

## O12. DIFRAKTSIOONIVÕRE UURIMINE

### 1. Tööülesanne

Tutvumine difraktsioonivõre kui dispergeeriva elemendiga. Lainepikkuse või võrekonstandi määramine difraktsioonivõre abil.

### 2. Katsevahendid

Spektraallamp, goniomeeter, difraktsioonivõre (300 pilu/mm), pilutatud ala laius 45 mm.

### 3. Vajalikud eelteadmised

Antud juhendis on esitatud töö tegemiseks vajalikud minimaalsed teoreetilised teadmised, vajaduse korral võib kasutada põhjalikumat eestikeelset materjali aadressil:

[http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/prax/Difraktsioon1\\_eesti.pdf](http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/prax/Difraktsioon1_eesti.pdf)

Ka eraldi mainimata viited käesolevas juhendis mitteesinevatele valemitele, joonistele jne, tähendab viidet sellele materjalile.

Valgus on elektromagnetlainetus lainepikkuste vahemikus 400 – 700 nm ja elektromagnetlaine levikul piiramatult homogeenes keskkonnas lainefront<sup>1</sup> ei deformeeru. Kui aga laine teel asuvad tõkkes, mille omadused (neeldumine ja/või murdumisenäitaja) järsult erinevad ümbritseva keskkonna omadest, toimub lainefrondi deformatsioon. Difraktsiooniks nimetatakse tõkete tõttu toimuvat lainefrondi deformeerumist ja sellega kaasnevat valguse kiiritustiheduse (tavakõnes valguse intensiivsuse) ümberjaotumist ruumis.

Antud töös uurime difraktsiooninähtust lihtsamal juhul, nn Fraunhoferi difraktsiooni. Fraunhoferi difraktsiooniga on tegemist siis, kui tõkkesse e difrakteerivale elemendile langeb paralleelne kiirtekimp e tasalaine ja difraktsiooni tulemust (difraktsioonipilti) jälgitakse samuti paralleelsetes kiirtes, s.t kaugel tõkkest.

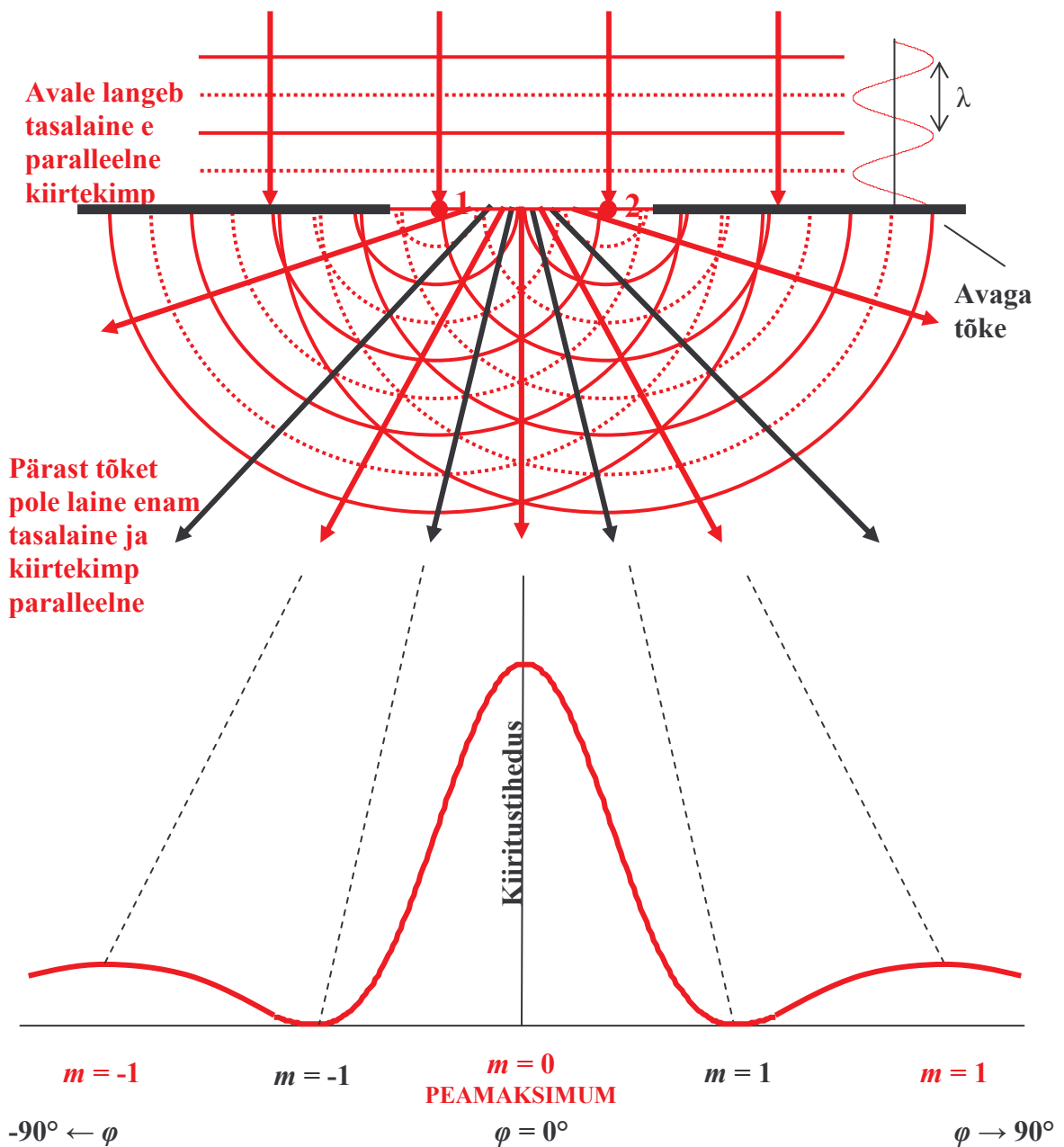
#### 3.1. Fraunhoferi difraktsioon ühe pilu korral

Difraktsiooni tekkimist saab seletada Huygens'i-Fresnel'i printsiibi alusel. Langegu tõkkes (joonis 1) olevale avale valguslaine, siis Huygens'i printsiibi järgi iga lainefrondi punkti võib vaadelda uue punktvalgusallikana (siin punktide lõpmata hulgast välja valitud punktid 1 ja 2), millest lähtuvad sfäärilised lained. Et need uued allikad on tekitatud ühe ja sama lainefrondi poolt, siis Fresnel'i järgi need allikad on omavahel koherentsed<sup>2</sup> ja nendest lähtuvad lained interfereeruvad, mille tagajärjel nendes suundades, kus kohtuvad omavahel mõlema laine harjad ja mõlema laine põhjad, toimub lainete liitumine ja valguse tugevnemine (tekivad difraktsioonimaksimumid, punased kiired), aga suundades, kus ühe laine hari kohtub teise põhjaga – toimub lainete vastastikune kustutamine ja valguse nõrgenemine (difraktsioonimiinimumid, mustad kiired). Vahepealsetes suundades kujuneb vahepealne olukord.

Langegu monokromaatiline tasalaine lainepikkuse  $\lambda$  ja kiiritustihedusega  $I_0$  risti pilule, s.t et tema kiired olgu risti pilu tasandiga. Piluks loeme riskülikukujulist ava, mille laius  $b$  on palju

<sup>1</sup> Lainefront on ruumipunktide kogum, milleni laine on levinud antud ajamomendiks. Homogeenes isotroopses keskkonnas on lainefront ja valguskiired omavahel risti. Punktallikast lähtuvad kiired radiaalselt ja lainefrondiksid on sfääri pind, lõpmatuses asuva allika e paralleelse kiirtekimbu korral on lainefrondiksid tasand (tasalaine).

<sup>2</sup> Koherentsus tähendab kooskõlastatust faasis (faasivahe konstantsust) kas erinevates kiirtekimpudes või ühe kiirtekimbu erinevate osade vahel. Ainult koherentsetes kiirtekimpudes (koherentsete lainete vahel) saab toimuda interferents.



**Joonis 1 . Difraktsiooni tekkimise seletamine Huygens'i-Fresnel'i printsiibi alusel.** Joonisel on esitatud momentvõtte lihtsustatud difraktsioonipildist. Langegu tõkkes olevale avale valguslaine, välja valitud punktidest 1 ja 2 lähtuvad Huygens'i printsiibi järgi sfäärilised lained, mille tagajärjel valgus paindub tõkke taha. Et need punktallikad on tekitatud ühe ja sama lainefrondi poolt, siis nad võnguvad samas faasis ja Fresnel'i järgi nendest lähtuvad koherentsed lained interfereeruvad: mõnes suunas toimub lainete liitumine ja valguse tugevnemine (punased kiired), mõnes suunas aga lainete kustutamine ja valguse nõrgenemine (mustad kiired). Heledaid kohti nimetatakse difraktsiooni-maksimumideks ja nummerdatakse  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , tumedaid – miinimumideks ( $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ ), kus  $m$  on maksimumi või miinimumi järk. Pealelangeva valgusega samasuunalist tugevaimat maksimumi nimetatakse tsentraalseks maksimumiks ja tema järk  $m = 0$ .

väiksem, kui pikkus. Sel juhul saab lahendada ühemõõtmelise ülesande ja kiiritustiheduse jaotust  $I_\varphi$  difraktsioonipildis kaugel pilust (Fraunhoferi difraktsioon) kirjeldab valem:

$$I_\varphi = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2, \quad (1)$$

kus suurus  $u$  avaldub valemiga (2)

$$u = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi, \quad (2)$$

milles  $\varphi$  on difraktsiooninurk, mida loeme langeva valguse suunast nagu joonisel 1: paremale

$\varphi > 0$  ja vasakule  $\varphi < 0$ . Funktsiooni  $\left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$  graafik on toodud joonisel 3a, ta on

sümmeetriline punkti  $u = \varphi = 0$  suhtes. Kui  $u \rightarrow 0$ , siis  $\lim_{u \rightarrow 0} \frac{\sin u}{u} \rightarrow 1$ , ja suunale  $\varphi = 0$  vastava valguse kiiritustihedus võrdub valemi (1) järgi pilule langeva valguse kiiritustihedusega:  $I = I_0$ .

$I_\varphi = 0$  siis, kui on samaaegselt täidetud tingimused  $\sin u = 0$ , aga  $u \neq 0$  ehk

$$u = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi = \pm \pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots$$

Siit saame difraktsioonipildi miinimumide tingimuse

$$b \sin \varphi = m \lambda, \quad (3)$$

kus  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ . Arvu  $m$  nimetatakse miinimumide järguks. Umbes 92 % pilule langevast valgusest paikneb esimest järku miinimumide ( $m = \pm 1$ ) vahel, seda piirkonda nimetatakse null-järku ehk tsentraalseks maksimumiks. Teiste, miinimumide vahel paiknevate maksimumide asukohad on määratud seostega

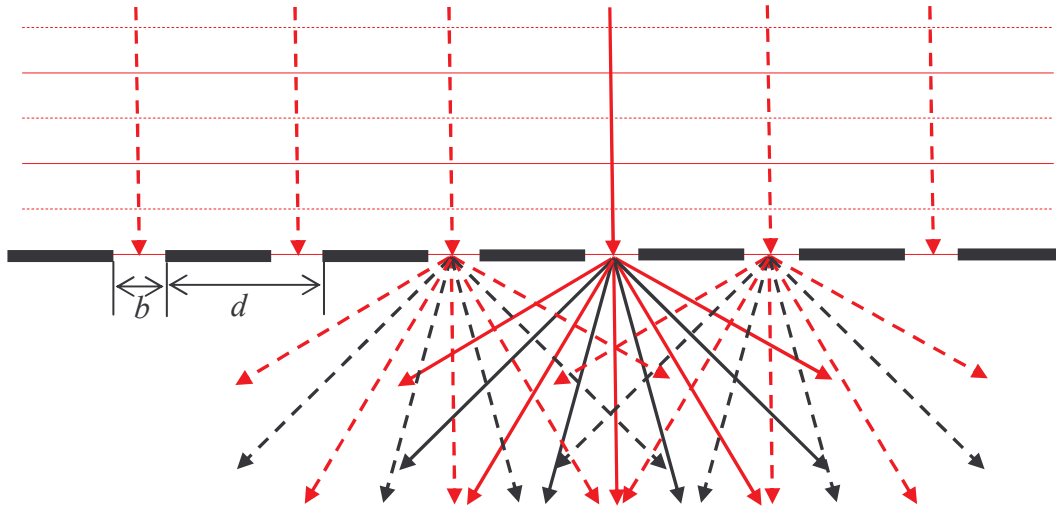
$$\sin \varphi_1 = \pm 1,43 \frac{\lambda}{b}, \quad \sin \varphi_2 = \pm 2,46 \frac{\lambda}{b}, \quad \text{jne.}$$

### 3.2. Fraunhoferi difraktsioon perioodilise pilude süsteemi korral

Kui valguse teele asetatud tõkkes olevad avad paiknevad kindla seadusärasuse järgi, tekib sellise tõkke valgustamisel koherentse valgusega täiendav efekt. Lihtsaimaks ja praktikas väga tähtsaks avade süsteemiks on süsteem  $N$  paralleelsest pilust (joonis 2). Sellist pilude süsteemi nimetatakse difraktsioonivõreks, kaugust  $d$  kahe naaberpilu ekvivalentse punkti vahel aga võre perioodiks e võrekonstandiks. Praktikas iseloomustatakse võresid suurusega  $1/d$  (1/mm), mis annab meile pilude arvu ühe millimeetri kohta.

Langegu risti difraktsioonivõrele, milles on  $N$  pilu ning pilude laius on  $b$  ja periood  $d$ , monokromaatiline tasalaine e paralleelne kiirtekimp (joonis 2). Kõik pilud on koherentsed valgusallikad, sest neist lähtuvad lained on tekitatud sama lainefrondi poolt. Iga pilu tekitab juba tuttava ühe pilu difraktsioonipildi [valemid (1), (2), joonis 3a], kuid koherentsuse tõttu kõigi  $N$  pilu difraktsioonipildid interfereeruvad omavahel ja tulemuseks on võre difraktsioonipilt.  $N$  pilu valguse interferentsi tõttu lisandub kiiritustiheduse jaotuse valemisse liige

$\left( \frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$  ja lõplik kiiritustiheduse jaotuse valem on järgmine:



**Joonis 2.** Difraktsioonivõrele langeb tasalaine e paralleelne kiirtekimp. Kõik pilud on koherentsed valgusallikad, sest neist lähtuvad lained on tekitatud sama lainefrondi poolt. Iga pilu tekitab juba tuttava ühe pilu difraktsioonipildi, kuid koherentsuse tõttu kõikide pilude difraktsioonipildid interfereeruvad omavahel ja tulemuseks on võre difraktsioonipilt, mida kirjeldab valem (5) ja graafik 3c.

$$I_{\varphi} = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2, \text{ kus } \delta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi \quad (4)$$

Uurime lähemalt interferentsiliiget  $\left( \frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$ , mille graafik on esitatud joonisel 3b. Selle funktsiooni maksimumid asuvad kohtades, kus  $\sin \delta = 0$ , sest

$$\lim_{\sin \delta \rightarrow 0} \left( \frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2 = N^2.$$

Aga  $\sin \delta = 0$ , kui  $\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \varphi = m\lambda$ , kus  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Saame kiiritustiheduse maksimumide tingimuseks

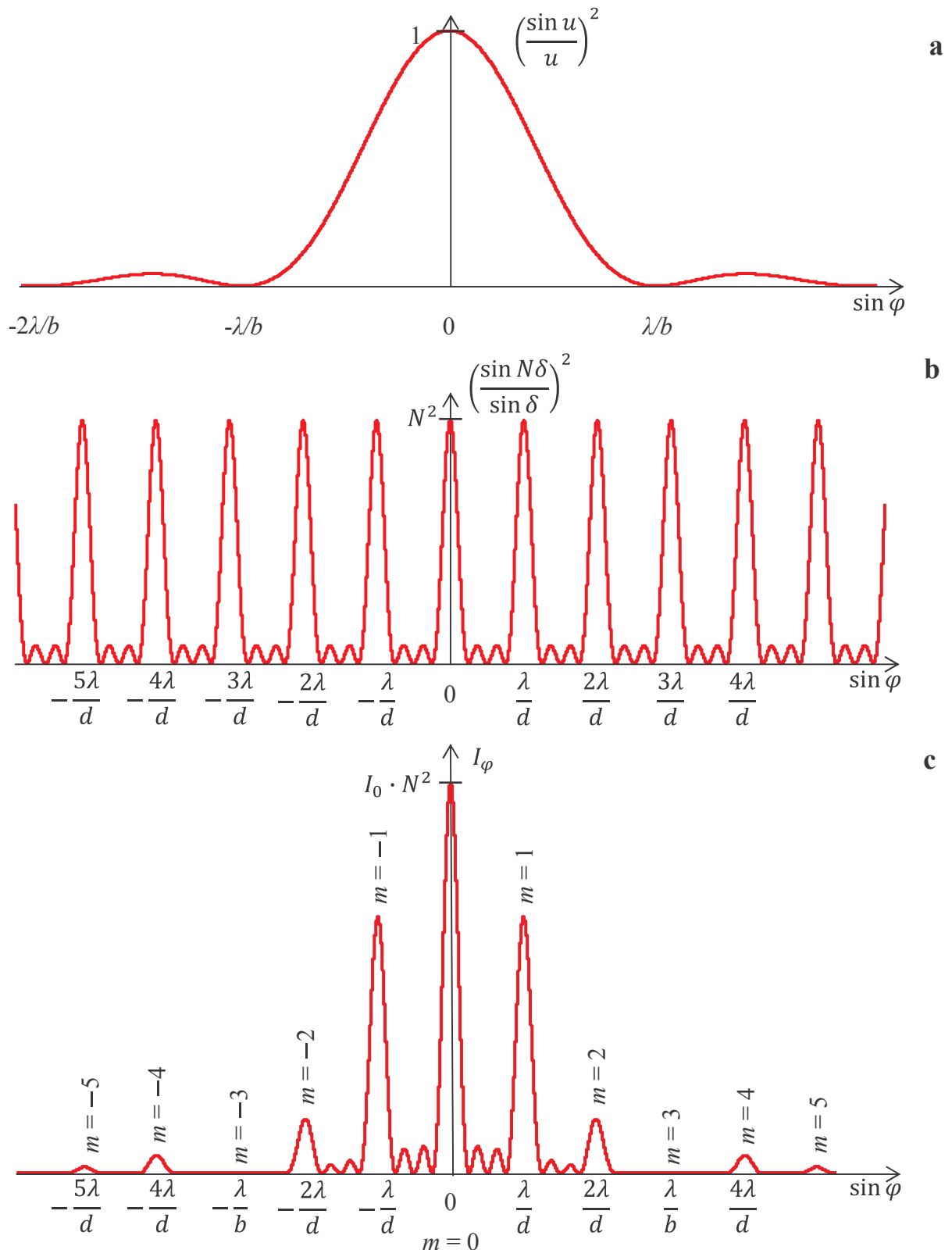
$$d \sin \varphi = m \lambda. \quad (5)$$

Tingimusega (5) määratud maksimumide suundades on kiiritustihedus  $N^2$  korda suurem, kui ühe pilu korral – neid maksimume nimetatakse **peamaksimumideks**. Siit alates arvu  $m$  nimetatakse peamaksimumi järguks.

Uurime edasi interferentsiliiget. Peamaksimumide vahel paikneb  $N - 1$  punkti, kus lugeja  $\sin N\delta = 0$ , kuid nimetaja  $\sin \delta \neq 0$ . Nendes suundades kiiritustihedus on null (miinimumid).

Miinimumide vahel peab kiiritustihedus omama maksimaalset väärtust, seega peab kahe peamaksimumi vahel paiknema  $N - 2$  kõrvalmaksimumi. Kõrvalmaksimumide kiiritustihedus on ligikaudu  $N^2$  väiksem kui peamaksimumidel.

Joonisel 3 esitatud funktsioonide  $\left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$ ,  $\left( \frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2$  ja kiiritustiheduse jaotuse graafik difraktsioonipildis vastavuses valemiga (4), kui pilude arv  $N = 4$  ning võrekonstant  $d$  on 3 korda suurem kui pilu laius  $b$ :  $d/b = 3$ . Jooniselt 3c selgub, et kolmandat järku peamaksimumi



**Joonis 3.** Kiiritustiheduse jaotus nelja pilu korral: **a** – ühe pilu difraktsioon; **b** – nelja pilu interferents; **c** – nelja pilu difraktsioon:  $N = 4$ ,  $d/b = 3$ . Peamaksimume  $m = \pm 3$  pole näha, sest sinna satub ühe pilu esimene difraktsioonimiinimum (graafik **a**), aga järkude loendamisel valemi (5) järgi temast üle hüpata ei tohi!

pole näha, sest ta kattub ühe pilu esimese difraktsioonimiinimumiga. Valemi (4) analüüs näitab, et kui peamaksimumi järk  $m$  rahuldab tingimust  $\frac{b}{a}m = \text{täisarv}$ , siis nende peakimumide kiiritustihedus on null. Antud juhul oli valitud  $\frac{b}{a} = \frac{1}{3}$  ja seetõttu sõltumata langeva valguse lainepikkusest pole nähtavad peamaksimumid  $m = \pm 3, \pm 6$  jne. Maksimaalne nähtav järk on iga lainepikkuse jaoks erinev, sõltub ka võrekonstandist ja on piiratud tingimusega  $|\varphi_m| < 90^\circ$ .

### 3.3. Difraktsioonipilt mitmevärvilise valguse korral

Seni me vaatlesime ühevärvilise e monokromaatilise kiirtekimbu langemist pilule või võrele. Nüüd uurime, millist difraktsioonipilti me näeme siis, kui meie võrele langeb mitmevärviline kiirtekimp. Difraktsioonimaksimumide tingimusest (5)  $d \sin \varphi = m \lambda$  on näha, et fikseeritud lainepikkuse  $\lambda$  korral maksimumide kõrvalekalde nurk  $\varphi$  kasvab koos järgu  $m$  absoluutväärtuse kasvuga ja paneme siis valemi (5) kirja veidi muudetud kujul:

$$d \sin \varphi_m = m \lambda . \quad (6)$$

Langegu meil võrele kahevärviline paralleelne kiirtekimp (joonis 4), mis koosneb sinistest (olgu  $\lambda_s = 450$  nm) ja punastest ( $\lambda_p = 650$  nm) kiirtest. Valemist (6) näeme, et väljaarvatud järk  $m = 0$ , kalduvad sama järguga sinised kiired kõrvale vähem, kui punased – liitvalguse komponendid eraldatakse ja saame lahutada võrele langeva valguse spektri, niisiis difraktsioonivõre toimib disperseeriva elemendina. Erinevalt teisest disperseerivast elemendist – prismast, mis tekitab ainult ühe spektri, võib võre tekitada kuni  $2m$  spektrit. Samas aga teame, et sõltuvalt  $b$  ja  $d$  vahekorra me ei pruugi kõiki spektreid näha (antud juhul siis järkudega  $\pm 3, \pm 6$ ). Kõrgemat järku võrespektrite juures esineb segav nähtus – erinevat järku spektrite kattumine: joonisel 4a on näha, et punane peamaksimum järguga  $m = \pm 4$  tuleb alles pärast sinist peamaksimumi  $m = \pm 5$ , aga punane peamaksimum  $m = \pm 5$  pärast 7. järgu siniseid jooni. Kui spekter sisaldab palju jooni, on segadus veel hullem. Samas on aga võre lahutusvõime just suurem, mida kõrgemat järku spektrit kasutame.

Loetakse, et kaks väga lähedast spektrijoont lainepikkustega  $\lambda$  ja  $\lambda' = \lambda + \delta\lambda$  on difraktsioonivõreaga veel eristatavad, kui joone  $\lambda$  maksimum satub kohakuti  $\lambda'$  miinimumiga ja selle kriteeriumi (Rayleigh kriteerium) järgi võre lahutusvõime  $R$  avaldub valemiga

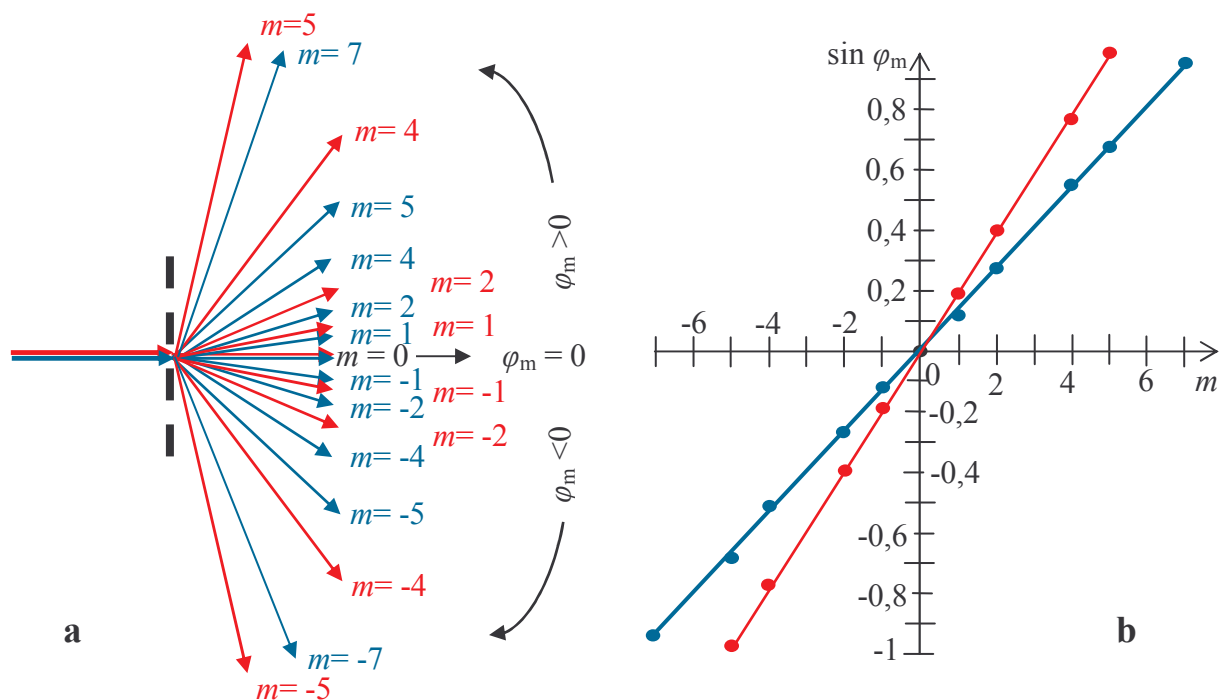
$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = N \cdot m . \quad (7)$$

Seega lahutusvõime sõltub võre pilude üldarvust  $N$  ja spektri- e peamaksimumi järgust:  $m = 0$  korral on kõik jooned koos, pole lahutatud spektri.

Kui kirjutame valemi (6) ümber kujul

$$\sin \varphi_m = \frac{\lambda}{d} m , \quad (8)$$

siis näeme, et fikseeritud lainepikkuse ja võrekonstandi korral valem (8) kujutab koordinaatide alguspunkti läbivat sirget  $y = a \cdot x$ , kus argumendiks  $x$  on maksimumi järk  $m$ , funktsioon  $y = \sin \varphi_m$  ja sirge tõus  $a = \frac{\lambda}{d}$ . Valemile (8) vastavate graafikute võimalikku kuju sinise ja punase valguse jaoks illustreerib joonis 4b.



**Joonis 4. a** – difraktsioonipilt kahevärvilise (sinine ja punane) valguse korral:

- 1) sama järguga, aga suurema lainepikkusega kiired kalduvad kõrvale rohkem, kui lühema lainepikkusega kiired;
- 2) toimub erijärku spektrite kattumine: 4. järgu punased jooned tulevad pärast 5. järgu siniseid, 5. järgu punased jooned alles pärast 7. järgu siniseid;
- 3) mõlemat värvi 3. ja 6. järgu jooni pole näha, sest valitud võrel  $b = \frac{1}{3}d$ .

**b** – valemi (8) illustatsioon: pikema lainepikkusega joonele vastava sirge tõus on järsem ja ordinaatteljele tuleb kanda selle joone tõelisele, mitte aga näivale maksimumijärgule vastav difraktsiooninurga siinus.

## 4. Töö käik ja tulemused

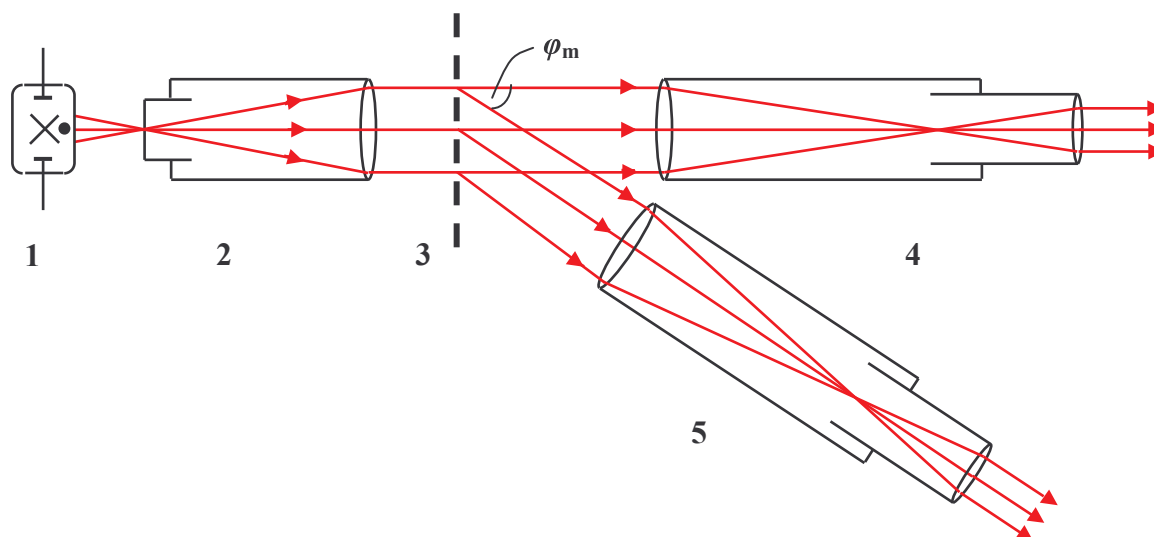
### 4.1. Mõõtmised

Uuritava valgusallika (tavaliselt spektraallamp) spektrijoonte lainepikkuste määramiseks kasutame joonisel 5 toodud katseseadet.

Enne töö juurde asumist kontrollime goniomeetri korrasolekut ja vajaduse korral justeerime ta. Goniomeetri JJY ehitus ja justeerimise käik on toodud Lisas 6.

Kontrollimise või justeerimise järel peab meil pikksilma okulaari niitrist olema terav, pikksilm 4 ise teravustatud lõpmatusse, pikksilma telg ja aluslaud risti aluslaua pöörlemisteljega, uuritav valgusallikas 1 valgustamas kollimaatori 2 sisendpilu ja pilu asuma kollimaatori objektiiv fookuses, et kollimaatorist tuleks välja paralleelne kiirtekimp.

Pärast goniomeetri justeerimist asetame difraktsioonivõre aluslauale risti pealangeva valguse suhtes. **NB! Võre ei ole näpujälgede salvesti, vaid õrn ja kallis optiline detail, ta ei talu mingit nühkimist – seepärast võre tõstmiseks ja liigutamiseks võtke kinni ainult tema raamist, mitte klaasplaadist, mille peal on hologramm!!!**



**Joonis 5.** Valguse lainepikkuste määramine difraktsioonivõrega: 1 – spektraallamp; 2 – kollimaator; 3 – difraktsioonivõre; 4 – pikksilma asend otse läbituleva valguse e järgu  $m = 0$  registreerimisel; 5 – pikksilma asend difrageerunud valguse ( $m \neq 0$ ) registreerimisel.

Kõigepealt tuleb registreerida pikksilma asendi näit otsetuleva valguse korral – see vastab 0-järku peamaksimumile ( $\varphi = 0^\circ$ ) ja sellest näidust hakkate määrama difraktsiooninurki teiste maksimumide jaoks, millede  $m \neq 0$ . Nii et ärge unustage, et üks pikksilma asendi näit pole veel difraktsiooninurk, vaid nurk on kahe näidu vahe! Näitude registreerimisel valige alidaadi üks noonius põhinooniuks, millelt loete kraadid ja minutid, teiselt nooniuselt pange kirja ainult minutid ja keskmistage minutite väärtused – sellega väldite nn ekstsentrilisuse vea, mis tuleneb ringskaala (limbi) keskpunkti ja goniomeetri telje mitteühtivusest.

Sõltuvalt spektraallambi tüübist on difraktsioonispektris näha rohkem või vähem jooni, kusjuures osa jooni on tugevad, osa nõrgad ja osa vahepealsed. Valige kogu spektrist välja 5 – 6 tugevamat joont ja määrake nende joonte difraktsiooninurgad maksimaalse võimaliku järguni mõlemal pool 0-joont. Eri värvi joonte maksimumidele omistage oma näiv järgunumeratsioon ja mõõtmiste käigus ärge muretsege, et mõnda järku maksimumi ei pruugi näha – õige  $m$  väärtused saab leida tulemuste töötlemise käigus.

#### 4.2. Mõõtmistulemuste töötlemine

Tulemuste töötlemiseks on sobiv kasutada kinnispunktiga lineaarse regressiooni varianti (Aineveeb FKEF01.036 → Abimaterjalid → FMA tarkus → „Ühemõõtmeline“ statistika, kust saab lähtevalemid MathCAD-is). Iga värvi joone jaoks moodustage lähteandmetest kaheveeruline maatriks, kus esimeses veerus on registreeritud maksimumide näiv järjekorranumber (ärge 0-järku välja jätke) ja teises veerus – vastavad pikksilma asendi näidud (vt näidisprotokoll). Kui mõnda maksimumi järku pole näha, siis vastava joone näiva järgunumbriga mõõtmispunktid ei satu samale sirgele ja tuleb suurendada järgunumbrit, kuid seejuures peate olema veendunud, et tegemist on ikka ühe ja sama spektrijoonega – näidisprotokollis on näidatud, et järgud  $m = \pm 3$  on vahele jäänud.

Kui olete määranud kõikide mõõdetud spektrijoonte lainepikkused ja nende määramatused, siis arvutage valemi (7) järgi võre lahtusvõime kõikide registreeritud järkude jaoks.



## 5. Küsimused ja ülesanded

5.1. Võrel on 200 pilu mm kohta. Milline on esimese järgu spektrijoone difraktsiooninurk elavhõbeda rohelse joone ( $\lambda = 546,1 \text{ nm}$ ) korral?

5.2. Võrekonstant  $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$ . Arvutada maksimaalne võimalik jälgitav spektrijärk lainepikkuste  $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$  ja  $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$  jaoks.

5.3. Kui suur on eelmise ülesande võre lahutusvõime maksimaalsete jälgitvate spektrijärkude korral, kui piludega kaetud ala laius on 2,5 cm?

5.4. Kaadmiumi punase joone lainepikkus on 634,8 nm. Arvutada võre pilude arv 1 mm kohta, kui selle joone kolmandat järku spekter asub tsentraalse maksimumi suhtes nurga  $41^\circ 48'$  all.

5.5. Difraktsioonivõrega saadakse valgusallika joone lainepikkusega 5890 Å teist järku spekter nurga  $6^\circ 16'$  juures ja mingi teise joone kolmandat järku spekter nurga  $10^\circ 11'$  juures. Milline on teise joone lainepikkus?

## 6. Lisa: Goniometri JJY ehitus ja käsitlemine

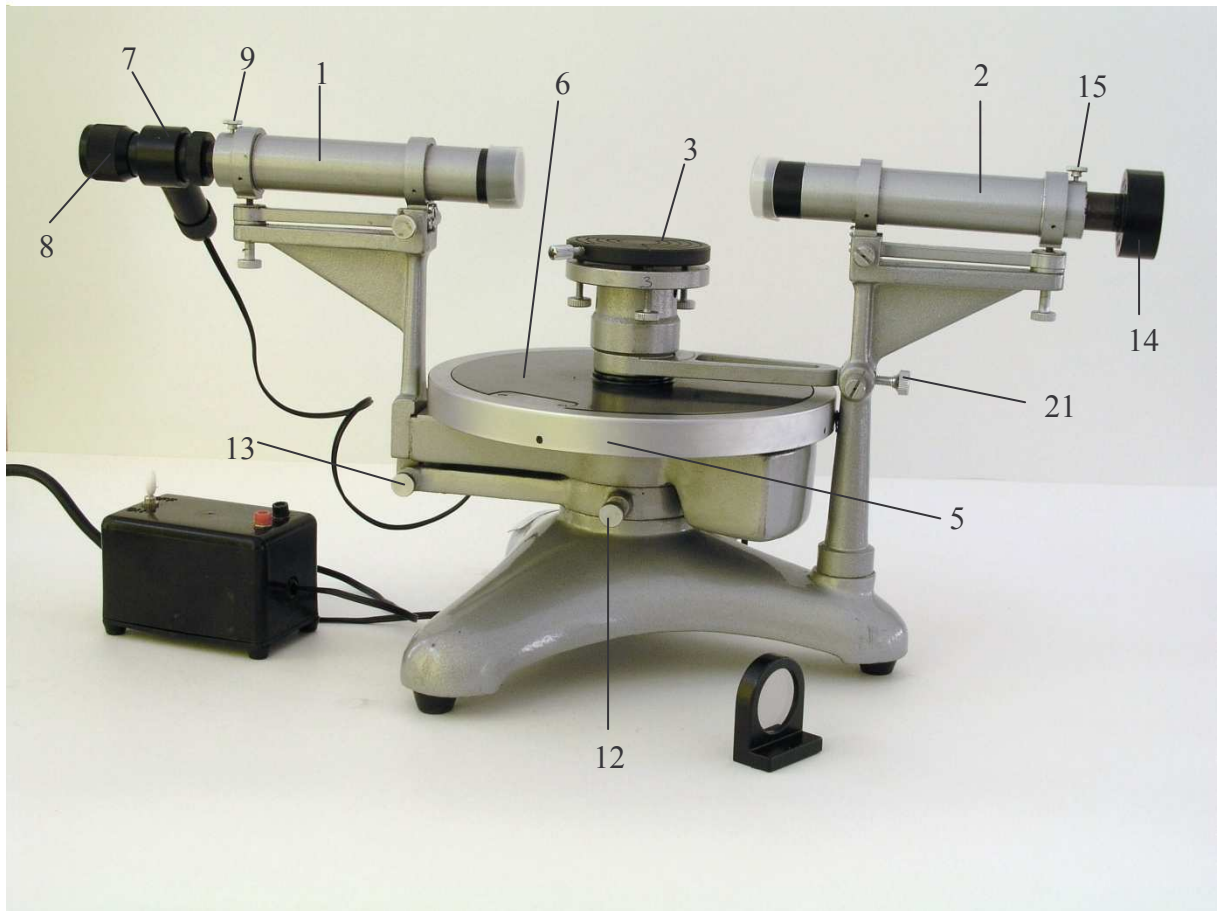
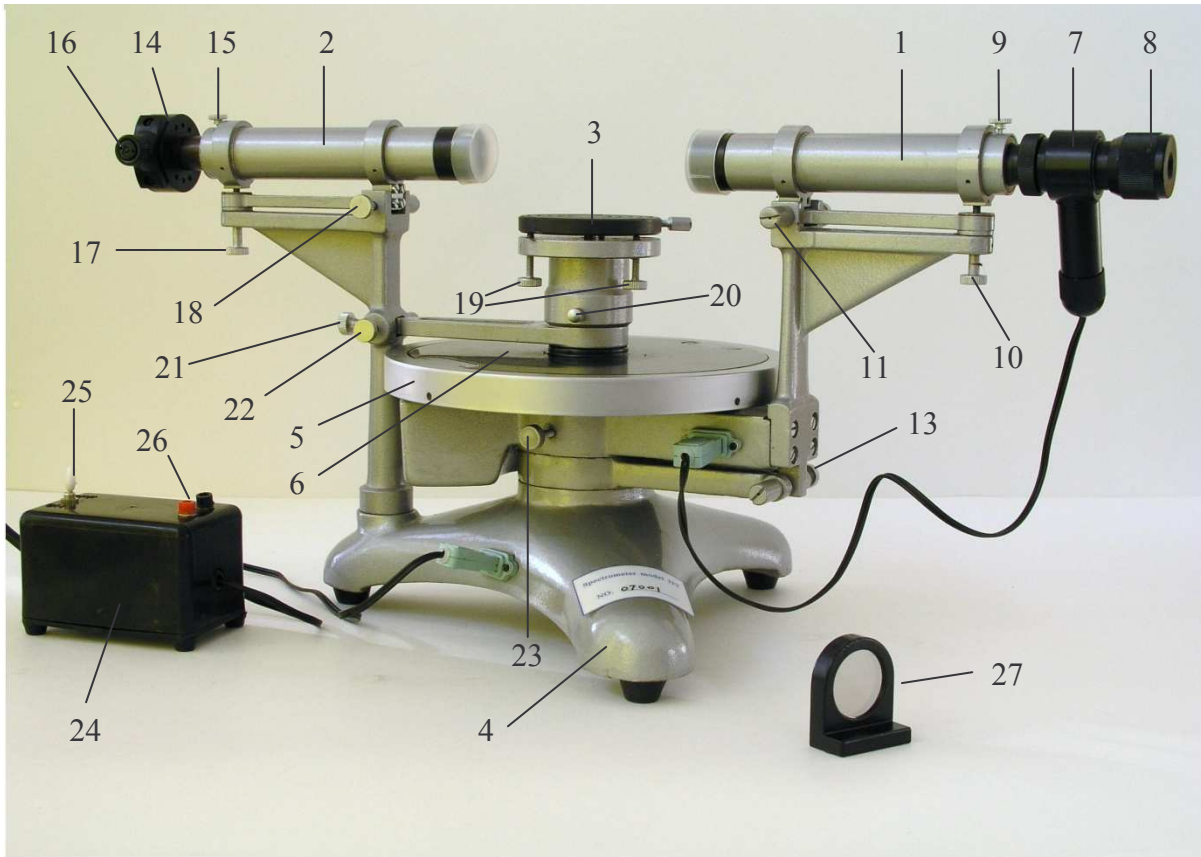
### 6.1. Goniomeetri ehitus

Goniomeetri vaated on toodud joonisel 6. Goniomeetri põhiosad on pikksilm 1, kollimaator 2, pööratav aluslaud 3 ja pöördenurkade mõõtesüsteem. Kõik loetletud osad on kinnitatud aluse 4 külge. Pikksilma ja aluslaua pöördenurkade mõõtesüsteem koosneb kahest kontsentrisest rõngast, millede keskpunkt ideaalsel juhul peaks asetsema vastava telje keskjoonel. Väline rõngas e limb 5 on jaotatud kogu ulatuses kraadideks ja minutiteks ning sisemisele rõngale – alidaadile 6 – on kantud sümmeetriliselt ringi keskpunkti suhtes 2 nooniust.

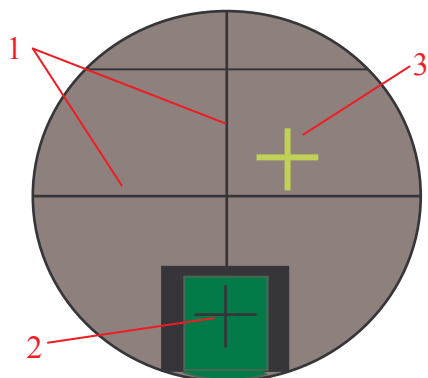
**Milleks pikksilm?** Pikksilm on kahest läätsest – objektiivist ja okulaarist – koosnev optiline süsteem, mis on mõeldud kaugete esemete vaatlemiseks. Esemel- e objektipoolset läätse nim objektiiviks, silmapoolset – okulaariks. Kaugetelt esemetelt tulevaid kiiri võime lugeda paralleelseteks. Kuna inimese silm pingutamata olekus on teravustatud lõpmatusse ja pikksilmaga vaatlemine toimub silma abil, on pikksilm ehitatud nii, et ka temast väljuvad kiired on paralleelsed. Siit järeldub, et pikksilmal tervikuna puuduvad fookused, s.t et paralleelsed kiired jäävad ka pärast pikksilma läbimist omavahel paralleelseteks. Selliseid optilisi süsteeme, millel puuduvad fookused, nimetatakse afokaalseteks. Pikksilmas tagatakse afokaalsus objektiivi ja okulaari vahelise kauguse valikuga: igas lõpmatusse teravustatud pikksilmas peab objektiivi läätse tagumine fookus ühtima okulaari läätse esimese fookusega. Pikksilma nurksuurendus võrdub objektiivi ja okulaari fookuskauguste suhtega ja ühest suurema nurksuurenduse saamiseks valitakse objektiivi fookuskaugus suurem kui okulaari fookuskaugus.

**Pikksilm 1** on varustatud Abbe autokollimatsiooniokulaariga 7, mis lihtsustab pikksilma teravustamist lõpmatusse. Okulaari vaateväljas oleva niitristi (joonis 7) teravustamine toimub rihveldatud krae 8 pööramisega ja pikksilma teravustamine – okulaari nihutamiselega edasi-tagasi, kui vabastada fiksaator kruvi 9. Pikksilma telge saab kallutada vertikaalsihis kruviga 10 ja horisontaalsihis kruviga 11. Pikksilma pööramiseks ümber goniomeetri vertikaaltelje tuleb alusel 4 vabastada fiksaator kruvi 12. Kui kruvi 12 on kinni keeratud, siis saab teha piiratud ulatuses pikksilma täpispöörämist kruvi 13 abil. Üldjuhul koos pikksilma pööramisega pöörduvad ka alidaad 6.

**Kollimaatori 2** ülesandeks on formeerida tema ette paigutatud allika valgusest paralleelne kiirtekimp. Kollimaatori valgusallika poolses otsas asub pilumoodul 14, mida saab nihutada



Joonis 6. Goniomeetri JJY vaated.



**Joonis 7.** Pikksilma vaateväli sisselülitatud Abbe okulaari korral: **1** – okulaari niitrist, tal on veel horisontaalse keskjoonega paralleelne abijoon vaatevälja ülaosas; **2** – abiristike valgustusprisma vaateväljas; **3** – goniomeetri aluslaval asetsevalt klaasplaadilt peegeldunud risti kujutis, mis tuleb teravustada kogu okulaari edasi-tagasi nihutamiseks pikksilmas.

kollimaatori torus edasi-tagasi, kui vabastada kruvi 15. Pilu laiust saab reguleerida kruviga 16. Kollimaatorit saab kallutada verikaalsihis kruviga 17 ja horisontaalsihis kruviga 18.

**Aluslaua 3** kallutamiseks on kolm kruvi 19. Kui keerata lahti fiksaatorkruvi 20, siis saab aluslauda kergitada või pöörata ümber goniomeetri vertikaaltelje nii, et ei pöördu alidaad 6. Kui kruvi 20 on kinni keeratud, siis pöörduvad aluslaud ja alidaad koos, selle võimaldamiseks aga tuleb lahti keerata kruvi 21. Kinnikeeratud kruvi 21 korral saab aluslauda koos alidaadiga piiratud ulatuses peenelt pöörata kruvi 22 abil.

**Limb 4** on vabastatav ja fikseeritav kruvi 23 abil.

**Toiteplokk 24** on ettenähtud Abbe okulaari 7 valgusti toitmiseks (lüliti 25) ja luubi lambikese toitmiseks, kui selle juhtmeotsad torgata pistikutesse 26.

**Tasaparalleelne plaat 27** on ettenähtud pikksilma teravustamiseks lõpmatusse ja aluslaua ning pikksilma telje seadmiseks risti aluslaua pöörlemistelega.

## 6.2. Goniomeetri justeerimine e korrastamine

Goniomeeter on justeeritud, kui

- 1) pikksilma okulaari niitrist on teravustatud;
- 2) pikksilm ise on teravustatud lõpmatusse;
- 3) pikksilma optiline telg ja aluslaud on risti aluslaua pöörlemisteljega;
- 4) kollimaatori pilu asub kollimaatori läätse fokaaltasandis ning pilu ja okulaaristi vertikaaljoon on paralleelsed aluslaua pöörlemisteljega;
- 5) otsevaate korral kollimaatori optiline telg ühtib pikksilma teljega.

Nende tingimuste täitmisel on goniomeetriga tehtavad mõõtmised maksimaalse võimaliku täpsusega. Üldreeglina on goniomeeter korrastatud ja pole mõtet hakata umbropsu kohe kõiki 17 reguleerimiskruvi usinalt keerama, vaid kontrollida õiges järjekorras üle, et mis on korras ja mis paigast ära ning teha ainult vajalikud justeerimid.

### Korrastamise käik

- 1) Pikksilma okulaari niitristi teravustamiseks hoolitseme kõigepealt, et pikksilma vaateväli (joonis 7) oleks hele, siis on must niitrist **1** hästi nähtav ja teravustame risti pöörates okulaari kraed 8. Kui rist on teravustatud, siis **järgnevate teravustamiste** (peegeldunud ristike **3**, pilu kujutis) **käigus ei tohi enam kraed 8 puudutada**, sest sellega rikute niitristi teravuse ja peate korrastamisega taasalustama.
- 2) Kuna antud goniomeeter on varustatud Abbe okulaariga, siis on pikksilma lõpmatusse teravustamine lihtne – pole vaja otsida lõpmata kauget objekti. Lülitiga 25 lülitame sisse okulaari lambi, siis näeme pikksilma vaatevälja alumises osas rohelisel taustal väikest musta ristikest **2**. Asetame pöördlauale tasaparalleelse

plaadi ja plaati pöörates püüame tabada pikksilma vaateväljas plaadilt peegeldunud valgustatud ristikesse kujutise (väike heleroheline ristike 3 joonisel 7). Vabastame okulaari fiksaatori 9 ja nihutame kogu okulaari edasi-tagasi asendisse, kus heleroheline ristike on maksimaalse teravusega. Samaaegselt jälgime, et suure niitristi vertikaaltelg tuleks ikka vertikaalne. Nagu juba öeldud, kogu selle teravustamise ja orienteerimise käigus ei tohi pöörata okulaari kraed 8!

- 3) Seejärel seame pikksilma telje risti aluslaur pöörlemisteljega. Selleks asetame tasaparalleelse klaasplaadi aluslaurale nii, et tema pind oleks risti ühe laua reguleerimiskruvi 19 sihilise sirgega, sest siis saab laua kallet selles sihis muuta valitud reguleerimiskruvi abil. Nüüd pöörame kas pikksilma või aluslaurda (alidaadi) koos klaasplaadiga nii, et okulaari niitristi 1 ja peegeldunud roheline ristikesse 3 vertikaaljooned ühtiksid. Horisontaaljoonte ühteviimiseks kallutatakse pikksilma ja aluslaurda, tehes pool vajalikust parandusest pikksilma (kruvi 10) ja pool – aluslaur (plaadiga ristsihiline kruvi 19) kallet muutes. Seejärel pöörame aluslaurda 180° võrra. Kui ristide horisontaaljooned kattuvad, siis ongi pikksilma telg ja aluslaur valitud siht risti laua pöörlemisteljega. Vastasel juhul kordame reguleerimist kuni 180° pöörde järel ristide horisontaaljooned jäävad kattunuks. Sellega oleme seadnud pikksilma telje ja esialgu ka ühe aluslaur sihi risti laua pöörlemisteljega. Niisiis järgnevate korrastamisetappide juures pikksilma kallutuskrugi 10 enam ei puutu!  
Aluslaurd on tervikuna risti pöörlemisteljega, kui tema pinna kaks ristuvat sihti on risti pöörlemisteljega. Ühe sihi me seadsime risti, nüüd peame seadma risti ka teise sihi. Selleks pöörame klaasplaati aluslaural 90°, siis aluslaurda koos plaadiga nii, et okulaari vaatevälja keskele ilmuks ristike 3. Kuna pikksilma telg on juba seatud risti laua pöörlemisteljega, siis tuleb mõlema risti horisontaaljoonte ühitamiseks pöörata ülejäänud kahte reguleerimiskruvi 19, mis asuvad klaasplaadiga ristival sirgel. Pöörame aluslaurda koos plaadiga 180° ja kontrollime ristide horisontaaljoonte kattuvust, kui vaja pöörame jälle kahte reguleerimiskruvi 19.
- 4) Pilu seadmiseks kollimaatori läätse fookusse asetame pilu ette valgususallika ja vaatleme kollimaatorist väljuvat valgust pikksilmaga. Kui pilu asub kollimaatori läätse fookuses, siis väljuvad kollimaatorist paralleelsed kiired ja lõpmatusse teravustatud pikksilmas on näha pilu terav kujutis. Niisiis tuleb kruvi 15 abil vabastada pilumoodul 14 ja pilu õige asendi leidmiseks teda nihutada edasi-tagasi seni, kuni pikksilmas on näha pilu terav ja okulaari niitristi 1 suhtes parallaksivaba kujutis. Samas seame pilu kujutise paralleelseks niitristi verikaaljoonega ja keerame kruvi 15 kinni. **NB! Pilu kujutist ei tohi teravustada pikksilma okulaari abil!** Sel juhul ei ole enam okulaari niitrist terav ja pikksilm teravustatud lõpmatusse ning peate üle kordama korrastamise esimese-teise osa. Pilu kujutise laiuseks seame umbes 1 mm.
- 5) Seame kollimaatori telje risti aluslaur pöörlemisteljega. Selleks pöörame pikksilma asendisse, kus Abbe okulaari valgustusprisma ei kata pilu kujutist ja nihutame kollimaatori kruvi 17 pööramisega pilu kujutise sümmeetriliseks okulaari niitristi horisontaaljoone suhtes.

Nüüd on meil goniomeeter korrastatud ja võime asuda mõõtmiste juurde.