

1. Geomeetriline optika

1.1 Optiliste mõõteseadmete korrastamine

Optilised mõõtmismeetodid võimaldavad määrata füüsikalisi suurusi väga suure täpsusega: näiteks valguse lainepikkust kuni 0,01 Å, murdumisnäitajaid kuni 10^{-15} jne. Nii suur täpsus on võimalik ainult seetõttu, et mõõteseadmete optilised detailid on valmistatud samuti väga suure täpsusega ja hoolikalt justeeritud. Näiteks kõrgekvaliteetsete läätsede pind ei erine sfääri pinnast rohkem kui 0,005% ja klaasi murdumisnäitaja ei või läätse ulatuses muutuda rohkem kui $\pm 0,0001$. Fotoobjektiivis on aga läätsed tsentreeritud täpsusega $\pm 0,01 - 0,02$ mm.

Kuld ka kõrgekvaliteetne riist ei garanteeri suurt mõõtmistäpsust, kui see ei ole korralikult välja reguleeritud. Näiteks võib teha väga hõlpsasti 6 – 7 % vea tundmatu lainepikkuse leidmisel, kui monokromaatori parallaks ei ole korrigeeritud. Tulemuseks on aga see, et me seame antud spektrijoonetele vastavusse lainepikkuse, mis vastab tegelikult hoopis teisele värvusele.

Ülaltoodust on selge, kui tähtis on mõõteseadmete reguleerimine (justeerimine). Kuigi erinevaid seadmeid on justeerimiseks erinevad nõuded, võib välja tuua üldised, kõigile optilistele süsteemidele omased justeerimisvõtted: parallaksivaba kujutise saamine, goniomeetri korrastamine, spektraalriista valgustamine, peegelpindade asetamine risti optilise teljega jms.

Üksikute optiliste detailide samale teljele joondamiseks kasutatakse sageli laserkiire abi

1.1.1 Parallaksivaba kujutise leidmine

1.1.1.1 Tööülesanne

Tutvumine parallaksiga ja parallaksivaba kujutise leidmine.

1.1.1.2 Töövahendid

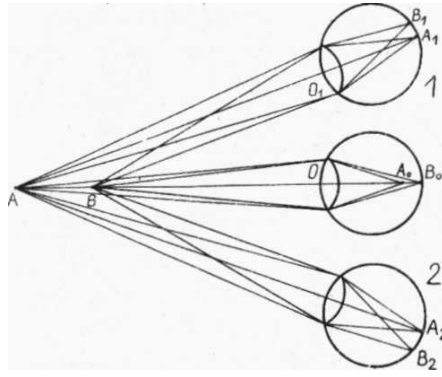
Optiline pink, lääts, valgusallikas, näidikud, nõguspeegel.

1.1.1.3 Töö käik

Sissejuhatus

Optiliste mõõtmiste korral tuleb sageli määrata kujutise asukoht kas mõõteriista näidiku või objekti enda suhtes (näiteks monokromaatori kaliibrimisil spektrijoonete asukohad, tööd goniomeetriga töötamisel pilu kujutis niitriist suhtes, sfääriliste peeglite uurimisel näidikute ja nende kujutiste asukohad jne.). Juhul kui kujutis ei asu võrdlusobjektiga optilisel teljel samas tasandis, ilmneb, et me võime kujutist näha nii näidiku kohal kui ka mõlemal pool seda, sõltuvalt vaatleja silma asukohast. Seda nähtust nimetatakse parallaksiks ja sellest tingitud mõõtmisviga parallaktiliseks veaks.

Parallaksi olemust aitab selgitada joonis **1.1**. Olgu joonisel näidik punktis A ja objekti kujutis punktis B. Kui vaatleja silm asub sirgel AB, siis näeb ta näidikut ja objekti kujutist kohakuti asuvaina.



Joon. 1.1. Parallaksi tekkimine

Kui vaatleja viib silma asendisse **1**, siis tekib silma võrkkestal kujutis B_1 paremal näidiku kujutisest A_1 . Asendis **2** aga, vastupidi, tekib objekti kujutis B_2 vasakul näidiku kujutisest A_2 . Kui neis asendites viia objekti kujutis asendisse, kus ta asuks samal optilisel teljel näidiku ja silmaga, näeksime neid jälle kohakuti olevaina, kuid saadud näit võib oluliselt erineda

Parallaksi suurust iseloomustab nurk tipuga silmaläätse keskpunktis ning haaradega läbi vaadeldavate punktide A ja B. Seda nurka nimetatakse parallaktiliseks nurgaks ε , mis avaldub järgmiselt:

$$\varepsilon = \frac{b \sin \alpha}{R},$$

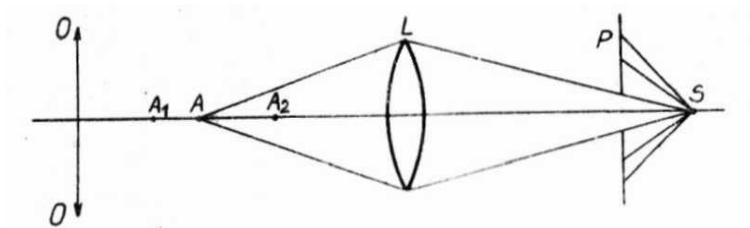
kus b on punktide A ja B vaheline kaugus, R - lõigu b keskpunkti kaugus silmaläätsest ja α - nurk b ja R vahel.

Parallaksivaba kujutist on võimalik jälgida ainult ühe silmaga vaadeldes. Kui vaadata kujutist ja näidikut kahe silmaga, segab meid nn. binokulaarne parallaks [1].

EKSPERIMENT

I. Veendume — binokulaarse parallaksi olemasolus.

II. Parallaksivaba kujutise saamiseks kasutame seadet, mille skeem on toodud joonisel **1.2**.



Joon. 1.2. Katseskeem parallaksivaba kujutise leidmiseks

Valgusallika S ette on asetatud pilu P. Läätse L abil saadud pilu kujutist jälgimegi. Kui näidik A asub samas tasandis pilu kujutisega, siis parallaksi ei esine, s.t. silma liigutamisel risti vaatesuunaga (suunas OO') ei nihku pilu kujutis näidiku suhtes. Kui näidik asub kohas A_1 või A_2 , esineb parallaks. Parallaksivaba kujutise leidmiseks võib näidikut A nihutada fikseeritud läätse ja pilu suhtes või nihutada läätse paigal seisva näidiku ja pilu suhtes.

Tööd saab teha ka nõguspeegli abil. Selleks asetame optilisel pingil asuva nõguspeegli ette statiivil liikuva näidiku. Liigutades näidikut, leiame sellise asukoha, kus näidiku teravik ja selle ümberpööratud kujutis langevad parallaksivabalt kokku.

Leidnud parallaksivaba kujutise kas läätse või nõguspeegli abil, laseme seda kontrollida juhendajal. Joonistame protokollki katseskeemi.

1.12 Goniomeetri korrastamine

1.1.2.1 Tööülesanne

Goniomeetri töökorda seadmine.

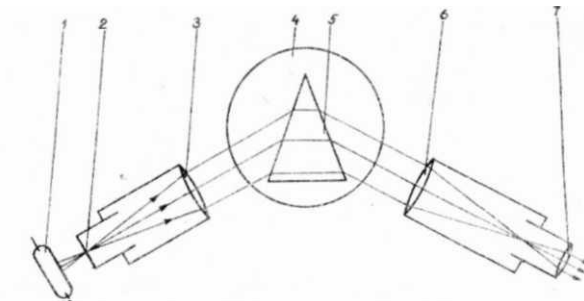
1.1.2.2 TÖÖVAHENDID

Goniomeeter, tasaparalleelne klaasplaat, valgusallikas.

1.1.2.3 Töö käik

Sissejuhatus

Goniomeeter on riist nurkade mõõtmiseks ja seda kasutatakse praktikumis prismade difraktsioonivõrede uurimisel (vt. Lisa 1.1). Goniomeetreid saab kasutada ka spektroskoopidena ja järelkult on nende korrastamise nõuded kehtivad ka spektroskoopide jaoks. Goniomeetri põhimõtteline skeem on toodud joonisel 1.3.



Joon. 1.3. Goniomeetri skeem. 1 - valgusallikas; 2 - kollimaatori pilu; 3 - kollimaatori objektiiv; 4 - aluslaud; 5 - uuritav prisma; 6 - pikksilma objektiiv; 6 - pikksilma okulaar.

Goniomeeter on korrastatud, kui:

1) pikksilma okulaari niitrist on teravustatud; 2) pikksilm on teravustatud lõpmatusse; 3) kollimaatori pilu asub kollimaatori fokaaltasandis (s.t. kollimaatorist väljub paralleelne kiirte kimp); 4) kollimaatori ja pikksilma optilised teljed on risti aluslaua pöörlemisteljega; 5) pilu ja okulaarriisti vertikaal joon on paralleelsed aluslaua pöörlemisteljega.

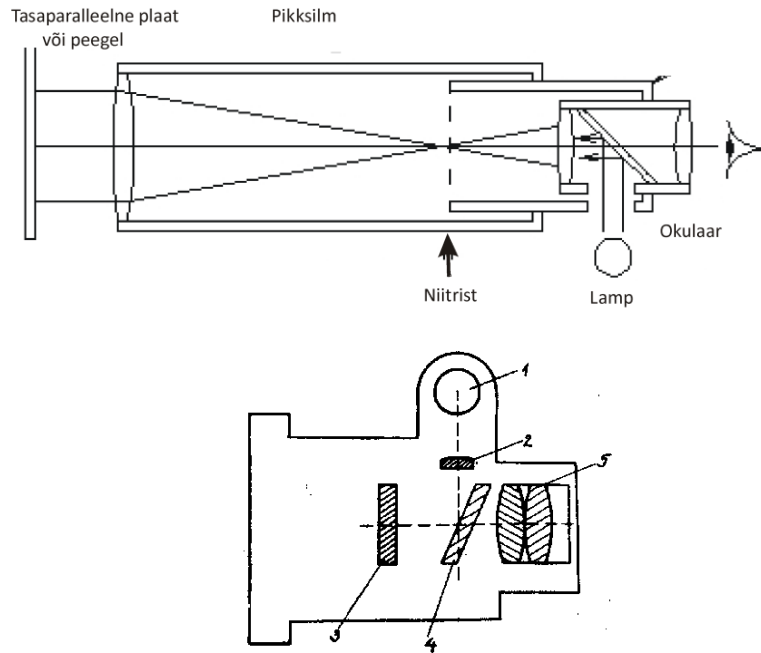
Ainult nende tingimuste täitmisel on goniomeetris saadav kujutis kõrge kvaliteediline ja mõõtmistulemused maksimaalse täpsusega.

Goniomeetri korrastamine

I. Pikksilma okulaari teravustamine niitristile ja pikksilma teravustamine lõpmatusse.

Esmalt teravustame pikksilma okulaari niitristile, mida saab teha pöörates okulaari. Pööramisel nihkub okulaar niitristi suhtes.

Järgnevalt teravustame pikksilma lõpmatusse. Lihtsamate goniomeetrite korral tuleb selleks vaadelda läbi pikksilma mingit kaugel asuvat objekti (mis asub praktiliselt lõpmatuses). Kujutise teravustame okulaari ja objektiivi vahelise kauguse muutmisega. Kujutis peab niitristi suhtes parallaksivaba olema.



Joon. 1.4. Pikksilm Gaussi okulaariga ja Gaussi okulaari skeem.

Paremail goniomeetrel on pikksilm varustatud nn. Gaussi okulaariga (vt. joon. 1.4). Okulaari 5 väline lääts on liigutatav niitristiga klaasi 3 suhtes. Risti valgustatakse lambiga 1 klaasplaadi 4 abil.

Kui pikksilm on teravustatud lõpmatusse ja niitrist on teravalt näha, siis asub niitrist objektiivi fookuses ning kiired, mis lähtuvad igast selle punktist, on objektiivist väljudes paralleelsed. Kui need kiired suunata tagasi objektiivi selliselt, et need oleksid endiselt paralleelsed, siis tekib niitristi kujutis samuti objektiivi fokaaltasandis. Seda kujutist nimetatakse autokollimatsiooni kujutiseks.

Järelikult tuleb pikksilma lõpmatusse teravustamiseks asetada objektiivist väljunud kiirte tee tasapeegel või tasane klaasplaat, millelt kiired peegelduvad tagasi objektiivi. Kui niitrist ja selle autokollimatsiooni kujutis on samaaegselt näha teravalt ja parallaksivabalt, ongi esimene ülesanne täidetud.

Pöörame aluslauda jälle 180° ja viime eespool nimetatud viisil risti kattumiseni oma kujutisega. Reguleerimist kordame seni, kuni 180° pöördel ei teki erinevust kujutise ja risti vahel.

Nüüd paigutame tasaparalleelse plaadi aluslauda selliselt, et selle tahud asetseksid paralleelselt teisi reguleerimiskruve ühendava joonega. Kontrollime, kas ka selle asendi korral on täidetud ristseisu tingimus. Vajaduse korral kordame eespool kirjeldatud reguleerimisoperatsioone.

III. Pilu reguleerimine kollimaatori objektiivi fookusesse.

Pilu asetamiseks kollimaatori objektiivi fookusse seame pilu ette valgusallika ja vaatleme kollimaatorist väljuvaid kiiri pikksilmaga. Kui pilu asub kollimaatori objektiivi fookuses, siis väljub kollimaatorist paralleelne kiirte kimp ja lõpmatusse teravustatud pikksilmas on näha terav kujutis. Järelikult tuleb pilu õige asendi leidmiseks nihutada seda seni, kuni pikksilmas on näha pilu terav ja niitristi suhtes parallaksivaba kujutis. **NB! Pilu kujutist ei tohi teravustada pikksilma okulaari abil!** Sel juhul ei ole enam pikksilm teravustatud lõpmatusse ja tuleb korrata töö eelmist osa.

IV. Kollimaatori optilise telje ristiseadmine aluslauda pöörlemisteljega.

Kontrollime, kas pilu on paralleelne niitristi vertikaalse joonega. Kui ei ole, siis reguleerime need pilu pöörlemisega paralleelseks. Kollimaatori telje ristiseadmiseks aluslauda pöörlemisteljega vähendame diafragma

abil sümmeetriliselt pilu kõrgust ja kallutame kollimaatorit (vastava kruvi abil) selliselt, et niitristi horisontaaljoon jagaks pilu kujutise pooleks.

Laseme juhendajal kontrollida goniomeetri korrasolekut. Joonistame protokollis goniomeetri skeemi, märgime üles goniomeetri korrastamise võtted ja registreerime limbi näidu, mille puhul niitristi vertikaaljoon asub kollimaatori pilu kujutise keskel (vt. lisa 1.2).

1.13 Spektraalriista valgustamine

1.1.3.1 Tööülesanne

Valgusallika asetamine monokromaatori optilisele teljele sobivale kaugusele sisendpilust ja spektrijoone parallaksivaba kujutise saamine.

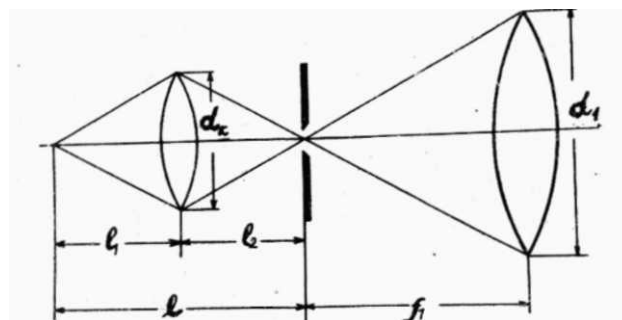
1.1.3.2 Töövahendid

Monokromaator YM-2, valgusallikas, spektraallamp, kondensor, metalljoonlaud.

1.1.3.3 Töökäik

Sissejuhatus

Spektraalriista läbiv valgusvoog sõltub pilu valgustamise iseloomust. Selleks, et kasutada täielikult riista valgus jõudu ja lahutusvõimet, on vaja, et valgus pilu kõigist punktidest täidaks täielikult kollimaatori. Seda tingimust saab täita, kui valgusallikas on homogeenne, suur ja seda saab asetada pilule küllalt lähedale. Kui need nõuded ei ole täidetud, tuleb kasutada kondensorit, mis peab rahuldama teatud geomeetrisi seoseid - need on leitavad jooniselt 1.5.



Joon. 1.5. Pilu valgustamine kondensori abil.

Joonisel 1.5 on d_1 ja f_1 kollimaatori objektiivi diameeter ja fookuskaugus, d_k - kondensori diameeter. Kui valgusallikas asub pilust kaugusel l_1 ja me tahame aeda projitseerida pilule suurendusega β , siis kondensori fookuskauguse leiame võrrandisüsteemist

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_k}$$

$$\frac{l_2}{l_1} = \beta,$$

$$l_1 + l_2 = l$$

Lahendades selle võrrandite süsteemi, leiame, et

$$f_k = \frac{\beta l}{(\beta + 1)^2}$$

Kondensori diameetri leiame tingimusest, et valgusega oleks täidetud kogu kollimaator. Selleks on tarvis, et

$$\frac{d_k}{l_2} = \frac{d_1}{f_1}$$

Kui valime $\beta = 1$, siis $l_1 = l_2 = l/2$ ja $f_k = 1/4$ ning $d_k/f_k = 2d_1/f_1$, s.t. et kondensori suhteline ava peab olema vähemalt kaks korda suurem kollimaatori suhtelisest avast.

Kollimaatori objektiiv ei ole korrigeeritud kromaatilise aberratsiooni suhtes. Järelikult sõltub kollimaatori objektiivi fookuskaugus valguse lainepikkusest. Sellest tingituna tekib sisendpilu kujutis väljundpilu (või pikksilma näidiku) tasandis vaid ühel kindlal lainepikkusel. Teistel lainepikkustel tekib pilu kujutis kas ees- või tagapool seda tasandit.

Nimetatud asjaolu ei luba aga spektrijoone asukohta täpselt määrata, kuna parallaks hakkab segama. Sellest vabanemiseks on tehtud kollimaatori objektiiv liigutatavaks piki optilist telge. Monokromaatori kalibrimisel valgustatakse pikksilma näidikut läbi valgusfiltrite spektrijoonega sama värvi valgusega ja leitakse kollimaatori objektiivi selline asend, mille korral me näeme vastavat spektrijoont näidiku kohal parallaksivabalt.

Valgusallika asetamine sobivale kaugusele monokromaatori optilisele teljele

Monokromaatori YM-2 kollimaatori suhteline ava on $1/6$. Järelikult peab kondensori suhteline ava olema vähemalt $1/3$. Olgu meil näiteks kasutada kondensori, mille $f_k = 94$ mm. Leiame selle suhtelise ava. Kui see osutub võrdseks või suuremaks kui $1/3$, leiame kaugused l_1 , l_2 ja l tingimusel, et $\beta = 1$. Asetame valgusallika kaugusele 1 monokromaatori sisenemispilust.

Valgusallika viimine monokromaatori optilisele teljele toimub järgmiselt. Teeme sisendpilu $0,5$ mm laiuseks ja $0,5$ mm kõrguseks (diagramma abil). Väljundpilu avame maksimaalselt. Vaadates läbi monokromaatori, liigutame lampi ristisuundades optilise teljega kuni see paistab asuvana vaatevälja keskel. Sellega ongi valgusallikas asetatud optilisele teljele.

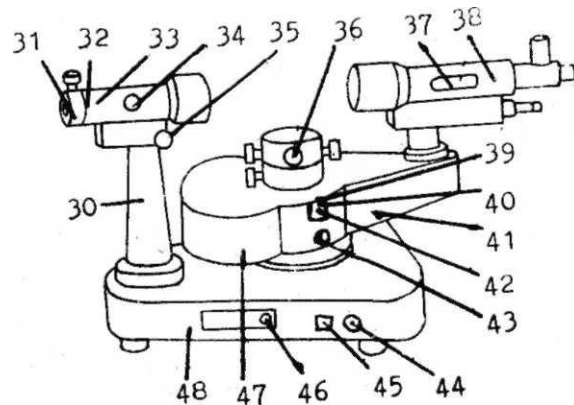
Nüüd asetame kondensori kaugusele l_2 sisendpilust. Sel juhul peab pilu tasandis tekkima valgusallika terav kujutis. Vajaduse korral liigutame kondensorit risti optilise teljega seni, kuni valgusallika kujutis langeb sisendpilu keskele.

Asendame väljundpilu pikksilmaga ja teeme sisendpilu 1 cm kõrguseks. Asetame valgusallika kohale mõne spektraallambi ja süütame selle. Monokromaatori trumlit pöörates seame mingi spektrijoone näidikuga kohakuti. Süütame näidiku valgustuse ja valime sobiva valgusfiltri. Kontrollime, kas spektrijoon on näidiku kohal nähtav ilma parallaksita. Parallaksi ilmnemisel likvideerime selle, nihutades kollimaatori objektiivi vastava nupu pööramisega.

Kirjutame protokolliga näidu (arvestada tuleb ka nooniust!). Laseme juhendajal tehtut kontrollida ja märgime protokolliga valgusallika sobivale kohale asetamise võtted.

Lisa 1.1

Goniomeetri ehituse kirjeldus



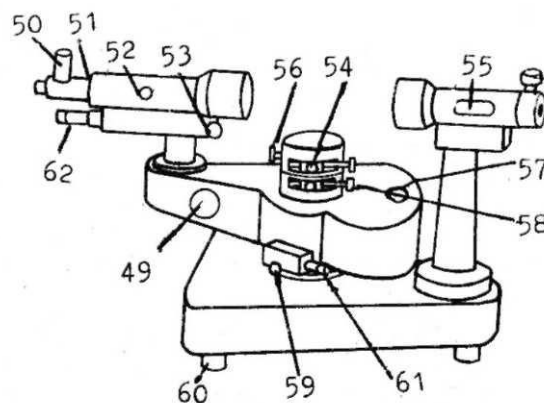
Joon. 1.6. Goniomeetri GC-5 vaade kollimaatori poolt.

30 - kollimaatori tugi, 31 - pilu, 32 - vaheõngas, 33 -kollimaator, 34 - kollimaatori fokuseerimise kruvi, 35 - kollimaatori kalde muutmise kruvi, 36 - aluslaua kalde muutmise kruvid, 37 - skaala, 38 - pikksilm, 39-40 - limbi fiksaator, 41 - alidaad, 42 - limbi alidaadiga ühendamise mehhanism, 43 - limbi pööramise kruvi, 44 - lüliti, 45 - pistikupes, 46 - ümberlüüti, 47 - valgusti, 48 - alus.

Goniomeetri põhilised osad on pikksilm 38 , kollimaator 33, alus koos pöördemehhanismidega 48 ja aluslaud 54. Pikksilm ja lugemi võtmise mikroskoop 62 on kinnitatud pöörleva kronsteiniga, millega on jäigalt ühendatud alidaad 41 . Alidaadi ja pikksilma, mis pöörlevad limbi suhtes, liigutatakse käega, täpseks reguleerimiseks on kruvi 61 , mis töötab ainult fikseeritud kruvi 59 korral.

Limbi saab pöörata alidaadi ja aluslaua suhtes mikromeetrilise kruvi 58 abil (fikseeritud abikruvi korral).

Enne goniomeetri korrastamist tuleb see reguleerida vesiloe 57 ja reguleeritava kõrgusega jalgade abil horisontaalseks.



Joon. 1.7. Goniomeetri GC-5 vaade pikksilma poolt.

49 - optilise mikromeetri kruvi, 50 - valgusti, 51 - vaheõngas , 52 - pikksilma fokuseerimise kruvi, 53 - pikksilma kalde muutmise kruvi, 54 - aluslaud, 55 - skaala, 56 - kruvi, 57 - lood, 58 - mikromeetriline kruvi limbi pööramiseks koos aluslauaga, 59 - fiksaator, 60 - reguleeritava kõrgusega jalg, 61 - mikromeetriline kruvi alidaadi pööramiseks (fikseeritud 59 korral), 62 - mikroskoop lugemi võtmiseks.

Lisa 1.2

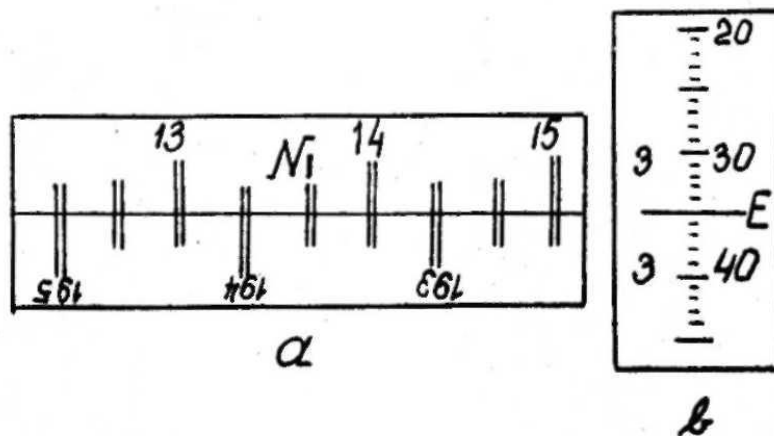
Lugemi võtmine goniomeetri skaalalt

Lugemi võtmise mikroskoobi vaateväli on toodud joonisel 1.8. Vasakpoolses aknas (joon. 1.8 a) on näha limbi diametraalselt vastastikku asetsevad lõigud ja vertikaalne liikumatu kriips (indeks N), parempoolses aknas (joon. 1.8 b) on näha optilise mikromeetri skaala horisontaalse indeksiga E.

Lugemi võtmiseks tuleb pikksilma niitristi vertikaaljoon reguleerida pilu kujutise keskele ja fikseerida alidaad kruvi 59 abil. Seejärel tuleb pöörata optilise mikromeetri kruvi 49 seni, kuni mikroskoobi vaateväljas vasakpoolses aknas limbi ülemised ja alumised kaksikjooned satuvad täpselt kohakuti. Sel juhul saame kraadide arvuks esimese arvu indeksist N vasakul; kümnete minutite arvu annab intervallide arv täiskraadide arvu ja sellest 180° võrra erineva arvu vahel (skaala alumisel poolel). Minutite arvu loeme parempoolse akna vasakpoolsest reast, aga sekundite arvu loeme parempoolse akna parempoolsest reast vastavalt horisontaalse indeksi E asukohale.

Mikromeetri skaalal on väikseim jaotis $1''$, kuid pikksilma lahutusvõime on $3''$, seega ei saa ka nurki mõõta täpsemini.

Joonisel 1.8 toodud skaala lugem on $13^\circ 43' 35''$.



Joon. 1.8. Mikroskoobi vaateväli.