

Naslov članka/Article:

ANIZOTROPIJA V SNOVEH – OPTIČNA DVOLOMNOST IN DEMONSTRACIJA KOMPLEMENTARNIH BARV (2. DEL)

Avtor/Author:

mag. Vitomir Babič

CC licenca



Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav



Fizika v šoli št. 2/2016, letnik 21

ISSN 1318-6388

Izdal in založil: Zavod Republike Slovenije za šolstvo

Kraj in leto izdaje: Ljubljana, 2016

Spletna stran revije:

<https://www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/>

Anizotropija v snoveh – optična dvolomnost in demonstracija komplementarnih barv (2. del)

mag. Vitomir Babič

Šolski center Celje, Gimnazija Lava

Povzetek

Pred vami je nadaljevanje članka, katerega prvi del je bil objavljen v prejšnji številki revije. V prvem delu smo opisali pojav dvolomnosti in možnost demonstracije pojava, pri kateri uporabimo plast tekočega kristala. Prav tako smo omenili, da lahko plasti dvolomne snovi izbrane debeline bistveno spremenijo polarizacijo prepuščene svetlobe. V nadaljevanju se osredotočimo na prehod bele svetlobe skozi plast dvolomne snovi ter analiziramo barvnost prepuščenih svetlob za različne kombinacije kotov med polarizatorjem in analizatorjem.

Abstract

Before you is the continuation of the first part of the article, which was published in the previous issue of the journal. The first part discussed the phenomenon of double refraction and the possibilities for demonstrating said phenomenon using a layer of liquid crystal. It also mentioned that layers of a doubly refracting substance of a specific thickness can significantly alter the polarisation of transmitted light. The rest of the article focuses on the transmission of white light through the layer of the doubly refracting substance, and analyses the hue of the transmitted light for various combinations of angles between the polariser and analyser.

Barva in komplementarnost barv

V prvem delu članka [1] smo pokazali, kako lahko plast dvolomne snovi spremeni polarizacijo svetlobe. Z ustreznimi izbranimi kotom med optično osjo vzorca ter polarizatorjem vpadne svetlobe dosežemo eliptično polarizirano prepuščeno svetlobo, v kateri je faza odvisna od dvolomnosti vzorca, njegove debeline in valovne dolžine svetlobe. Gostoto svetlobnega toka, ki jo prepušča polarizatorju (P) vzporedni analizator (A), označimo z j_{\parallel} , gostoto svetlobnega toka, ki jo prepušča na P pravokotni A, pa z j_{\perp} (glej enačbi 3.1 in 3.2, [1]). Prepuščeni gostoti svetlobnega toka seštejemo in dobimo izraz:

$$\frac{j_{\parallel}}{j_0} + \frac{j_{\perp}}{j_0} \propto \frac{1}{4} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda_0} \Delta n \right) \right) + \frac{1}{4} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda_0} \Delta n \right) \right) = \text{konst.}$$

Vsota teh dveh gostot svetlobnega toka je gostota vpadnega svetlobnega toka j_0 . Povzemimo – na dvolomni vzorec posvetimo z enobarvno svetlobo z gostoto svetlobnega toka j_0 in opazujemo svetlobni tok skozi polarizatorju vzporedni analizator j_{\parallel} . Nato enostavno zasučemo A za 90° – gostota prepuščenega svetlobnega toka se spremeni v

j_{\perp} . Ker velja $j_0 = j_{\parallel} + j_{\perp}$, vidimo, da sta prepuščeni gostoti glede na gostoto vpadnega svetlobnega toka komplementarni. Če paralelna P in A prepuščata veliko svetlobe, bosta pravokotna P in A prepuščala malo svetlobe. V primeru, da je dvolomna plast ravno ploščica $\frac{\lambda}{2}$, paralelna P in A ne bosta prepustila nič svetlobe, ko pa analizator zasučemo tako, da sta P in A pravokotna, bo prepuščeni svetlobni tok enak vpadnemu.

Opisana odvisnost velja za katerokoli valovno dolžino svetlobe, ki jo pri poskusu uporabimo, torej lahko zapišemo:

$$\int_0^{\infty} \frac{d j_0}{d\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{d j_{\parallel}}{d\lambda} d\lambda + \int_0^{\infty} \frac{d j_{\perp}}{d\lambda} d\lambda$$

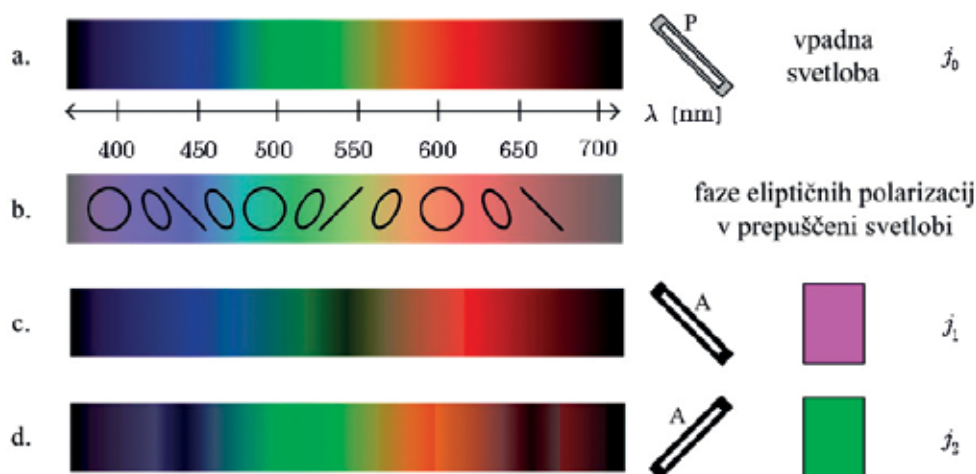
Pojav izkoristimo kot definicijo fizikalne komplementarnosti barv – če spekter neke svetlobe razcepimo na dva dela, sta razcepljena spektra (in s tem svetlobi) barvno natanko komplementarna.

Taka definicija komplementarnosti je splošnejša od običajne definicije komplementarnosti, kot jo uporabljajo v slikarstvu, kjer je v okviru teorije barv komplementarnost definirana takole:

Barvi sta komplementarni takrat, kadar je mogoče iz njiju zmešati nevtralno barvo [8]. (Nevtralne barve so bela, črna in njune mešanice – torej poljubni odtenki sive barve.)

Običajno je svetloba, s katero osvetljujemo vzorec, bela. Za vsako od enobarvnih komponent te svetlobe je izpolnjena komplementarnost med svetlobnima tokovoma j_{\parallel} in j_{\perp} . Če torej analizator, skozi katerega opazujemo svetlobni tok, npr. neke enobarvne komponente ne absorbira, je ta svetloba v spektru j_{\perp} močno zastopana. Ko zasučemo analizator, vidimo svetlobni tok j_{\parallel} , v katerem te iste enobarvne komponente praktično ni. V opisanem primeru deluje dvolomni vzorec kot ploščica »lambda polovic«. Tak primer (za svetlobo z valovno dolžino $\lambda = 530$ nm) je prikazan na sliki 1 c.

Če spekter neke svetlobe razcepimo na dva dela, sta razcepljena spektra (in s tem svetlobi) barvno natanko komplementarna.



Slika 1: Popolnoma prepusten dvolomni vzorec osvetlimo z belo svetlobo, katere spekter vsebuje vse spektralne barve (a). Smer vpadne polarizacije je nakazana z režo P. Prepuščena svetloba je eliptično polarizirana, oblika elipse je funkcija valovne dolžine posamezne barvne komponente. Če je fazna razlika pri valovni dolžini $\lambda_1 = 530$ nm enaka 5π , je fazna razlika za $\lambda_2 = 440$ nm enaka $\sim 6\pi$ in za $\lambda_3 = 660$ nm je $\sim 4\pi$ (b). Če zasučemo analizator vzporedno z analizatorjem (j_{\parallel}), so enobarvne komponente, za katere velja $\Delta kd = N \cdot 2\pi$, v celoti prepuščene, svetloba, za katero velja $\Delta kd = 2N + 1 \cdot \pi$, pa v celoti absorbirane (c). Če analizator zasučemo za 90° (j_{\perp}), so razmere ravno komplementarne (d).

Analiza spektrov prepuščenih svetlob s tokovoma j_{\parallel} in j_{\perp} jasno pokaže, da sta spektra komplementarna. V skladu s principom barvne komplementarnosti torej velja tudi, da morata biti barvi prepuščenih svetlob tudi likovno natančno komplementarni. Poskusi to trditev potrjujejo.

Vpeljani pojem komplementa svetlobnega toka je uporaben za cel spekter vidnih svetlob in za njihove poljubne mešanice oz. delne spektre. Zanimivost te definicije je, da je KAKRŠENKOLI svetlobni tok pravzaprav komplementaren »črni« barvi. Če za osnovo uporabimo belo svetlobo, velja, da sta bela in črna komplementarni barvi (saj res z njunim mešanjem dobimo nek odtenek sivine, kar je v skladu z likovno definicijo komplementarnosti.)

Na tem mestu je potrebno poudariti, da se tako definirani komplementarni svetlobi razlikujeta v eni, pomembni lastnosti: polarizaciji obeh prepuščenih svetlobnih tokov sta pravokotni druga na drugo. Vendar tega ne moremo opaziti, saj človeške oči niso občutljive za polarizacijo svetlobe [3].

Eksperimentalna demonstracija komplementarnih spektrov

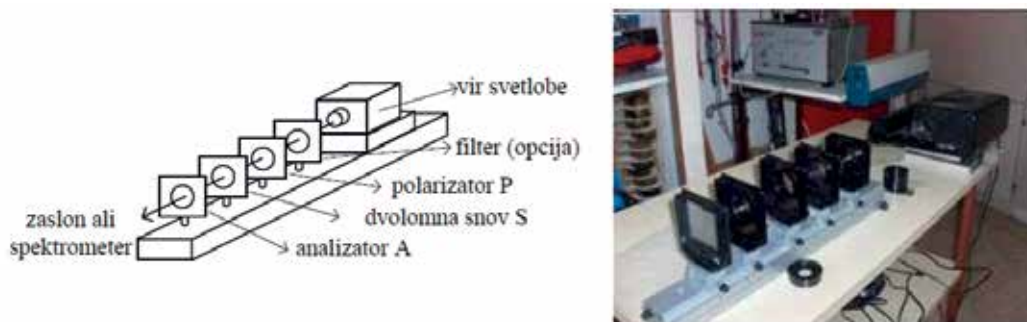
Kot dvolomno snov pri poskusu uporabimo plast celofana, ki ga poznamo kot običajno, poceni in lahko dostopno folijo za ovijanje raznih izdelkov. Uporablja se tudi kot nosilni trak pri samolepilnih trakovih. Tipična debelina posamezne plasti lepilnega traku je okrog $d = 23 \mu\text{m}$. Poznamo ga zgolj kot bolj ali manj prozorno snov in praviloma redko opazimo njegovo dvolomnost. Lomni količnik celofana znaša okrog $n = 1,5$. Celofan je dvolomen zato, ker ga med izdelavo pred sušenjem napenjajo in s tem nekoliko uredijo smer, v katero so orientirane dolge polimerne molekule, iz katerih je narejen. V smeri urejenosti polimernih molekul ima celofan drugačen lomni količnik kot v smeri, ki je na prvo pravokotna. Dvolomnost celofana znaša okrog $\Delta n = 0,010$ za vzorec iz lepilnega traku in $\Delta n = 0,018$ za vzorec iz navadnega celofana. Potrebujemo še dva polarizatorja (plastična polaroida), vir svetlobe (diaprojektor) in bel zaslon za vizualno opazovanje in fotografiranje. Za podrobnejšo analizo prepuščenih svetlob potrebujemo še spektrometer. Poskus lahko zastavimo kot preprost prikaz komplementarnih barv (listič celofana vtaknemo med polarizatorja) ali pripravimo podrobnejšo analizo dogajanja in kontroliramo posamezne elemente tako, da jih nanizamo na optično klop. Slednji način je primernejši za prikaz podrobnejše spektralne analize prepuščenih svetlob z uporabo ustreznega spektrometra. Bistvenih razlik med postavitvama elementov pri poskusu ni. Svetlobo usmerimo na polarizator, nato sledi vzorec. Za enostavnejše prikaze je vzorec lahko kar listič celofana, če gre za natančnejše meritve, pa ga vpneemo v okvir tako, da lahko kontroliramo njegovo kotno orientacijo glede na smer polarizacije vpadnega valovanja. Skozi vzorec prepuščeno svetlobo nato vodimo skozi analizator. Sledi analiza prepuščene svetlobe – lahko kar z očesom, za natančnejše meritve uporabimo spektralne analizatorje.

Pri demonstraciji komplementarnosti barv je dobro najprej preučiti svetlobo, ki jo prepuščata vzporedna polarizator in analizator (brez dvolomnega vzorca med njima!) – ta služi kot »referenčna« barva oz. »celota« (j_0), ki jo bomo kasneje s poskusom razstavljali na barvna komplementa. Če ta »referenčna« barva ni »bela«, tudi komplementarne barve ne bodo ustrezale likovnim definicijam komplementarnih barv. Ko vstavimo vzorec med polarizator in analizator, se prepuščena svetloba obarva. Pri poskusu se osredotočamo na dve barvi prepuščene svetlobe. Prvo dobimo pri vzporednih polarizatorju in analizatorju (j_{\parallel}), drugo pa takrat, ko analizator zavrtimo za pravi kot – takrat sta torej prepustni smeri polarizatorja in analizatorja pravokotni druga na drugo (j_{\perp}). Postavitev poskusa je prikazana na sliki 2.

V skladu s principom barvne komplementarnosti torej velja tudi, da morata biti barvi prepuščenih svetlob tudi likovno natančno komplementarni. Poskusi to trditev potrjujejo.

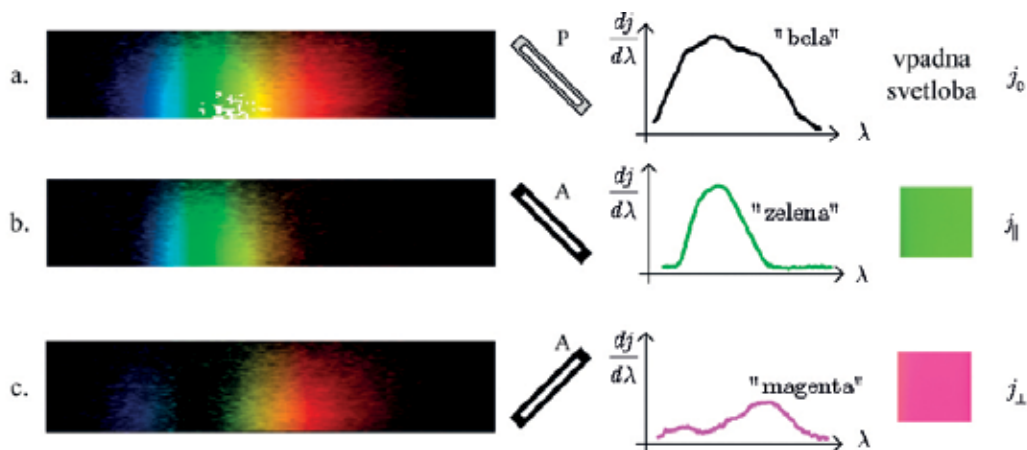
Kot dvolomno snov pri poskusu uporabimo plast celofana, ki ga poznamo kot običajno, poceni in lahko dostopno folijo za ovijanje raznih izdelkov.

Elementi, ki jih uporabljamo pri poskusu, so na voljo praktično v vsakem srednješolskem laboratoriju. Izbira vzorca je najmanjša težava – kakršenkoli celofan, tanjša plastične mase, pleksisteklo ali kaj podobnega. Še najbolje se odreže lepilni trak, prilepljen na stekleno ploščico. Za prikaz barvnosti od vzorca zahtevamo le, da je fazna razlika $\Delta\varphi$ med posameznima polarizacijama zgolj $N\pi$, pri čemer je N majhno število. Pri opisanem poskusu smo posneli spektre s spektrometroma TVSPEC (Elliot instruments LTD, priprava izmeri spekter ter tudi posame meritev v formatu AVI) in SPECTROVIS (Vernier).



Slika 2: Tipična postavitev elementov pri poskusu. Fotografija dejanske postavitve v šolskem laboratoriju.

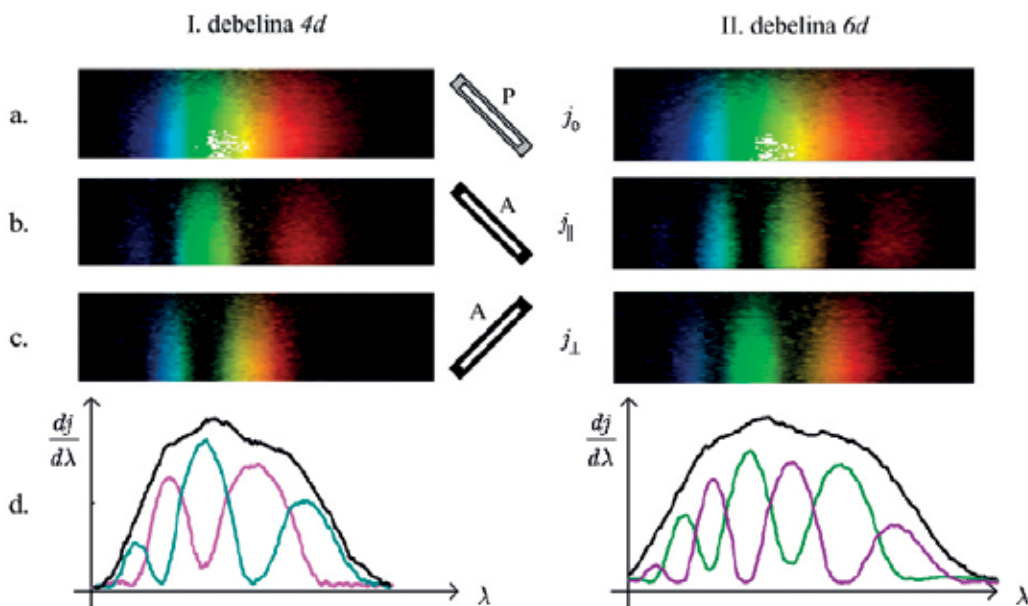
Pri eksperimentu izmerimo spektre svetlob, ki smo jih usmerili skozi različne dvolomne materiale, spreminjamo tako debelino materiala kot tudi orientacijo glede na polarizator in analizator. Prikazani so rezultati za primer, ko je vzorec zasukan za 45° glede na smer P–A (glej sliko 3).



Slika 3: Belo svetlobo s spektralno sestavo (a) polariziramo v določeni smeri (P), kot kaže reža na sliki. S to svetlobo presvetlimo listič iz celofana debeline $2d$, $d = 55,2 \mu\text{m}$. Svetloba, ki jo prepušča analizator (A) takrat, ko je postavljen vzporedno s polarizatorjem (j_{\parallel}), je obarvana »zeleno«. Skrajno desno je slika s to svetlobo osvetljenega belega zaslona, ki je bila posneta s fotoaparatom HP R817 (b). Če zasučemo analizator tako, da prepustna smer oklepa pravi kot s smerjo polarizatorja, je prepuščeni svetlobni tok (j_{\perp}) tako spektralno kot tudi barvno komplementaren (c).

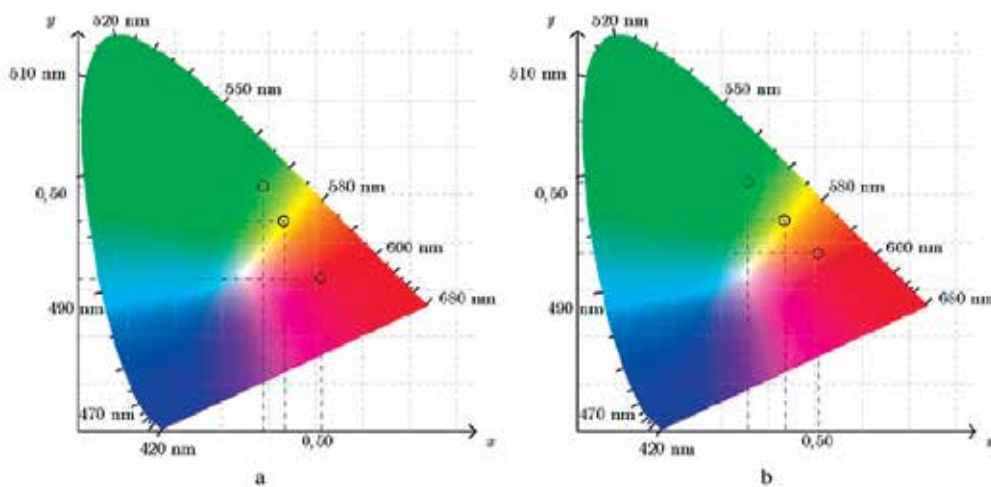
Rezultati poskusa dobro prikazujejo komplementarnost med j_{\parallel} in j_{\perp} . Vsota spektrov komplementarnih svetlob je zelo blizu (v okviru natančnosti eksperimenta) spektru svetlobe, s katero osvetljujemo vzorec. Če je ta svetloba bela, se barve ujemajo z barvami po napovedih barvnega prostora CIE xyz 1931 [5] in so v skladu s tem, kar o komplementarnosti barv navajajo likovne teorije. Če uporabljamo čedalje debelejši vzorec, postajajo prepuščene svetlobe čedalje bolj »bele«, saj vsebujejo nekaj barvnih komponent iz vseh delov spektra (slika 4).

Pri eksperimentu izmerimo spektre svetlob, ki smo jih usmerili skozi različne dvolomne materiale, spreminjamo tako debelino materiala kot tudi orientacijo glede na polarizator in analizator.



Slika 4: Spekter prepuščene svetlobe je odvisen od debeline vzorca. Na slikah so od zgoraj navzdol predstavljeni barvni spektri vpadne svetlobe (a), spektri svetlobe za obe komplementarni legi analizatorja (b in c) ter z instrumentom posneta porazdelitev prepuščenega toka od valovne dolžine svetlobe (za oba načina). Dvolomni vzorec je isti kot na sliki 3, debelina vzorcev je dvakrat ali trikrat večja. Komplementarnost spektrov je očitna. Debelejši kot je vzorec, več enobarvnih komponent zadošča pogoju za ploščico $0,5 \lambda$ (ali λ).

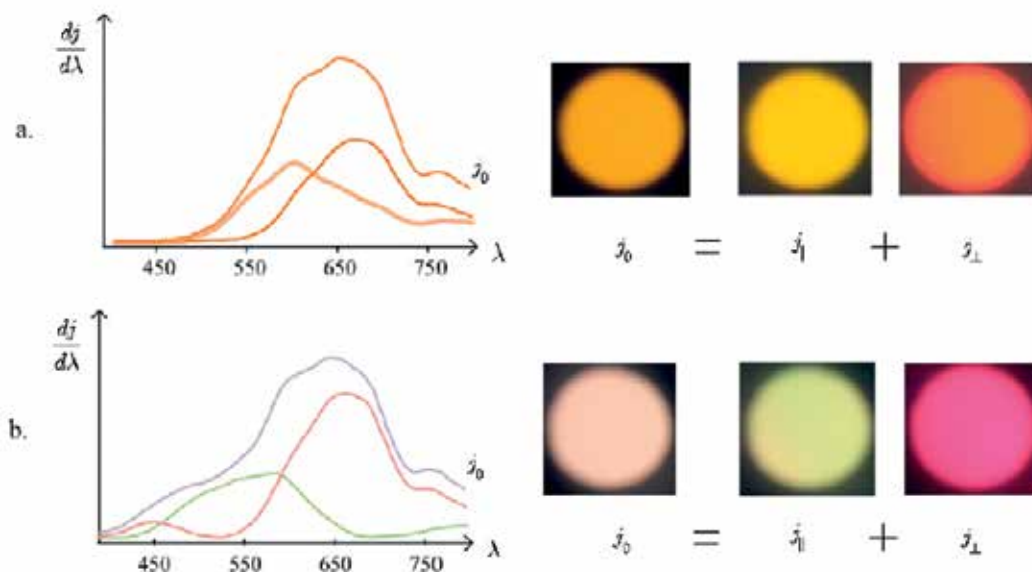
Spekter prepuščene svetlobe je odvisen od debeline vzorca.



Slika 5: Če poznamo spekter svetlobe, lahko izračunamo pozicijo barve te svetlobe v barvnem (kromatičnem) diagramu CIE 1931 [7]. Slika (a) kaže razmere za svetlobo, katere spekter je prikazan na sliki 4. Barvni vrednosti x in y sta bili izračunani s pomočjo definicij barvnosti za standardnega opazovalca [10]. Barvnost svetlobe, ki je potovala skozi vzporedna polarizator in analizator (brez dvolomnega vzorca), leži na diagramu v srednji točki – (0,4338; 0,4446). Svetloba ni bela – najbrž zaradi absorpcije v polaroidih, pa tudi temperatura nitke v žarnici je precej nižja od temperature Sonca. Barvni vrednosti za komplementarni svetlobi na sliki 4 b in c sta (0,389; 0,516) in (0,514; 0,315). Slika 5 (b) kaže podobno analizo svetlobe za primer, ko ima vzorec večjo debelino – spekter je prikazan na sliki 4 (debelina $4d$). Skladno s teorijo [4] se izkaže, da obe komplementarni barvi vedno ležita na premici, ki vsebuje barvo svetlobe, s katero svetimo na vzorec.

Zgoraj opisani eksperiment lahko izkoristimo za posplošeni prikaz komplementarnosti. V likovni teoriji so komplementarne barve definirane glede na BELO svetlobo. Bela svetloba je pravzaprav posledica spektra Sonca. Kako bi bile videti komplementarne barve v okolici hladnejše ali toplejše zvezde?

Če bi bilo Sonce hladnejše, bi spekter sevanja vseboval manj kratkovalovnih svetlob. Taka zvezda bi bila z našimi očmi videti nekoliko oranžne barve. Pri poskusu simuliramo svetlobo take zvezde tako, da pred polarizator vstavimo ustrezen filter in opazujemo prepuščeno svetlobo. Ko tako svetlobo razstavimo na barvne komplemente, vidimo, da sta taki komplementarni barvi z našimi očmi videti precej podobni druga drugi (slika 6 a). Na ta način lahko preizkušamo komplementarnost za kakršnokoli vhodno svetlobo. Slika 6 b prikazuje rezultate enega od tovrstnih poskusov.

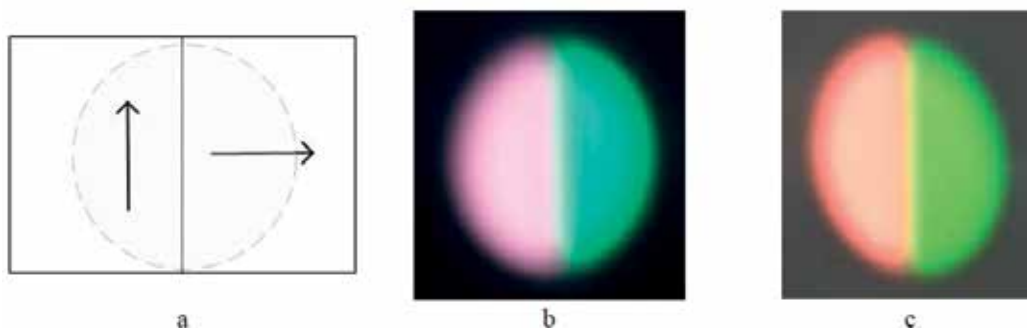


Slika 6: Svetloba, s katero osvetljujemo vzorec, ni nujno bela. Slika kaže spekter vpadne svetlobe in spektra obeh prepuščenih komplementarnih svetlob. Spektri so bili posneti s spektrometrom SpectroVis (Vernier). Fotografije belega zaslona, osvetljenega s svetlobo, so bile posnete s fotoaparatom HP R817. V obeh primerih je bil uporabljen dvolomni vzorec iz plasti prozornega samolepilnega traku debeline 110,4 μm . Svetlobi na obeh slikah sta nastali tako, da smo belo svetlobo usmerili skozi plastična filtra.

Prikaz komplementarnih barv lahko izvedemo še nazorneje, če na zaslon hkrati projiciramo obe komplementarni barvi. To lahko storimo tako, da analizator sestavimo iz dveh paroma pravokotnih analizatorjev. Barvna svetlobna lisa na zaslonu je tako razdeljena na dva barvno natančno komplementarna polkroga (slika 7).

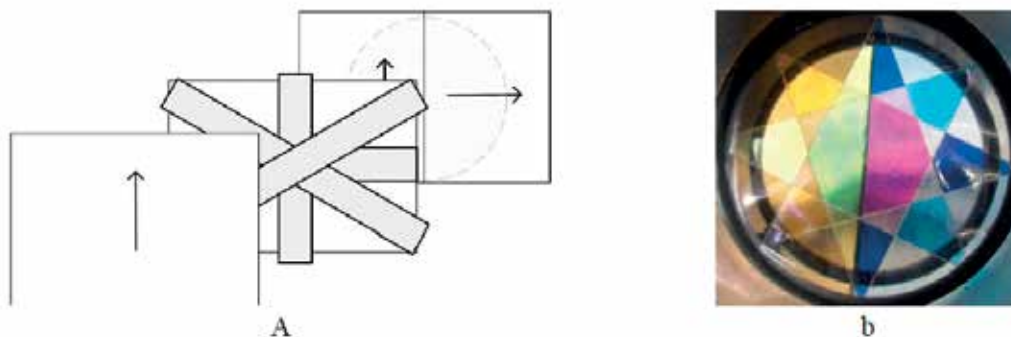
Na opisani način lahko prikažemo množico komplementarnih barvnih parov. Ni pa enostavno vnaprej napovedati, kateri barvno komplementarni par bo pri dani dvolomni snovi nastopil. Barvnost komplementov je odvisna od debeline vzorca d , njegove dvolomnosti Δn in od zasuka glavnih osi vzorca glede na polarizator in analizator α .

Prikaz komplementarnih barv lahko izvedemo še nazorneje, če na zaslon hkrati projiciramo obe komplementarni barvi.



Slika 7: Analizator sestavimo iz dveh paroma pravokotnih polarizatorjev (a), prepuščeno svetlobo usmerimo na bel zaslon in opazujemo barvno komplementarna polkroga (b in c).

Pri dani izvedbi barvne pare še najlažje spreminjamo tako, da vrtimo vzorec med polarizatorjem in analizatorjem.



Slika 8: Na začetek in konec cevi pritrdimo polarizator in analizator. V cev namestimo stekleno ploščico z nekaj plastmi lepilnega traku, vrtimo polarizator ali analizator ter opazujemo kalejdoskopske vzorce. Poleg tega, da so na pogled lepi, se lahko iz razporeditve barvnih ploskev naučimo veliko fizike.

Opisan je relativno preprost poskus s polarizatorji in dvolomno snovjo, pri katerem lahko lepo prikažemo nastanek barv brez uporabe pigmentov, barvil ali filtrov.

Zaključek

Če se na učitelja obrne dijak z željo, da naj mu npr. razloži delovanje LCD, nastopijo težave. Govoriti je treba o naravi svetlobe, o prehodu svetlobe skozi anizotropno snov, o »čudnih« (LC) stanjih snovi in kako do njih pride, o polarizaciji, o popolnem odboju, o načinih mešanja in dojemanja barv – skratka o temah, ki so iz rednega programa UN večinoma izpuščene. Pojasnjevanje odgovora bi vzelo krepko več časa, kot si ga lahko učitelj z zainteresiranim dijakom ukrade ob koncu ure in med odmorom. Samo obravnava tem, ki sem jih naštel, bi potrebovala kar nekaj šolskih ur.

Pričujoči članek ponuja možno kvalitativno obravnavo omenjene tematike (anizotropija, polarizacija, mešanje barv) v srednji šoli. Pričenja z dovolj preprosto sliko o anizotropiji snovi in jo predstavlja z

mehanskim modelom. Model pomaga pri razlagi razumevanja optične dvolomnosti snovi in je podpora razlagi nastanka in mešanja barv.

Opisan je relativno preprost poskus s polarizatorji in dvolomno snovjo, pri katerem lahko lepo prikažemo nastanek barv brez uporabe pigmentov, barvil ali filtrov. Pomembno pri poskusu je, da lahko prikažemo natančna barvna komplementa glede na svetlobo, s katero osvetljujemo vzorec. Če uporabimo za osvetljevanje vzorca belo svetlobo, lahko prikažemo vsa likovna pravila o komplementarnosti barv. Poskus je zanimiv za dijake, pa tudi priporočljiv za študente fizike v nižjih letnikih. Vsebuje temeljna načela valovne optike, še posebej lastnosti polarizirane svetlobe z učinkom dvolomnosti, in hkrati pouči študenta o lastnostih barvne svetlobe. S tega vidika je mogoče priporočiti podoben poskus tudi študentom likovne umetnosti.

Literatura

- [1] Babič, V. (2016). Anizotropija v snoveh – optična dvolomnost in demonstracija komplementarnih barv (1. del). *Fizika v šoli*, 21(1), str. 20–27.
- [2] Babič, V. (2009). *Dvolomnost in komplementarne barve*. Magistrsko delo, Ljubljana: FMF Fizika, Univerza v Ljubljani.
- [3] Babič, V. in Čepič, M. (2009). Complementary colours for a physicist. *European journal of physics*, 30(4), str. 793–806.
- [4] Falk, D. S., Brill, D. R. in Stork, D. G. (1986). *Seeing the Light*. New York: Harper in Row.
- [5] Hoffman, G., *CIE Colour Space*. <http://www.fho-empden.de/~hoffmann/ciexyz29082000.pdf>. (oktober 2008).
- [6] MacEvoy, B. <http://www.handprint.com/LS/CVS/colour.html>. (11. 18. 2008).
- [7] Mednarodna komisija za razsvetljavo (december 2008). <http://www.cie.co.at/>.
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_colour (december 2008).
- [9] Pye, D. (2001). *Polarized Light in Science and Nature*. Bristol: Institute of Physics.
- [10] Shevel, S. K. (ur.) (2003). *The Science of Color*, 2nd Edition. Elsevier, Optical Society of America.