

Spektraalmõõtmised CCD-võrespektrograafiga

Taavi Tammaru

19 november 2025

Töö eesmärk

Töö eesmärk on dispersiivse spektrograafi ehituse ja tööpõhimõttega tutvumine. Skaala kalibreerimine hõõglambi spektri abil. Lahuse neeldumise ja kiirgusspektri mõõtmine. Luminestsentslambi spektri mõõtmine.

Töövahendid

- CCD kaameraga varustatud spektromeeter
- optiline relss koos kinnitusdetailidega
- kaks akromaatset läätse
- hõõglamp
- luminestsentslamp
- dioodlaser (532 nm) luminestsentsi ergastamiseks
- küvett värvaine vesilahusega
- küvett puhta veega
- küvetihoidja

Difraktsioonijärkude analüüs

Oletagem lihtsuse huvides, et kasutatava filtri (SZS-21) läbipääsuriba on täpselt 350 kuni 600 nm. Põhjendage, kas sellistel tingimustel on alati võimalik spektrit usaldusväärselt mõõta, ilma et 1. ja 3. difraktsioonijärk segaks?

Kasutame difraktsiooni kirjeldavat võrrandit:

$$m\lambda = d \sin \theta \quad (1)$$

kaks difraktsiooni järku segavad üksteist kui:

$$m_1\lambda_1 = m_2\lambda_2 \quad (2)$$

kas 1. ja 2. difraktsioonijärk kattuvad antud laine pikkuse vahemikus?

$$m_1\lambda_1 = 1 \cdot 600 = 600\text{nm} \quad (3)$$

$$m_2\lambda_2 = 2 \cdot 350 = 700\text{nm} \quad (4)$$

(5)

Ehk need järgud ei kattu.

kas 2. ja 3. difraktsioonijärk kattuvad?

$$m_2\lambda_2 = 2 \cdot 600 = 1200\text{nm} \quad (6)$$

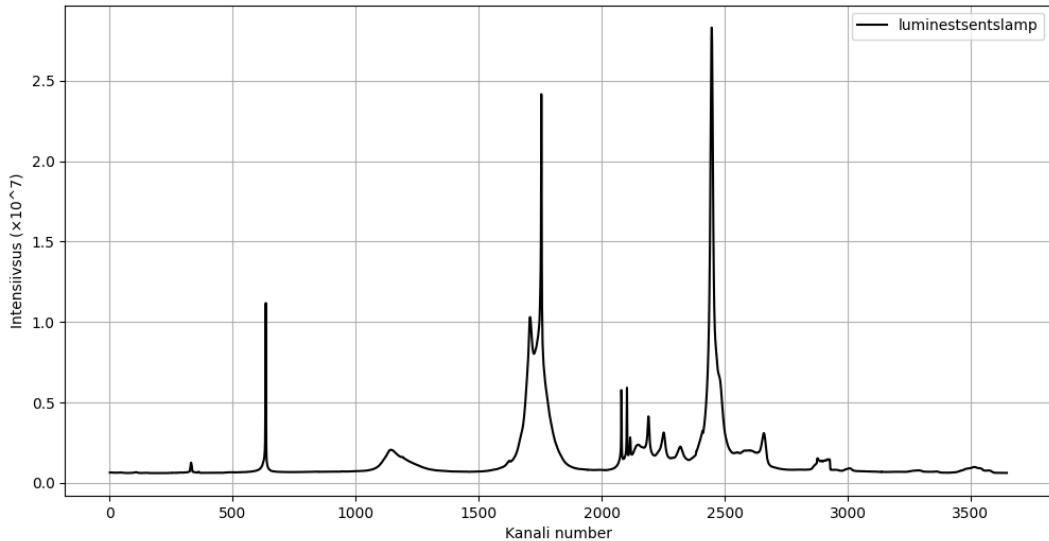
$$m_3\lambda_3 = 3 \cdot 350 = 1050\text{nm} \quad (7)$$

(8)

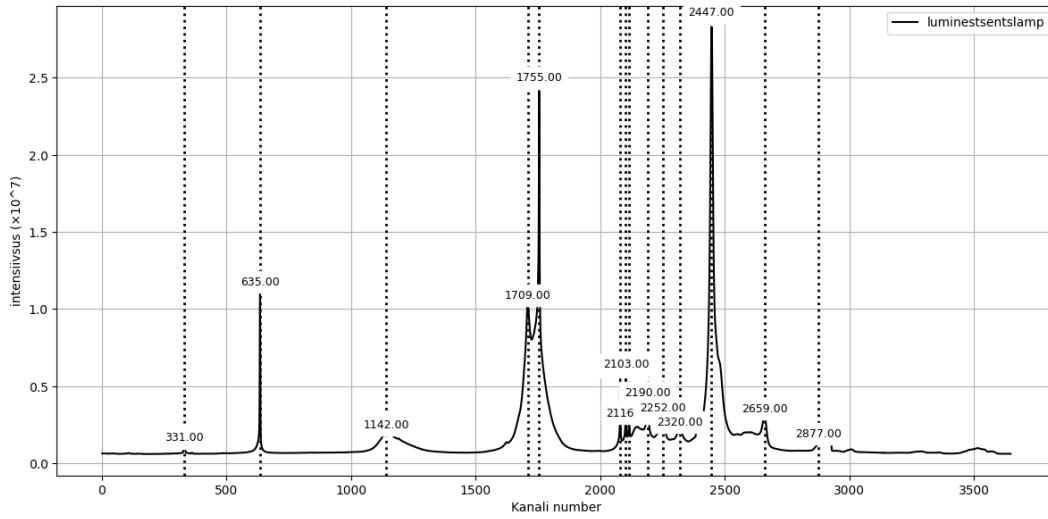
Need difraktsioonijärgud kattuvad ja võivad potentsiaalselt segada üksteist.

Skaala kalibreerimine

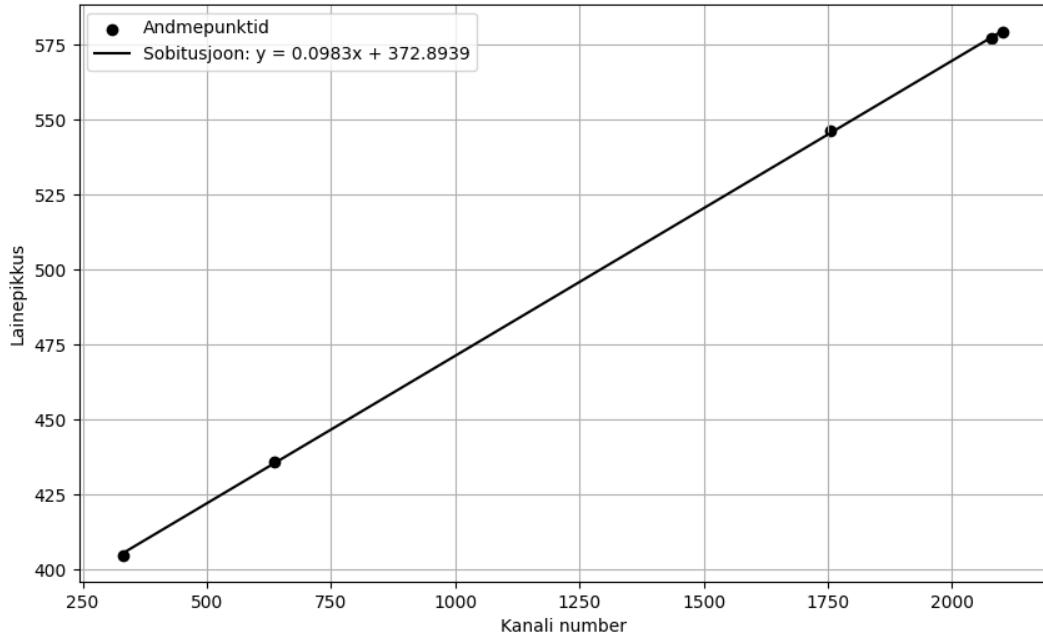
Identifitseerides luminestsentslambi spektrilt tuntud piigid leiame seose kanali numbri ja laine pikkuse vahel. Piigi asukoha määrmamiseks kasutame piigi keskpunkti, mitte maksimaalset väärust. Töötlemata luminestsentlambi spekter on järgnev:



Kirjutame koodi, mis tuvastab kõige tugevamat piigid ja märgib need graafikul:



Otsime piikide kanali numbreid, mis vastaksid lainepeikkustele: 404,77, 435,96, 546,23, 577,12 ja 579,23. Internetist leitud Hg-luminestents spektri abil leidsin kanali numbrite vasted ja sain punktid (404,77; 331), (435,96; 635), (546,23; 1755), (577,12; 2080) ja (579,23; 2103).



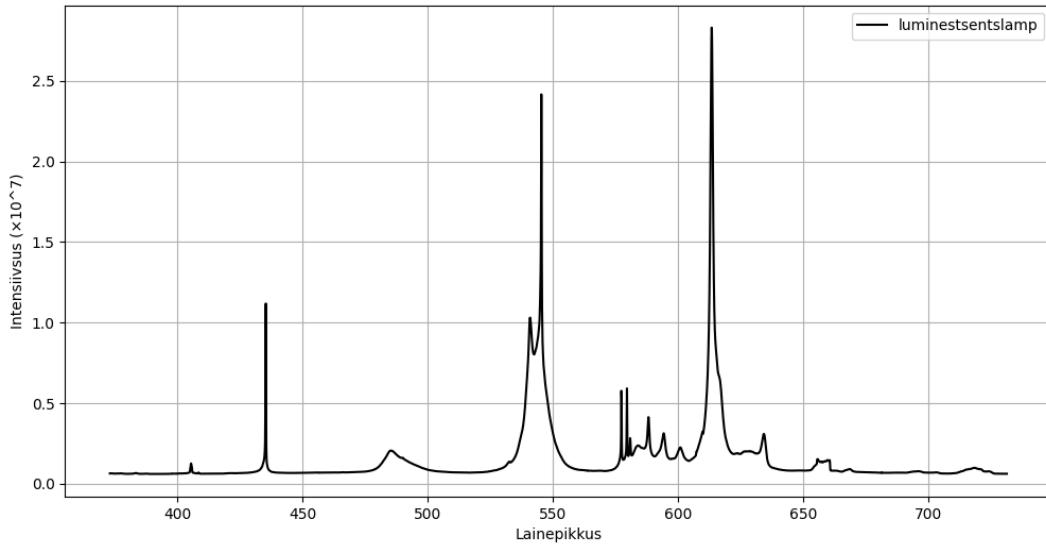
Saame kalibreerimisvõrrandi:

$$y = 0.098x + 372.9 \quad (9)$$

Ruutkeskmine viga on 0.35.

Spektrid

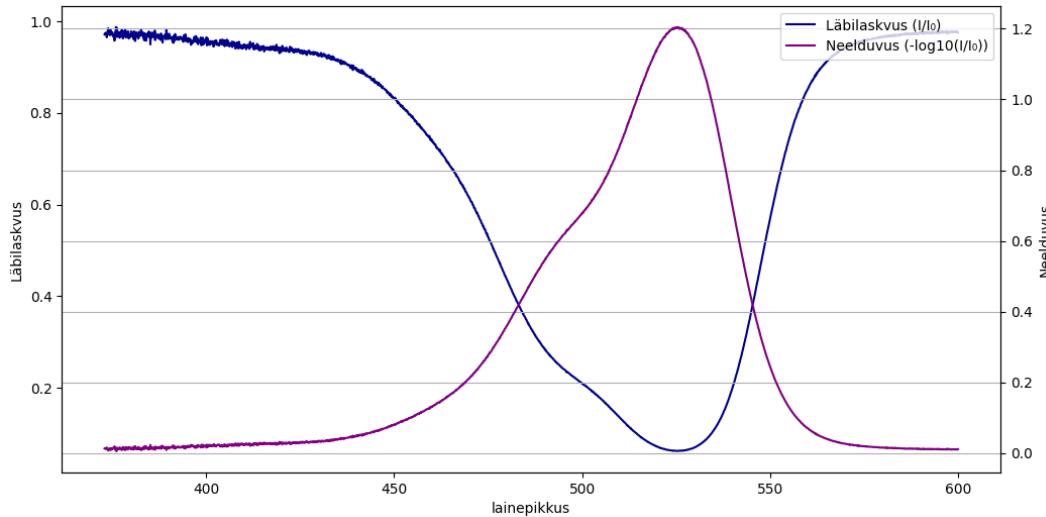
Kasutates saadud klaibreerimisvõrrandit ja lahutades spektrist tausta spektri saame luminestsentslambi kiirgusspektri:



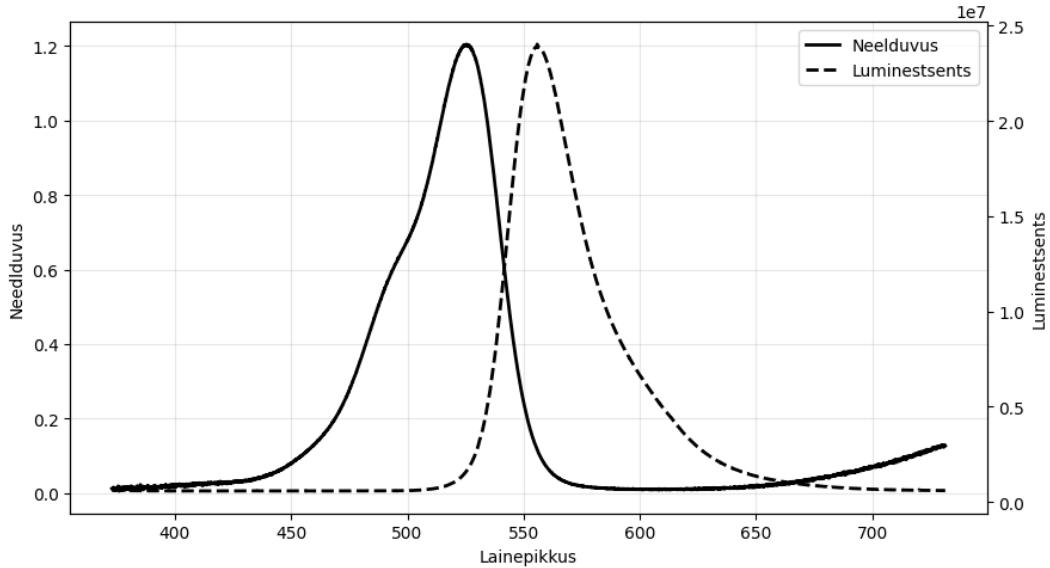
Värvaine läbilaskvuse ja neelduvuse arvutame valemiga valemitega:

$$T = \frac{I_{\text{proov}}}{I_{\text{võrdlus}}}$$

$$A = -\log_{10}(T).$$



Järgmiseks teeme neelduvuse ja luminestsentsi graafiku, kus on selgelt näha stokes'i-nihe.



Dispersioon ja Lahutusvõime

Pöörd-dispersioon

Meie kalibreerimisvõrrand oli

$$y = 0.098x + 372.9 \quad (10)$$

kus x on kanali number. Selle funktsiooni tõus b (ühikutes nm/kanal nr.) määrab, kui palju muutub lainepikkus ühe kanali kohta.

$$b = 0.098 \text{ nm/kanal.}$$

Antud CCD sensori ühe kanali laius on

$$p = 8.0 \mu\text{m} = 0.008 \text{ mm.}$$

Eksperimentaalselt leitud lineaarne pöörd-dispersioon on:

$$D_l^{-1} = \frac{b}{p} = \frac{0.098 \text{ nm}}{0.008 \text{ mm}} = 12.3 \text{ nm/mm.}$$

Teoreetiline dispersioon leitakse difraktsioonvõre valemist

$$D_l = \frac{mf}{d \cos \beta},$$

kus

- $m = 2$ on difraktsioonijärk,
- $f = 120$ mm on fookuskaugus,
- $d = \frac{1}{300}$ mm on võre samm,
- $\beta \approx 0$ ja seega $\cos \beta \approx 1$.

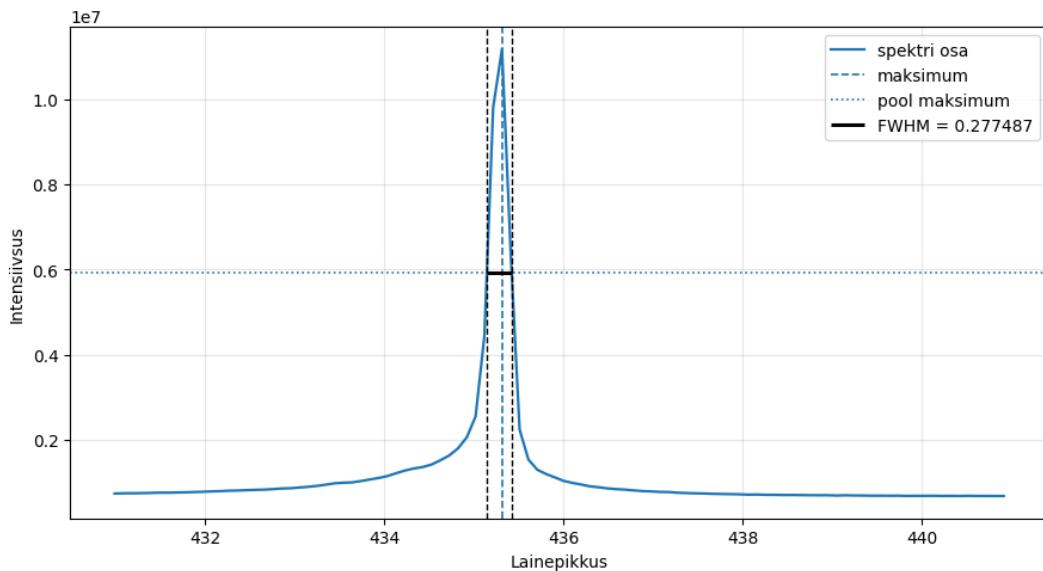
Seega saame teoreetiliseks väärtsuseks:

$$D_l^{-1} = \frac{d}{mf} = 13.9 \text{ nm/mm.}$$

Spektraallahutus

Luminestsentslambi tervamate joonte kaudu saame hinnata süsteemi spektraallahutust. Valime piigi lainepeikkel 435,96 nm.

Spektrijoone laiuse määrame täislaiusena poole kõrguse juures (FWHM).



Seega eksperimentaalne spektraallahutus on 0.28 nm.

Teoreetiline spektraallahutus

Teoreetilise spektraallahutuse leiate valemiga:

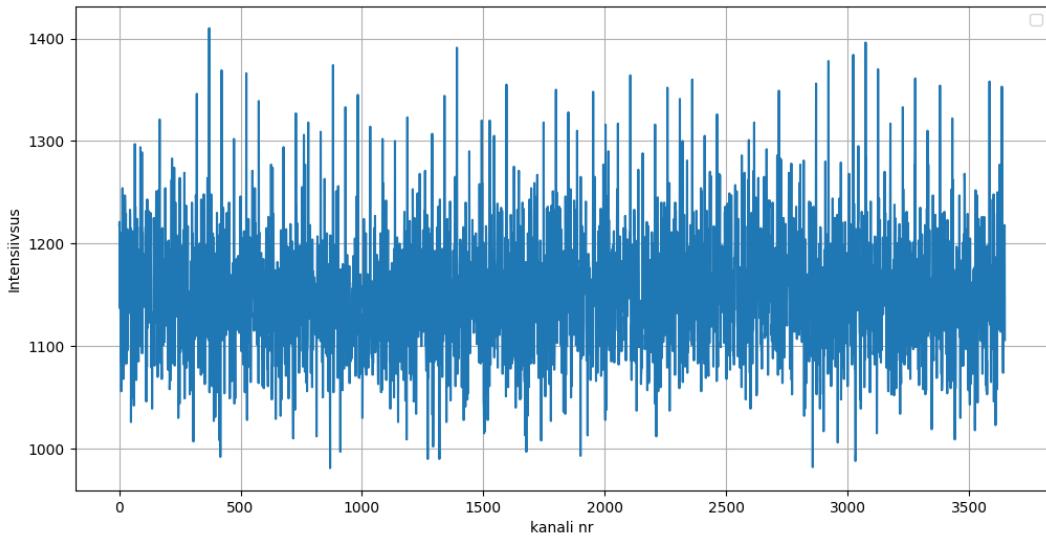
$$\delta\lambda = \frac{s}{D_l},$$

$$\delta\lambda = s \cdot D_l^{-1} = 0.02 \text{ mm} \cdot 13.9 \text{ nm/mm} = 2.8 \text{ nm}$$

Detektori müra ja pimesignaal

Väljalugemismüra

Väljalugemismüra hindamiseks mõõdeti spekter võimalikult lühikese eksponeerimisaaga. Meie puhul oli $t = 0.1$ ms. Lisaks pidi olema spektromeeter täielikult pimendatud ruumis.



Kasutades python'is funktsiooni $np.std(y)$ saame, et detektori väljalugemismüra on:

$$\sigma = 55.4 \text{ ADU}$$

Termiliste elektronide tekitatud signaal

Termilise pimesignaali määramiseks mõõtsime teise spekteri oluliselt pikema eksponeerimisajaga. Selle mõõtmise puhul $t = 1$ s.

Olgu vastavate spektrite keskmised kanalite vääritud:

$$\overline{D}_{\text{lühike}} = 1149.6 \text{ ADU} \quad \overline{D}_{\text{pikk}} = 2394.0 \text{ ADU}$$

Termiliste elektronide keskmise tekkimise kiirus ühe kanali kohta:

$$I = \frac{\overline{D}_{\text{pikk}} - \overline{D}_{\text{lühike}}}{t_{\text{pikk}}} = 1244.5 \text{ ADU/s.}$$