

Uklon in razklon svetlobe

Pripravil: Samo Lasič

V prvem delu bomo spoznali, kako lahko izkoristimo pojav interference za meritev debeline lasu. Nato bomo ozek pas bele svetlobe razklonili z interferenčno mrežico. Opazovali bomo, kako se spremeni slika razklonjene svetlobe na zaslonu, če spreminjamo širino pasu bele svetlobe, ki vpada na interferenčno mrežico. Podoben poskus bomo naredili še z oviro, ki jo bomo postavili pred interferenčno mrežico. V tem primeru namesto ozkega pasu svetlobe vpada na interferenčno mrežico ozek pas "ne-svetlobe". Opazovane pojave bomo razložili z modelom aditivnega mešanja barv.

Potek dela in delavna vprašanja:

1. del: poskusi z laserjem

Naloga:

Z rdečim laserjem ($\lambda \approx 650\text{nm}$) posvetimo na ozko režo in opazujemo odvisnost intenzitete svetlobe na oddaljenem zaslonu.

Vprašanje:

Skiciraj odvisnost intenzitete svetlobe na oddaljenem zaslonu. Kako se odvisnost intenzitete spremeni, če režo razširimo ali zožimo?

Naloga:

Ponovi preizkus s širšo in ožjo režo.

Vprašanje:

Kako se odvisnost spremeni, če namesto rdečega laserja uporabimo zeleni laser ($\lambda \approx 532\text{nm}$)?

Naloga:

Ponovi preizkus z zelenim laserjem.

Vprašanje:

Od katerih parametrov so odvisne lege minimumov intenzitete na zaslonu? Kakšna je odvisnost od posameznih parametrov? Za dodatno razlago glej teoretični dodatek.

Vprašanje:

Namesto reže, postavimo svetlobi na pot oviro-"antirežo". V ta namen uporabimo tanko žico in rdeči laser. Poskusi napovedati izid poskusa v tem primeru. Skiciraj odvisnost intenzitete na zaslonu. Za dodatno razlago glej teoretični dodatek.

Naloga:

Izvedi poskus z "antirežo". Uporabi dve žici znanih debelin (0.21 mm, 0.3 mm). Izmeri razmik med sosednjima centralnima interferenčnima minimuma na zaslonu v obeh primerih. Iz meritev določi valovno dolžino svetlobe.

Naloga:

Z meritvijo lege interferenčnega minimuma lahko pri poskusu z "antirežo" zelo natančno določimo debelino ovire- "antireže". To lahko izkoristimo za določanje debeline tankih predmetov, kot je denimo človeški las. Opazuj interferenčno sliko, ki nastane, če laserskemu curku postavimo na pot las. Izmeri razmik med sosednjima centralnima interferenčnima minimuma na zaslonu.

Vprašanje:

Iz razmika med centralnima minimuma določili debelino lasu. Pri tem si pomagaj z meritvijo, pri kateri si uporabil žico znane debeline.

2. del: poskusi z belo svetlobo*Naloga:*

Na grafoskop postavi karton z režo, ki prepušča ozek pas bele svetlobe. Reža je široka okoli 1 cm. Za zrcalo grafoskopa namesti uklonsko mrežico (300 rež/mm). Bela svetloba se razkloni v posamezne barve. Spreminjaj širino reže in opazuj barve na zaslonu. V primeru ozke reže se bela svetloba razkloni v primarne barve (rdeča, zelena, modra), ko pa režo širimo, dobimo med rdečo in modro pas bele svetlobe.

Vprašanje:

Pojasni izid poskusov. Za dodatno razlago glej teoretični dodatek.

Naloga:

Opazuj barve na zaslonu v primeru, ko uporabiš bolj grobo interferenčno mrežico (80 rež/mm).

Vprašanje:

Pojasni izid poskusa.

Naloga:

Na grafoskop postavi oviro (širine okoli 1 cm), ki bele svetlobe ne prepušča in ponovi poskuse, ki si jih naredil z režo. Spreminjaj širino ovire in opazuj barve na zaslonu v obeh primerih interferenčne mrežice (300 in 80 rež/mm). V tem primeru se bela svetloba razkloni v barve, ki so komplementarne primarnim (cian, magenta, rumena).

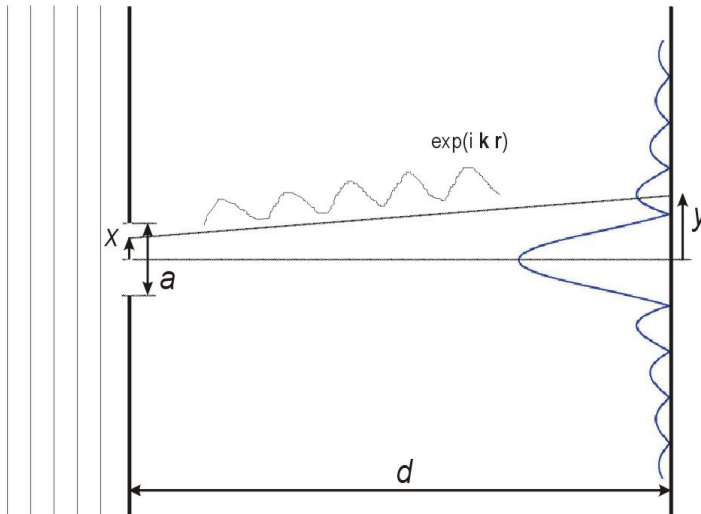
Vprašanje:

Pojasni izid poskusov. Za dodatno razlago glej teoretični dodatek.

Teorija:

Interferenca koherentne monokromatične svetlobe

Interferenca z režo



Slika 1: Shema za razlago interference svetlobe na reži. Reža je široka a , koordinato na reži označimo z x , koordinato na zaslonu pa z y .

Interferenčni vzorec s tanko režo izračunamo v *Fraunhoferjevem približku*, to je v primeru, ko je širina reže a veliko manjša od oddaljenosti zaslona d . Glej sliko 1. Pri tem upoštevamo *Huygensovo načelo*. Intenziteta svetlobe $I \propto |E|^2$ pri izbranem odmiku y na zaslonu je rezultat vsote vseh krožnih valov, ki se širijo iz posameznih točk na reži. Pogosto lahko predpostavimo, da je svetloba na reži *koherentna*, to pomeni, da je faza valovanja električnega polja E vedno¹ pri vseh legah x na zaslonu enaka, kar pomeni, da so valovne fronte v območju reže ravne. V tem primeru na interferenčni vzorec vplivata le valovna dolžina svetlobe λ in oddaljenost od izvora $r = \sqrt{d^2 + (y-x)^2}$. Valovanje električnega polja zapišemo v kompleksni obliki kot $E = \exp(i\varphi)$. Fazo zapišemo kot $\varphi = kr$, kjer je $k = 2\pi/\lambda$ valovni faktor². V Fraunhoferjevem približku zapišemo oddaljenost kot

$$r = d \sqrt{1 + \left(\frac{y}{d}\right)^2 + \left(\frac{x}{d}\right)^2 - \frac{2xy}{d^2}} \approx d \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{d}\right)^2 - \frac{xy}{d^2} \right). \quad (1)$$

¹ Če se faza valovanja na reži s časom spreminja, ne dobimo na zaslonu interferenčnega vzorca.

² \mathbf{k} je v splošnem valovni vektor, ki opisuje širjene valovanja v prostoru.

V prvem koraku lahko zanemarimo kvadrat razmerja x/d , saj upoštevamo le prvi člen razvoja korena v Taylorjevo vrsto³. Razdalja $r_0 = d\sqrt{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{y}{d}\right)^2}$ ne prispeva k interferenčnemu vzorcu, saj je enaka za vse točke na reži. Na zaslonu je faza valovanja

$$\varphi = kr_0 - K(y)x, \quad (2)$$

kjer je $K(y) = k\frac{y}{d}$.

Vsoto $E(y) = \sum_{reža} E_{delno} \exp(i\varphi)$ lahko izračunamo z integriranjem ali jo izrazimo kot vsoto neskončne geometrijske vrste. Če označimo $E_0 = E_{reža} \exp(ikr_0)$, dobimo z integriranjem

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{a} \int_{-a/2}^{a/2} \exp(iKx) dx = \frac{\sin(Ka/2)}{Ka/2}. \quad (3)$$

Relativna intenziteta je potem

$$\frac{I}{I_0} = \left| \frac{E}{E_0} \right|^2 = \left[\frac{\sin\left(\frac{ka}{2d}y\right)}{\frac{ka}{2d}y} \right]^2. \quad (4)$$

Glej sliko 2. Na spletu je mogoče najti številne demonstracije interferenčnega vzorca. Uporabnik lahko spreminja posamezne parametre poskusa in opazuje učinek. Glej na primer [1-3].

Električno polje na zaslonu lahko izrazimo tudi kot geometrijsko vsoto

$$E(y) = E_0 \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{l=-m}^m q^l, \quad (5)$$

kjer je $q = \frac{1}{2m} \exp\left(i \frac{kay}{2dm}\right)$. Tako kot smo pri integriranju upoštevali "dolžinsko gostoto"

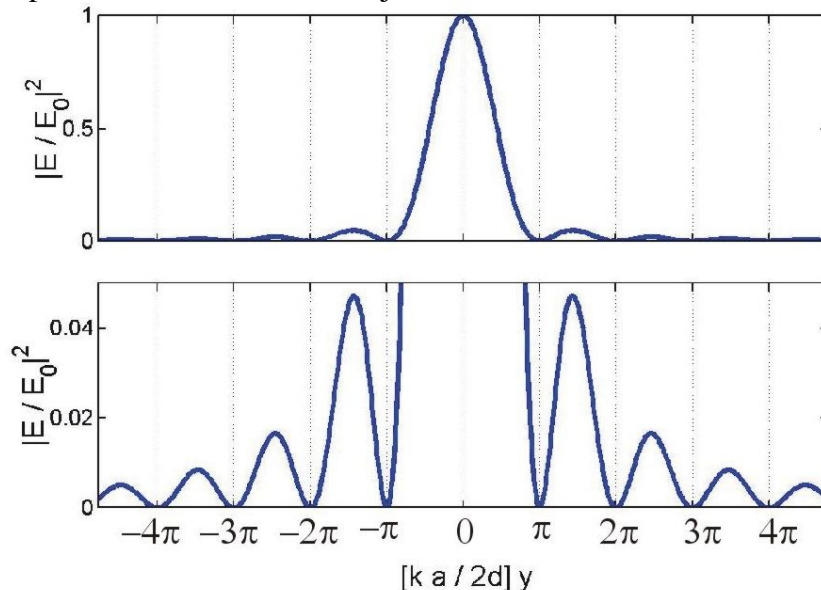
polja E_0/l , moramo v tem primeru jakosti delnih valov zapisati kot $E_0/2m$. Od tod dobimo faktor $1/2m$ v definiciji q . Enačba (5) da enak rezultat kot enačba (3).

Prvi interferenčni minimum nastopi ob pogoju

$$\frac{ka}{2d} y_{\min} = \pm\pi. \quad (6)$$

³ To je člen, v katerem x nastopa linearno.

Če poznamo širino ene reže lahko z merjenjem y_{min} določimo širino druge reže, saj je produkt $y_{min}a$ pri izbrani svetlobi in oddaljenosti zaslona konstanten.



Slika 2: Relativna intenziteta svetlobe pri interferenci na reži.

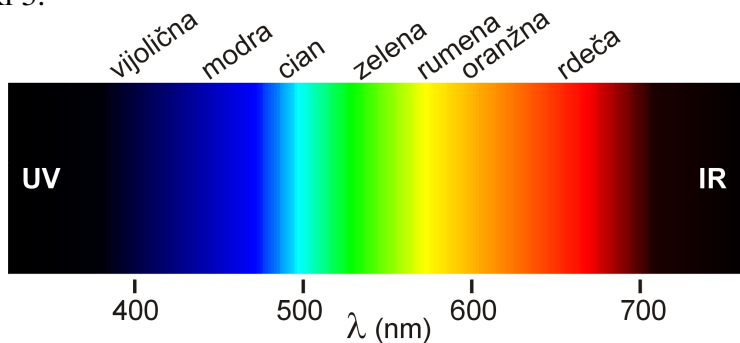
Interferenca z "antirežo"

V primeru ovire-"antireže" je interferenčni vzorec enak kot v primeru reže. To lahko utemeljimo s predpostavko, da je za oviro polje v protifazi (se uniči s poljem pred oviro) in izračunamo interferenco tega končno širokega izvora "antipolja".

Razklon bele svetlobe

Spekter svetlobe in fiziologija barv

Interferenčna mrežica povzroči razklon bele svetlobe. Na zaslonu dobimo spekter, ki je prikazan na sliki 3.



Slika 3: Spekter bele svetlobe.

Mrežnica človeškega očesa vsebuje "čepke" in "paličice". Paličice omogočajo gledanje pri nizkih intenzitetah svetlobe, čepki pa omogočajo zaznavanje barv svetlobe normalne intenzitete. Poznamo tri vrste čepkov: take, ki omogočajo zaznavanje rdeče svetlobe (R-"red"), zelene svetlobe (G-"green") in modre svetlobe (B-"blue"). Na tej osnovi temelji

zaznavanje barv. Svetloba, katere valovna dolžina ustreza cianasti barvi (C-"cian")⁴ hkrati vzbudi čepke, ki so občutljivi na modro in čepke, ki so občutljivi na zeleno svetlobo. Podobno vzbudi rumena (Y-"yellow") oziroma oranžna svetloba hkrati čepke, ki so občutljivi na modro in čepke, ki so občutljivi na rdečo svetlobo. Če je spekter svetlobe dovolj širok, da vzbudi vse tri vrste čepkov, vidimo belo svetlobo (W-"white").

Svetlobo cianaste in rumene barve lahko vidimo, tudi če v spektru ne nastopajo frekvence, ki ustrezajo cianasti ali rumeni barvi, pač pa nastopajo ustrezne kombinacije frekvenc, ki ustrezajo modri in zeleni ali zeleni in rdeči svetlobi. V primeru, da svetloba vsebuje kombinacijo modre in rdeče, vidimo magentno⁵ (M-"magenta") barvo. Tu velja opozoriti, da magentne barve ni v spektru bele svetlobe, saj nastane z mešanjem rdeče in modre, ki ležita na skrajnih delih vidnega spektra. Več o spektru in barvah najdemo na spletnih straneh [4, 5]. Koristna je tudi spletna knjiga "hyperphysics" [6], kjer se lahko o svetlobi in vidu poučimo v poglavju "Light and vision".

Mešanje barv in barvni krog

Na fiziološkem nastanku barv temelji *aditivno mešanje* barv (mešanje s seštevanjem). Tako se na primer mešajo barve tudi na televizijskih in računalniških zaslonih ter v projektorjih. Sistem aditivnega mešanja barv označimo z RGB ("red", "green", "blue") in ga prikazuje slika 4 na levi. Simbolično lahko mešanje barv ponazorimo z naslednjimi enačbami: $R+G=Y$, $G+B=C$, $B+R=M$ in $R+G+B=W$. Rdeči, zeleni in modri barvi pravimo *primarne barve* aditivnega mešanja. Barve, ki nastanejo z mešanjem rdeče, modre in zelene, to so cian, magenta in rumena, so *komplementarne* ali *sekundarne barve* aditivnega mešanja. Hkrati so cian, magenta in rumena tudi primarne barve *subtraktivnega mešanja* (mešanja z odštevanjem). Glej sliko 4 na desni. Te barve dobimo, če beli svetlobi odvzamemo rdečo, zeleno ali modro barvo. Rdeča, zelena in modra predstavljajo komplementarne ali sekundarne barve subtraktivnega mešanja. Pri subtraktivnem mešanju dobimo izbrano primarno barvo, če beli svetlobi odštejemo tej barvi komplementarno barvo. Barvni sistem subtraktivnega mešanja označimo z CMY ("cian", "magenta", "yellow"). Simbolično lahko zapišemo: $W-C=R$, $W-M=G$, $W-Y=B$ in $W-C-M-Y$ =črna. Takšen sistem (CMYK) je v uporabi pri tiskanju, kjer pa je dodana še črna barva (označena s "K"), s katero je mogoče uravnati temnost barvnih odtenkov. Dodatne informacije najdemo v [7-10].

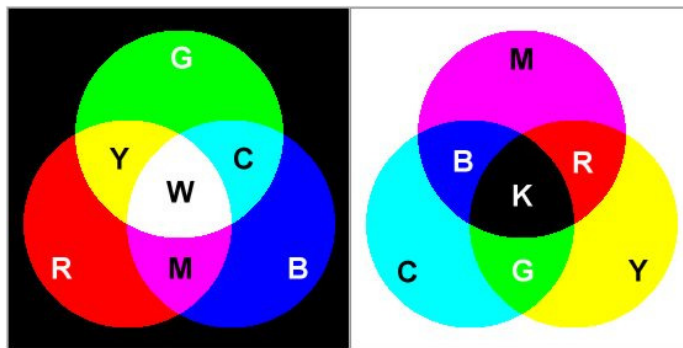
Pri slikarskih barvah je tradicionalno v uporabi barvni krog, pri katerem so primarne barve rdeča, rumena in modra, sekundarne pa zelena, vijolična in oranžna (slika 5) [11-13]. Zaradi tega lahko pride do nesporazumov⁶. Pravijo, da lahko izurjen slikar zmeša poljubno barvo z uporabo rdeče, rumene in modre. Zato, da dobi želeni odtenek, pa si mora pomagati še s črno in belo. Slikarski barvni sistem temelji na subtraktivnem mešanju. Sistema RGB in CMYK sta se uveljavila zato, ker omogočata doseganje najširšega razpona barvnih odtenkov zgolj s tremi primarnimi barvami. V letu 2005 je v okviru Stalnega strokovnega izpopolnjevanja prof. Irena Drevenšek Olenik pripravila poučno predavanje z naslovom: "Kako merimo barvo"⁷.

⁴ Cianasti barvi bi rahlo rekli tudi zeleno modra.

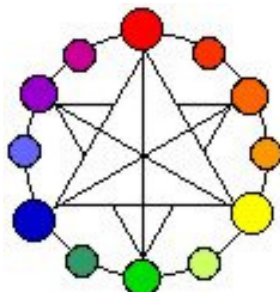
⁵ Magentni barvi bi lahko rekli tudi škrlatno rdeča.

⁶ Potrebno se je zavedati, da lahko konflikt v zvezi z barvnimi sistemi izvira tudi iz samega imenovanja posameznega barvnega odtenka.

⁷ irena.drevensek@ijs.si

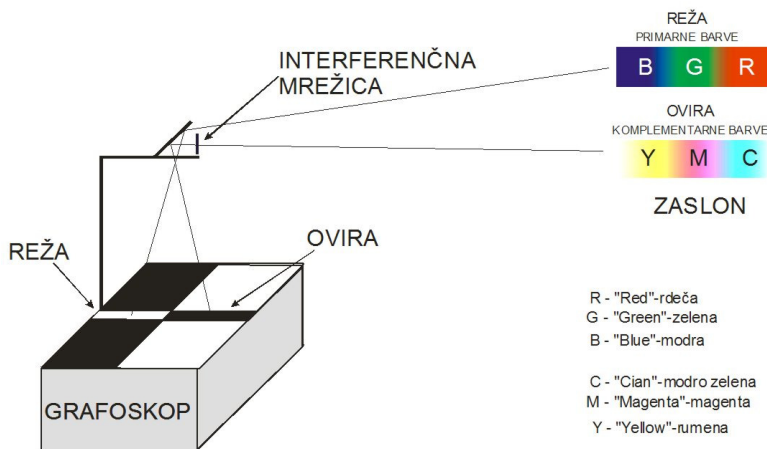


Slika 4: Aditivni (levo) in subtraktivni (desno) sistem za mešanje barv. V prvem primeru sestavlja primarne barve sistem RGB, v drugem pa sistem CMYK.



Slika 5: Tradicionalni barvni krog, ki se uporablja v slikarstvu.

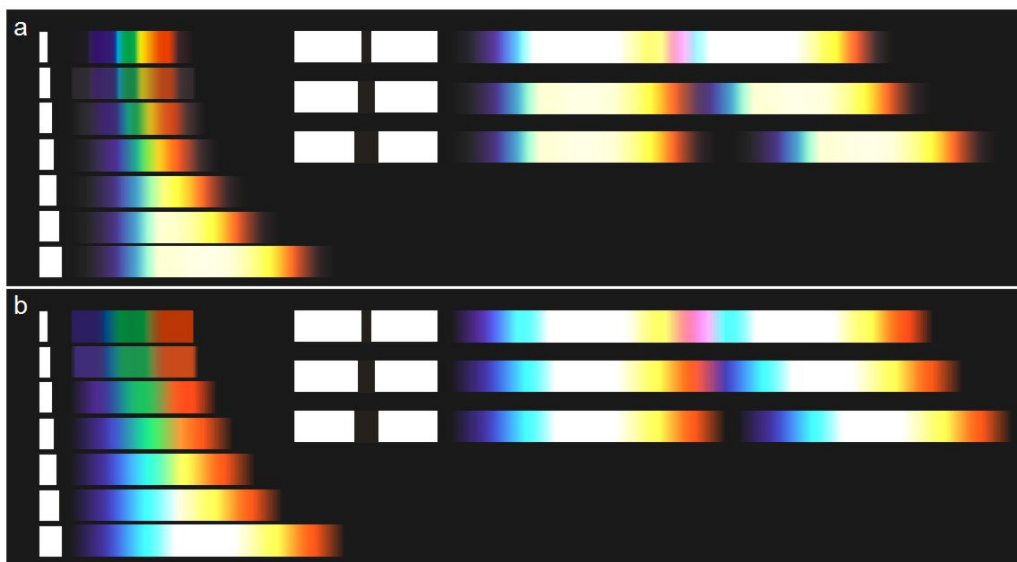
Razklon bele svetlobe



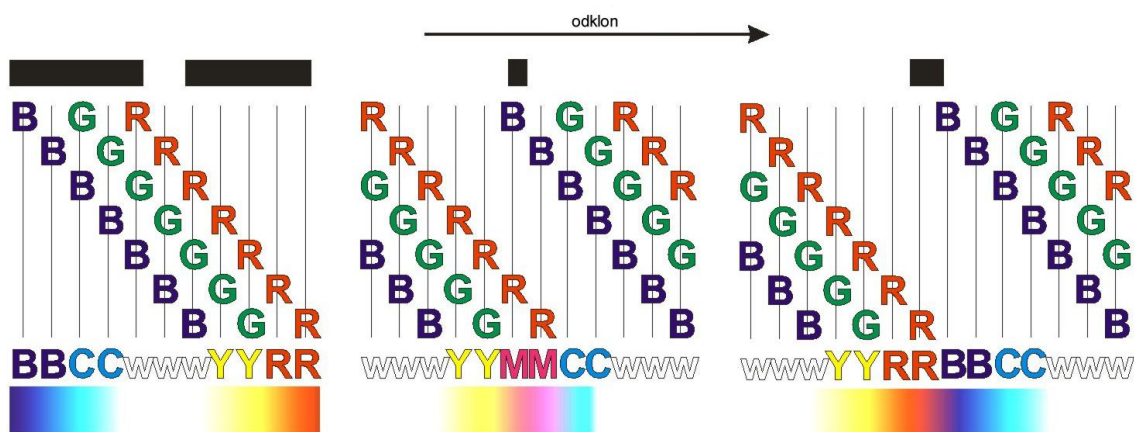
Slika 6: Shema poskusa z razklonom bele svetlobe. Svetloba, ki vpada na interferenčno mrežico, se širi iz ozke reže ali pa je zastrta z oviro. V primeru reže se barve razklonijo v rdečo, zeleno in modro, v primeru ovire pa dobimo na zaslonu komplementarne barve.

Poskus z razklonom bele svetlobe, ki se širi iz ozke reže ali pa je zastrta z oviro, lahko razložimo, če predpostavimo, da na interferenčno mrežico vpada svetloba iz področji posameznih ozkih pasov. Svetloba iz vsakega posameznega pasu se razkloni v "mavrico". Slika na zaslonu pa je superpozicija vseh "mavric" iz posameznih ozkih pasov. S takšnim sklepanjem lahko razložimo, zakaj se s širjenjem reže med rdečo in modro pojavi pas bele svetlobe, med modro in belo cian, med belo in rdečo pa rumena. Glej sliko 7.a na

levi in sliko 8 na levi. Če namesto reže uporabimo oviro dobimo komplementarne barve, zato ker se barve iz leve strani ovire aditivno mešajo z barvami iz desne strani ovire. Z večanjem ovire sta pasova svetlobe iz leve strani ovire in iz desne strani čedalje bolj vsaksebi in barve se ne mešajo več. Zato dobimo z večanjem ovire črni pas, med rumeno in črno je rdeča, med črno in cian pa je modra. Glej sliko 7.a na desni in sliko 8 na desni. Analizo lahko poenostavimo, če namesto vseh barv, ki sestavljajo mavrico, upoštevamo le primarne barve (RGB). Tudi v tem primeru lahko s prekrivanjem sosednjih barv dobimo kvalitativno ustrezne rezultate (slika 7.b). Na sliki 8 je prikazana shema za aditivno mešanje barv pri prekrivanju spektrov iz sosednjih pasov. Predpostavili smo, da spekter sestavljajo primarne barve.



Slika 7: Simulacija aditivnega mešanja barv v primeru reže (na levi) in ovire (na desni). V primeru (a) upoštevamo, da se ozek pas bele svetlobe razkloni v mavrične barve, v primeru (b) pa predpostavimo, da spekter sestavljajo le rdeča, zelena in modra barva.



Slika 8: Shema za aditivno mešanje barv pri prekrivanju spektrov iz sosednjih pasov. Odklon narašča v desno smer. Na levi je primer široke reže, na desni pa ozke in široke ovire. Predpostavili smo, da spekter sestavljajo primarne barve (RGB).

Zahvala:

Za pomoč pri iskanju razlage poskusa z razklonom bele svetlobe se zahvaljujem Stanleyu Micklavzini iz univerze v Oregonu, ZDA.

Reference:

Uklon na reži:

- [1] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/sinlit.html#c1>
- [2] <http://www.lon-capa.org/~mmp/kap27/Gary-Diffraction/app.htm>
- [3] <http://www.walter-fendt.de/ph14e/singleslit.htm>

Svetloba in vid:

- [4] <http://sol.sci.uop.edu/~jfalward/physics17/chapter11/chapter11.html>
- [5] <http://www.marktaw.com/design/ColorTheorya.html>
- [6] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

Aditivno in subtraktivno mešanje barv:

- [7] <http://www.lon-capa.org/~mmp/applist/RGBColor/c.htm>
- [8] http://www.cbu.edu/~jvarrian/applets/color1/colors_g.htm
- [9] <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/image/rgbColor.html>
- [10] <http://www.jgiesen.de/ColorTheory/RGBColorApplet/rgbcolorapplet.html>

Tradicionalni barvni krog:

- [11] <http://www.zoomschool.com/crafts/Colormixing.shtml>
- [12] <http://www.kinderart.com/across/tasty.shtml>
- [13] <http://www.geocities.com/dtmcbride/tech/light.html>