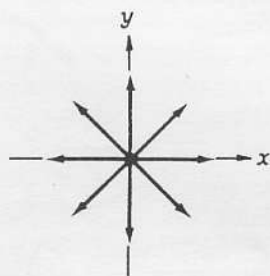
A dipólantennából érkező sugárzás polarizált. A polarizáció iránya merőleges a terjedés irányára és a dipólantenna síkjában fekszik.

pontatlanok. Például, a 40-2 ábrán az *A* és a *B* sugarak polarizációs síkja ugyanaz (a papír síkja), de a polarizációjuk iránya mégis különböző.

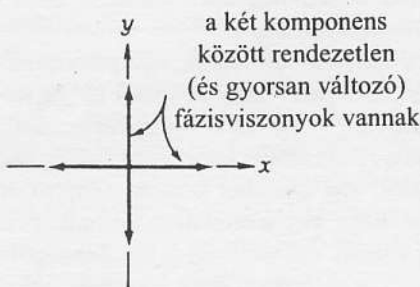
Az antennából kibocsátott rádió- és mikrohullámok abban az irányban vannak polarizálva, amelyben az antenna huzalában a töltések gyorsulnak (40-2 ábra). A vevő dipólantenna, a polarizáció irányával párhuzamosra állítva, energiát vesz fel a hullámokból, mert a váltakozó elektromos erőter a vevő dipólantennában az elektronokat előre-hátra mozgatja, s ezáltal a dipólban váltakozó elektromos feszültség jön létre. Amennyiben a vevődipólust a polarizáció irányára merőlegesen állítjuk, a dipólus két fele ugyanazon a feszültségen marad és a vevő nem érzékeli a hullámokat.

Az a tény, hogy az elektromágneses hullámok polarizálhatók, döntő bizonyítékot jelent arra nézve, hogy *transzverzális hullámok*. Az interferencia és az elhajlás azt bizonyítja, hogy a sugárzási tér hullámtermészetű, azt azonban nem döntik el, hogy a hullámok longitudinálisak vagy transzverzálisak. A hanghullámok például interferálhatnak, de mert longitudinálisak, nem polarizálhatók. Csak a transzverzális hullámok polarizálhatók.

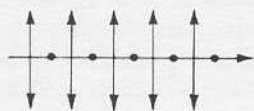
A látható fényt, amit közönséges fényforrások, pl. izzólámpák és izzó testek bocsátanak ki, gerjesztett atomokból vagy molekulákból ered. A klasszikus szemlélet szerint az atomok vagy molekulák rövid elektromágneses hullámcsomagokat bocsátanak ki, amik kb.  $10^{-8}$ s ideig tartanak, és néhány milliárd rezgést tartalmaznak. Így a kibocsátott *hullámvonulat* hossza a terjedés irányában kb. egy méter. Minthogy az atomok egymástól *függetlenül* bocsátják ki a fényt, az eredő fény hullámvonulat szuperpozíciója, amelyben a hullámvonulatok elektromos térerősségvektorainak az iránya véletlenszerű eloszlást mutat a terjedés irányára merőlegesen valamennyi irányban. Az ilyen fényt **polarizálatlan** fénynek nevezzük. Ahogyan a 40-3 ábrán látható, a nem poláros fény ábrázolására két szokásos eljárás van. Az egyikben (a) a fénysugár a szemlélő felé halad, és a vektorok nyilainak elrendezése sok, véletlen irányú, síkban polarizált hullámvonulatot ábrázol. Minthogy tetszőleges *xy* síkbeli elektromos térerősség *x* és *y* irányú összetevőkre bontható fel, a fény ezekkel az összetevőkkel is megadható. A (b) ábra szerint minden egyes hullámvonulat elektromos térerősségvektorát *x* és *y* összetevőre bontottuk és összegeztük. Természetesen a két összetevő átlagos értéke egyenlő egymással. De egy fontos jellegzetességet ki kell emelnünk. A hullámvonulatok *fázisai* teljesen véletlenszerűek (a különböző atomokból származó fény *inkohérens*), ezért nincsen kapcsolat az összetevők eredőjének fázisai között sem. Valóban, a komponensek fázisa véletlenszerű és gyorsan változik. Ugyanakkor azonban *időbeli átlaguk* minden irányban ugyanakkora. Ennek következtében annak, hogy a terjedés irányára merőleges síkban az



(a)



(b)



(c)

40-3 ábra

Az (a) és (b) a szemlélőhöz közeledő nempolarizált transzverzális hullám ábrázolásának két módját mutatja. (c) A papír síkjában terjedő polarizálatlan hullám; a rövid nyilak és a pontok a térben elválasztva vannak elhelyezve, ami azt kívánja hangsúlyozni, hogy nincs rögzített kapcsolat az inkohérens rezgést végző két komponens fázisa között.

A fénytani irodalomban más megállapodások is elterjedtek. Polarizációs síknek történeti okokból gyakran a fény terjedési iránya és a mágneses térerősség rezgési iránya által meghatározott síkot szokás nevezni. (A fordító megjegyzése.)

$x$  és  $y$  irányt hogyan választjuk meg, a polarizálatlan fény esetében nincs semmilyen jelentősége. Tetszőleges választás mellett a (terjedés irányára merőleges) két komponens időátlaga ugyanakkora.

## 40.2 A polárszűrő

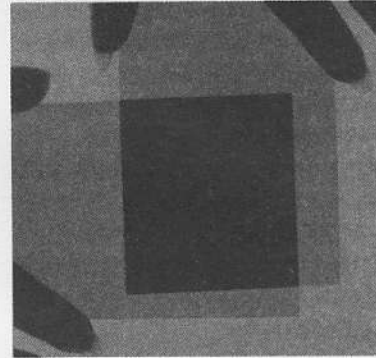
Az emberi szem nem nagyon érzékeny a polarizáció irányára<sup>1</sup>. A Polaroid nevű, kereskedelemben is kapható eszközzel<sup>2</sup> azonban könnyen létrehozhatunk poláros fényt, ill. megvizsgálhatjuk egy fénynyaláb polárosságát. Ideális esetben egy „tökéletes” polárszűrő a beeső polarizálatlan sugár intenzitásának 50%-át elnyeli, 50%-át átengedi. A gyakorlatban azonban az átengedett hányad csak 40% vagy még annál is kevesebb, a felületeken bekövetkező visszaverődések és a nem kívánatos abszorpció következtében. Mint a 40-4 ábra mutatja, ha két polárszűrőt „keresztvezünk”, azaz úgy állítjuk be, hogy az ún. transzmissziós tengelyeik (ilyen irányú rezgéseket enged át a szűrő) egymással derékszöveget zárjanak be, akkor a fényintenzitásnak kb. 90%-a elnyelődik.

Ha két polárszűrőt együtt használunk, akkor az elsőt *polarizátor*nak, a másodikat pedig, amit az elsőből érkező sugárzás polarizációjának meghatározására alkalmazunk, *analizátor*nak nevezzük.

Tekintsünk most két polárszűrőt, melyek átérésztési irányai egymással  $\theta$  szöveget zárnak be, ahogyan a 40-5 ábra mutatja. Ha a polarizátorból érkező fény elektromos térerősségének amplitúdója  $E_0$ , akkor az („ideálisnak” feltételezett) analizátor csak az  $E_0 \cos \theta$  komponenszt fogja átengedni, azt, amelyik párhuzamos az  $\theta$  transzmissziós tengelyével. Minthogy az  $I$  intenzitás arányos az amplitúdó négyzetével, az átengedett intenzitás a  $\theta$  szög függvénye lesz:

$$\text{MALUS TÖRVÉNYE} \quad I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (\text{W/m}^2\text{-ben}) \quad (40-1)$$

ahol  $I_0$  az analizátorra eső *polarizált* fénynek az intenzitása,  $\theta$  pedig az analizátor transzmissziós tengelyének a polarizátor tengelyével bezárt szöge. A (40-1) képletet felfedezőjéről, Étienne Malus kapitányról, Napoléon hadseregének egyik hadmérnökéről nevezték el. Amikor több, különböző tengelyállású polárszűrőt helyezünk egymás mögé, akkor a (40-1) képlet szűrőről-szűrőre egymás után alkalmazható.



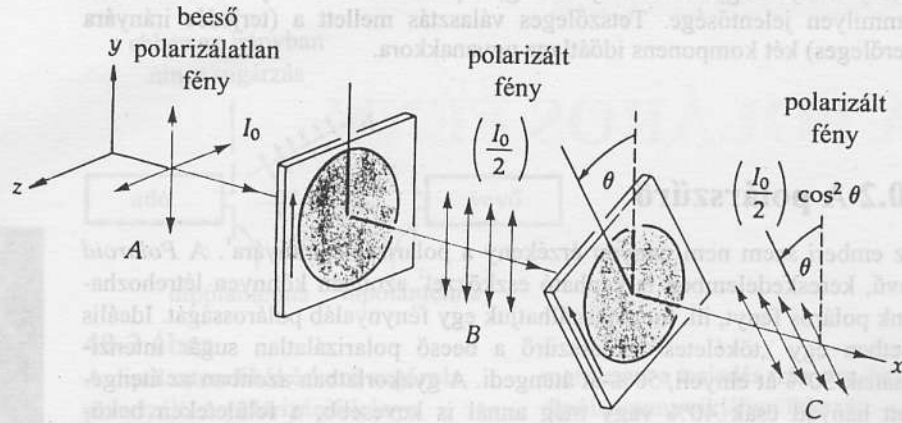
40-4 ábra

A „keresztezett” polarizátorok transzmissziós tengelye derékszöveget zár be egymással. Mindkét lemez külön-külön szürke, mert a beeső nem poláros fény intenzitásának mintegy felét elnyelik.

<sup>1</sup> A polarizáció irányát néha szabad szemmel is felismerhetjük a halvány Haidinger-féle nyaláb révén. Ezt néhány ember – korántsem mindenki – képes megfigyelni. Ennek a hatásnak és más, a polarizált fényvel összefüggő, érdekes jelenségek leírása található a Science Series sorozata W. A. Shurcliff és S. S. Ballard: Polarized Light c. kötetében (D. van Nostrand Co, 1965)

<sup>2</sup> A „Polaroid”-ot 1928-ban 19 éves korában fedezte fel Edwin H. Land, a Harvard egyetem hallgatójaként. A Polaroid modern változatát polivinil-alkohol hosszú láncú molekuláit tartalmazó műanyaglemez melegítésével és nyújtásával készítik. A nyújtási folyamat a molekulákat egymással párhuzamosra állítja. A lemezt ezután jód-oldatba merítik, ahol az alkohol-molekulákhoz jód-atomok csatlakoznak és így belőlük is hosszú láncok alakulnak ki, melyek mikroszkópius vezető huzalokként viselkednek. A láncok irányával párhuzamos E-komponenssel bíró elektromágneses hullám, a vezetési elektronokat a lánc mentén elmozdítja. Ezáltal az anyag a hullámnak ebben a térerősségkomponensében lévő energiáját gyakorlatilag teljes egészében elnyeli. Másrészt viszont, ha E merőleges a láncokra, csak egészen kis abszorpció következik be, ezért ennek a komponensnek legnagyobb része áthalad. Ezt a tulajdonságot *szelktív abszorpciónak* nevezzük. A Polaroid-lemez transzmissziós (átengedési) tengelye tehát az az irány, amely merőleges a lemez nyújtási irányára. Ma már 1 m széles és 30 m, vagy még ennél is hosszabb lemezek is előállíthatók. Az anyag megóvása, ill. megerősítése érdekében a szűrőt vékony üveg vagy műanyag lemezek közé helyezik (laminálják). A polaroid lemez és a fény kölcsönhatása éppen olyan, mint ahogyan a párhuzamos drótháló hat a polarizálatlan rádió- vagy mikrohullám-nyalábra. A háló csak azt a komponenszt *engedi át*, amelynek térerősségvektora *merőleges* a huzalok irányára, feltéve, hogy a huzalok közti távolság kisebb, mint a sugárzás hullámhossza.





**40-5 ábra**

Két párhuzamos polarárszűrő lemez közül az egyiket úgy fordítjuk, hogy transzmissziós tengelye a másikéval  $\theta$  szöget zárjon be. Az  $A$ -nál az  $x$ -tengely mentén terjedő polarizálatlan fény az  $y$ -tengely irányában lineárisan polarizálttá válik  $B$ -ben, majd polarizációjának iránya  $C$ -ben az  $y$ -tengelyhez képest  $\theta$  szögbe fordul. Ha a  $B$ -nél az intenzitása  $I_0$ , akkor a  $C$ -nél  $I_0 \cos^2 \theta$  lesz az intenzitás („ideális” polarizáló anyagok esetében).

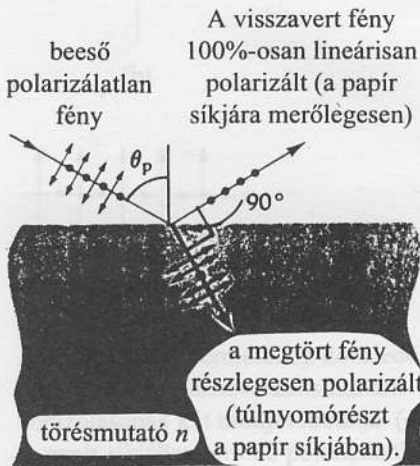
**40-1 PÉLDA**

$I_0$  intenzitású polarizálatlan fény esik két (ideális) polárszűrőre, amelyeknek transzmissziós tengelyei  $35^\circ$ -os szöget zárnak be egymással. Adjuk meg a második szűrőt elhagyó fény  $I$  intenzitását a beeső  $I_0$  intenzitás függvényében!

**MEGOLDÁS**

Miután a fény áthaladt az első polárszűrőn, intenzitása  $I_0/2$ -re csökkent. A második szűrő ezt az intenzitást tovább csökkenti a  $\cos^2 \theta$  tényezővel. Így a kilépő fénynyaláb intenzitása

$$I = \left(\frac{I_0}{2}\right) \cos^2 \theta = \left(\frac{I_0}{2}\right) \cos^2 35^\circ = 0,336 I_0$$



**40-6 ábra**

Ha a fény éppen a  $\theta_p$  polarizációs szögben esik be, akkor a visszavert és a megtört sugarak egymásra merőlegesek.

**40.3 Polarizáció visszaverődéskor és szórásakor**

A polarizált fény előállításának másik módszere az, hogy a fény útjába valamilyen sík felületű szigetelő anyagot pl. üveget, vizet vagy egyéb fényes, festett felületet helyezünk. A visszavert nyaláb részben, esetleg teljesen polarizált lehet attól függően, hogy mekkora a beesési szög. Sir David Brewster skót fizikus 1812-ben tanulmányozta az üvegről visszaverődött fény polarizációját és azt találta, hogy a visszavert hullám 100%-ban polarizált volt akkor, amikor egy üvegfelületen áthaladó megtört és róla visszavert sugarak iránya éppen merőleges egymásra. Ez az összefüggés érthetővé válik, ha arra gondolunk, hogy a beeső nempolarizált fény két (inkohérens) térerősségkomponensből tevődik össze, amelyek merőlegesek egymásra (lásd a 40-6 ábrát). Amikor a fény az anyagba behatol, ott az elektronokat e két egymásra

merőleges irányban készíti rezgésre. Minthogy azonban a felgyorsított elektronok nem sugározhatnak a gyorsulás irányában, az elektronrezgéseknek az ábra síkjába eső komponense nem sugározhat a visszavert sugár irányába. Csak az a rezgéskomponens kelt sugárzást a visszaverődési irányba, amelynek a rezgése a papír síkjára merőleges. Ezáltal viszont olyan visszavert sugár keletkezik, amelyik 100%-ig a mondott módon polarizált.

Jelölje  $\theta_p$  azt a beesési szöveget, melynél a visszavert és a megtört sugár merőleges egymásra:  $\theta_p + \theta_2 = 90^\circ$ . Ha a Snellius-féle  $n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2$  visszaverődési törvényt, ezzel a feltétellel összevetjük, levezethetjük az alábbi összefüggést, amelyet Sir David Brewster 1812-ben állított fel:

#### BREWSTER TÖRVÉNYE

dielektrikum határán  $\text{tg } \theta_p = n$ , (40-2)  
visszaverődő fény 100%-os polarizáltságának feltétele

ahol  $n = n_2/n_1$ , a fénytörő anyag relatív törésmutatója (a környező anyaghoz képest). A (40-2) egyenlettel definiált szöveget Brewster-szögnek nevezzük (Lásd a 40B-10 problémát). A törvény azonban *csak dielektrikumok esetén* érvényes. (A vezető felületeken a visszaverődés folyamata sokkal összetettebb jelenség, ebbe nem mélyedünk bele. Általában a fémfelületek tetszőlegesen polarizált komponenset visszavernek, bár a beesési iránytól függő intenzitással.)

A polárszűrős napszemüvegek azt a jelenséget használják fel, hogy a vízfelszínről, úttestről és más vízszintes felületekről visszavert sugarak (legalább részlegesen) lineárisan polarizáltak, így az ilyen visszavert sugarak hatását nagy mértékben gyengíteni lehet megfelelően beállított tengelyű polárszűrős szemüveggel. (Mi a helyes irány?)

#### 40-2 PÉLDA

Milyen szögben beeső fény verődik vissza vízfelszínről tökéletesen polárisan? (törésmutató = 1,33)

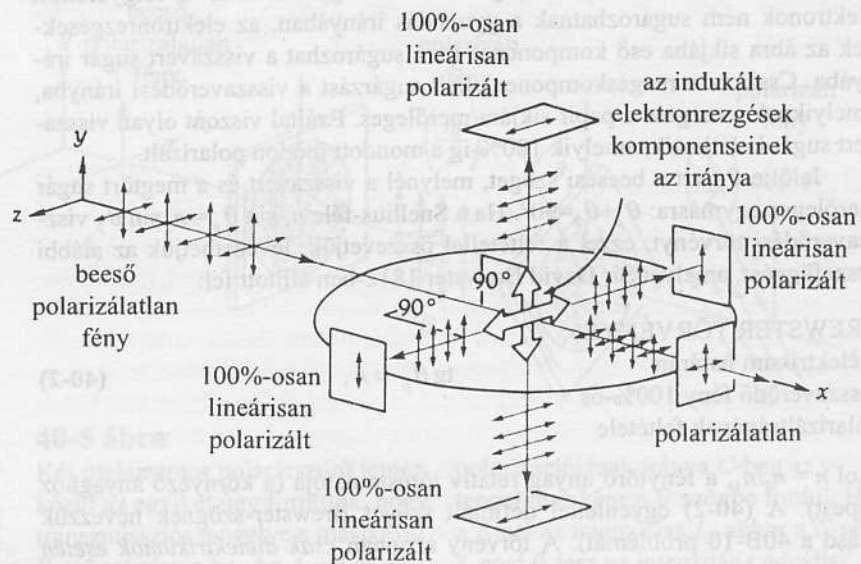
#### MEGOLDÁS

A (40-2) képletből:  $\text{tg } \theta_p = 1,33$ . Így

$$\theta_p = \arctg 1,33 = 53,1^\circ$$

#### A szórt fény polarizációja

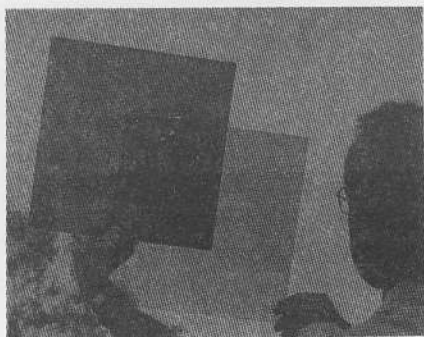
A tiszta égboltról érkező szórt napfény részben polarizált. A beeső (nempolarizált) napfény a levegőben lévő molekulák elektronjait rezgésbe hozza úgy, hogy a rezgés merőleges lesz a napsugár irányára. Ahogyan a 40-7 ábrán megmutatjuk, ezek a rezgő elektronok a fényt újra kisugározzák a gyorsuló töltéseknek megfelelő polarizációs irányval. *A megfigyelt szórt fény intenzitásához csak a megfigyelés irányára merőleges rezgéskomponensek járulnak hozzá;* a megfigyelés irányában rezgő töltések ugyanis mozgásuk irányában energiát nem sugároznak ki. Ha napkeltekor vagy napnyugtakor függőlegesen felfelé nézünk (és az égbolt tiszta) a napsugarak tekintetünk irányára merőlegesek. Ha polaroid lemezen vagy ilyen napszemüvegen keresztül nézzük az eget, az áteresztési tengely elforgatásával észrevehetjük, hogy a szórt napsugár részben poláris (azért csak részben, mert a fény egy része többször is szóródik, mielőtt a szemünkbe kerülne). A fényképészek az égbolt fényerősségének csökkentésére, a köd okozta fényszórás gyengítésére,



40-7 ábra

Polarizálatlan fény szóródása molekulákon. A beeső hullám transzverzális rezgést végző elektromos térerőssége az elektronokat az  $yz$ -sík minden irányában rezgésbe hozza. Itt az  $y$  és  $z$  komponensek iránya felbontva látszik. Mindegyik elektron dipólantennaként sugároz (lásd a 35-14 ábrát). A  $\pm y$  tengely irányába csak a  $\pm z$  irányú elektronmozgásból

eredhet sugárzás, így a szórt sugárzás 100%-ban polarizált. (Az antenna saját irányába nem sugároz!) Hasonlóképpen csak az elektronok  $\pm z$  irányú mozgása szolgáltat  $\pm y$  irányú sugárzást, tehát ez a sugárzás is 100%-ban polarizált. Az előre és a hátra szórt sugárzás polarizálatlan, más szögeknél a szórt sugárzás részben polarizált.



40-8 ábra

Keresztezett polárszűrők. A bal oldali lemez sötétebb, jelezve, hogy az égbolt szórt fény részben poláros.

vagy nemkívánatos tükröződések kiküszöbölésére néha polárszűrőt használnak. A méhek, a hangyák és egyes más rovarok összetett szeme érzékeli a fény polárosságát. Egyes biológusok szerint ezek a rovarok az égbolt fényének polarizáltságát tájékozódás céljára használják.

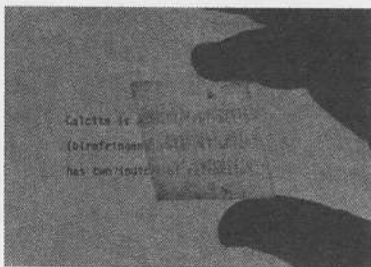
### 40.4 A kettőtörés

Néhány kristályos anyagban az atomok úgy rendeződnek, hogy a rendszernek nagyfokú szimmetriája van. Ennek eredményeként ezek egyetlen törésmutatóval jellemezhetők, amely a beeső fény polarizációjától független. A legtöbb gáz, folyadék és amorf szilárd anyagok, mint pl. a feszültségmentes üveg vagy a műanyagok így viselkednek. Ezeket az anyagokat *optikailag izotrópoknak* nevezik. Van azonban jó néhány kristályos, ill. feszültséges amorf anyag, amelynek molekuláris szerkezete jelentős aszimmetriát mutat. Ez az aszimmetria ezeknek az anyagoknak az optikai tulajdonságaiban úgy jelentkezik, hogy a beeső fény polarizációjának irányától függően két törésmutatójuk van. Ezeket *kettősen törő*, vagy *optikailag anizotróp* anyagoknak nevezzük. A két törésmutató megjelenésének az oka nyilvánvaló. Ha a kristályrácsban az atomok elrendeződése nem szimmetrikus, akkor az elektronokra ható kötélerők sem szimmetrikusak. Így az egyensúlyi helyzetükből kimozdított elektronokra az egyik irányban nagyobb effektív visszahúzó erő („rugóerő”) hat, mint egy másik irányban. Minthogy az elektromágneses hullámok terjedése az anyagokon keresztül olyan folyamat, amelynek során a

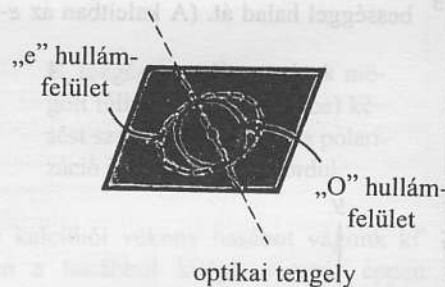


hullámokat az elektronok elnyelik, majd az energiát újra kisugározzák, az a tény, hogy az elektronok az egyik irányból érkező hatásra másként reagálnak, mint a másik irányból érkezőre, azt eredményezi, hogy a hullámok a különböző irányokban különböző sebességgel terjednek tovább.

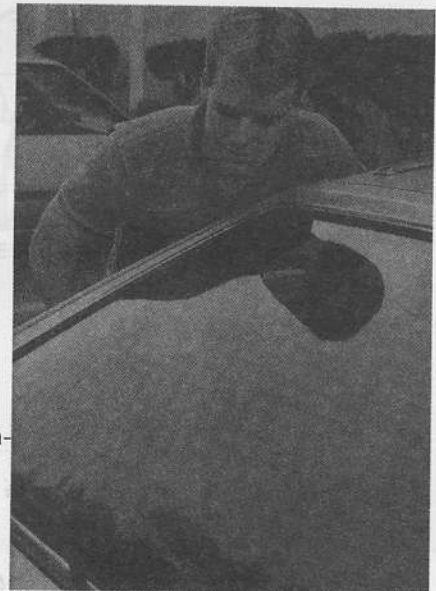
A kalcit, a kvarc és a jég jó példa a kettősen törő anyagokra. A 40-9 ábra mutatja, hogy a kalcitra eső polarizálatlan fény két polarizált összetevőre bomlik fel, egy *ordinárius* (vagy *rendes*) sugárra, (melyet „o”-sugárnak is nevezünk), és amely követi a Snellius-Descartes-törvényt, és egy olyan sugárra, amely nem követi e törvényt, ezt *rendellenes* vagy *extraordinárius* sugárnak, (ill. *e* sugárnak) nevezzük. A kristályon belül a rendellenes sugár általában nem is ugyanabban az irányban terjed, mint a rendes sugár. Ezt a jelenséget úgy figyelhetjük meg, hogy kalcitkristály-darabot helyezünk egy papírdarabra, amelyre előbb egy fekete pontot rajzoltunk. Ekkor a képen két fekete pontot fogunk látni. A kristály elforgatása az egyik képet változatlan helyzetben hagyja, míg a másik kép ezt körbejárja. Továbbá megállapítható, hogy a két képet egymásra merőlegesen különbözőképpen polarizált fény



(a) A kalcitkristály kettős képet alkot

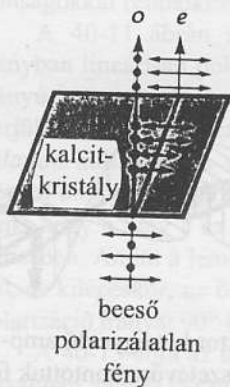


(c) A kalcitkristály belsejébe helyezett pontszerű fényforrás két különböző Huygens-féle elemi hullámfelületet hoz létre. Az „o” hullámfelület (folytonos vonal) gömb. Az „e” hullámfelület (szaggatott vonal) forgási elipszoid, ami egy ellipszis forgatásából keletkezik. A forgástengely azon a két ponton megy át, ahol a gömb és az ellipszis metszete érintkezik. Ezt a tengelyt optikai tengelynek nevezzük. E mentén mind az „o”, mind az „e” sugár ugyanazzal a sebességgel terjed. Az optikai tengelyre merőleges síkban az „e” hullám is ugyanabban az irányban terjed, mint az „o” hullám, de nagyobb sebességgel. (Emlékezzünk arra, hogy az optikai „tengely” egy irány, nem pedig meghatározott vonal!)



40-10 ábra

Az autók szélvédő üvegét ún. biztonsági üvegből készítik, azaz két üveglap közé nagyon erős átlátszó műanyagfóliát ragasztanak, ami, ha az ablak betörik, akkor az üvegcserépeket összetartja. A hátsó és az oldalüvegeket azonban gyakran egyetlen hőkezelt üveglapból állítják elő úgy, hogy a lehűlés során szándékosan nagy mechanikai feszültségek keletkezzenek bennük. Ha az ablaküveg eltörik, akkor az egész ablak viszonylag biztonságos, kicsiny szemcsékre, és nem nagy cserepekre törik, mint a közönséges üveg. A feszültségek az üveget kettősen törővé teszik. Az ábra egy autó hátsó ablakán feszültségi kettőtörés miatt létrejövő képet mutatja, amikor a részben polarizált napfény éppen a Brewster-szögben esik be az üvegre. Jóllehet, ehhez a fényképfelvételhez nem használtak polár szűrőt, a visszavert fényt polarizációs napszemüvegen keresztül szemlélve, a feszültségeloszlást még kifejezettebbé teszi.



(b) A kalcitkristály a felületére merőlegesen beeső polarizálatlan fényt két különbözőképpen polarizált sugárra bontja. Az „o” sugár változatlanul folytatja egyenes-vonalú útját, az „e” sugár a kristályban ferdén halad tovább, majd az „o” sugárral párhuzamosan kissé eltolódva lép ki a kristályból. (Ebben az esetben a sugár terjedési iránya nem merőleges a hullámfrontra.)

40-9 ábra

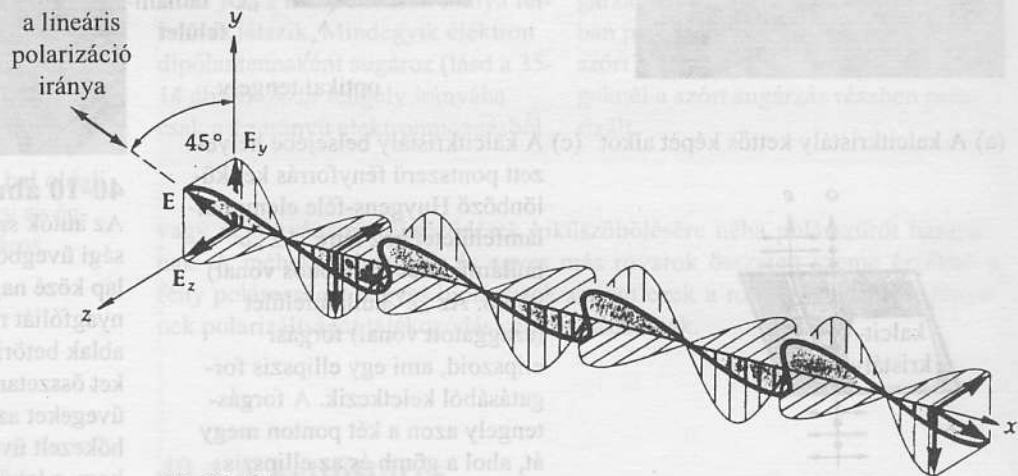
A kettősen törő kalcitkristály néhány optikai tulajdonsága

alkotja<sup>3</sup>. Mágnesezett plazmák is mutatják a kettőtörés jelenségét, s ez hasznos segédeszköz a távoli ionizált gázok mágneses terének csillagászati vizsgálatában.

Néhány kristályos anyag természetes polarizátorként viselkedik, mert a polarizáció egyik komponensét elnyeli és csak a másikat engedi át. A turmalin nevű féldrágakő, amit gyakran használnak az ékszerészek is, példa erre. Ezt a tulajdonságot szelektív abszorpciónak nevezik, de néha *dichroizmusnak* is (a görög *di* – kettő – és a *chros* – bőr és szín – jelentésű szavak kombinációjából), mert amikor az ezeken a kristályokon átmenő fényt különböző irányból nézzük, akkor rendszerint két különböző szintet látunk. Sajnos, a természetes dichroizmust mutató kristályok általában igen kicsik.

## 40.5 A fázistoló lemezek és a cirkuláris polarizáció

Mint fentebb említettük, a kettősen törő anyagoknak két törésmutatójuk van, az egyik az „*o*”-sugárra, a másik az „*e*”-sugárra vonatkozik. Ezért a fény ezeken az anyagokon, polarizációjától függően, két különböző terjedési sebességgel halad át. (A kalcitban az *e*-sugár, de egyes más anyagokban az *o*-



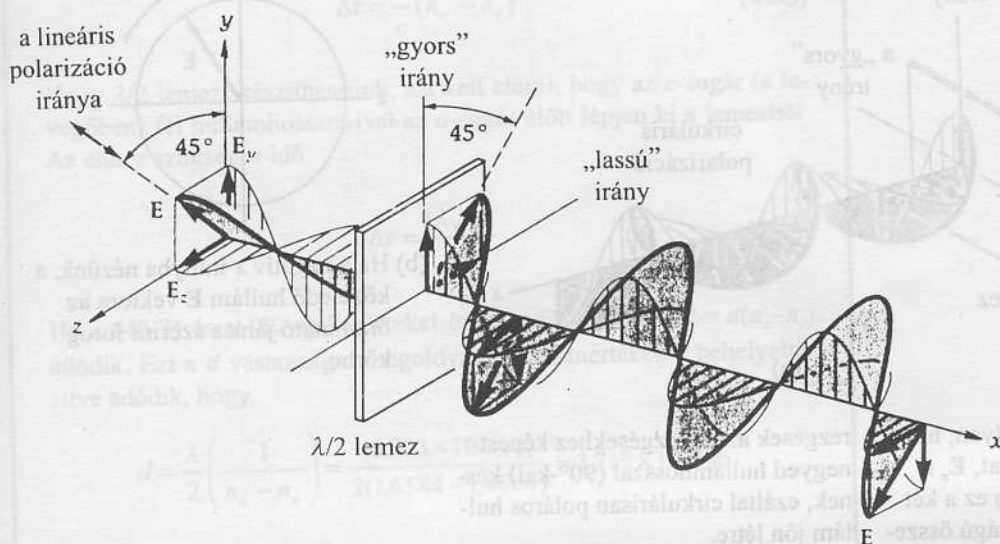
40-11 ábra

A lineárisan polarizált fénycső mentén terjed, polarizációs iránya az *y*-tengellyel  $45^\circ$ -os szöveget zár be. Az *E* elektromos tér-

erősségvektor két egyenlő amplitúdójú összetevőre bontottuk fel az *y*- és a *z*-tengelyek irányában.

<sup>3</sup> Ennek a két képnek a polarizáltsága vezette Malus-t arra a felfedezésre, hogy a visszavert fény polarizált lehet. A Párizsi Akadémia díjat tűzött ki a kettőtörés elméletének megalkotására. Malus 1808-ban, házában ablakánál állva vizsgálta a kalcit-kristályt, abban a reményben, hogy rájön valamire a kettőtöréssel kapcsolatban. A kristályon keresztül véletlenül éppen a lenyugvó Nap képét nézte, ahogyan az a közeli LuxembourgPalota ablakain visszaverődik. Meglepetéssel látta, hogy a két kép közül az egyik eltűnik, amikor a kalcitot forgatja. Malus kapitánynak nemcsak jó szerencséje volt, hogy felfedezte: egy természetes polarizátort tart a kezében, hanem elég szerencsés volt ahhoz is, hogy a palota ablakaihoz képest éppen a Brewster-szögben állt, s jó helyzetben! Az éjszakát szorgalmas kísérletezéssel töltötte, a gyertya különböző víz- és üvegfelületeken visszavert képét vizsgálta. Mindez





#### 40-12 ábra

A  $\lambda/2$  lemez irányítása olyan, hogy  $E_y$  mutat a „gyors” irányba,  $E_z$  pedig a „lassú” irányba. Amikor a hullám kilép a  $\lambda/2$  lemezből, az

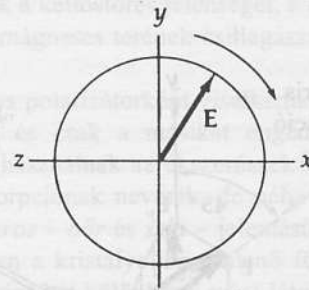
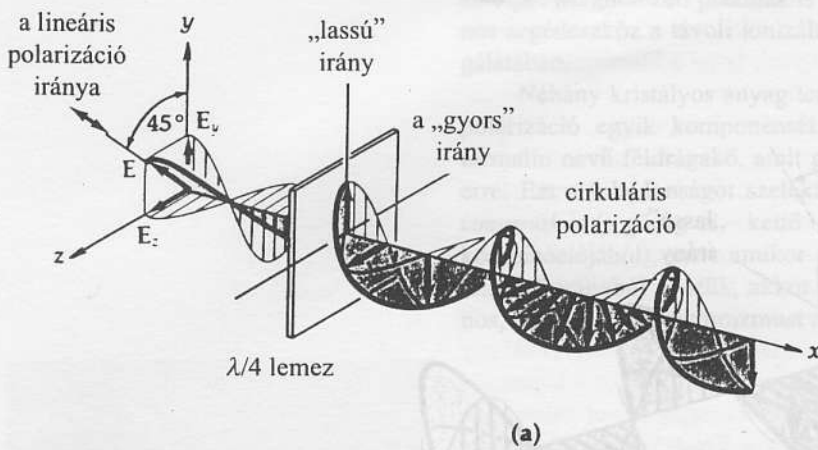
$E_z$  rezgések az  $E_y$  rezgések mögött félhullámnyi ( $180^\circ$ -os) késést szenvedtek, ezáltal a polarizáció iránya  $90^\circ$ -kal elfordul.

sugár a gyorsabb.) Tegyük fel, hogy kalcitból vékony hasábot vágunk ki<sup>4</sup> úgy, hogy az gyorsabb hullámhossz esetén a hasázból kilépő  $o$ -sugár éppen félhullámhosszal maradjon le az  $e$ -sugár mögött. A két sugár fáziskülönbsége ekkor  $180^\circ$ . Az ilyen hasábot  $\lambda/2$ -es lemeznek nevezük, amely érdekes tulajdonságokkal rendelkezik.

A 40-11 ábrán az  $x$ -tengely mentén az  $y$ -tengelyhez  $45^\circ$ -ban hajló irányban lineárisan poláros hullám látható. Az elektromos térerősséget  $y$  és  $z$  irányú, egymással azonos fázisban rezgő összetevőkre bonthatjuk. (Ne keverjük össze ezt az esetet azzal, ami a 40-3b ábrán szerepel, és amin a polarizálatlan hullámnak a véletlenszerű és változó fázisviszonyait mutattuk be.) Lépjen be most az így polarizált fény egy  $\lambda/2$ -es lemezbe, amelyet úgy irányítunk, hogy a fény  $y$  és  $z$  összetevői rendre éppen az „ $e$ ”, ill. az „ $o$ ”-sugarak a lemezben. Amint a lemezen áthaladnak, az  $o$ -sugár az  $e$ -sugárhoz képest lemarad, és kilépéskor, az összetevők között  $180^\circ$ -os fáziskülönbség lesz. Emiatt a polarizáció irányát  $90^\circ$ -kal elforgatja, ahogyan a 40-12 ábrán látszik.

A 40-13 ábra az ún.  $\lambda/4$ -es lemezt mutatja, (ez a lemez a gyorsabban és lassabban haladó összetevők között  $90^\circ$ -os a fáziskülönbséget hoz létre).  $90^\circ$  fáziskülönbséggel találkozó elektromos térerősségkomponensek egymáshoz képest cirkulárisan polarizált fényt hoznak létre. Ha a fényforrás felé nézünk úgy, hogy a hullám felénk közeledik, akkor az  $E$  elektromos térerősségvektor  $\omega = 2\pi f$  szögsebességgel forog (ahol  $f$  a fény frekvenciája). Attól függően, hogy melyik összetevő marad le a másik mögött, a forgás iránya az

40 évvel azelőtt történt, hogy a fényről kiderült volna: lényegében transzverzális elektromágneses hullám. Ekkor még a polarizációs effektusok rejtélyszámba mentek. Általában a kettősen törő anyagra eső fénysugár két, egymással szöget bezáró különböző irányú fénysugárra bomlik. Vannak azonban bizonyos irányok, amelyekben a két sugár együtt halad, de különböző sebességgel, ezek az optikai tengelyek. A hasábot úgy készítették, hogy ez az irány merőleges legyen a hasáb előlapjára és hátlapjára, ezáltal a két nyaláb ne váljék el egymástól a hasábon áthaladva.

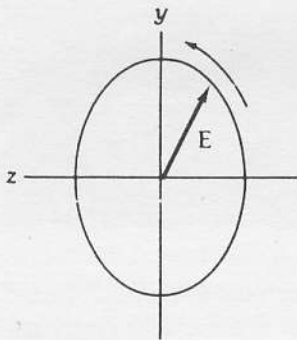


(b) Ha a negatív  $x$  irányba nézünk, a közeledő hullám  $E$  vektora az óramutató járására szerint forog körbe.

**40-13 ábra**

A  $\lambda/4$  lemez irányítása olyan, hogy  $E_y$  a „gyors” irányba mutat,  $E_z$  a „lassú” irányba. Ahogyan ez a két egymással egyenlő nagyságú összetevő kilép a  $\lambda/4$  lemezből, az  $E_z$

rezgések az  $E_y$  rezgésekhez képest negyed hullámhosszal ( $90^\circ$ -kal) késnek, ezáltal cirkulárisan poláros hullám jön létre.



**40-14 ábra**

Ha egy  $\lambda/4$  lemezt a beeső hullám polarizációjának irányához képest tetszőleges irányba állítunk be, az elektromos térerősség komponensei *nem lesznek egyenlő nagyságúak*, (de  $90^\circ$  lesz a fáziskülönbségük) és így a kilépő hullám *elliptikusan polarizált* lesz.

óramutató járásával megegyező vagy ellenkező, s ez a cirkulárisan polarizált fény két lehetséges polarizációs állapotának felel meg.<sup>5</sup> Ha a polarizáció iránya nem a gyors és lassú fénykomponensek szögfelezőjébe esik, akkor a térerősség  $y$  és  $z$  komponense nem egyenlő, bár a fáziskülönbség közöttük még mindig  $90^\circ$ . Ebben az esetben **elliptikusan polarizált** fény jön létre (40-14 ábra). A  $\lambda/2$ -es és a  $\lambda/4$ -es lemez stb. gyűjtőneve: *fázistoló lemez*.<sup>6</sup>

**40-3 PÉLDA**

Mekkora annak a kalcitlemeznek a minimális vastagsága, amely a sárga  $\lambda = 589,3$  nm hullámhosszra nézve  $\lambda/2$ -es lemez. Az  $o$ - és az  $e$ -sugarak számára a törésmutatók rendre:  $n_o = 1,6584$  és  $n_e = 1,4864$

**MEGOLDÁS**

Az  $o$ - és az  $e$ -sugaraknak a  $d$  vastagságú lemezen való áthaladásához szükséges  $t_o$  és  $t_e$  idők rendre:  $t_o = d/v_o$  és  $t_e = d/v_e$ . A lemezben a terjedési sebesség rendre:  $v_o = c/n_o$  és  $v_e = c/n_e$ . Ezért a  $\Delta t = (t_o - t_e)$  időkülönbség így

<sup>5</sup> Ahogyan a 35. fejezetben már megtárgyaltuk, a fénynyaláb impulzust hordoz, ezért, ha elnyelő anyagba ütközik, annak impulzust ad át, arra erőt gyakorol. Kísérletileg igazolható, hogy ehhez az erőhöz még az is hozzájárul, hogy a cirkulárisan poláros fénynek impulzusnyomatéka is van, és ezáltal elnyelődése az abszorbenstre forgatónyomatékot gyakorol. Érdekes, hogy a fény részecske-, vagy fotonmodelljében minden egyes foton cirkulárisan poláros és meghatározott impulzusnyomatékot hordoz, melynek nagysága  $L = h/2\pi$ , ahol  $h$  a Planck-féle állandó. Az impulzusnyomaték megmaradásának elve megkívánja, hogy az az atom, amelyik a foton kibocsátja, maga is megváltoztassa ennyivel az impulzusnyomatékát, de természetesen a kibocsátott fotonéval ellentétes forgás értelmében. A síkban polarizált fény valójában olyan keverék, amelyben egyenlő arányban keverednek az óramutató járására szerinti és vele ellentétes cirkulárisan poláros fotonok.

<sup>6</sup> Amatőr kísérletezés céljaira elég jó fázistoló lemezek készíthetők egyes celofán-szalagokból, vagy pedig az átlátszó ételcsomagoló műanyagfóliák megnyújtásával. Ezekkel a lemezekkel végezhető érdekes kísérletekről lásd a Scientific American 1977 évi decemberi számában az „Amateur Scientist” rovatot.

$$\Delta t = \frac{d}{c}(n_o - n_e) \quad (40-3)$$

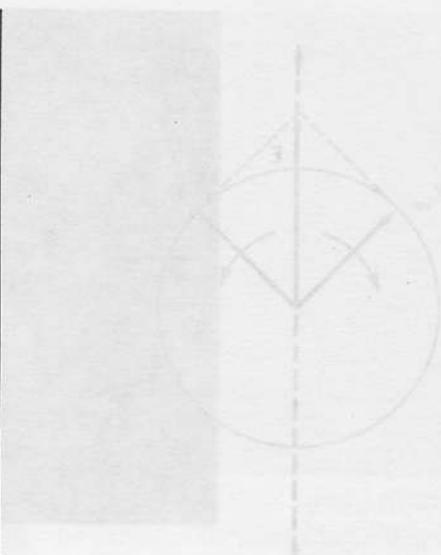
Hogy  $\lambda/2$  lemezt készíthessünk, azt kell elérni, hogy az  $e$ -sugár (a legegőben) fél hullámhossznyival az  $o$ -sugár előtt lépjen ki a lemezből. Az ehhez szükséges idő:

$$\Delta t = \frac{(\lambda/2)}{c} \quad (40-4)$$

Ha a (40-3) és a (40-4) képleteket összevetjük, ebből  $\lambda/2 = d(n_o - n_e)$  adódik. Ezt a  $d$  vastagságra megoldva és a számértékeket behelyettesítve adódik, hogy

$$d = \frac{\lambda}{2} \left( \frac{1}{n_o - n_e} \right) = \frac{(5,893 \times 10^{-7} \text{ m})}{2(1,6584 - 1,4864)} = 1,713 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Vegyük észre, hogy az  $o$ - és az  $e$ -sugár közti fáziskülönbség  $\frac{3}{2}\lambda$  értéke is  $\lambda/2$  lemezt eredményezne. Ebben az esetben a kalcit-lemez háromszor olyan vastag lenne, vagyis  $5,139 \times 10^{-6}$ . Hasonlóképpen a  $5\lambda/2$ ,  $7\lambda/2$  lemezek is  $\lambda/2$  lemezként viselkednének.



40-16 ábra  
A kalcit-kristályon keresztül a polarizált fényt a kristályoptikai tengelyre merőlegesen irányítjuk. A fény terjedési sebessége a kristályban két különböző irányban terjed, az  $o$ - és az  $e$ -sugárként. Az  $e$ -sugár terjedési sebessége a kristályban a legnagyobb, az  $o$ -sugár terjedési sebessége a legkisebb. A két sugár közötti fáziskülönbség a kristályvastagságtól függően változik. A fáziskülönbség a kristályvastagsággal arányos. A fáziskülönbség a kristályvastagsággal arányos. A fáziskülönbség a kristályvastagsággal arányos.



40-17 ábra  
A kristályoptikai tengelyre merőlegesen irányítjuk a polarizált fényt a kristályon keresztül. A fény terjedési sebessége a kristályban két különböző irányban terjed, az  $o$ - és az  $e$ -sugárként. Az  $e$ -sugár terjedési sebessége a kristályban a legnagyobb, az  $o$ -sugár terjedési sebessége a legkisebb. A két sugár közötti fáziskülönbség a kristályvastagságtól függően változik. A fáziskülönbség a kristályvastagsággal arányos. A fáziskülönbség a kristályvastagsággal arányos.

## 40.6 Az optikai aktivitás

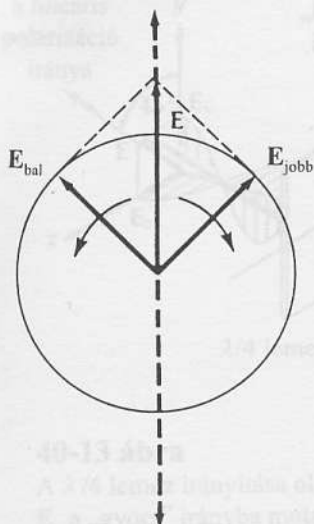
Ahogy bizonyos anyagok a két különböző, egymásra merőlegesen lineárisan polarizált fényt két különböző terjedési sebességgel bocsátják át, úgy bizonyos anyagok a különböző forgási irányú, *cirkulárisan* polarizált fényt engedik át két különböző sebességgel. Ahogy majd megmutatjuk, ennek az az érdekes hatása van, hogy a *lineárisan* polarizált fény polarizációs iránya elfordul. Például, ha cukoroldatot helyezünk a polarizátor és az analizátor közé, akkor a cukoroldatban a fény polarizációjának iránya elfordul, ahogyan a 40-15 ábrán látható. Az ilyen anyagokat *optikailag aktívnak* nevezzük. Az elforgatás mértéke arányos az oldatban megtett úthosszal, de természetesen arányos az optikailag aktív anyag koncentrációjával is.

Az optikai forgatóképességet azzal magyarázhatjuk, hogy a lineárisan polarizált fény felfogható két, egymással szemben forgó cirkulárisan polarizált fény eredőjeként (lásd a 40-16 ábrát) és az optikailag aktív anyagokban az egyik cirkulárisan polarizált fény gyorsabban terjed, mint a másik. Ennek az lesz az eredménye, hogy a két forgó komponens állandóan változtatja a fázisát egymáshoz képest, így aztán az eredő vektor iránya helyről helyre változik. Ennek pedig az a következménye, hogy a lineárisan polarizált fény az anyagon való áthaladás során megváltoztatja polarizációs irányát.

Az irányváltozás lehet az óramutató járásával egyező, de lehet azzal ellentétes is, attól függően, hogy az anyag molekuláiban az atomok hogyan helyezkednek el. Például a cukor ugyanolyan kémiai összetétel mellett két különböző alakban létezik, az atomok elrendeződése az egyik fajta molekulában éppen tükörképe a másik fajta molekulában található elrendezésnek. Az ilyen párokat *sztereoizomereknek* nevezzük (40-17 ábra).

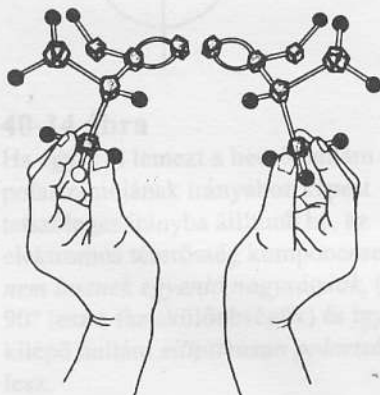
Az egyik molekulatípusban az atomok hosszú, az óramutató járását követő tekeredésű láncokban helyezkednek el, míg a másikban a láncok az óramutató járásával ellentétes irányban tekerednek. A *dextróz* nevű cukor (a latin *dexter* = jobb jelentésű szóból) a lineáris polarizáció irányát az óramutató járásával egyező irányban forgatja el, legalábbis így látja az a megfi-





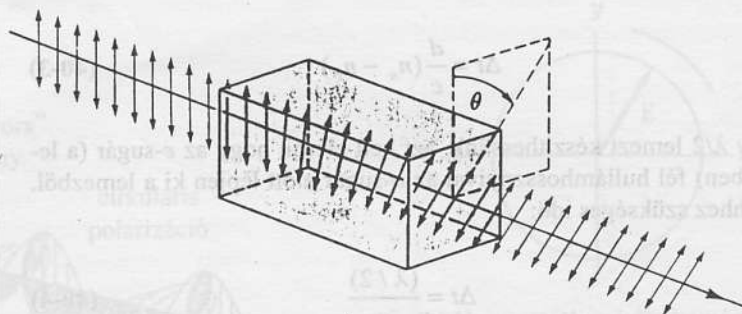
40-16 ábra

A papír síkjából kifelé terjedő lineárisan polarizált hullám. Az  $E$  elektromos térerősségvektor a szaggatott vonal mentén le- és felfelé rezeg. (Ez a vonal a polarizáció irányát jelképezi.) Az  $E$  vektort két cirkulárisan polarizált,  $E_{\text{bal}}$  és  $E_{\text{jobb}}$  összetevőből állíthatjuk elő, amelyek a mutatott irányban egymással szemben forognak. A forgó vektorok összege éppen kiadja a lineáris rezgést végző  $E$  vektort.

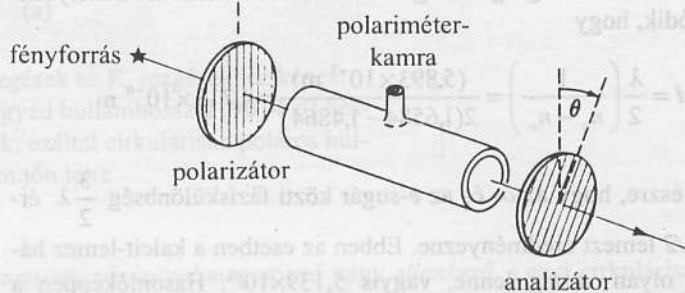


40-17 ábra

A *sztereoizométerek* olyan anyagok, amelyeknek a kémiai összetétele megegyezik, de atomjaik térbeli elhelyezkedése egymásnak tükörképe.



- (a) Amikor a lineárisan polarizált fény optikailag aktív anyagon halad át, polarizációs síkja fokozatosan elfordul a haladás irányára, mint tengely körül.



- (b) A *polariméter* azt a  $\theta$  szöget méri, amennyivel a fény polarizációs síkja elfordul. Gyakran előfordul, hogy különböző hullámhosszú fénysugarak polarizációs síkját ugyanaz az anyag különböző mértékben forgatja el, ezáltal – amikor az analizátort elforgatjuk – színváltozást észlelhetünk. A mérés szabványosítása érdekében a méréskor csak meghatározott hullámhosszú fényt használnak.

45-15 ábra

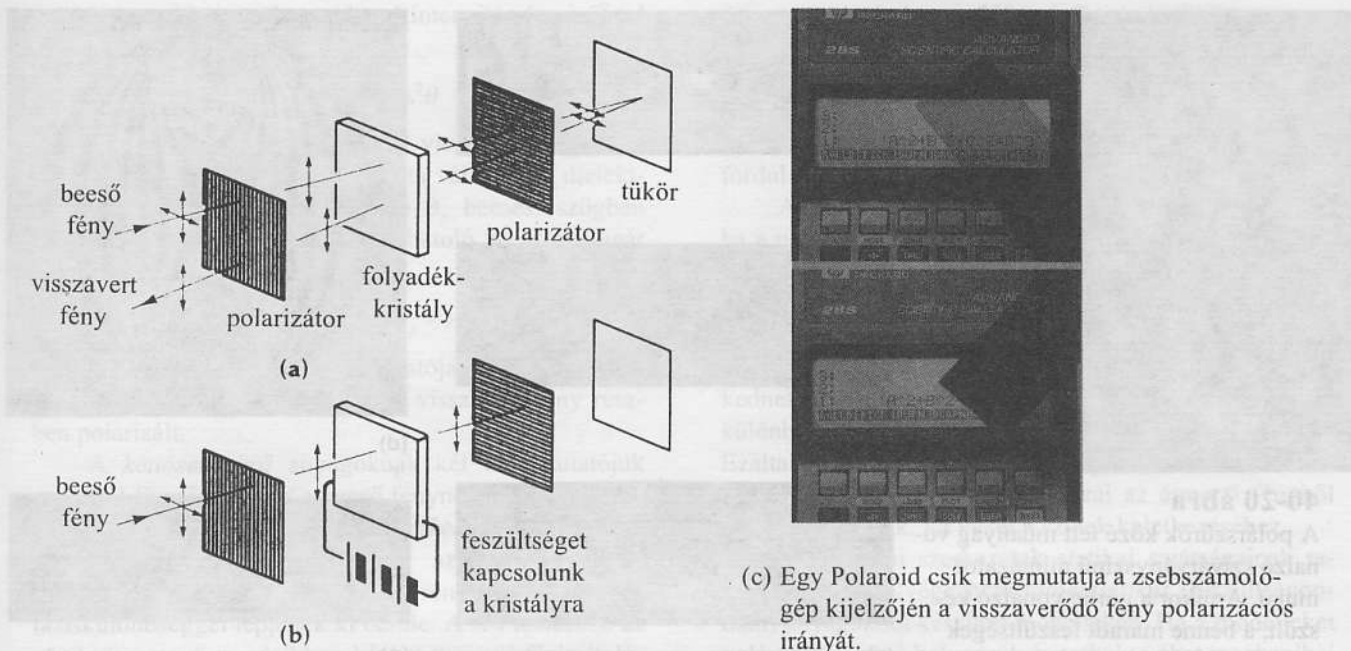
Az optikai aktivitást mutató anyagok a lineárisan polarizált fény polarizációs irányát elforgatják.

gyelő, aki felé a polarizált fény terjed. Az ilyen anyagokat *jobbra forgatóknak* nevezzük. A *levulóz* nevű cukor (a latin *laevus* = bal szóból) az óramutató járásával ellentétesen, vagyis *balra forgatja* el a fény polarizációs irányát. A *szacchariméter* nevű berendezés az optikai forgatás alapján méri a kereskedelmi forgalomban kapható cukorszirupok cukorkoncentrációját, de alkalmazzák a borok esetében is, sőt a cukorbetegség diagnosztikájában is felhasználható az eljárás a vizelet cukortartalmának vizsgálatánál.

## 40.7 Interferenciaszínek és a feszültségoptika

Ha egy kettősen törő celofánlapot néhányszor – véletlenszerű irányokban – összehajtogatunk és két polárszűrő közé helyezünk, akkor az átmenő fény különböző élénk színben ragyogó tartományokat mutat. Ezek a színek azért

<sup>7</sup> Figyeljük meg, hogy egy csavarvonalnak, függetlenül attól, hogy melyik irányban mozgunk a tengely mentén, ugyanaz a forgásiránya. Így nem számít, hogy a molekulák az oldatban hogyan vannak irányítva. Az optikai aktivitást könnyű megfigyelni vizes cukoroldatokban (répacukor -szacharóz- 10%-os oldata 13°/cm forgatóképességű). A terpentin az óramutató járásával ellentétes irányú -3,7°/cm elforgatást okoz. A folyadékkristályok olyan szerves vegyületek, amelyek folyékony állapotban is megőrzik a molekulák irányítottóságát. A kristályok olyan spirális alakú molekulákból állnak, amelyek rendkívül nagy (akár 40.000°/mm) optikai forgatóképességűek.



(c) Egy Polaroid csík megmutatja a zsebszámológép kijelzőjén a visszaverődő fény polarizációs irányát.

#### 40-18 ábra

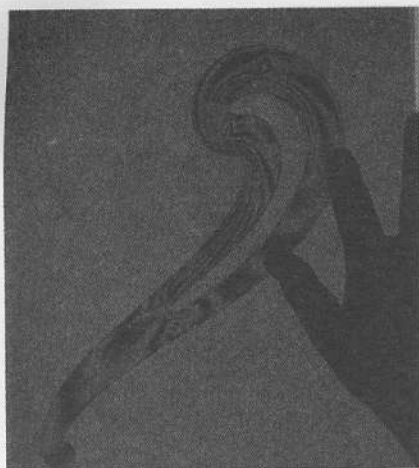
**Folyadékkristály kijelzők.** Az optikai aktivitás érdekes alkalmazásai a *folyadékkristály kijelzők* (Liquid Crystal Displays, LCD), amiket karórákban, hordozható számítógépek monitorain, benzinkutak mérőműszereiben és zsebszámológépeken, stb... láthatunk. A folyadékkristály molekulái rendezettebbek, mint a folyadékoké, de mégsem annyira, mint a kristályoké. Tulajdonságaik érdekesek. Egyes folyadékkristályok a fény polarizációs síkját elforgatják, de ezt a képességüket kis elektromos térerősség hatására elveszítik.

A 40-18a ábra kereszttezett polarizátorok közé helyezett vékony,  $90^\circ$ -os elforgatást okozó folyadékkristálylemezt mutat. Az eszköz mögött tükör van. Amikor kívülről fény érkezik az eszközre, a folyadékkristályra eső fény polarizált síkja  $90^\circ$ -kal elfordul, visszaverődik, majd ismét  $90^\circ$ -kal elfordul, és áthalad az első polarizátoron. Az eszköz visszavert fényben világosnak látszik. Amikor viszont elektromos feszültséget adunk a kristályra, – 40-18b ábra – a fény polarizációs síkja nem fordul el, nem jut fény a tükörrre,

ezért az eszköz sötétnek hat. Ha az elektromos tér csak a kristály egyes zónáira hat, akkor a visszavert fény csak ezeken a területeken tűnik el. Az elektromos teret vákuumpárolgatással készült átlátszó elektródokkal hozzák létre. Az elektródok sűrűn elhelyezett sorokból és oszlopokból álló hálózatot alkotnak; így az igen kis méretű pontokból képeket lehet kialakítani. Az LCD-k igen kis elektromos teljesítményt igényelnek, mert a környező világítást használják fényforrásként.

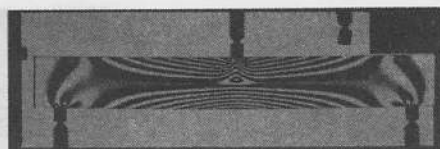
jöttek létre, mert a különböző vastagságú celofánrétegek egyes részei pl. a vörös fény számára  $\lambda/4$  lemezként viselkednek, míg mások esetleg a kék fényre alkotnak  $\lambda/2$  lemezt, stb. Ennélfogva a celofán a ráeső fény polarizációs irányát a különböző színekre különbözőképpen forgatja el, s ennek megfelelően az analízator egyes színeket átenged, másokat pedig nem. A kilépő fényből ezért a színek bizonyos tartományai hiányoznak, ez okozza a szembevető színhatásokat. Ha a celofánt, vagy a két polarizátor-lemezt elforgatjuk, akkor a színek szép látványt nyújtva változnak.

Ennek a tetszetős esztétikai látványnak vannak azonban gyakorlati alkalmazási lehetőségei is. Mechanikai szerkezetek kicsinyített modelljeit elkészítik speciális átlátszó, ún. *fotoelasztikus* műanyagból. Amikor a modelleket polárszűrők közé helyezve terhelik – vagyis erők hatásának teszik ki –, akkor ez a műanyag a rá gyakorolt feszültségek nagyságának függvényében kettősen törővé válik. A kialakuló fényes és sötét (vagy színes) mintázat mintegy feltérképezi a modellben a feszültségeloszlást (lásd a 40-19 ábrát). Hasonló feszültségoptikai (feszültségi kettős törés miatt keletkező) eredetű színeket lehet megfigyelni, ha polárszűrő napszemüvegen keresztül nézzük a műanyag dobozokról, műanyag fejesvonalzóról és más átlátszó rajzeszközről visszavert fényt (pl. 40-20 ábra). Egyes műanyagokban nem túl erős a fe-



### 40-20 ábra

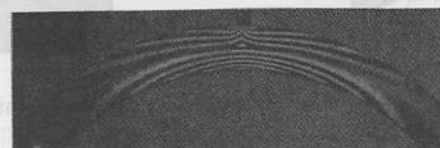
A polárszűrők közé tett műanyag vonalzó szívárványszínű mintázatot mutat. Amikor a görbe vonalzó készült, a benne maradt feszültségek miatt kettősen törővé vált.



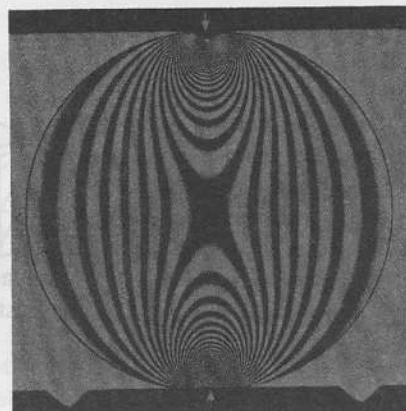
(a)



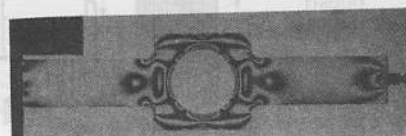
(b)



(c)



(d)



(e)

### 40-19 ábra

A mechanikai szerkezetek modelljeit speciális feszültségoptikai műanyagokból készítik és keresztezett polárszűrők között vizsgálják. A modellek terhelés hatására kettő-

sen törökké válnak, s az átmenő fényben olyan mintázat válik láthatóvá, amely a feszültség-eloszlást mutatja a modellben.

szültség hatására létrejövő kettőtörés, előfordulhat, hogy az Olvasónak igen csak keresnie kell azt a műanyag eszközt, amellyel a jelenséget jól láthatóan megfigyelheti.

A polarizált fény számos más alkalmazásban is hasznos. Így például: az atomok a mágneses tér jelenlétében polarizált fényt bocsátanak ki (Zeeman-effektus), ezt a polarizációt pl. a napfoltok környékén a mágneses tér mérésére, vagy távolabbi csillagok mágneses terének mérésére használják. Ugyancsak a mágneses tér, adott esetben a Tejútrendszerünk távoli vidékein uralkodó mágneses tér okozza azt, hogy a csillagközi gáz és por hosszúkás szemcséi egymással párhuzamosan igyekeznek beállni. Amikor a csillagok fénye ezeken a por- és gázfelhőkön szóródik, akkor a csillagfény részlegesen polarizálttá válik. Így a polarizációs irányoknak a szórt csillagfényben megjelenő eloszlását elemezve információ nyerhető a távoli mágneses terekről. A kristályszerkezetekre, biológiai anyagmintákra és más anyagok természetére vonatkozóan is sok információhoz jutottak a polarizált fény elemzése során.

## Összefoglalás

A transzverzális hullámok *lineárisan polarizáltak*, ha a hullámmal kapcsolatos rezgések egy, a térben rögzített iránnyal párhuzamosan mennek végbe. Az elektromágneses hullám polarizációjának irányát az *elektromos térerősség* vektorának irányával vesszük azonosnak. (Lásd a 296. oldal fordítói lábjegyzetét.)

Amikor egy (szabad) atom nagyobb energiájú állapotból kisebb energiájú állapotba megy át, akkor egy *hullámvonulatot* bocsát ki, ami a látható fény esetében kb. 1-3 méter hosszú, a terjedés irányában mérve. A

*polarizálatlan* fény sok hullámvonulat eredője, amelyben az elektromos térerősségvektorok véletlenszerű eloszlást mutatnak a térbeli irányok szerint.

Egyes átlátszó anyagok, mint pl. a polaroid, szelektív módon nyelik el, abszorbeálják a különböző polarizációs irányú fénysugarakat (az egyiket jobban, mint a másikat) és így a rajtuk átmenő fény részben vagy egészben, lineárisan polarizálttá válik. Ha a beeső  $I_0$  intenzitású *polarizált* fény polarizációs síkja az ideális polarizátor áteresztési (transzmissziós) irányával  $\theta$  szö-



get zár be, akkor az átengedett  $I$  intenzitás (ami  $E^2$ -tel arányos):

$$\text{MALUS TÖRVÉNYE: } I = I_0 \cos^2 \theta$$

A dielektrikumok felületéről visszaverődő polarizálatlan fény 100%-ban polarizálttá válik, ha a dielektrikum felületére a Brewster-féle  $\theta_p$  beesési szögben esik, ekkor a visszavert és a behatoló megtört sugár egymásra merőlegesek:

$$A \theta_p \text{ BREWSTER-SZÖG: } \operatorname{tg} \theta_p = n,$$

ahol  $n$  a kérdéses anyag törésmutatója a környezetéhez viszonyítva. Más szögek esetén a visszavert fény részben polarizált.

A kettősen törő anyagoknak két törésmutatójuk van attól függően, hogy a beeső fénynek milyen a polarizációs iránya. A fázistoló lemezeket a kettősen törő anyagokból úgy készítik, hogy az (o) ordinárius (rendes) és az (e) extraordinárius (rendellenes) sugarak fáziskülönbséggel lépjenek ki belőle. A  $\lambda/4$  lemezben az egyik összetevő a másikhoz képest  $90^\circ$ -nyi fáziseltolódást szenved. Ha a polarizált hullám  $\lambda/2$  lemezen halad át, akkor az egyik összetevő a másikhoz képest  $180^\circ$ -nyi fáziskésést szenved. A cirkulárisan polarizált fény egyenlő amplitúdójú o- és e-komponensből tevődik

## Kérdések

1. Lehet-e polarizálni longitudinális hullámokat, pl. a hanghullámokat? Ha igen, hogyan?
2. A polarizáció vagy az interferencia jelenségei szolgáltatók-e a meggyőzőbb bizonyítékokat a fény hullámtermészete mellett?
3. A fény hullámtermészetének milyen, az interferencia alapján nem vizsgálható sajátosságára mutatnak rá a polarizációs jelenségek?
4. A gépkocsiban használt rádiótelefon antennája egyenes és függőleges helyzetű. Az ilyen antennából származó elektromágneses hullám függőlegesen vagy vízszintesen polarizált? Magyarázzuk meg a választ.
5. Egymáshoz közel elhelyezett függőleges fémhuzalok a függőleges polarizációjú mikrohullámok számára átlátszatlanok. Miért?
6. A fény nem hatol át a keresztezett polarizátorokon. De ha egy harmadik polarizátort teszünk a keresztezett polarizátorok közé, valamekkora fényintenzitás mégis átjut. Magyarázzuk meg ezt.
7. Hogyan lehetne felhasználni egy köteg polárszűrőt arra, hogy a polarizált fény polarizációs síkját elforgassuk?
8. A változtatható elnyelésű fényszűrő egyik formája két polárszűrőből áll, amelyeket úgy helyeznek egymásra, hogy transzmissziós (áteresztési) tengelyeiket egymáshoz képest el lehessen forgatni. Vajon a tengelynek kis elforgatása mikor eredmé-

nyez nagyobb változást az áteresztett fényintenzitásban, akkor-e, amikor a transzmissziós tengelyek közel párhuzamosak, vagy közel merőlegesek (keresztettek)? Esetleg egy másik, közbülső esetben?

össze, amelyek éppen  $90^\circ$ -nyi fáziskülönbséget mutatnak egymáshoz képest. Az optikailag aktív anyagokban (cukoroldat pl.) az eltérő cirkuláris polarizációjú fénysugarak különböző sebességgel terjednek, emiatt a beeső lineárisan polarizált fény polarizációs iránya elfordul.

A fehér fényből interferenciaszínek jönnek létre, ha a polarizáló lemezek (a polarizátor és az analizátor) közé különböző vastagságú kettősen törő rétegeket helyezünk. A színek azért jelennek meg, mert az anyag egyes rétegei, mondjuk, a kék színű fényre  $\lambda/2$ -es, más színű fényre pedig pl. negyedhullám-lemezként viselkednek és ennek megfelelően a polarizáció irányát a különböző hullámhosszakra másképpen változtatják meg. Ezáltal egyes hullámhosszak nem jutnak át az analizátoron és a spektrum egyes szakaszai az átmenő fényből hiányozni fognak. Ez vezet a színek keletkezéséhez.

Mechanikai szerkezetek statikai sajátosságainak tanulmányozása elvégezhető fotoelasztikus (feszültségoptikai) anyagokból készített modelleken. Ha a modelleket polárszűrők közé helyezük és terhelve őket mechanikai feszültségeket hozunk létre bennük, akkor az anyag kettősen törővé válik, s emiatt olyan ábra alakul ki, amely a modellben a feszültség eloszlására jellemző.

9. Egy köteg véletlenszerűen orientált polárszűrő közül egyet kihúzzunk. Ennek az az eredménye, hogy a kötegen átengedett fény intenzitása lecsökken. Hogyan történhet meg ez?
10. Az ideális polárszűrő a nempolarizált fénynek csak a felét engedi át. Hová lesz a másik fele?
11. Sok halász polárszűrő napszemüveget használ halászat közben. Miért?
12. Lehet-e polarizálni a fényt két átlátszó közeg közti határfelületen való visszaverődéssel, ha a fény a határfelületen át a nagyobb törésmutatójú közeg felé halad?
13. Hogyan határozhatnánk meg, hogy egy fénynyaláb polarizálatlan, síkban polarizált vagy cirkulárisan polarizált-e?
14. Bizonyos helyzetekben a fényképészek a fényképezőgép lencséjére polárszűrőt tesznek. Soroljunk fel néhányat ezek közül a helyzetek közül.
15. Síkban polarizált fénynyaláb két, ellenkező forgási irányú cirkulárisan polarizált nyaláb szuperpozíciójaként is előállítható. Mi lesz az eredménye annak, ha az egyik nyalábnak a másikhoz képest vett fázisát megváltoztatjuk?

16. Egy érdekes berendezés két polárszűrőből áll, amelyek mindegyikére  $\lambda/4$  lemez van felerősítve. Az eszközön a fény áthalad, ha az egyik szűrőt a másikra helyezük, ha azonban a szűrők sorrendjét megváltoztatjuk, akkor nem. Mi lehet a lemezpár készítésének titka és miért viselkednek így?
17. Kialakulhat-e interferenciakép, ha kétréses interferenciaberendezés egyik részét a rése merőle-

ges tengelyű polárszűrővel, míg a másik rést vele párhuzamos tengelyű polárszűrővel fedjük be? Magyarazzuk meg a választ.

18. Mechanikai szerkezetek fotoelasztikus modelljeit polárszűrők közé helyezve színes sávokat látunk, amelyekből a szerkezetben ébredő feszültségekre következtethetünk, (lásd 40-16 ábrát). A sávok közti távolságokat hogyan lehet értelmezni?

## Feladatok

### 40.2 A polárszűrő

**40A-1** Polarizálatlan fény halad át két (ideális) polarizáló lemezen. Adjuk meg, hogy a beeső fény intenzitásának mekkora hányadát nyelik el a lemezek, ha transzmissziós áteresztési tengelyeik szöge  $60^\circ$ ?

**40A-2** Két ideális polárszűrő lemez úgy van egymásra helyezve, hogy a transzmissziós tengelyeik közötti szög  $\theta$ . Adjuk meg a lemezek közötti szöget úgy, hogy a beeső polarizálatlan fény intenzitásának 45%-a átjusson.

**40B-3** Két polárszűrőt keresztezett állásban helyeztünk egymásra, a szűrők nem eresztenek át fényt. Egy harmadik polárszűrő lemezt teszünk közéjük, melynek transzmissziós tengelye az előbbieket mindegyikének tengelyével  $45^\circ$ -os szöget zár be. Adjuk meg, hogy a beeső fény intenzitásának hányadrészét eresztí át a három szűrő együttese (feltéve, hogy mindhárom lemez ideális polarizátor)!

**40B-4** Polarizálatlan fény esik három, egymás mögé helyezett ideális polárszűrő lemezre. A második lemez transzmissziós tengelyét az elsőéhez, a harmadikét a másodikéhoz képest  $30^\circ$ -kal elfordítjuk. Számítsuk ki, hogy a beeső fény intenzitásának hányadrészét engedi át az együttes?

### 40.3. Polarizáció fény visszaverődésekor és szóródásakor

**40A-5** Üveglemezre polarizálatlan fénynyaláb esik  $58^\circ$ -os szögben. Adjuk meg az üvegben megtört sugár irányának szögét.

**40A-6** Egy adott hullámhosszra az üvegminta törésmutatója 1,50. Számítsuk ki a  $\theta_p$  Brewster-szöget erre a törésmutatóra. Általában nő vagy csökken a Brewster-szög, amikor a beeső fény hullámhossza nő?

**40A-7** Üveglemez Brewster-szöge  $57^\circ$ , ha a lemez a levegőben van. Számítsuk ki a lemez Brewster-szögét, ha vízbe helyezük ( $n = 1,33$ ).

**40A-8** Egy polarizálatlan fénynyaláb visszaverődik a víz felszínén és  $53^\circ$  visszaverődési szög mellett síkban polarizálttá válik. (a) Számítsuk ki a víz törésmutatóját. (b) Mutassuk meg, hogy az a szög, amit a visszavert nyaláb iránya a felület normálisával bezár, az  $53^\circ$  pót-szöge.

**40B-9** Dielektrikum teljes visszaverődésének kritikus szöge  $\theta_c$ . Adjuk meg a  $\theta_p$  Brewster-szöget  $\theta_c$  függvényében!

**40B-10** Vezessük le a visszaverődési polarizáció Brewster-törvényét, a (40-2) képletet.

### 40.4 A kettős törés

#### 40.5 A fázistoló lemezek és a cirkuláris polarizáció

#### 40.6 Az optikai aktivitás

**40B-11** A kvarc kettősen törő anyag, az 589 nm hullámhosszú fényre a törésmutatója 1,553, ill. 1,544. Adjuk meg annak a kvarcértegnek a minimális vastagságát, amely az adott hullámhosszon  $\lambda/4$  lemezként viselkedik.

**40B-12** Cirkulárisan poláros fénynyaláb polarizáló lemezre esik. Miért nem függ a kilépő fény intenzitása a polarizátor tengelyének irányától?

**40B-13** (a) Mutassuk meg, hogy ha cirkulárisan polarizált fénynyaláb  $\lambda/4$  lemezre esik, akkor a kilépő fény síkban polarizált lesz. (b) Mutassuk meg, hogy ha a cirkulárisan polarizált fény forgási iránya megfordul, akkor a kilépő fény polarizációs síkja  $90^\circ$ -kal változik!

**40B-14** Kvarcból ( $n_e=1,544$ ,  $n_o=1,553$ ) készült fázistoló lemez úgy van kivágva, hogy optikai tengelye a lemez síkjában fekszik. Számítsuk ki, hogy legalább mekkora legyen a lemez vastagsága, hogy az 500 nm-es fényhullám számára  $\lambda$  lemezként, a 600 nm-es hullámhosszra pedig  $\lambda/2$  lemezként viselkedjék.

**40B-15** Egy köbcentiméter vízben oldott egy gramm szacharóz koncentráció a lineárisan polározott hullám síkját  $66,8^\circ$ -kal forgatja el 10 cm úthosszon! Egy ismeretlen szacharóz-oldat a 35 cm hosszú szachariméterben  $16^\circ$ -nyi forgatást okoz. Adjuk meg az ismeretlen oldat koncentrációját.

**40B-16** Egy  $\lambda/2$  lemezt két polárszűrő közé helyezünk, a szűrők polarizációs irányai párhuzamosak. A  $\lambda/4$  lemez és az első polárszűrő helyzete a 40-11 ábrán látható. (a) Magyarazzuk meg, miért *nem* halad át a fény a berendezésen! (b) Ha – ezzel szemben – a két polárszűrő keresztezett állású (áteresztési tengelyeik merőlegesek), akkor a berendezés a fényt gyengítenél átengedi. Miért? (c) Magyarazzuk meg kvalitatív módon, hogy az (a) feladatrészben milyen fény lép ki a berendezésből, ha a  $\lambda/2$  lemezt lassan  $360^\circ$ -kal elforgatjuk!



**Vegyes feladatok**

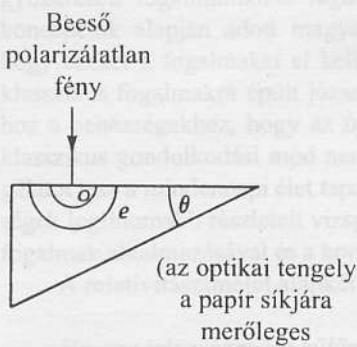
**40C-17** Változtatható áteresztésű fényszűrő két polárszűrő lemezből készül, az egyik lemezt a másikhoz képest el lehet forgatni. Határozzuk meg a transzmissziós tengelyek közti szöget úgy, hogy a további  $d\theta$  szögelfordulás az átengedett fény  $dI$  intenzitásváltozásával a lehető legnagyobb  $dI/I_0$  relatív intenzitásváltozást eredményezze.

**40C-18** Két ideális polárszűrő lemezt egymásra helyezünk transzmissziós tengelyekkel egymásra merőlegesen. Egy harmadik lemezt is elhelyezünk közéjük úgy, hogy transzmissziós tengelye  $\theta$  szöget zárjon be annak a lemeznek a tengelyével, amelyik a beeső polarizálatlan fénnyel közelebb van. Adjuk meg az  $I/I_0$  relatív intenzitást ( $I_0$  a beeső fényintenzitás) a  $\theta$  szög függvényében.

**40C-19** Egy köteg polárszűrő lemez a beeső lineárisan polarizált fény polarizációs irányát elfordítja. Az egymást követő lemezek polarizációs tengelye rendre  $\theta$  szöggel van elfordítva az előzőhöz képest (a kívánt irányban). Ha 10 ideális szűrőt használunk  $90^\circ$ -os elforgatás létrehozásához, akkor a beeső  $I_0$  intenzitásnak mekkora az a maximális hányada, amely a tizedik lemezen át fog haladni.

**40C-20** Lineárisan polarizált, és polarizálatlan fény keveréke ideális polárszűrőn halad át. Amikor a lemezt elforgatjuk, az áteresztett fény intenzitása egy maximális értékről az egyharmad akkora értékre változik. Számítsuk ki, hogy a beeső keverék intenzitásának hányadrésze a lineárisan polarizált fényé.

**40C-21** A 40-8b ábra mutatja, hogy a rendellenes sugár nem követi Snellius fénytörési törvényét. Huygens-elvének felhasználásával, – a Huygens-féle elemi hullámokat felvázolva a kalcitban – mutassuk meg, hogy az ábrán bemutatott fénytörés lehetséges.



**40-21 ábra**

A 40C-22 feladathoz

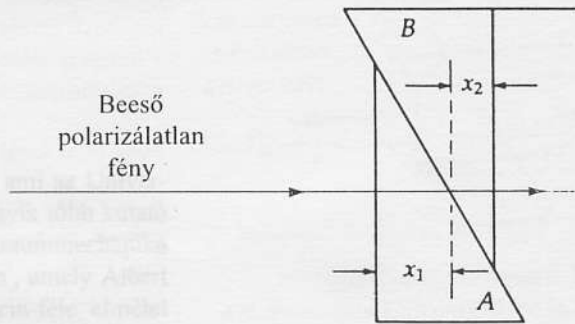
**40C-22** A 40-21 ábrán kalcitprizma látható oldalnézetből, amelynek optikai tengelye merőleges a papír síkjára. A prizma felső lapjára merőlegesen sárga nátriumfény ( $\lambda=589$  nm) esik. Erre a hullámhosszra a törésmutatók:  $n_o=1,638$ ,  $n_e=1,486$ . (a) Adjuk meg a prizma minimális  $\theta$  törőszögét, amelynél a rendes sugár teljes

visszaverődést szenved. (b) Mutassuk meg, hogy a rendellenes sugár a ferde lapról lép ki, így 100%-ban lineárisan polarizált lesz. (c) Adjuk meg a kilépő rendellenes sugár irányát a kilépés után!

**40C-23** A Babinet-kompensátorban két, egymáson elcsúsztatható kvarccék ( $A$  és  $B$ ) van, ahogyan a 40-22 ábra mutatja. Az  $A$  ék optikai tengelye a papír síkjában függőleges irányú, míg a  $B$  éké a papír síkjára merőleges. Így a rendellenes sugár (melyre a törésmutató  $n_2$ ) az  $A$  ékben átmegy a  $B$  ék rendes sugarába (melynek  $n_1$  a törésmutatója) és megfordítva. Amikor a  $B$  éket az  $A$  éken elcsúsztatjuk, az  $x_1$  és az  $x_2$  utak közti különbséget változtatjuk. Mutassuk meg, hogy a két kilépő sugár közti  $\Delta\phi$  fáziskülönbség

$$\Delta\phi = ((2\pi)/\lambda)(n_2-n_1)(x_1-x_2)$$

szerint változik.



**40-22 ábra**

A 40C-23 feladathoz

**40C-24** Vékony kettősen törő hasábra  $\lambda$  hullámhosszú polarizálatlan fény esik. A hasáb vastagsága  $b$ , és a törésmutató  $n_o$  és  $n_e$  a rendes és a rendellenes sugarakra. A megadott paraméterek felhasználásával határozzuk meg a hasárból kilépő két sugár közti  $\phi$  fáziskülönbséget.

**40C-25** A 40-3 példában leírt  $\lambda/2$  lemez minimális vastagsága túl kicsi ahhoz, hogy gyakorlatilag használható lehessen. Határozzunk meg a 0,1 mm környékén olyan vastagság értéket, ami ugyanazt a hatást váltja ki, mint a minimális vastagság.

**40C-26** Egy 0,610 mm vastagságú kvarclemez úgy van kivágva, hogy optikai tengelye a lemez síkjában fekszik. A lemezre eső polarizált fénynek a polarizációs iránya a lemez optikai tengelyével  $45^\circ$ -os szöget zár be. Számítsuk ki azokat a hullámhosszakat 600 nm és 700 nm között, amelyeknél a kilépő fény lineárisan polarizált lesz. (Tegyük fel, hogy  $n_e=1,544$  és  $n_o=1,553$  minden hullámhosszra.)

**40C-27** Mutassuk meg, hogy optikailag aktív közegen áthaladó polarizált fény síkjának elfordulása pontosan fele akkora, mint a jobbra és a balra cirkulárisan polarizált komponensek közötti fáziskülönbség.





- 38B-19 a) zöld b) piros  
 38B-21 99,6 nm  
 38B-23 113  
 38B-25 1,31  
 38B-27 18,7 cm  
 38C-29 A válasz adott.  
 38C-31 A válasz adott.  
 38C-33 A válasz adott.  
 38C-35 A válasz adott.  
 38C-37 A válasz adott.  
 38C-39 a)  $0,155\lambda/d$  b)  $0,500\lambda/d$   
 38C-41 543 nm  
 38C-43 A válasz adott.  
 38C-45 1,000 30

### XXXIX. Fejezet

- 39A-1 0,396 mm  
 39B-3 18,0 mm  
 39B-5 a)  $\lambda_1/\lambda_2 = 2$   
 39B-7 0,684  
 39B-9 a) 120 b) 60  
 39A-11 11,5 km  
 39A-13 15,4  
 39B-15 420 m  
 39B-17  $1,07 \times 10^{-5}$  m b)  $1,97 \times 10^{-5}$  m  
 39A-19  $36,9^\circ$   
 39A-21  $7,16 \times 10^{-2}$  fok/nm b) 25 000  
 39B-23 688 nm  
 39B-25  $1,375 \times 10^{-3}$  fok  
 39A-27 0,300 nm  
 39A-29 A válasz adott.  
 39B-31 17,0  
 39C-33 0,1233 rad  
 39C-35 lásd 2. láb.  
 39C-37 A válasz adott.  
 39C-39 A válasz adott.  
 39C-41 A válasz adott.

### XL. Fejezet

- 40A-1  $\frac{7}{8}$   
 40B-3  $\frac{1}{8}$   
 40A-5  $32,0^\circ$   
 40A-7  $49,2^\circ$   
 40B-9  $\text{tg } \theta_p = 1/\sin \theta_c$   
 40B-11 16,4  $\mu\text{m}$   
 40B-13 A válasz adott.  
 40B-15  $68,4 \text{ mg/cm}^3$   
 40C-17  $0^\circ$  és  $90^\circ$   
 40C-19  $78,1\%$   
 40C-21 A válasz adott.  
 40C-23 A válasz adott.

- 40C-25 0,085 65 mm vagy 0,1199 mm  
 40C-27 A válasz adott.  
 40C-29  $118^\circ$

### XLI. Fejezet

- 41B-1 1,5 cm/s  
 41A-3 a) 2,31 perc b) 1,16 c·perc  
 41A-5 a)  $1 - \beta \approx 2,35 \times 10^{-7}$  b) 1 c · nap  
 41B-7  $22,5m/c$  vagy  $\frac{7}{5} \times 10^{-8}$  s  
 41B-9 6,17 ns  
 41B-11 a) 60 m b) 75 m/c c) 45 m/c  
 d) 36 m e) 45 m/c  
 41A-13 0,946c és  $-0,385c$   
 41A-15  $v_x = 0,994c$   
 41B-17 1,78  
 41A-19  $v = 0,866c$   
 41A-21 889 kg  
 41B-23  $4,28 \times 10^9$  kg/s  
 41B-25 A válasz adott.  
 41B-27 A válasz adott.  
 41B-29 A válasz adott.  
 41B-31 A válasz adott.  
 41B-33 a) 270 m/c vagy  $9,00 \times 10^{-7}$  s b) az űrhajó  
 orrában lévő óra mutatja a korábbi időt.  
 41B-35 b) 80 m/c  
 41C-37 a) 1,33c·s b) 3,00 s  
 41C-39 a) 2,00 m/c b) 2,50 m/c  
 41C-41 A válasz adott.  
 41C-43 A válasz adott.  
 41C-45  $5,55 \times 10^{-17}$  s  
 41C-47  $V = v \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta^2} \right)$  ahol  $(\beta \equiv v/c)$   
 41C-49 a)  $K = 4E_0$  b)  $p = \sqrt{24}E_0/c$   
 c)  $\beta = \sqrt{\frac{24}{25}}$   
 41C-51 A válasz adott.  
 41C-53 A válasz adott.  
 41C-55 A válasz adott.

### XLII. Fejezet

- 42A-1 1,51  $\text{cm}^2$   
 42B-3 0,646%  
 42A-5 9660 nm  
 42A-7 5222 K  
 42A-9  $2,43 \times 10^{-12}$  m  
 42A-11 A válasz adott.  
 42B-13  $3,54 \times 10^6$  m  
 42A-15 451 nm  
 42B-17 a)  $3,56 \times 10^5$  m/s b) 432 nm  
 42A-19 4,85 pm