

Spektrometer

Bor Kokovnik

Maj 2024

1 Uvod

Spektroskop je priprava za merjenje spektrov, to je porazdelitve svetlobnega toka po frekvenci ali valovni dolžini. Uporabljali bomo klasični optični spektroskop na prizmo. Njegovo delovanje temelji na principu, da se svetloba v prizmi iz stekla razcepi na raznobarvne komponente. Naš detektor, oko, je najbolj občutljiv na svetlobo pri 550 nm, kar je potrebno upoštevati pri meritvi.

Osnovne komponente spektroskopa 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 disperzijo lomnega količnika $n(\lambda)$. 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.

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 težavneje. 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 svetlobo 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. Ločljivost spektroskopa, v primeru simetričnega loma skozi eno prizmo, izrazimo z dolžino osnovnega roba S in z disperzijo lomnega količnika prizme

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

Emisijske spektre opazujemo, če izvor sam oddaja svetlobo. Pri omejeni ločljivosti, kakršno lahko dosežemo z našim spektrometrom, delimo te spektre na zvezne in črtaste. Pri dovolj veliki ločljivosti pa ugotovimo, da je vsak spekter zvezen. Zvezne spektre 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.

Črtaste spektre sevajo plini. Valovna dolžina spektralnih črt je določena z energijo elektronskih prehodov v atomih plina ali z vibracijskim oz. rotacijskimi 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 nedoločenosti 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 $P_0 = 1013$ mbar. 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

$$P_V = P_L * P_D$$

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 pomiril 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 premaknjeni zaradi Dopplerjevega efekta proti manjšim frekvencam, iz česar je mogoče oceniti hitrost oddaljevanja posameznih zvezd.

2 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

3 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, zelene 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 NO₂ tako, da cevko s plinom preseivate z belo svetlobo.
6. Izmerite valovne dolžine črt v spektru He in Ne.

4 Obdelava meritev

Datum izvedbe: 14. 3. 2024

Zaradi težav z merjenjem spektra H₂ sem moral fitati umeritveno krivuljo za pretvorbo med koti in valovnimi dolžinami (slika 1) narediti le z meritvami za Hg žarnico.

Inverz te funkcije sem izračunal numerično s pomočjo `pythona`. Iz dobljene funkcije sem lahko izračunal ustrezne vrednosti valovnih dolžin:

Tabela 1: Tabela izmerjenih valovnih dolžin pri varčni žarnici

Varčna žarnica	
Barva	λ [nm]
Rdeča	638
Zelena	537
Vijolična	436
Turkizna	482
Rumena	571

Tabela 2: Tabela meritev za LED. Indeks C pomeni centralno (najsvetlejšo) vrednost, min in max pa začetek in konec intervala.

LED			
Barva LED	λ_C [nm]	λ_{min} [nm]	λ_{max} [nm]
Zelena	557	550	590
Rdeča	638	610	640
Rumena	613	570	640
Modra	466	440	510

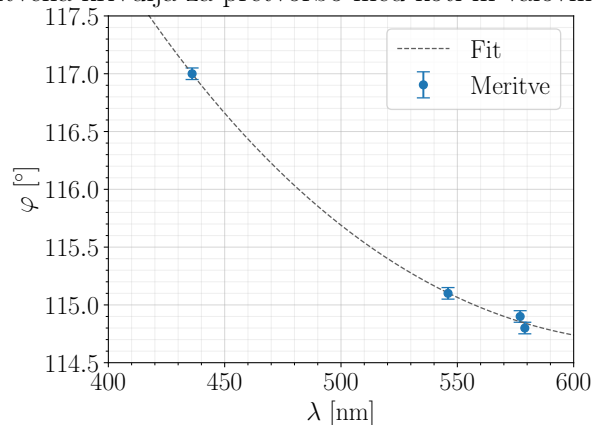
Pri wolframovi nitki sem ocenil, da je najsvetlejši del spektra pri 560 nm, intervali barv pa si sledijo takole:

- Rdeča: ~ 640 nm
- Rumena: 640 - 580 nm
- Zelena: 580 - 500 nm
- Modra: 500 - 460 nm
- Vijolična: 460 - 400 nm

Tabela 3: Tabela izmerjenih valovnih dolžin absorpcijskih črt pri NO_2 .

Absorpcija NO_2	
Barva	λ [nm]
Rdeča	638
Rdeča	612
Oranžna	570
Rumena	557
Rumena	537
Zelena	520
Zelena	513
Turkizna	499
Turkizna	493
Modra	487

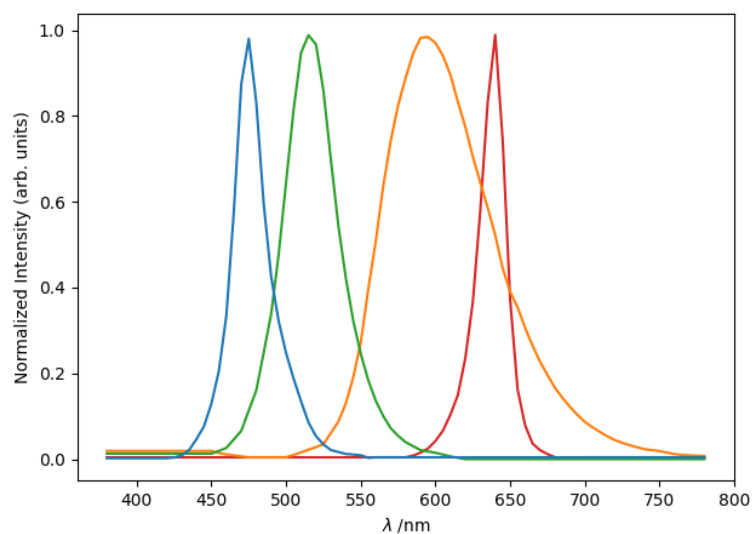
Umeritvena krivulja za pretvorbo med koti in valovnimi dolžinami



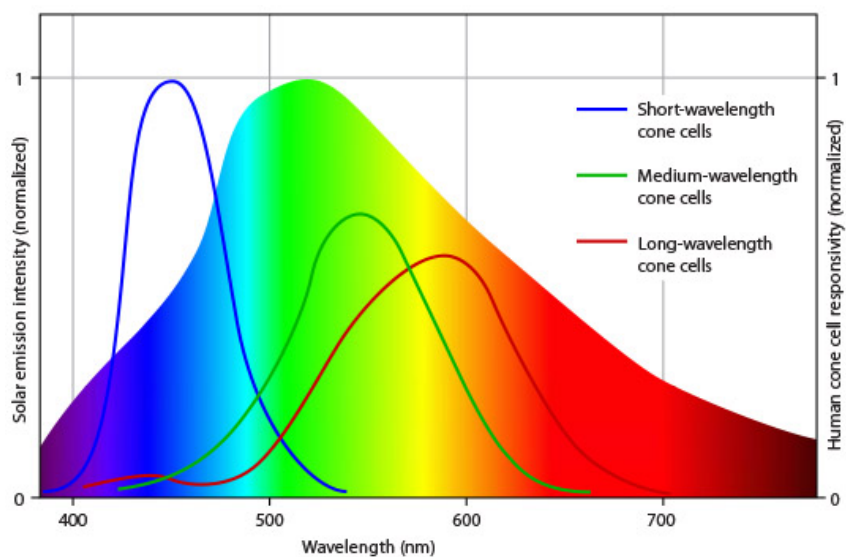
Slika 1: Fitana umeritvena krivulja, s katero pretvarjamo med izmerjenimi koti in ustreznimi valovnimi dolžinami.

5 Zaključek

Cilj vaje je bil, da se spoznamo z različnimi tipi spektrov. Meritve so smiselne, kar vidimo iz primerjave videne barve z izračunano valovno dolžino. Pri spektrih LED elementov vidimo podobnost s pričakovanimi porazdelitvami, prikazanimi na sliki 2. Pri iskanju najsvetlejših valovnih dolžin pri zveznem spektru volframove žarnice je potrebno upoštevati še občutljivost očesa, ki ni idealen merilni inštrument. Karakteristika svetlobne zaznave človeškega očesa je prikazana na sliki 3, skupaj s spektrom sončne svetlobe, na katerega smo prilagojeni.



Slika 2: Spektri LED elementov različnih barv.



Slika 3: Odziv človeškega očesa na različne valovne dolžine, skupaj s spektrom sonca.