

# Anizotropija v snoveh – optična dvolomnost in demonstracija komplementarnih barv (1. del)

mag. Vitomir Babič

Šolski center Celje, Gimnazija Lava

## Povzetek

Ena od splošnih opredelitev pouka fizike v srednjih šolah je »Dijaki naj spoznajo fizikalne zakonitosti delovanja strojev in naprav, s katerimi se srečujejo v vsakdanjem življenju« [2]. Srednješolski fiziki je najbrž odmerjeno premalo šolskega časa za korektno obravnavo znanj na nivoju, ki bi omogočal »biti domač s tehnologijo svojega časa«, a poskusiti (vsaj na kvalitativni ravni) vendar velja. Živimo v izrazito tehnološko naprednem času. Industrija se pripravlja na obdobje, v katerem bo mogoče s snovjo manipulirati tako rekoč na molekularnem nivoju. Tudi dandanašnja tehnologija, ki je že globoko prodrla v splošno rabo, uporablja lastnosti snovi, ki jih med poukom običajno zamolčimo – saj njihova obravnava ni posebej zapisana v učnem načrtu. A ta načrt tudi spodbuja, naj učitelji z dijaki nekaj časa posvetijo obravnavi kakšnih zanimivih pojavov in njihovih lastnosti po lastni izbiri. Pričujoči članek skuša motivirati oz. prikazati način, kako je mogoče v srednji šoli povedati nekaj o anizotropnih lastnostih snovi s poudarkom na optični anizotropiji, hkrati pa sproža debato o mešanju barv in analizira njihovo komplementarnost. Članek je bil zaradi obsežnosti razdeljen na dva dela. Prvi del, ki se ukvarja z dvolomnostjo snovi, je objavljen v tej številki. Nadaljevanje članka obravnava predvsem nastanek (komplementarnih) barv in bo objavljen v naslednji številki revije.

## Abstract

One of the general definitions of physics lessons in secondary schools is: »Students should learn about the physical laws of the operation of the machines and devices which they encounter in everyday life.« [2] Secondary school physics has probably not been allocated enough school hours to be able to properly discuss such knowledge at a level that would enable one »to be familiar with the technology of the time«, but we should nevertheless try (at least on a qualitative level). We are living in a highly technologically advanced time. The industry is preparing for a time when matter will be manipulated at the molecular level, so to speak. Today's technology, which has made its way into general use, makes use of the properties of substances which are usually not mentioned during lessons – since the curriculum does not explicitly mention a discussion of this topic. However, the same curriculum also encourages teachers to devote a bit of time to discussing interesting phenomena and their properties (of their own choosing) with the students. The present article tries to motivate or demonstrate how we can say a few words about anisotropic properties of substances in secondary schools, with emphasis on optical anisotropy; simultaneously, it triggers a debate on the mixing of colours and analyses their complementarity. Due to its comprehensiveness, the article has been divided into two parts. The first part, which discusses the double refraction of substances, has been published in this issue. The rest of the article primarily discusses the creation of (complementary) colours and will be published in the next issue of the journal.

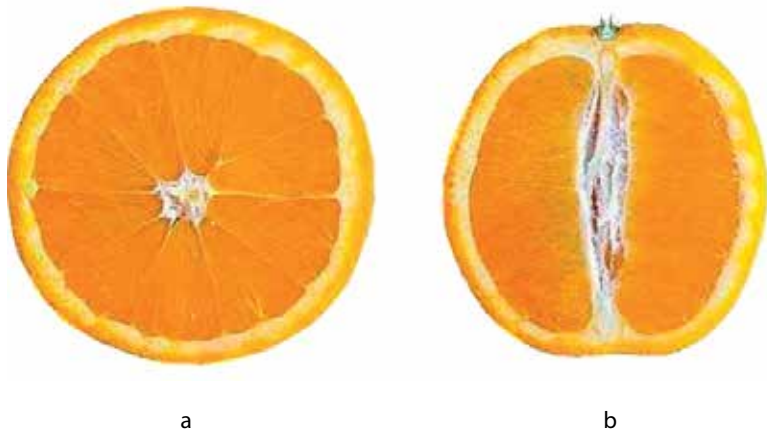
Živimo v izrazito tehnološko naprednem času. Industrija se pripravlja na obdobje, v katerem bo mogoče s snovjo manipulirati tako rekoč na molekularnem nivoju.

## O izotropiji in anizotropiji

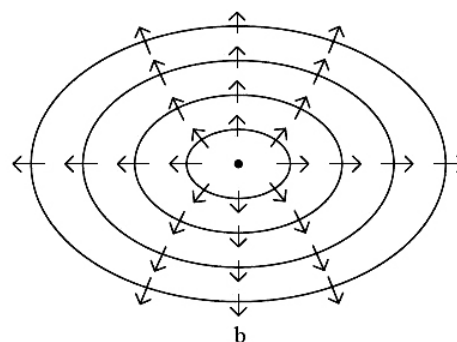
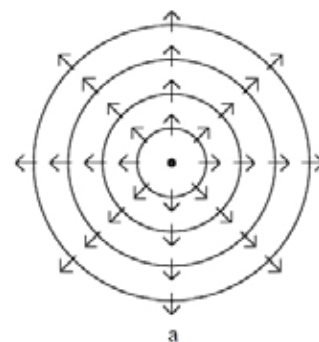
»Izotropnost« (iz gr. *isos* – enak, *trope* – obrat) je izraz, s katerim izražamo dejstvo, da so lastnosti neke fizikalne količine neodvisne od smeri v prostoru. Če pri nekem naravnem pojavu smer v prostoru ni pomembna oz. poteka pojav neodvisno od smeri v prostoru, pravimo, da je »izotropen«. Prazen prostor je sam po sebi izotropen. Do anizotropije praviloma prihaja takrat, ko obravnavamo fizikalne pojave v zvezi s snovjo – ta ima zaradi notranje strukture pogosto različne lastnosti v različnih smereh.

Anizotropije pri pouku fizike v srednji šoli vsaj na kvantitativni ravni ne omenjamo, saj so opisi anizotropnih pojavov za srednješolski nivo matematike prezahtevni. Tudi učni načrt za pouk fizike in maturitetni katalog med učnimi cilji ne omenjata anizotropnih pojavov. Izraz »izotropnost« je npr. v učnem načrtu omenjen le tam, kje je govora o razširjanju energije valovanja iz izotropnih izvirov valovanja. Tako o izotropnosti govorimo le pri sevanju točkastega svetila v okoliški prazen prostor ali pri širjenju zvoka, ki ga ustvarja zelo majhno zvočilo v homogeni atmosferi. Če obravnavamo anizotropne lastnosti snovi, si je vsaj na začetku treba pomagati z enostavnimi in lahko razumljivimi zgledi.

Zamislimo si, da smo v sredini popolnoma homogene kroglice (npr. sredi meglice v vesolju) in si želimo ven po najkrajši poti. In če bi se znašli v sredini pomaranče? Še vedno bi bilo vseeno, v katero smer ekvatorialnega prereza pomaranče se usmerimo (glej sliko 2a). Razlike pa so očitne, če se usmerimo v poljubno smer prereza vzdolž meridijana (glej sliko 2b). Pot po osi (na sliki 2b navpično) bi se precej razlikovala od poti v ekvatorialni ravnini (na sliki 2b vodoravno). Pomaranča bi bila takrat za tistega, ki bi se napolnil iz njenega središča, anizotropno telo, saj vse poti proti pomarančni lupini ne bi bile enakovredne. Omeniti velja, da je pomaranča telo, ki je vsaj delno izotropno (če se oziramo samo na ekvatorialno ravnino) – obstajajo seveda telesa, ki niso izotropna niti v eni ravnini.



**Slika 2:** V ravnini ekvatorialnega prereza so glede na središče vse smeri enakovredne (a). Če pomarančo prerežemo vzdolž »poldnevnikov« (b), je očitna anizotropija glede na središče.



**Slika 1:** Primer izotropnega razširjanja valovanja v prostor – hitrost valovanja je v vseh smereh prostora enaka (a). Če je hitrost valovanja v eni smeri večja (vodoravno), v drugi pa manjša, je širjenje valovanja anizotropno (b).

Do anizotropije praviloma prihaja takrat, ko obravnavamo fizikalne pojave v zvezi s snovjo – ta ima zaradi notranje strukture pogosto različne lastnosti v različnih smereh.

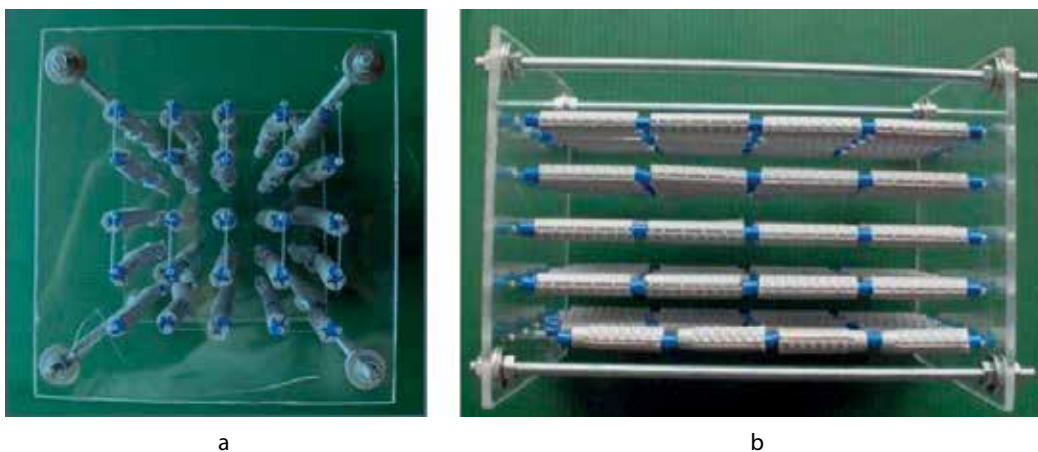
Tudi kadar pri pouku v srednji šoli obravnavamo pojave, pri katerih so anizotropne lastnosti snovi lahko pomembne in tudi očitne, se običajno omejimo le na pojave, pri katerih smer ali orientacija (morda z izjemo teže) nista pomembni. Tako je npr. lomni količnik stekla za katerokoli polarizacijo neodvisen od smeri, vzdolž katere se razširja svetloba po njem. Pri obravnavi mehanskih lastnosti snovi običajno ne omenjamo odvisnosti od morebitne notranje strukturne urejenosti gradnikov, ki jo tvorijo. Tudi pri obravnavi toplotnih tokov se omejimo le na primere, ko struktura toplotnega prevodnika ni pomembna.

V naravi stvari seveda niso tako preproste – velika večina materialov ima zaradi neke notranje urejenosti osnovnih gradnikov snovi oz. njihovih celic različne lastnosti v različnih smereh. V materialih torej praviloma nastopa »anizotropija« (negacija od »v vse smeri enako«). Kvantitativni obravnavi anizotropije se pri pouku fizike v srednji šoli izognemo – še za izotropne pojave je včasih premalo časa. Tu in tam nakažemo, da so lastnosti snovi lahko odvisne od smeri – les ima drugačno toplotno prevodnost vzdolž žil kot v smeri prečno na žile, tudi zvok se širi prečno na desko drugače kot vzdolž deske. Obravnavana anizotropnih optičnih lastnosti materialov in pojavov v zvezi s širjenjem svetlobe po njih v učnem načrtu ni predvidena, lahko pa jo v program vključi

šola (ali učitelj), če je za tako obravnavo zanimanje. Iz izkušenj vem, da je za dijake gotovo zanimiv pogovor o delovanju sodobnih prikazovalnikov LCD. Pri tem se pogovoru o polarizaciji svetlobe ni mogoče izogniti. Ker je svetloba, ki prihaja iz prikazovalnika LCD, polarizirana, pa ni več daleč do zanimivih poskusov s polarizirano svetlobo. Tu je mogoče obravnavati DVOLOMNOST kot povod za pogovor o anizotropnih optičnih lastnostih snovi.

### Preprosti modeli anizotropne snovi in poenostavljena razlaga dvolomnosti

Dovolj preprost primer modela anizotropne snovi je vsaj približno urejen sklad podolgovatih molekul, kot jih najdemo npr. v prikazovalnikih LCD. Izdelava modela anizotropnega kristala, ki ga sestavljajo podolgovate molekule, ne vzame veliko časa – na nit nanizamo plastične valje (vložki za vijačenje v zid) z distančniki (glej sliko 3). Opazimo, da je v določeni smeri videti, kot da so »molekule« v vseh smereh enakih dimenzij – kot krogci z določenim premerom (slika 3a). V drugi smeri so videti drugače – kot pravokotniki, katerih krajša stranica ustreza premeru krogcev iz prejšnjega pogleda (slika 3b). Smer, v kateri so molekule videti kot (izotropni) krogci, bomo imenovali »optična os« kristala.

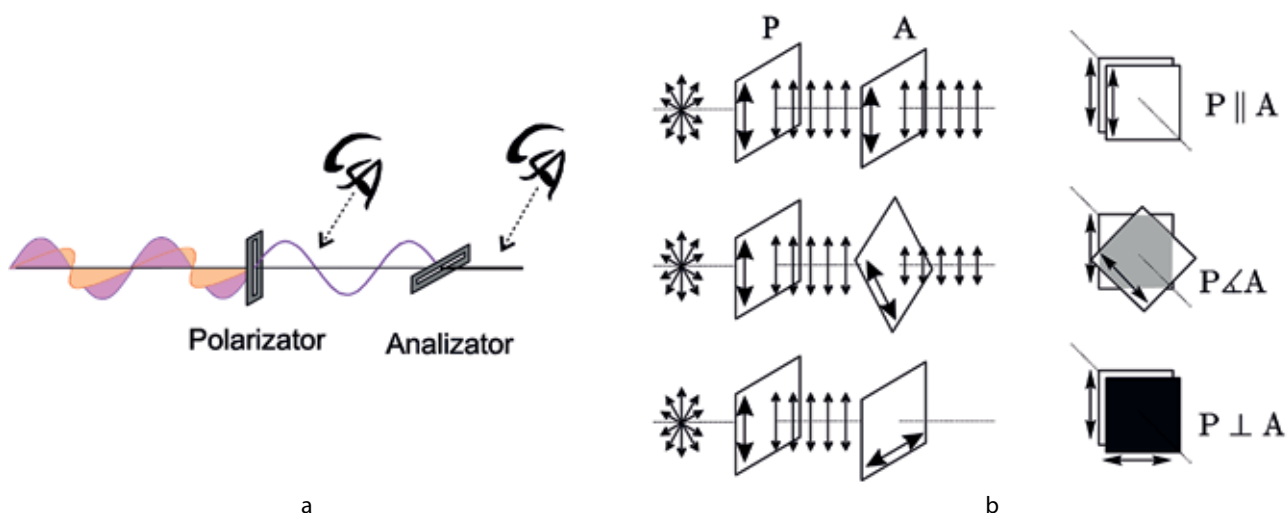


**Slika 3:** Model dvolomnega kristala. Na prozorno nit nanizani plastični valji sive barve, ločeni z modrimi distančniki. Pogled vzdolž optične osi (a) ter pogled pravokotno na optično os (b).

Za razlago dvojnega loma v anizotropnem kristalu je treba najprej spoznati, da je svetloba transverzalno elektromagnetno valovanje, ki ga je mogoče polarizirati. Šole so opremljene s polarizatorji svetlobe še iz časov programa SVIO, ko je bila tema polarizacije vključena v učni načrt in je bila obravnavana v prvem letniku srednje šole.

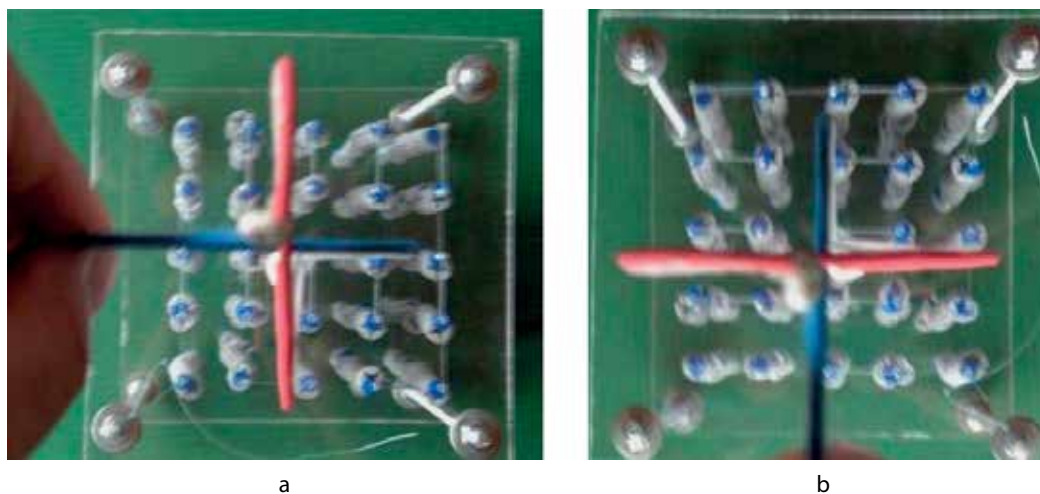
Predstavljam si, da vpada poljubno polarizirani val (svetloba) na model kristala vzdolž optične osi. Vse možne polarizacije svetlobe (žični model vala nakazuje dve med sabo pravokotni polarizaciji) »vidijo« enake molekule in se širijo skozi kristal z

Les ima drugačno toplotno prevodnost vzdolž žil kot v smeri prečno na žile, tudi zvok se širi prečno na desko drugače kot vzdolž deske.



**Slika 4:** Polarizirano valovanje je valovanje s predvidljivo smerjo nihanja vzvalovanega sredstva. Mehanski model (a) in poskus s polarizirano belo svetlobo (b).

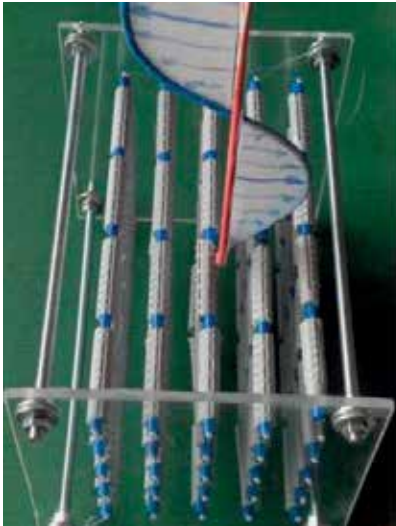
enako hitrostjo (glej sliko 5). Zgodba je drugačna, če vpada svetlobni val pravokotno na optično os. Če ena od polarizacij vidi molekule enake dimenzije, kot so videti vzdolž optične osi, so molekule za drugo polarizacijo bistveno drugačne. Za svetlobi, ki imata pravokotni polarizaciji, lastnosti kristala niso enake. Za eno od polarizacij so razmere enake kot vzdolž izotropne, optične osi. Tež svetlobi pravimo »redni žarek«. Za drugo polarizacijo so razmere drugačne, zato se ta svetloba (pravimo ji »izredni žarek«) širi skozi kristal z drugačno hitrostjo (glej sliko 6 in 7).



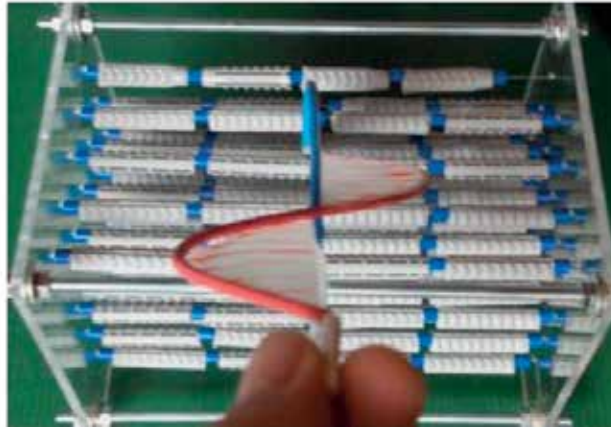
**Slika 5:** Vpadni val prihaja v kristal vzdolž optične osi. Val razstavimo na dve med seboj pravokotni polarizirani komponenti. Ker je kristal videti izotropen, je prehod obeh (a ali b) komponent simetrično enak – torej ni razlik med posameznima polarizacijama.

Za svetlobi, ki imata pravokotni polarizaciji, lastnosti kristala niso enake.

Zgoraj opisane lastnosti anizotropne dvolomne snovi je mogoče lepo demonstrirati s poskusom, ki vključuje snov v tekočerkristalni fazi. Opisan je v članku [3]. Na tem mestu povzemimo, da je tudi v srednješolskem laboratoriju mogoče relativno preprosto izdelati snovi (medpredmetna povezava s kemijo), ki imajo tekočerkristalno fazo v primernem temperaturnem območju. Ko kanemo kapljico take snovi na primerno obdelan substrat (objektno stekelce, ki smo ga podrgnili z žametno krpo, namočeno v alkohol – v steklu s tem ustvarimo mikroskopsko majhne brazde, vzdolž katerih se uredijo molekule), ustvarimo plast dvolomne snovi. Če je plast na enem koncu tanka,

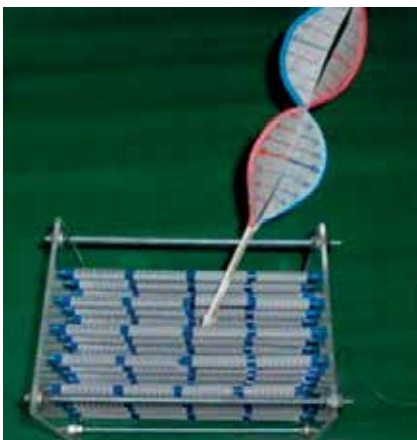


a



b

**Slika 6:** Vpadni val prihaja v kristal pravokotno na optično os. Val razstavimo na dve med seboj pravokotni polarizirani komponenti. Ena od polarizacij »vidi« le debelino molekul (modri val, a), polarizacija vzdolž optične osi »vidi« drugačne lastnosti molekul – zato se tudi drugače širi skozi kristal (rdeči val, b).



a

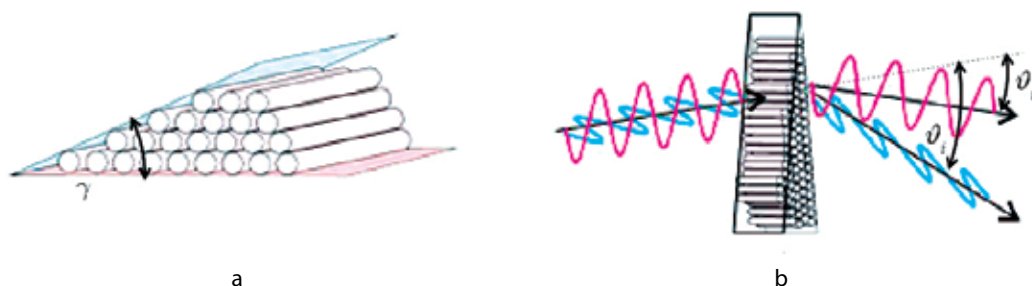


b

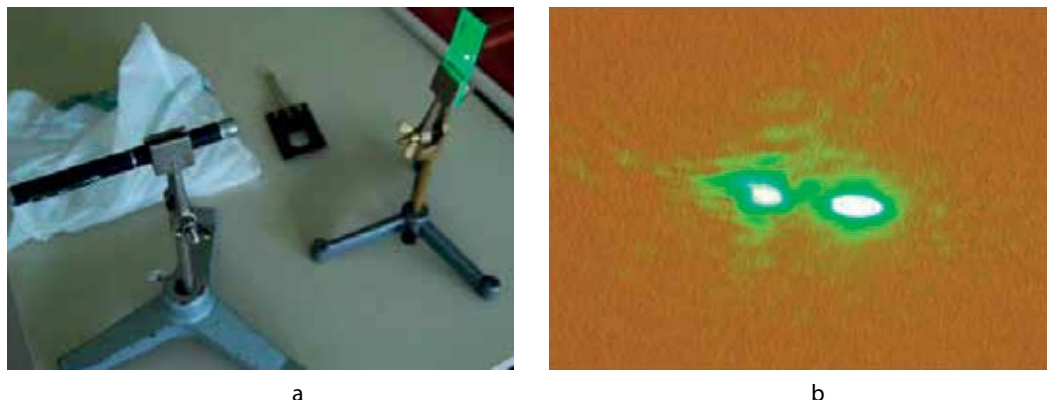
**Slika 7:** Vpadni val lahko vpada na kristal pod poljubnim kotom (a) – vedno lahko polarizacijo tega valovanja razstavimo tako, da ena od komponent »vidi« le prečno dimenzijo molekul (modri val, b), druga pa njihovo vzdolžno dimenzijo (rdeči val, b). Polarizacija, ki vidi molekule tako, kot so videti vzdolž optične osi, tvori »redni žarek«. Polarizacija vzdolž optične osi tvori »izredni žarek«.

na drugem pa debelejša, imamo dvolomni klin, ki deluje kot tristrana prizma. Na ta klin usmerimo enobarvno svetlobo. Zopet jo razstavimo na dve med seboj pravokotni polarizirani svetlobi. Ena od polarizacij vidi le širino molekul, zato se skozi klin širi s hitrostjo  $c_r$ . Lomni količnik te polarizacije označimo z enačbo  $n_r = \frac{c_0}{c_r}$ . Ta del svetlobe se na klinu lomi za kot  $\vartheta_r = (n_r - 1)\gamma$ . Druga, pravokotna polarizacija vidi dolge molekule in se širi skozi klin s hitrostjo  $c_i$ . Za to svetlobo je lomni količnik drugačen:  $n_i = \frac{c_0}{c_i}$ . Ta del svetlobe se na klinu lomi pod kotom:  $\vartheta_i = (n_i - 1)\gamma$ . Razliki lomnih količnikov pravimo »dvolomnost snovi« in jo definiramo z izrazom  $\Delta n = (n_r - n_i)$ . Poskus omogoča, da se polarizaciji zaradi različnih lomnih količnikov fizično ločita in ju je mogoče prikazati na oddaljenem zaslonu, saj žarka potujeta v smereh, ki oklepata kot  $\Delta\vartheta = (n_r - n_i)\gamma = \Delta n\gamma$ . Z uporabo polarizatorja lahko pokažemo, da sta curka polarizirana v med seboj pravokotnih smereh.

Razliki lomnih količnikov pravimo »dvolomnost snovi«.



**Slika 8:** Dvolomna celica v obliki klina, ustvarjena na substratu LC urejenih molekul (a). Fizični razcep polarizacij zaradi dvojnega loma na klinu (b).



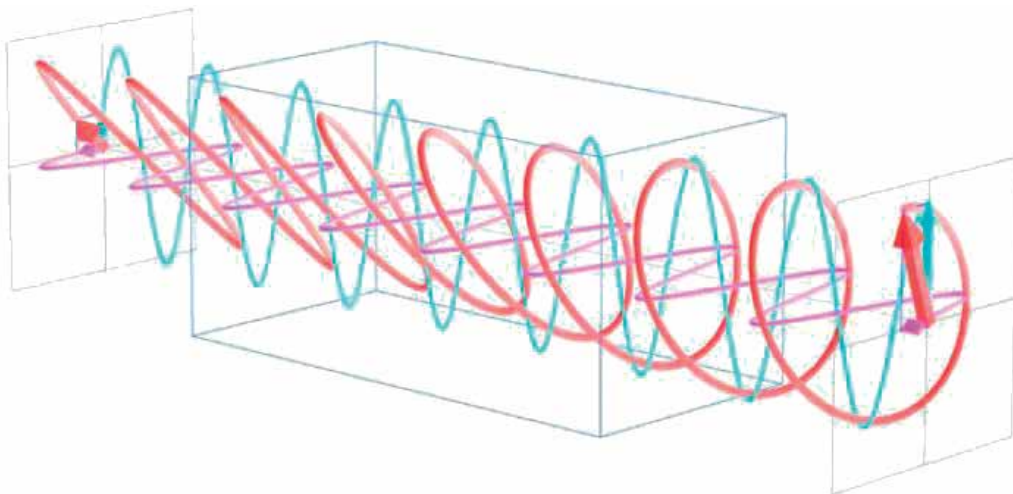
**Slika 9:** Izdelana klinasta celica, skozi katero svetimo z zelenim laserjem (a). Razcep svetlobnega curka v dva delna curka različnih polarizacij zaradi dvojnega loma na klinu (b). Foto: Z. Jazbinšek, december 2011

Oglejmo si še prehod linearno polarizirane svetlobe skozi ploščico iz prozorne, dvolomne snovi. Na kvalitativni ravni je mogoče obnašanje svetlobe na hitro ponazoriti z ustrežno animacijo. Na spletu je na voljo izvrsten program – EMANIM [4] – s katerim lahko jasno ponazorimo razmere v zvezi s polarizacijo svetlobe pri prehodu skozi dvolomno snov.

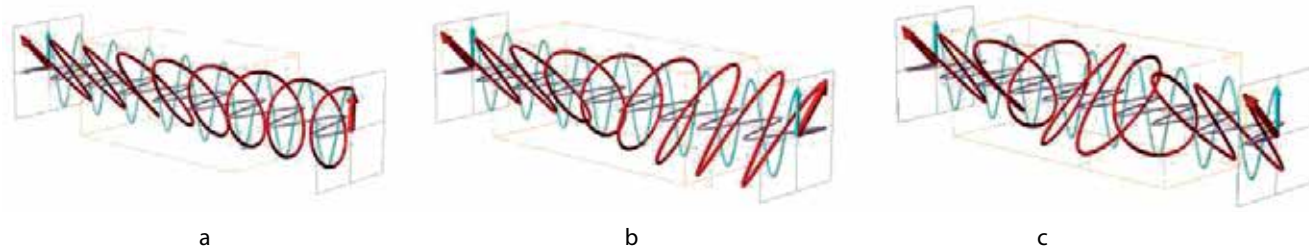
Linearno polarizirano svetlobo si predstavljamo kot vsoto dveh svetlob, ki sta polarizirani ena vzdolž dolge in ena vzdolž kratke osi molekul. Ti polarizaciji se širita skozi plast dvolomne snovi z različnima hitrostma, zato se fazi posameznih polarizacij ob izhodu svetlobe iz dvolomne plasti načeloma ne ujemata. Ob vstopu v plast imata polarizaciji enako fazo. Do konca plasti pridela polarizacija prečno na molekule (»redni žarek«) fazno razliko  $\varphi_1 = k_{\perp}d = \frac{2\pi n_r}{\lambda_0}d$ , polarizacija vzdolž molekul (»izredni žarek«) pa fazno razliko  $\varphi_2 = k_{\parallel}d = \frac{2\pi n_i}{\lambda_0}d$ . Prepuščeni svetlobni curek je seveda vsota obeh komponent polarizacij, a vsota ni več nujno linearno polarizirano valovanje, saj je med pravokotnima si komponentama fazna razlika,  $\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda_0}\Delta n$ . Dvolomna plast tako iz linearno polarizirane svetlobe ustvari v splošnem eliptično polarizirano svetlobo – to pomeni, da vektor električne poljske jakosti v prepuščenem svetlobnem curku opisuje elipso. Elipsa se izrodi v črto vsakič, ko velja  $\Delta\varphi = n\pi$ . V posebnem primeru, ko je polarizacija vpadne svetlobe orientirana pod kotom  $45^\circ$  glede na optično os vzorca, se elipsa izrodi v krog. Če fazna razlika med polarizacijama v prepuščenem svetlobi ustreza  $\frac{\pi}{2}$  (ali  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi d}{\lambda_0}\Delta n \rightarrow d = \frac{\lambda_0}{4\Delta n}$ ), deluje vzorec kot »ploščica  $\frac{\lambda}{4}$ «, kar pomeni, da je dvolomna plast iz linearno polarizirane svetlobe ustvarila svetlobo s krožno polarizacijo. Če je fazna razlika še za dvakrat večja, postane prepuščena

Linearno polarizirano svetlobo si predstavljamo kot vsoto dveh svetlob, ki sta polarizirani ena vzdolž dolge in ena vzdolž kratke osi molekul.

svetloba spet linearno polarizirana, a je smer polarizacije ravno pravokotna na smer vpadne polarizacije. Taki plasti dvolomne snovi pravimo »ploščica  $\frac{\lambda}{2}$ «.



**Slika 10:** Linearno polarizirani vpadni val vpada z leve na dvolomni vzorec (kvader na sredini). Ker sta fazni zakasnitvi za posamezni polarizaciji v vzorcu različni, komponenti po prehodu vzorca nista več v fazi. Njuna medsebojna fazna razlika povzroči, da konica vektorja električne poljske jakosti v prepuščeni svetlobi (skrajno desno) opisuje elipso. Slika je izdelana s programom EMANIM, dosegljivim na spletu [4].



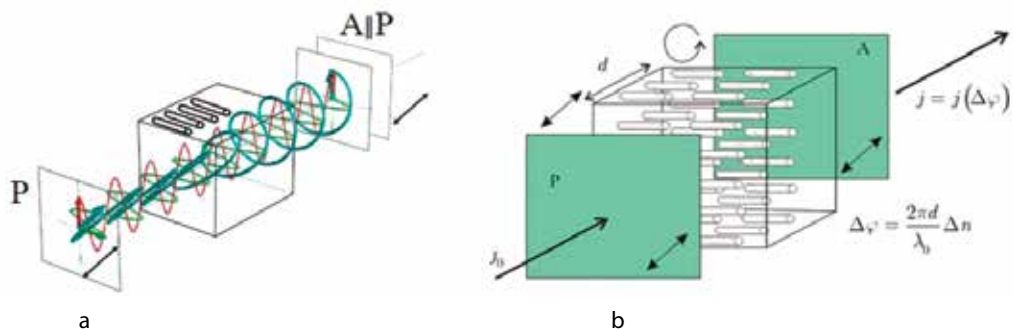
**Slika 11:** Plast dvolomne snovi lahko iz linearno polarizirane vpadne svetlobe ustvari krožno polarizirano svetlobo (a), lahko obrne polarizacijo za  $90^\circ$  (b), lahko pa tudi ohrani polarizacijo (c) – odvisno od debeline plasti, razlike lomnih količnikov in valovne dolžine vpadne svetlobe.

Zamislimo si nekakšen sendvič iz polarizatorja (P), dvolomne snovi (s) in analizatorja (A) ter usmerimo nanj svetlobo z določeno valovno dolžino. Polarizator poskrbi, da vpada v dvolomno plast linearno polarizirana svetloba. Če je optična os usmerjena pod kotom  $45^\circ$  glede na prepustno smer polarizatorja, je svetloba ob izstopu iz dvolomne plasti eliptično polarizirana. Skozi analizator (ki ima prepustno smer vzporedno polarizatorju) izstopa del svetlobe. Množina izstopajoče svetlobe je odvisna od fazne razlike, ki ju posamezni komponenti polarizacije pridelata med prehodom skozi dvolomno snov. Če fazna razlika med komponentama ustreza četrtini nihaja, je izhodna svetloba krožno polarizirana in analizator prepusti 50 % vpadne svetlobe. Če je fazna razlika enaka polovici nihaja, je svetloba po prehodu dvolomne plasti polarizirana pravokotno na prepustno smer analizatorja in skozenj ne prodre nič svetlobe. Če pa je fazna razlika enaka celemu nihaju, sta posamezni komponenti polarizacije zopet v fazi in prepuščena svetloba je polarizirana v prepustni smeri analizatorja, torej je množina prepuščene svetlobe tako rekoč enaka množini vpadle svetlobe. Vzorec je v tem primeru 100-odstotno prepusten. V splošnem lahko optično prepustnost vzorca zapišemo kot:

Če je optična os usmerjena pod kotom  $45^\circ$  glede na prepustno smer polarizatorja, je svetloba ob izstopu iz dvolomne plasti eliptično polarizirana.

$$\frac{j_{\parallel}}{j_0} \propto \frac{1}{4} (1 - \cos(\Delta kd)) = \frac{1}{4} \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda_0} \Delta n \right) \right). \quad 3.1$$

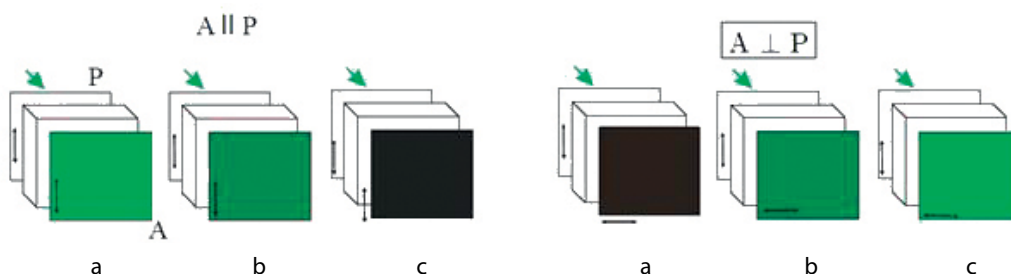
Prepuščeni svetlobni tok je odvisen od fazne razlike, ki se ustvari v vzorcu zaradi dvolomnosti.



**Slika 12:** Plast dvolomne snovi lahko iz linearno polarizirane vpadne svetlobe ustvari krožno polarizirano svetlobo (a). Prepustnost skozi analizador, ki je vzporeden polarizatorju, je odvisna od fazne razlike med polarizacijama oz. polarizacije svetlobe po prehodu dvolomnega vzorca (b).

Če analizador zasučemo za  $90^\circ$  glede na polarizator, ki polarizira vpadno svetlobo, so razmere ravno simetrične – fazna razlika, ki pri vzporednih P in A povzroči 100-odstotno prepustnost, povzroči v tem primeru popolno absorpcijo, in obratno.

$$\frac{j_{\perp}}{j_0} \propto \frac{1}{4} (1 + \cos(\Delta kd)) = \frac{1}{4} \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda_0} \Delta n \right) \right). \quad 3.2$$



**Slika 13:** Prepustnost svetlobe skozi dvolomno plast, ujeta med vzporedna si polarizator (P) in analizador (A), je komplementarna prepustnosti skozi plast med prekržanima polarizatorjem in analizatorjem. V obeh primerih si fazne razlike sledijo:  $\Delta\varphi_a = \pi$ ,  $\Delta\varphi_b = \frac{\pi}{4}$  in  $\Delta\varphi_c = \frac{\pi}{2}$ .

V dosednji obravnavi prehoda svetlobe skozi plast dvolomne snovi smo ves čas uporabljali le enobarvno svetlobo. Ko namesto enobarvne svetlobe uporabimo belo, se vzorec obarva v najrazličnejših barvah. Kako nastanejo barve pri prehodu svetlobe skozi prozorno plast dvolomne snovi? Razlago ponuja drugi del (nadaljevanje) članka, ki bo objavljen v naslednji številki revije.

## Literatura

- [1] Babič, V. in Čepič, M.: *Complementary colours for a physicist*, 2009. Eur. J. Phys. 30 793.
- [2] Učni načrt za pouk fizike v splošnih gimnazijah. Splet. [http://portal.mss.edus.si/msswww/programi2008/programi/media/pdf/un\\_gimnazija/un\\_fizika\\_gimn.pdf](http://portal.mss.edus.si/msswww/programi2008/programi/media/pdf/un_gimnazija/un_fizika_gimn.pdf) (april, 2016).
- [3] Pavlin, J. et. al. *How to Teach Liquid Crystals?* Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 547: str. 255, 2011.
- [4] Szilagyi, A. Emanim. Splet. <http://www.enzim.hu/~szia/emanim/emanim.htm> (marec, 2008).