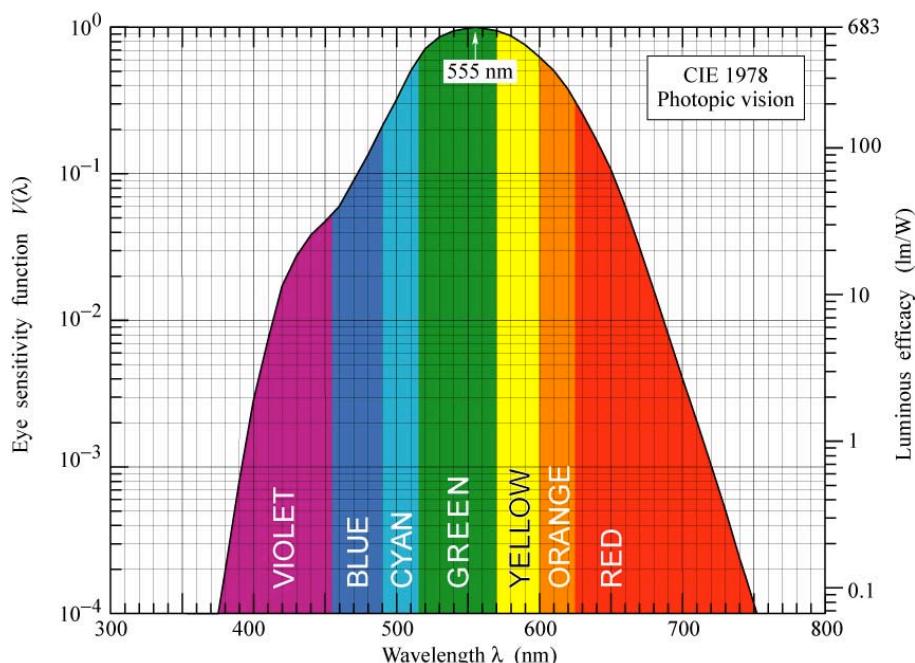


SPEKTROMETER

Uvod

Spektroskop je priprava za merjenje spektrov, to je porazdelitve svetlobnega toka po frekvenci ali valovni dolžini. Poznamo mnogo vrst spektroskopov prirejenih različnim potrebam glede spektralnega področja, ločljivosti, razpoložljivega svetlobnega toka itd. V naši vaji bomo uporabljali klasični optični spektroskop na prizmo. Njegovo delovanje temelji na principu, da se svetloba v prizmi iz stekla razcepi na raznobarvne komponente. Kot detektor valovanja uporabljam človeško oko in tako smo omejeni na merjenje vidnega spektra. Oko je najbolj občutljivo za rumenozeleno svetlobo pri valovni dolžini 555 nm, kjer je relativna občutljivost največja in je iz zgodovinskih razlogov dogovorjeno razmerje 683 lm/W. Proti vijolični in rdeči barvi občutljivost pada, kar prikazuje slika 1, in to moramo pri meritvi tudi upoštevati.



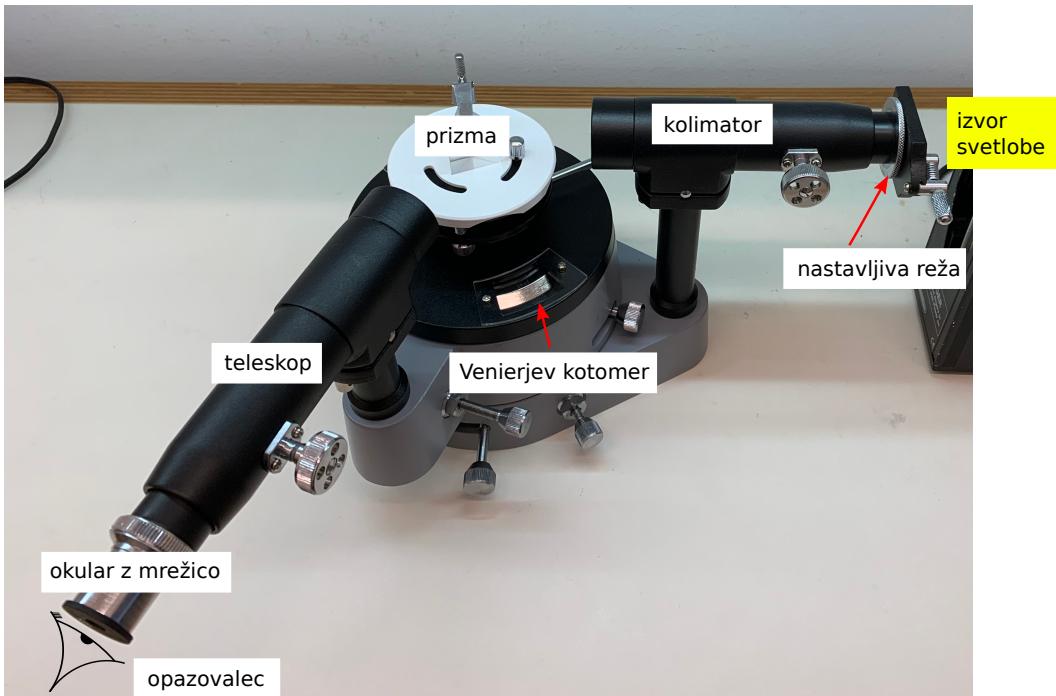
Slika 1: Občutljivost očesa za svetlobo merjena v fizioloških enotah lumen na W. Ta krivulja je pomembna za načrtovanje osvetljevanja, kjer želimo veliko svetlost in pravilno reprodukcijo barv. Običajna žarnica, ki dobro ustreza črnemu telesu pri temperaturi 2800 K, oddaja približno 15 lm/W, pri soncu (5800 K) pa je razmerje 94 lm/W. Učinkovitost fluorescenčnih sijalk je okoli 60 lm/W, medtem ko so tipične vrednosti LED sijalk še višje, to je okoli 90 lm/W. Za obe vrsti velja, da je učinkovitost višja pri barvni temperaturi okoli 6000 K.

Osnovne komponente spektroskopa povzete na sliki 2 so:

- Vstopna reža in kolimator, to je cev, ki ima na koncu lečo. Goriščna razdalja leče je enaka razdalji med režo in lečo. Kolimator pretvori divergentni snop svetlobe iz reže v vzporednega (kolimiranega).
- Osrednji del spektroskopa je prizma, v našem primeru je to sestavljena prizma iz treh zlepljenih prizem (Amicijeva prizma). Te prizme so narejene iz stekel z

različnimi lomnimi količniki in z različnimi disperzijami lomnega količnika $n(\lambda)$, da je lomni kot za posamezno barvo čim večji. Za prizmo vsako komponento svetlobe pričakujemo pri drugem kotu glede na vstopni kolimirani snop.

- Za prizmo imamo vrtljivi teleskop, ki v svoji goriščni ravnini zbere sliko reže, kar pa velja za vsako komponento spektra posebej.



Slika 2: Slika in shematični prikaz optičnega spektroskopa na prizmo. Skozi teleskop vidimo na prizmi po valovnih dolžinah razcepljeno svetlobo izvora. Za dobro delovanje spektrometra moramo pravilno izbrati osvetlitev vhodne zaslone, zato da kolimirani snop svetlobe napolni prizmo. Takrat je ločljivost spektroskopa odvisna od velikosti prizme in njene optične disperzije.

Če je opazovani spekter monokromatski, dobimo eno sliko reže, sicer pa dobimo za vsako valovno dolžino svojo sliko. Pri normalni disperziji, kakršno imajo vsi sestavni deli prizme, je lomni količnik za rdečo svetlobo manjši od tistega za modro svetlobo in se zato modra svetloba na prizmi lomi za večji kot. Večinoma lahko disperzijo lomnega količnika opišemo s tako imenovano Sellmeierjevo formulo

$$n(\lambda)^2 = 1 + \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}, \quad (1)$$

kjer je A tako imenovana moč oscilatorja in λ_0 valovna dolžina, ki ustreza njegovi resonanci.

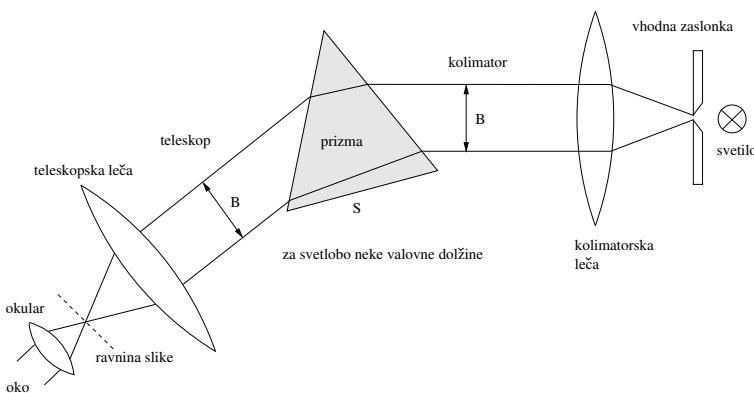
Širina reže določa minimalno širino slike, saj se vsaka točka v reži preslika v ustrezno točko slike. Čim manjša je reža, ostrejša je slika, vendar je pri tem manj tudi celotnega svetlobnega toka in je s tem opazovanje šibkih spektralnih komponent težavnejše. Zato je nastavitev reže vedno kompromis med ločljivostjo, ki jo običajno podamo kot razmerje $\Delta\lambda/\lambda$, in svetlostjo. Ločljivost spektroskopa pa omejujejo tudi nezaželeni uklonski efekti na optičnih elementih - vstopni reži, prizmi in lečah. Uklonskim efektom se izognemo,

če se optične poti v optičnem elementu za svetlogo z dobro določeno valovno dolžino razlikujejo bistveno manj kot ena valovna dolžina. Iz tega pogoja sledi, da je velikost slike oz. vstopne reže navzdol omejena in je njena minimalna vrednost podana kot

$$\Delta D \approx \frac{\lambda}{B} f, \quad (2)$$

kjer je B širina izhodnega svetlobnega snopa in f goriščna razdalja kolimatorske oz. teleskopske leče. V spektroskopu poskrbimo, da je prizma dovolj velika, da prepusti celoten snop širine B . Zato lahko ločljivost spektroskopa, v primeru simetričnega loma skozi eno prizmo, izrazimo z dolžino osnovnega roba S in z disperzijo lomnega količnika prizme

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \left(S \frac{dn}{d\lambda} \right)^{-1}. \quad (3)$$



Slika 3: Shematični prikaz poteka svetlobe skozi spektrometer.

Vrste spektrov. Emisijske spekture opazujemo, če izvor sam oddaja svetlobo. Pri omejeni ločljivosti, kakršno lahko dosežemo z našim spektrometrom, delimo te spekture na zvezne in črtaste. (Pri dovolj veliki ločljivosti pa ugotovimo, da je vsak spekter zvezen.) Zvezne spekture sevajo razžarjene trdne snovi, npr. žarilna nitka v volframovi žarnici. Barva izsevane svetlobe je določena z absolutno temperaturo žarečega telesa in pa z lastnostmi površine, ki jih opišemo z albedom oziroma emisivnostjo. Merjenje izsevane svetlobe lahko uporabimo za merjenje temperature žarečih snovi s pirometrom, npr. v kovinski industriji.

Črtaste spekture sevajo plini. Valovna dolžina spektralnih črt je določena z energijo elektronskih prehodov v atomih plina ali z vibracijskim oz. rotacijskim prehodi v molekulah. Slednji so predvsem dobro zaznavni predvsem v infrardečem območju. Nekatere črte so tako blizu skupaj, da so pri dani ločljivosti sistema praktično nerazločljive ter tako tvorijo spektralne pasove.

Na teoretično širino spektralnih črt izven merilnega sistema vpliva v prvi vrsti Heisenbergovo načelo nadoločenosti [1] po katerem ima porazdelitev izsevane intenzitete po frekvencah $P(\nu)$ za dano spektralno črto pri frekvenci ν_0 obliko Lorentzove funkcije

$$P_L(\nu) = \frac{\alpha_L/\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + \alpha_L^2}, \quad (4)$$

kjer je v idealnem vakuumu polovična širina črte v enotah frekvence $\alpha_L = h/(2\tau)$ določena s časom prehoda τ iz energijsko višjega v nižje stanje. Zaradi trkov z okoliškimi molekulami plina pa postane širina temperaturno T in tlačno P odvisna, zato je

$$\alpha_L(T, P) = \alpha_0 \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

kjer je α_0 polovična širina pri standardnih pogojih: $T_0 = 273$ K in $P_0 = 1013$ mB. Zaradi gibanja delcev v plinu je emisija podvržena Dopplerjevemu efektu. Gibanje delcev je naključno in recimo, da delci v lastnem sistemu sevajo valovanje s frekvenco ν_1 . Zaradi Dopplerjevega efekta ima v laboratorijskem sistemu intenziteta te emisije Gaussovo porazdelitev

$$P_D(\nu) = \frac{1}{\alpha_D \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{\nu - \nu_0}{\alpha_D} \right)^2 \right], \quad (6)$$

pri čemer je širina $\alpha_D = \nu_0 \sqrt{2k_B T / (mc^2)}$ in je m masa delca. Oba efekta (4) in (6) nastopata istočasno in zato je pravilna porazdelitev konvolucija obeh porazdelitev

$$P_V = P_L * P_D,$$

ki jo imenujemo Voigtov profil. Za nadaljne branje o lastnostih razelektritvenih spektrov v optičnem območju se pripomoča [2]. V okviru vaje opisanih fizikalnih procesov širjenja spektralnih črt ne opazimo, saj je snop žarkov skozi režo tipično preširok.

Če postavimo med belo svetilo in spektrometer merjenec, se v spektru lahko pojavijo temna področja, ki frekvenčno ustrezajo črtam, ki bi jih merjenec izseval, če bi ga uporabili kot svetilo. Vsaka snov absorbira prav tisto komponento svetlobe, ki jo lahko tudi izseva. Z merjenjem absorpcije je mogoče ugotavljati npr. sestavo atmosfer oddaljenih zvezd ali vsebnost različnih primesi v razredčeni krvi. Absorpcijski spekter Sonca je pomeril nemški optik Fraunhofer že v začetku prejšnjega stoletja. Fraunhoferjeve črte solarnega spektra dokazujejo obstoj plinov v Sončevi atmosferi (natrij, kalcij,...). Spektri zvezd v vesolju so v primerjavi z ustreznimi spektri izmerjenimi v laboratoriju prema knjeni zaradi Dopplerjevega efekta proti manjšim frekvencam, iz česar je mogoče oceniti hitrost oddaljevanja posameznih zvezd.

Potrebščine

- optični spektroskop: prizma iz kremenastega (angl. flint) stekla
- nosilec za spektralne cevi (ampule) z visokonapetnostnim izvorom, ampule s plini Hg, He, Ne, in H₂
- varčna žarnica, LED diode, volframova žarnica, cevka z NO₂

Naloga

1. Umerite kotno skalo spektroskopa s spektralnimi črtami Hg in H₂.
2. Izmerite valovne dolžine spektralnih črt v spektru varčne žarnice. Primerjajte spekter s tistim, izmerjenim v Hg pod točko 1.

3. Izmerite centralno valovno dolžino in ocenite spektralno širino rdeče, rumene, zelenih in modre svetleče diode (LED).
4. Opazujte zvezni spekter volframove žarnice in oceni valovno dolžino najsvetlejšega (rumenega) dela in zapišite intervale, ki jih pokrivajo posamezne barve.
5. Opazujte absorpcijski spekter NO_2 tako, da cevko s plinom presevate z belo svetlobo.
6. Izmerite valovne dolžine črt v spektru He in Ne .

Navodilo

Kotomer na spektroskopu meri ravninski kot teleskopa v stopinjah in minutah in je opremljen z Vernierovo skalo, ki nam omogoča določiti kot na 0.1° , glej sliko 4. Kot ocenimo na pol stopinje natančno in temu dodamo vrednost minut, ki jo odčitamo z Vernierove skale. Princip je identičen kot je uporabljen na kljunastem merilu pri določitvi dimenzije na del milimetra natančno. Če želimo iz kotov direktno izraziti valovno dolžino, moramo kotomer za dano lego prizme umeriti, kar storimo z opazovanjem izvorov z znanimi spektralnimi črtami. Okular nastavite tako, da je slika reže ostra, in reža naj bo čim bolj ozka. Pri spremicanju širine reže se premika le en rob slike, drugi pa ostaja pri miru. Pri meritvah opazuj vedno tisti rob reže, ki je fiksni.



Slika 4: Povečana slika Vernierovega kotomera na spektroskopu.

Emisijske spektre plinov lahko lepo opazujemo, če plin ioniziramo z električnim tokom, elektroni pa se nato vračajo na nižja stanja in pri tem izsevajo fotone. Na voljo imamo različne ampule s plini in ustrezno ohišje, v katerem je izvor električnega toka. Začnete z ampulo Hg , ki jo postavite v **neprižgan** namenski nosilec s kombiniranim samo-reguliranim visokonapetostnim izvirom, kot je prikazan na sliki 5. Tega vklopite s stikalom na zadnji strani ohišja. Ob prižigu izvor samostojno zvišuje napetost med elektrodama na ampuli dokler ne steče ustrezni tok oz. dosežemo maksimalno napetost 6 kV. Ob dovolj visoki napetosti se plin ionizira ter tvori plazmo, ki ima bistveno manjšo upornost kot snov v plinskem stanju, zato izvor zniža napetost, da omeji tok na primerno vrednost. Tukaj delamo z visoko napetostjo, zato se **ne dotikajte ampule v nosilcu, ko je le-ta prižgan!** Za umeritev bomo uporabili le najmočnejše črte. Za Hg so to:

dve rumeni 577 nm in 579 nm, zelena 546 nm ter modrovijolična 436 nm.

Zapišite si tudi lego ostalih črt in ocenite njihovo intenziteto. Mogoče boste uspeli videti vijolično črto pri 405 nm. Upoštevajte, da je občutljivost očesa v skrajnih legah spektra zelo slaba. Vstavite ampulo H₂ in za kalibracijo izmerite lego naslednjih črt:

rdeča 656 nm, svetlomodra 486 nm in modrovijolična 434 nm.

Te črte tvorijo Balmerjevo serijo vodikovega spektra in ustrezajo prehodom elektrona v stanje z glavnim kvantnim številom $n = 2$. Pri prehodu iz $n = 6$ v $n = 2$ je valovna dolžina izsevane svetlobe 410 nm. Ali lahko opazite tudi to?

Narišite umeritveno krivuljo, kjer na ordinato nanašate prebrane lege kotov in na absciso valovne dolžine. Skozi točke potegnite gladko krivuljo, ki jo upoštevate pri nadaljnjih meritvah. Dober približek je naslednja funkcija

$$\text{kot} = c_1 + c_2\lambda + c_3\sqrt{\lambda} \quad (7)$$

Če vseh šest umeritvenih točk ne leži na krivulji, ste najbrž katero izmed njih narobe identificirali. Poiščite popravek. Zato, da s tem ne boste imeli težav doma, skicirajte umeritveno krivuljo takoj.

V nadaljevanju vaje si oglejte emisijske spektre svetlobe iz LED diod, varčne žarnice in volframske žarnice, kjer izmerite valovne dolžine pomembnejših črt ali sprememb v intenziteti zveznih spektrov. Za opazovanje absorpcijskega spektra N₂ pa postavite pred volframsko žarnico ampulo z merjencem in si zabeležite nekaj (~ 10) najbolj vidnih črt.

Literatura

- [1] J. Strnad, *Fizika, 3. del, Posebna teorija relativnosti, Atomi*, (DZS, Ljubljana 1980).
- [2] R. Payling, et.al. *Glow Discharge Optical Emission Spectrometry*, (John Wiley & Sons, 1997)
- [3] J. Reader, H. Ch. Corliss, *Line Spectra of the Elements* (CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 1981).



Slika 5: Nosilec za ampule s plinom, ki je kombiniran s samo-reguliranim izvorom visoke enosmerne napetosti do 6 kV in tokovi do 2 mA. Ampule plina so pri nizkem tlaku med 10 do 100 Pa.

Tabela 1: Valovne dolžine glavnih spektralnih črt Hg, H₂, Ne in He in njihove relativne jakosti v spektru elementa [3].

Plin	Barva	nm	Intenzit.		Plin	Barva	nm	Intenzit.
	Vijolična	404.7	1800			Sinje zelena	488.5	10
		407.5	150			Zelena	503.7	10
	Modra	433.9	125				514.0	10
		434.7	240				533.0	25
		435.8	2000				534.0	20
							540.0	60
Hg	Zelena	491.6	80		Ne			
		512.8	100					
		546.1	1100			Svetlo zelena	576.0	80
	Rumena	578.0	1240			Rumena	585.2	500
		580.0	1100					
		607.2	20			Oranžna	594.3	100
		614.9	1000			Rdeča	618.3	250
		623.4	30				640.2	200
	Vijolična	410.2	15			Vijolična	402.6	50
		434.0	30				447.1	200
							468.5	30
	Modro-	486.1	80			Modra	471.3	30
	zelena							
H ₂				He	Zelena	492.2	20	
	Rdeča	656.27	120				501.6	100
		656.28	180					
					Rumena	587.562	500	
							587.597	100
					Rdeča	667.8	200	
							706.6	30