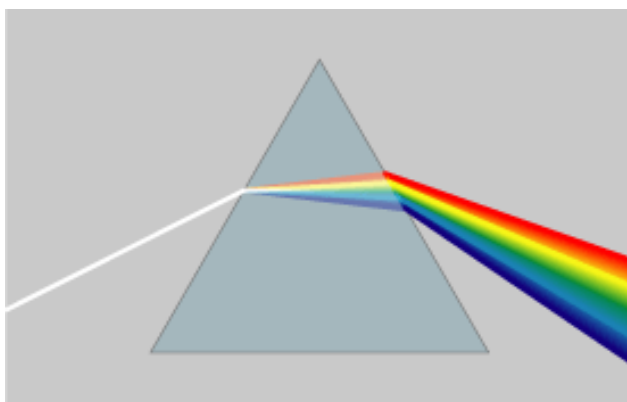


## 015. Prisma aine dispersiooni määramine goniomeetri abil.

### 1. VALGUSE DISPERSIOON

#### 1.1. Teoreetilised alused

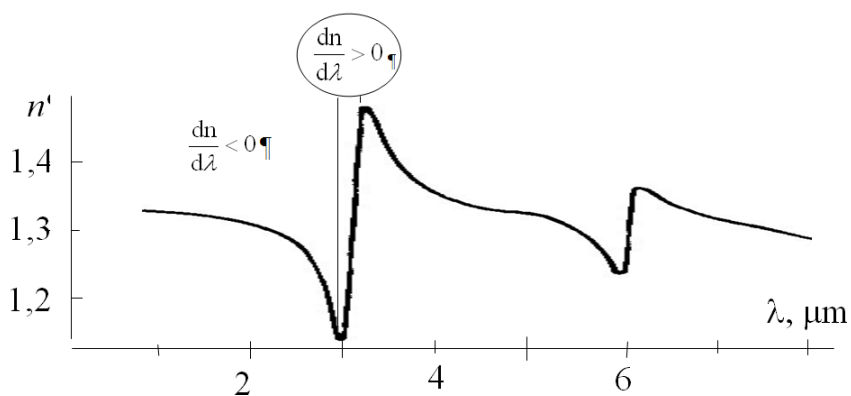
Prisma abil saame lahutada uuritava valguse spektri ning määrata murdumisnäitaja  $n$  sõltuvuse lainepikkusest  $\lambda$ . Sõltuvuse  $f = n(\lambda)$  graafilist esitust nimetatakse **dispersioonkõveraks**.



**Joonis 1.1.** Valge valguse lahutumine spektriks klaasprisma läbimisel. Sõltuvalt langeva valguse koostisest võib tulemus olla pidev spekter, joonspekter või ribaspekter.

Aine murdumisnäitaja sõltuvust lainepikkusest (sagedusest) nimetatakse aine **dispersiooniks**. Dispersiooni iseloomustavaks kvantitatiivseks karakteristikuks on suurus

$$\mu = \frac{dn}{d\lambda} \quad (1.1)$$



**Joonis 1.2.** Vee dispersioonikõver

Joonisel 1.2 toodud vee dispersioonikõveral on piirkonnad, kus  $\mu = \frac{dn}{d\lambda} < 0$ , s.t. lainepikkuse kasvades murdumisnäitaja väheneb. Neid piirkondi nimetatakse **normaalse dispersiooni** piirkondadeks. Normaalse dispersiooni piirkonnas on keskkond läbipaistev. Nähtust, kus suuremale lainepikkusele vastab ka suurem murdumisnäitaja,  $dn/d\lambda > 0$ , nimetatakse **anomaalseks dispersiooniks**. Lainepikkusi, kus esineb anomaalne dispersioon iseloomustab tugev valguse neeldumine.

Lihtsatest kaalutlustest lähtudes on murdumisnäitaja ja valguse sageduse vaheline teoreetiline sõltuvus tuletatud optika aineveebis (vt. Dispersioon ja levik aines: [http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/animatsioonid/PDFslaidid/22\\_dispersioon.pdf](http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/animatsioonid/PDFslaidid/22_dispersioon.pdf)).

Üks mitmetest empiirilistest seostest, mille abil saab kirjeldada eksperimentaalselt mõõdetud lainepikkuse ja murdumisnäitaja vahelist seost on Cauchy valem:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (1.2)$$

kus  $A, B, C, \dots$  on konstandid.

Cauchy valemi kasutamiseks tuleb uuritavate klaasisortide/ainete jaoks valemis olevad konstandid määrata eksperimentaalselt. Selleks tuleb murdumisnäitaja mõõta vähemalt kolmel lainepikkusel, misjärel on võimalik koostada võrrandsüsteem ja selle lahendamisel leida konstandid Cauchy valemi kolme esimese liikme jaoks. Seejärel saab vaadeldava aine jaoks valemi (1.2) abil mistahes etteantud lainepikkuse jaoks arvutada murdumisnäitaja rahuldava täpsusega.

Kui piirduda Cauchy valemis kahe esimese liikmega, on kerge leida aine dispersiooni:

$$\mu = -\frac{2B}{\lambda^3}, \quad (1.3)$$

Teades konstanti  $B$ , saame esitada dispersiooni  $\mu$  sõltuvuse lainepikkusest  $\lambda$ .

Erinevatel ainetel on erinev dispersioon. Aine dispersioonivõimet iseloomustamiseks on kasutusel mitmed erinevad suurused. Vältimaks väikese murdumisnäitajate vahe jagamist väikese lainepikkuste vahega (valem (1.1)), on dispersiooni iseloomustamiseks kasutusel fikseeritud lainepikkustele vastavate murdumisnäitajate vahe või mõni muu avaldis (seosed (1.4) - (1.6)). Traditsiooniliselt on lainepikkusteks valitud Fraunhoferi joontele  $C, D, F$  ja  $H$  vastavad lainepikkused  $\lambda_C = 656 \text{ nm}$ ,  $\lambda_D = 589 \text{ nm}$ ,  $\lambda_F = 486 \text{ nm}$  ja  $\lambda_H = 397 \text{ nm}$ .

$$\text{Keskmise dispersioon} \quad \mu_k = n_F - n_C. \quad (1.4)$$

$$\text{Eridispersioon} \quad \mu_e = n_H - n_C. \quad (1.5)$$

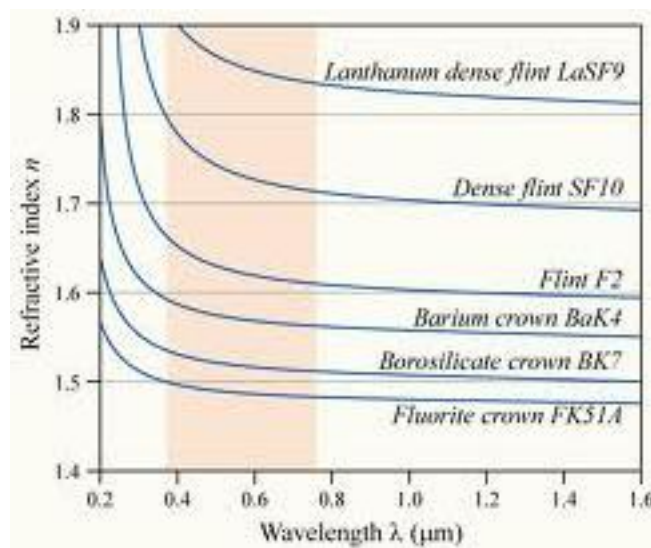
### Suhteline dispersioon

$$\mu_S = \frac{1}{\nu} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}, \quad (1.6)$$

Optiliste klaaside dispersiooni iseloomustatakse sageli **Abbe arvuga  $\nu$** , mis on suhtelise dispersiooni pöördväärtus:

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (1.7)$$

Dispersioon kasvab klaasi tiheduse suurenedes. **Flintklaasid** sisaldavad pliid, nad on suure tihedusega ja ka suure dispersiooniga. Väiksema tiheduse ja dispersiooniga on **kroonklaasid**. Joonisel 1.3 on mitmete erinevate klaasisortide dispersioonikõverad.

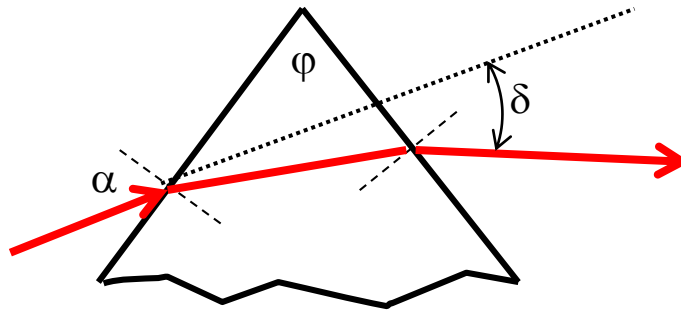


**Joonis 1.3** Erinevate klaasisortide dispersioonikõverad

## 2. DISPERSIOONIKÕVERA LEIDMINE PRISMA MEETODIL

Lihtsaimal murdval **prisma** on kaks murdvat tahku, nende ühist serva nimetatakse prisma **murdvaks servaks** ning tahkudevahelist nurka  $\varphi$  – prisma **murdvaks nurgaks**.

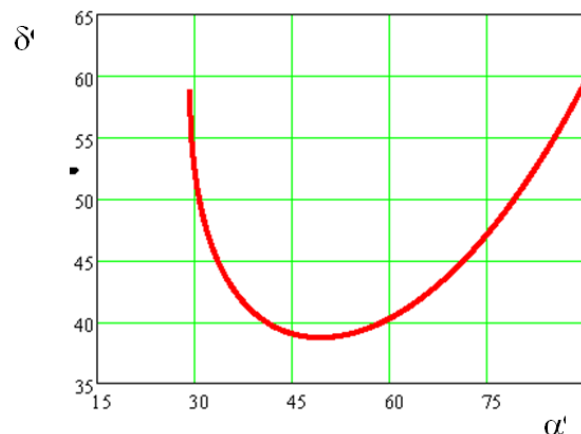
Joonisel 2.1 on kujutatud prisma lõiget, mis on risti prisma murdva servaga, nimetatakse **prisma peatasandiks**. Mõlemal prisma tahul toimuva murdumise tõttu kiire levikusiht muutub. Nurka  $\delta$  prismasse siseneva ja väljuva kiire vahel nimetatakse **kaldenurgaks**.



**Joonis 2.1.** Kiire käik prisma läbimisel.

Langemisnurga  $\alpha$ , muutmisel muutub ka kaldenurk  $\delta$ . Optikaveebi „Geomeetrilise optika” punktis 1.3: (<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efiti/loengumaterjalid/opt/optika/geoopt/GOI/pt1u.htm>) on tõestatud, et prisma korral, mille murdumisnäitaja on  $n$ , avaldub kaldenurga sõltuvus langemisnurgast järgmiselt:

$$\delta = \alpha + \text{asin} \left[ \sin \varphi \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \varphi \sin \alpha \right] - \varphi \quad (1.8)$$



**Joonis 2.2.** Prismat läbinud valguse kaldenurga  $\delta$  sõltuvus langemisnurgast  $\alpha$  ( $n = 1.5187$ ,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ ).

Jooniselt 2.2 on näha, et prisma korral eksisteerib selline langemisnurk  $\alpha$ , mille puhul kaldenurk omab minimaalset väärtust. Vastavat nurka nimetatakse kaldemiinimumi nurgaks  $\delta = \delta_m$  ja selliselt asetatud prisma on **kaldemiinimumi** asendis. On võimalik tõestada, et kaldemiinimumi asendis korral levib valguskiir prisma sees risti murdva nurga  $\varphi$  nurgapoolitajaga. Sel juhul on kiirte käik sümmeetriline:  $\alpha' = \alpha$  ja  $\gamma' = \gamma$  (jn. 2.3).

## 2.1. Tööülesanne

Goniomeetri justeerimine, prisma murdva nurga ja prisma materjali dispersiooni mõõtmine ning prisma lahutusvõime määramine.

## 2.2. Katsevahendid

Goniomeeter, valgusallikad, prisma ja tasaparalleelne klaasplaat.

## 2.3. Vajalikud eelteadmised

Goniomeetri põhimõtteline ehitus, valguse peegeldumis- ja murdumiseseadus, prisma kaldemiinimumi asend, normaalse ja anomaalse dispersiooni mõisted, keskmine, eri ja suhteline dispersioon, Rayleigh' kriteerium, spektraalriista lahutusvõime määramiseks, prisma lahutusvõime.

## 2.4. Töö käik

### 2.4.1 Goniomeetri korrastamine

Goniomeeter korrastatakse vastavalt "Optika praktikum V" (OP V), töö 1 punkt 1.2 juhendile. Kui goniomeetri korrastamine on lõppenud, tuleb sellest teatada juhendavale õppejõule, kes vajaduse korral kontrollib korrastatust. (Klaasplaati aluslaualt enne õppejõu luba mitte eemaldada!)

### 2.4.2. Prisma paigaldamine aluslauale

Kui korrastatud goniomeetri aluslauale asetada prisma, mille otsatahk on lihvitud risti prisma murdva servaga, siis peab tema murdev serv olema paralleelne aluslaua pöörlemisteljega ja risti pikksilma optilise teljega. Selles veendumiseks pöörame prisma aluslaual nii, et prisma üks murdev tahk oleks risti aluslaua kallet reguleeriva ühte kruvi ja aluslaua pöörlemistelje läbiva sirgega. Sel juhul on võimalik selle tahu kallet aluslaua pöörlemistelje suhtes muuta pöörates vaid seda ühte aluslaua kruvi. Teise tahu kalde reguleerimiseks kasutame teist aluslaua kruvi. Aluslaua pöörates leiame pikksilma abil niitristi autokollimatsioonilise kujutise (Gaussi okulaari niitristi peegelduse prisma tahult). Kui nüüd kujutise ja niitristi horisontaaljooned ühtivad, on selle tahu korral regulatsioon korras ning me võime pöörata aluslaua nii, et autokollimatsiooniline kujutis tekiks peegeldumisel prisma teiselt murdvalt tahult. Kui ka nüüd niitristi ja selle kujutise horisontaaljooned ühtivad, siis ongi prisma mõõtmisteks aluslauale paigaldatud.

Vastasel korral tuleb aluslaua kallet reguleerimiskruviga muuta nii, et need jooned ühtiksid (pikksilma reguleerimiskruvisid ei tohi selleks kasutada). Sama protseduuri kordame teise murdva tahuga. Vajadusel kontrollime taas peegeldust esimeselt tahult. Kui mõlemalt tahult saadud autokollimatsioonikujutise horisontaaljooned ühtivad piisavalt hästi niitristi horisontaaljoonega, siis on prisma mõõtmisteks aluslauale paigaldatud.

### **2.4.3. Mõõtmised**

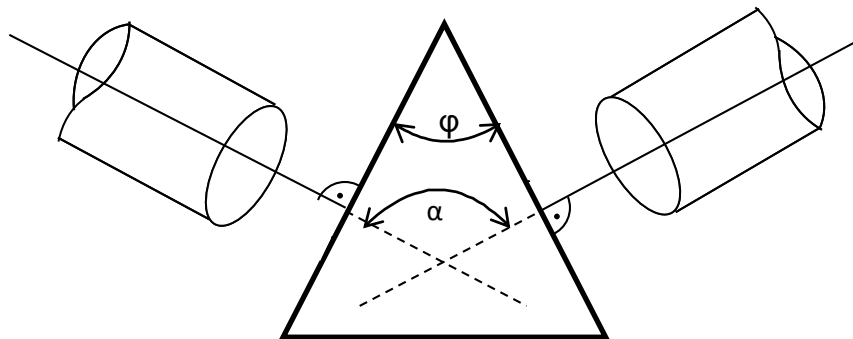
#### **2.4.3.1. Prisma murdva nurga mõõtmine**

##### **2.4.3.1.1. Autokollimatsioonilise kujutise kasutamine**

Goniomeetrite **ГC-5** ja **Г5** pikksilm on varustatud autokollimatsiooni võimaldava Gaussi okulaariga, mistõttu saame prisma murdva nurga  $\varphi$  määramisel kasutada murdvatelt tahkudelt peegeldunud valgust. Pöörame aluslaua prismaga asendisse, kus pikksilma pööramisega on võimalik mõlemalt murdvatelt tahult saada niitristi autokollimatsioonilise kujutise. Seejärel fikseerime aluslaua ja pöörates pikksilma ühitame niitristi vertikaaljoon ühtib kujutisega. Täpseks ühitamiseks kasutame pikksilma peennihutust. Võtame nurgaskaalalt lugemi. Pöörame pikksilma ja leiame autokollimatsioonilise kujutise teiselt tahult. Kui niitristi vertikaaljoon ja selle kujutis on ühitatud, võtame taas skaala lugemi. Saadud lugemite vahe on võrdne murdvate tahkude pinnanormalide vahelise nurgaga  $\alpha$  (jn. 2.3). Jooniselt näeme, et prisma murdva nurga  $\varphi$  ja  $\alpha$  vaheline seos on  $\alpha + \varphi = 180^\circ$ , millest  $\varphi = 180^\circ - \alpha$ .

Goniomeetrite **ГC-5** ja **Г5** kasutamisel võime fikseerida pikksilma asendi ja määrata aluslaua pöördnurkade lugemid asendites, kus niitrist ja selle kujutis ühtivad.

Kõikidel juhtudel ka edaspidi kordame mõõtmisi vähemalt kaks korda. Tulemuste olulisel erinevusel suurendame mõõtmiste arvu.



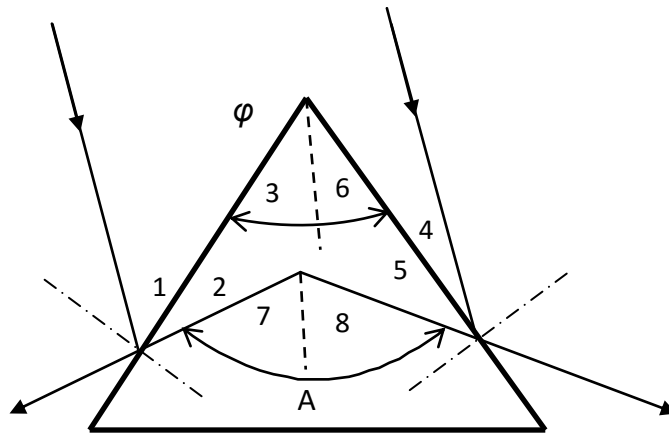
**Joonis 2.3.** Prisma murdva nurga määramine tahkudelt risti peegeldunud valguskiirte abil.

### 2.4.3.1.2. Kollimaatorist väljuva valguskimbu poolitamise meetod

Vaatame joonist 2.4, kus kollimaatorist väljunud valguskimbust on kujutatud kahte kiirt. Tõmbame nurkade  $\varphi$  ja  $A$  tipust rööbiti prismale langevate valguskiirtega sirged.

Peegeldumisseaduse ja tipunurkade võrdsuse põhjal  $\angle 1 = \angle 2$ . Jooniselt näeme, et  $\angle 1 = \angle 3$ , kui põiknurgad. Järelikult  $\angle 2 = \angle 3$ . Analoogiliselt saame tõestada, et  $\angle 5 = \angle 6$ . Seega  $\varphi = \angle 3 + \angle 6 = \angle 2 + \angle 5$ . Jooniselt 2.4 näeme, et  $A = \angle 7 + \angle 8 = (\angle 1 + \angle 2) + (\angle 4 + \angle 5) = 2 * \angle 2 + 2 * \angle 5 = 2(\angle 2 + \angle 5) = 2\varphi$ , millest jäeldub, et

$$\varphi = A/2 . \quad (2.1)$$



**Joonis 2.4.** Prisma murdva nurga mõõtmine paralleelse kiirtekimbu poolitamise meetodil.

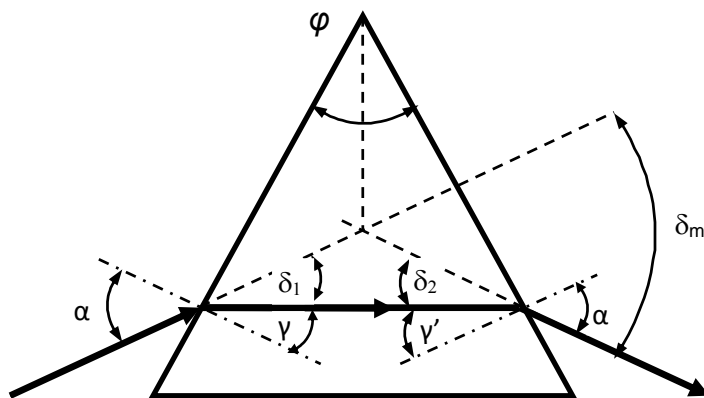
Prisma murdva nurga mõõtmiseks pöörame aluslauda sellel oleva prismaga nii, et murdev serv jaotaks kollimaatorist väljuva paralleelse valguskimbu kaheks. Osa valgusest langeb siis ühele, osa teisele murdvale tahule. Tahkudelt valgus peegeldub. Kontrollime visuaalselt, kas valgus ikka langeb mõlemale tahule, s.o. kas pilu kujutised on tahkudelt peegeldunud valguses silmaga näha. Seejärel kinnitame aluslauda fiksaatorkruviga ja pöörame pikksilma nii, et pilu kujutis ühtib niitristiga. Täpsuse huvides kasutame lugemi võtmisel taas pikksilma mikromeetrilist nihutust. Sama menetlust kordame prisma teiselt tahult peegeldunud valguse suuna määramiseks. Saadud lugemite vahe annab nurga  $A$  suuruse. Teades nurka  $A$ , saame arvutada murdva nurga  $\varphi$ .

Võrdleme erinevatel meetoditel mõõdetud prisma murdva nurga väärtusi, hindame määramatusi.

### 2.4.3.2. Prisma aine dispersiooni ja lahutusvõime määramine.

#### 2.4.3.2.1. Prisma aine murdumisnäitaja ja dispersiooni määramine.

Ümbritsevast keskkonnast optiliselt tihedamast aineist prisma läbivad valguskiired murduvad prisma aluse poole.



**Joonis 2.5.** Kiirte käik prisma kaldemiinimumi asendi korral.

Leiame prisma aine murdumisnäitaja  $n$ , prisma murdva nurga  $\varphi$  ja kaldemiinimumi  $\delta_m$  vahelise seose. Saab tõestada, et kaldemiinimumi asendi korral levib valguskiir prisma sümmeetriliselt. Murdumisnäitaja avaldamiseks tõmbame nurga  $\varphi$  poolitaja (jn. 2.5). Näeme, et  $\gamma = \varphi/2$ , kui vastastikku risti olevate haaradega nurgad. Jooniselt näeme, et langemisnurk  $\alpha = \delta_1 + \gamma$ . Kuna kiir läbib prisma sümmeetriliselt, siis  $\delta_m = 2 \delta_1$ , millest  $\delta_1 = \delta_m / 2$  ja

$$\alpha = \frac{\varphi}{2} + \frac{\delta_m}{2} = \frac{\varphi + \delta_m}{2} .$$

Murdumiseseaduse põhjal saame

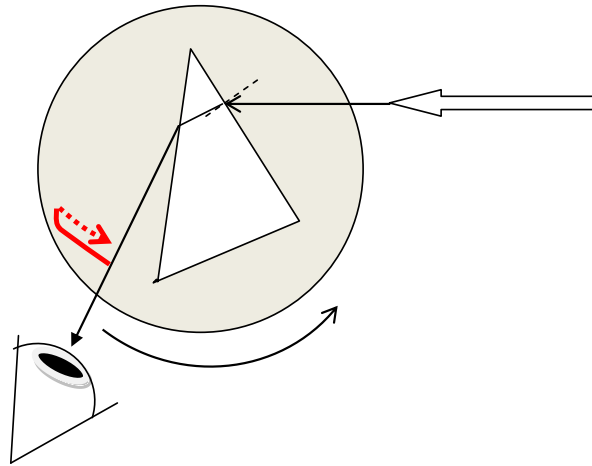
$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\sin \frac{\varphi + \delta_m}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} . \quad (2.2)$$

Valemit (2.2) kasutamegi murdumisnäitaja  $n$  määramisel. Prisma murdumisnäitaja leidmiseks on vaja mõõta prisma murdev nurk  $\varphi$  ja kaldemiinimumi nurk  $\delta_m$ .

Punktis 2.4.3.1. kirjeldasime, kuidas on võimalik mõõta prisma murdevat nurka. Nüüd vaatleme kaldemiinimumi nurga  $\delta_m$  mõõtmist.

Lülitame sisse spektraallambi, mille karaktersete spektrijoonte lainepikkused on teada (Vt lainepikkuste tabel lisa 2). Esmalt leiame prismale ligikaudse kaldemiinimumi asendi.





**Joonis 2.6.** Prisma kaldemiinimumi asendi leidmine. Aluslaua pöördumisel joonisel kujutatud suunas langemisnurk  $\alpha$  suureneb. Punane pidevjoon vastab mingi spektrijoone nihkumisele kaldemiinimumi poole ja punktiirjoon – eemaldumisele kaldemiinimumist.

Joonisel 2.6 on kujutatud olukord, kui goniomeetri kollimaator paikneb paremal ja langemisnurk on väike. Pöörake aluslaua koos sellel asuva prismaga nii, et kollimaatorist väljuv valgus langeb ühele murdvale tahule. Prismat läbiv valgus kaldub murdumisel prisma aluse poole ja lahutub spektriks. Esmalt leiame spektri asukoha visuaalselt, ilma pikksilmata. Näha on pilu värvilised kujutised (spektraallambi täitegaasi spekter). Kui pöörata goniomeetri lauda vastu kellaosuti liikumissuunda, siis langemisnurk suureneb ja vastavalt joonisele 2.6 peab kaldenurk vähenema. Jätkates laua pööramist samas suunas jõuame asendini, mis vastab joonisel 2.2 kujutatud kaldemiinimumile. Edasisel aluslaua pööramisel (langemisnurga suurenemisel) hakkab kaldenurk taas suurenema ja spektrijooned nihkuvad vastassuunas. Pärast kaldemiinimumi asendi ligikaudset leidmist vaatame spektrit pikksilmaga ja määrame kaldemiinimumi asendi kõigi tugevate spektrijoonte jaoks. Vältimaks süstemaatilisi ekseid, tuleb mõõtmisi teha korduvalt ning enne igat mõõtmist viia aluslaud ja ka goniomeetri lugemisseadme trummel eelmise mõõtmise lõppasendist kõrvale.

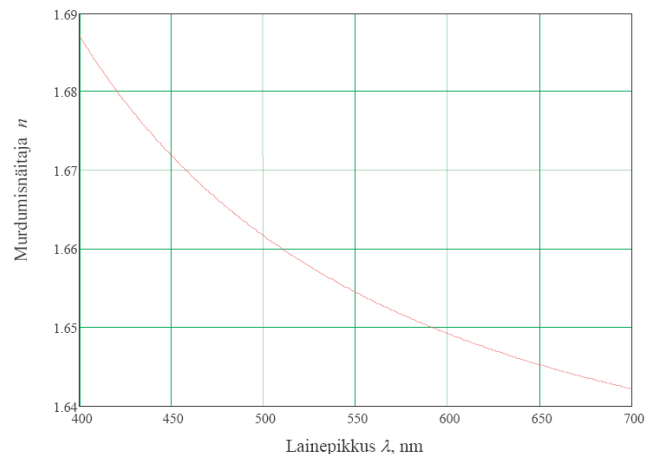
Määrame nüüd spektraallambi kõigile tugevatele spektrijoontele vastavad kaldenurgad  $\delta_m$ , alustades mõõtmisi punasest spektriosast. Paneme kirja ka spektrijoonte värvuse ja silmaga hinnatud suhtelise heleduse. Korraliku dispersioonikõvera saamiseks peab mõõdetud tuntud spektrijoone olema kogu nähtavas spektriirakonnas. Vajadusel (kui polnud tegemist *Hg-Cd* lambiga) asendame kollimaatori ees olnud *Hg*-lambi *Cd*-lambiga ja teeme kirjeldatuga analoogilised mõõtmised.

Kui oleme lõpetanud spektrite mõõtmised, nihutame aluslaual olevat prisma sedavõrd, et saame mõõta otsekiire asukoha.

Kõik mõõtmistulemused paigutame korralikult planeeritud tabelisse. Igale lainepikkusele vastava kaldemiinimumi nurga saame leida, kui teame nii spektrijoone asukohale kui ka **otsekiirele** vastavat nurgalugemit.

Teades nii prisma murdva nurga kui ka kaldemiinimumi nurga suurusi, arvutame valemist (2.2) erinevatele spektrijoontele vastavad murdumisnäitajad. Spektrijoonte lainepikkuste tabelist (Lisa 2) leiame kasutatud spektraallampide spektrijoonte lainepikkused. Prisma aine dispersiooni leidmiseks lähtume Cauchy valemist (1.2). Piirdume valemi kahe esimese liikmega ja esitame graafikul **murdumisnäitaja sõltuvuse**  $1/\lambda^2$ -st. Valitud teljestikus  $n = f(\lambda^{-2})$  kujutab see sõltuvus sirget. Vähimruutude meetodil määrame sirge tõusu  $B$  ja algordinaadi  $A$  koos vastavate mõõtemääramatustega.

Nende andmete põhjal konstrueerime dispersioonikõvera  $n = f(\lambda)$ , kuhu kanname nii eksperimendipunktid kui ka Cauchy valemist saadud sõltuvuse. Joonisel 2.7 on näidised esitatud flintklaasi dispersioonikõver nähtavas valguse jaoks.



**Joonis 2.7.** Flintklaasi dispersioonikõver.

Kasutades Cauchy valemit ja ka dispersioonikõverat leiame: 1) keskmise dispersiooni, 2) eridispersiooni, 3) suhtelise dispersiooni ja 4) Abbe arvu. Nendeks arvutusteks vajalikud Fraunhoferi joonte lainepikkused on toodud lisa 2.

Järgnevalt arvutame seosest (1.3) prisma klaasi dispersiooni  $Hg$  rohelisele spektrijoonele vastava lainepikkuse jaoks.

#### 2.4.3.2.2. Prisma lahutusvõime määramine

Spektraalriista lahutusvõime on tema omadus kujutada kahte lähedase lainepikkusega ja võrdse intensiivsusega spektrijoont eraldi. Lahutusvõime on määratud Rayleigh' kriteeriumiga, mille kohaselt kaks võrdse intensiivsusega spektrijoont on eristatavad, kui ühe lainepikkusega saadud difraktsioonpildi peamaksimum satub teise lainepikkusega saadud difraktsioonpildi esimese miinimumi kohale. Prismaspektrograafi korral on lahutusvõime määratud eelkõige prisma lahutusvõimega.

Teooria kohaselt prisma lahutusvõime avaldub järgmiselt:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = t \frac{dn}{d\lambda}, \quad (6.12)$$

kus  $t$  on prisma aluse laius, mille saab mõõta mõõtejooneliiga (kuidas mõõta uuritavate prismade korral prisma aluse pikkust õigesti?);  $\Delta\lambda$  – kahe eristatava spektrijoone lainepikkuste vahe.

Kui kogu prisma on täidetud valgusega (nii see on korralikult konstrueeritud spektrograafi korral), siis teades dispersiooni, hindame prisma lahutusvõimet  $Hg$  rohelisele spektrijoonele vastava lainepikkuse jaoks. Kuidas sõltub prisma lahutusvõime valguse lainepikkusest?

#### Küsimused

1. Mida nimetatakse valguse dispersiooniks?
2. Mis on aine dispersioon?
3. Mis on keskmine, eri- ja suhteline dispersioon ?
4. Milleks kasutatakse Abbe arvu?
5. Millist dispersiooni nimetatakse normaalseks ja millist anomaalseks?
6. Kuidas tekib Gaussi okulaari kasutamisel niitristi autokollimatsiooniline kujutis?
7. Kas mõõtmiste täpsus sõltub prisma asukohast goniomeetri aluslual?
8. Miks prisma lahutusvõime on piiratud?
9. Kas prisma kaldemiinimumi asend sõltub lainepikkusest?
10. Joonisel 6.1.4 algab sõltuvus langemisnurga väärtusest  $\alpha \approx 30^\circ$ . Miks eksisteerib minimaalne võimalik langemisnurk? Kuidas levib sel juhul kiir prisma?

## Kirjandus

Hecht E. Optics

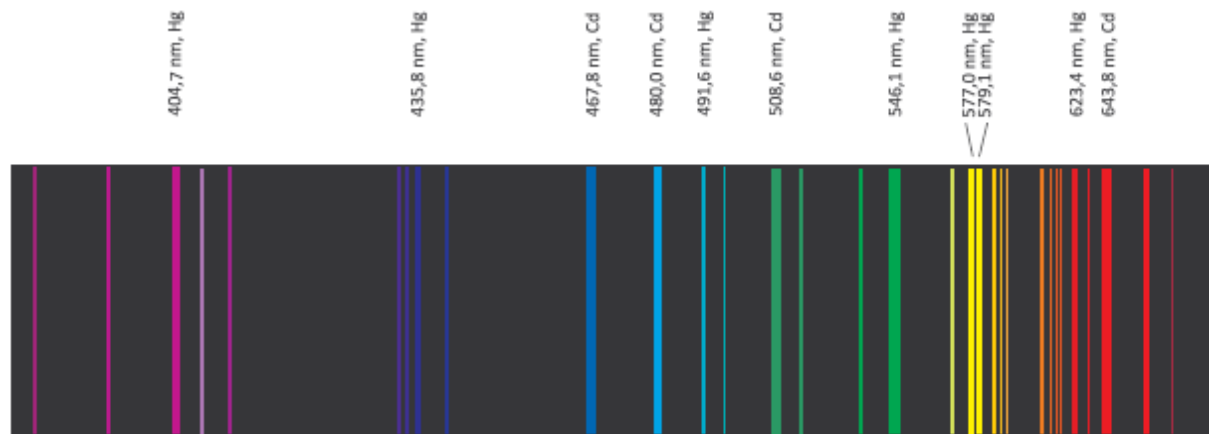
Pedrotti & Pedrotti Introduction to Optics

M. Laan, Geomeetriline optika. Aineveeb:

<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efiti/loengumaterjalid/opt/optika/geoopt/esileht.html>

## Lisa 1.

*Hg-Cd lambi spekter*



## Lisa 2:

Spektrijoonte tabelid

Element	Lainepikkus, nm	Intensiivsus, suht. ühikud
Kadmium <b>Cd</b>	643,8	2000
	508,6	1000
	480,6	300
	467,8	200

Elavhøbe <b>Hg</b>	745,4	50
	737,2	80
	709,2	100
	708,2	125
	690,7	125
	671,6	80
	623,4	15
	612,3	15
	607,3	10
	589,0	40
	587,2	10
	585,9	30
	580,4	70
	579,1	1000
	577,0	600
	567,6	80
	555,0	15
	546,1	2000
	538,5	15
	536,5	20
	535,4	30
	531,7	15
	529,0	10
	521,9	10
	520,5	40
	513,8	10
	512,1	20
	510,2	10
	504,6	15
	502,6	20
	499,1	15
	498,1	70
	491,6	50
	489,7	5
	489,0	15
	482,6	70
	459,8	20
	448,7	300
	437,6	50
	435,8	500
	434,7	50
	434,4	20
	433,9	20
	422,7	100
	418,1	100
	414,0	200
	410,8	5

	407,8	150
	404,7	300
	398,4	400
	390,6	15
	390,2	15

### Fraunhoferi joonte lainepikkusi

Fraunhoferi jooned on Maa pinnale jõudvad neeldumisjooned Päikese spektris

Joone tähistus	Element	Lainepikkus nm	Joone tähistus	Element	Lainepikkus nm
A	Hapnik	762,1	b <sub>4</sub>	Raud, magneesium	516,74
			c	Raud	495,76
B	Hapnik	687,0	F	Vesinik	486,13
C	Vesinik	656,28	d	Raud	466,8
	Hapnik	627,81		Raud	438,36
D <sub>1</sub>	Naatrium	589,59	G'	Vesinik	434,05
D <sub>2</sub>	Naatrium	589,00			
D <sub>3</sub>	Heelium	587,56	G	Raud, kaltsium	430,79
E	Raud	526,96	g	Kaltsium	422,67
b <sub>1</sub>	Magneesium	518,36	h	Vesinik	410,17
b <sub>2</sub>	Magneesium	517,27	H	Kaltsium	396,86
b <sub>3</sub>	Raud	516,90	K	Kaltsium	393,36

