

# Spektraalmõõtmised CCD-võrespektrograafia

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 akromaatsset lääts
- hõõglamp
- luminestsentslamp
- dioodlaser (532 nm) luminestsentsi ergastamiseks
- kuvett värvaine vesilahusega
- kuvett puhta veega
- kuvetihoidja

## 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 lainepikkuse vahemikus?

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

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

$$(5)$$

Ehk need järgud ei kattu.

kas 2. ja 3. difraktsioonijärk kattuvad?

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

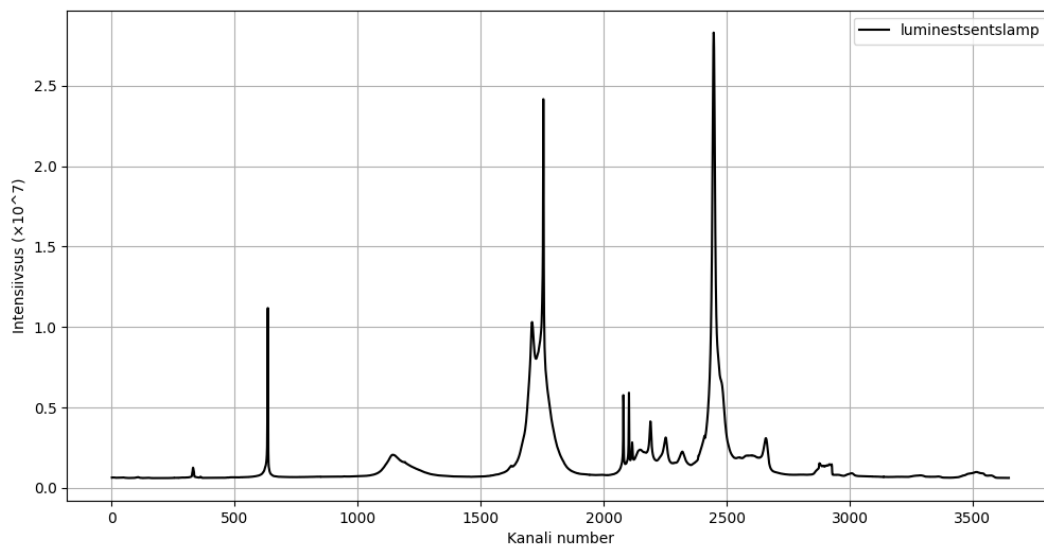
$$m_3\lambda_3 = 3 \cdot 350 = 1050nm \quad (7)$$

$$(8)$$

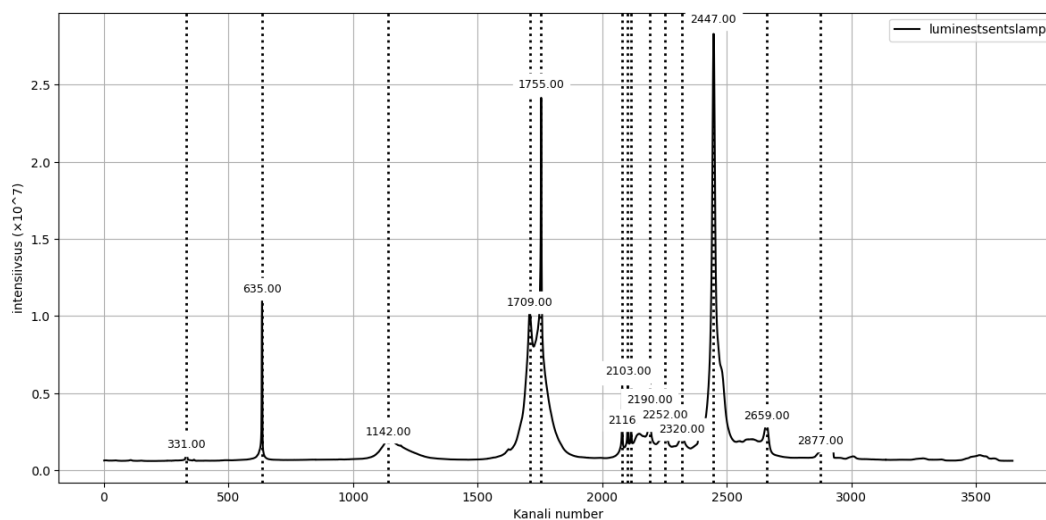
Need difraktsioonijärgud kattuvad ja võivad potentsiaalselt segada üksteist.

## Skaala kalibreerimine

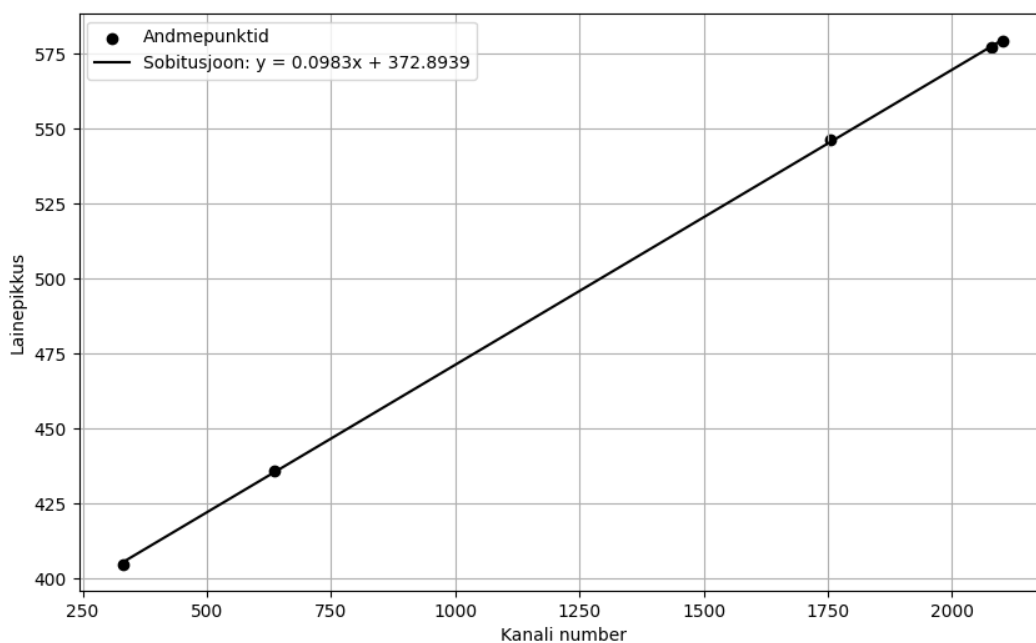
Identifitseerides luminesentslambi spektrilt tuntud piigid leiame seose kanali numbri ja laineikkuse vahel. Piigi asukoha määramiseks kasutame piigi keskpunkti, mitte maksimaalset väärtust. Töötlemata luminesentslambi spekter on järgnev:



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



Otsime piikide kanali numbraid, mis vastaksid lainepikkustele: 404,77, 435,96, 546,23, 577,12 ja 579,23. Internetist leitud Hg-luminesents 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).



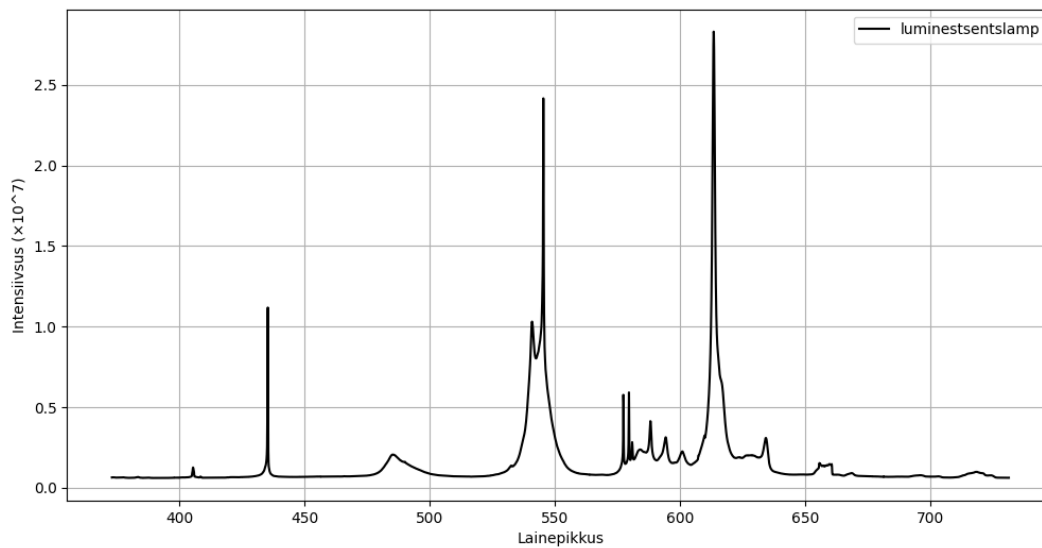
Saame kalibreerimisvõrrandi:

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

Ruutkeskmine viga on 0.35.

# Spektrid

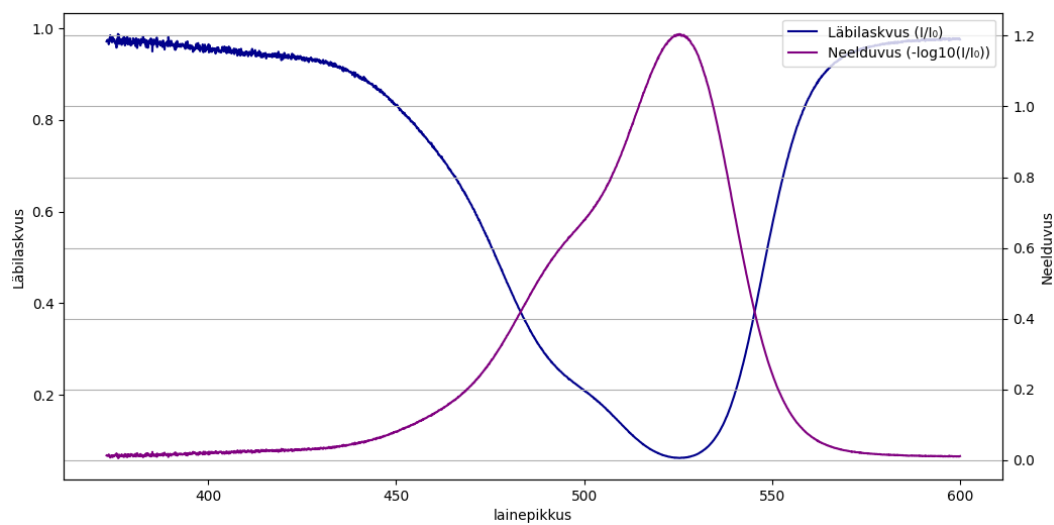
Kasutates saadud klaibreerimisvõrrandit ja lahutades spektrist tausta spektri saame luminesentslambi kiirgusspektri:



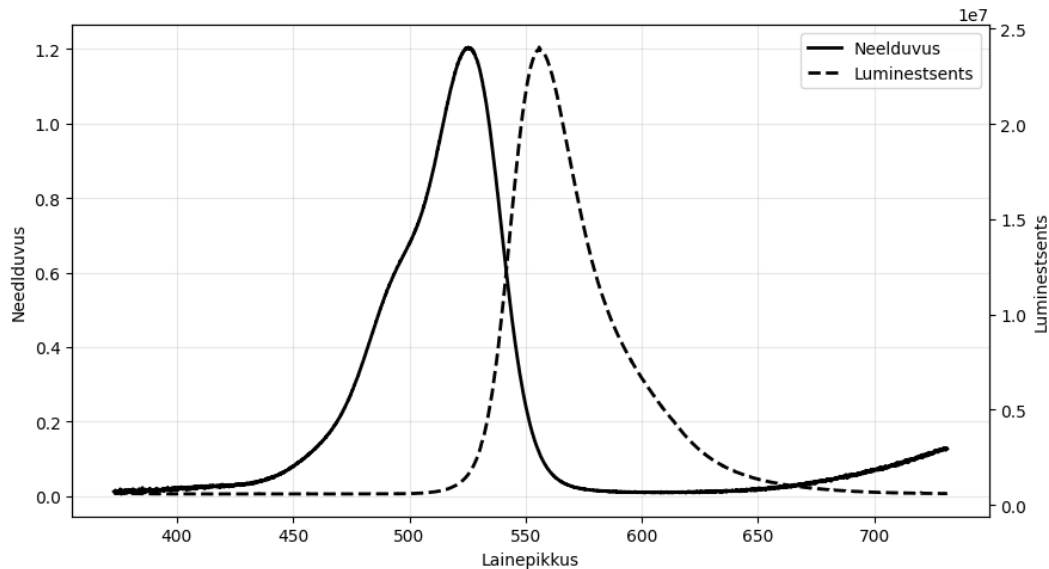
Värvaine läbilaskvuse ja neelduvuse arvutame valemiga valemitega:

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

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



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



## Dispersioon ja Lahutusvõime

### Pöörd-dispersioon

Meie kalibreerimisevõrrand 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

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

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  $\cos \beta \approx 1$ .

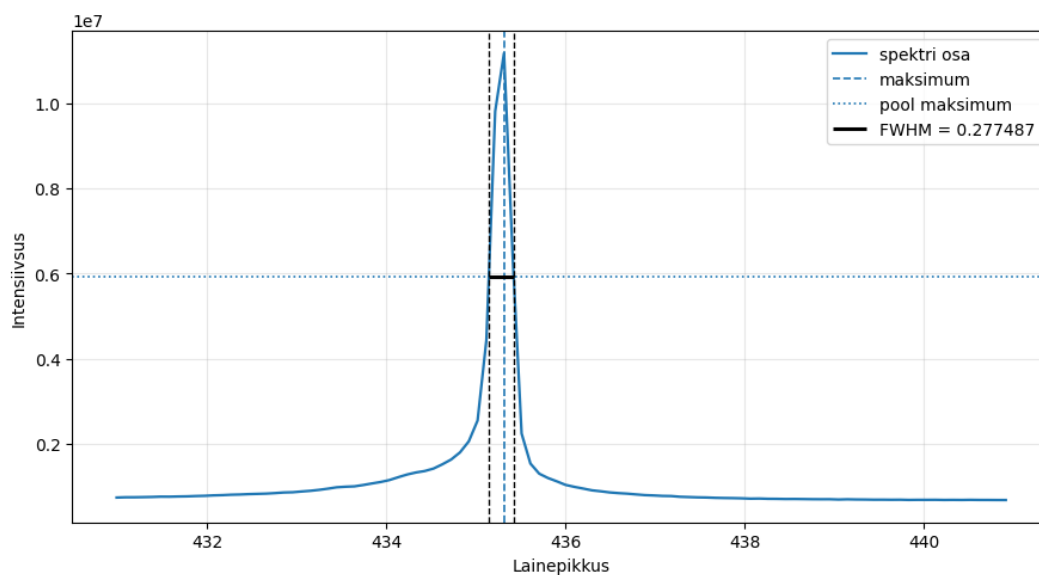
Seega saame teoreetiliseks väärtuseks:

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

## Spektraallahutus

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

Spektrijoone laiuse määrame täislaiusena poole kõrguse juures (FWHM).



Seega eksperimentaalne spektraallahutus on 0.28 nm.

## Teoreetiline spektraallahutus

Teoreetilise spektraallahutuse leiame valemiga:

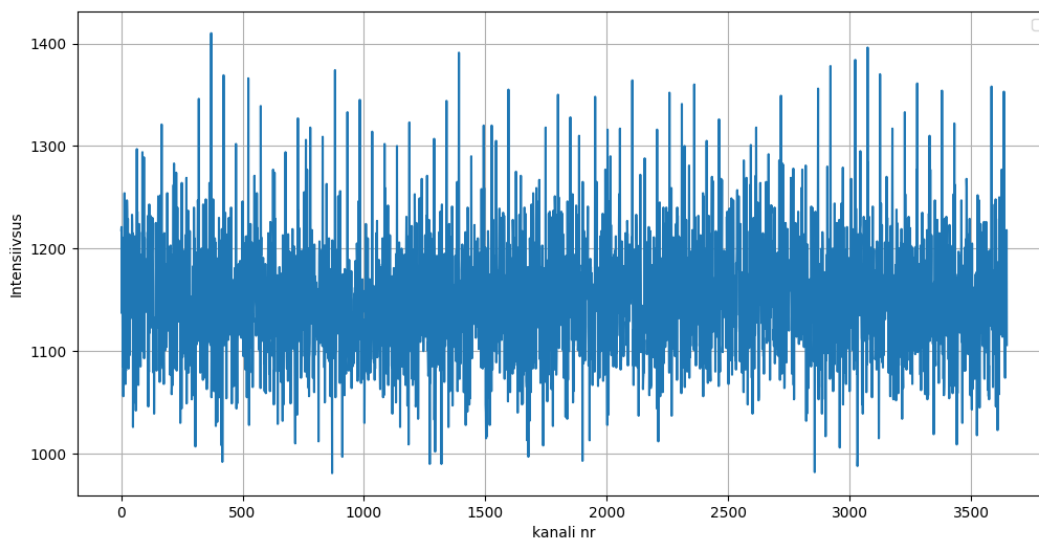
$$\delta\lambda = \frac{s}{D_l},$$

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

## Detektori müra ja pimesignaali

### Väljalugemismüra

Väljalugemismüra hindamiseks mõõdeti spekter võimalikult lühikese eksponeerimisajaga. Meie puhul oli  $t = 0.1 \text{ ms}$ . 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  $t = 1 \text{ s}$ .

Olgu vastavate spektrite keskmised kanalite väärtused:

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

Termiliste elektronide keskmine tekkimise kiirus ühe kanali kohta:

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