

TÄHED JA TEHNIKA



TEADUSE
TEEDELT



Uno Veismann

Tähed ja tehnika

Kirjastus «Valgus» · Tallinn 1968

52
V 39

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
71297

2 — 6 — 6
24 — 67

● sissejuhatus

Astronoomiat loetakse üheks vanemaks teaduseks. Teistest loodust uurivaist teadustest on teda alati eraldanud üks oluline joon — astronoomia toetub ainult vaatlustele. Mõeldamatud oleksid füüsika ja keemia ilma eksperimentideta, ka sellised vaatlustega tihedalt seotud teadusharud nagu zooloogia ja botaanika ei saa juba ammu läbi katseteta. Astronoomias neid võimalusi pole. Katse eeldab uuritava loodusnähtuse aktiivset mõjutamist uurija poolt, kosmiliste protsesside kulgemisse pole aga astronoomid seni nimetamisväärselt sekkuda suutnud.

Millele tuginevad astronoomilised teadmised? Andmetele, mida toob kaugetelt taevakehadelt lähtuv valguskiirgus või üldisemalt elektromagnetilised lained. Pole teisi teadusi, kus uurijaid ühendaksid uuritavate objektidega vaid valguskiired. Möödunud aegadel koosnes astronoomi töö taeva jälgimisest ja mõtisklustest nähtu üle. Mitte kunagi poleks me sel viisil jõudnud isegi nende teadmisteni, mida praegu võib leida keskkooliõpikust, rääkimata sellest, mida astronoomiateadus on üldse meie ajaks talletanud. Kõige selle eest võlgneme tänu tehnikale. Tehnilised vahendid suurendasid võrreldamatult vaatlustele kättesaadava maailmaruumi ulatust, nad tegid võimalikuks selliste lõksude seadmise valguskiirte teele, mis sunnivad kiiri «rääkima» meile peaaegu kõike, mida nad üldse öelda suudavad. Füüsikaseaduste ja matemaatika abil saab täpsetest mõõtmistulemustest, riistadega erapooletult fikseeritud arvulistest suurustest seletada füüsikalist olukorda tähtedel ja avastada uusi loodusseadusi.

Pöördelise tähtsusega astronoomia ajaloos oli teleskoobi leiutamine. Algul oli see riist, piltlikult väljendades, vaid inimese nägemise võimendajaks, hiljem aga muutus kõige keerulisemaks nõrkade valguskiirte püüdmise, salvestamise ja analüüsimise aparaadiks. Katsete asemel uurimisobjektidega tuli astronoomidel hakata tegema palju keerulisemaid katseid neilt saabunud kiirtega. Uued suured avastused astronoomias hakkasid otseselt järgnema just suuremate ja täiuslikumate teleskoopide ning nende juurde kuuluvate lisaseadmete kasutuselevõtmisele. Riistad määravad isegi uute astronoomiaharude sünni. Nii on väga vana teaduse kaasaja juhtivaim haru — astrofüüsika — üsna noor. Tähtede keemilise koosseisu ja neil toimuvate füüsikaliste protsesside kindlakstegemine oli teostamatu ilma optiliste vaatlusinstrumentideta. Esimene samm astuti siin teleskoobi kasutuselevõtmisega, teine aga spektroskoopia rakendamisega valguse analüüsiks. Spektroskoopia tegi astronoomias revolutsiooni ja sünnitas tegelikult astrofüüsika, mis kaasajal moodustab astronoomia põhiosa. Uurimisobjektidele lähenemise mõttes väljapääsmatus olukorras olevad astronoomid muutusid aegamööda kõige kõrgema tehnilise kultuuriga teadlasteks — vaevalt ilmus füüsikas või tehnikas uus meetod või seade, kui seda püüti juba kohandada astronoomilisteks vaatlusteks.

Käesoleva sajandi suured nihked tehnikas murdsid täie hooga sisse ka astronoomiliste vaatluste tehniliste vahendite valmistamisse. Paljudes teadusharudes toimus järkjärguline juhtpositsiooni üleminek optilis-mehhaanilistelt seadmetelt elektrilistele ja elektromehhaanilistele ning edasi elektroonsetele, ka astronoomias said domineerivateks raadioelektroonika meetodid ja vahendid. Raadiotehnika baasil arenes välja uus astronoomiaharu — raadioastronoomia. Tagasihoidlikust astronoomide ja optikute koostööst teleskoopide valmistamisel on kujunenud tehniline teadusharu — astronoomiline aparaadiehitus, milles füüsika, keemia, optika, täppismehhaanika, raadioelektroonika ja teiste teaduste uusimaid saavutusi rakendatakse astronoomia huvides. Nüüd, millal on alanud inimese väljumine Maalt kosmosesse, omandavad astronoomilised instrumendid inimkonna tegevuses veelgi tähtsama, tõeliste eksperimentidega seotud koha. «Kõrvuti astronoomia ja kosmonautikaga areneb lähemas tulevikus

tõenäoliselt välja uus tehnikaharu — kosmotehnika, mille abil inimene hakkab aktiivselt mõjutama nähtusi kosmoses,» arvab väljapaistev nõukogude astrofüüsik V. A. Ambartsumjan.

Astronoomilised riistad ühendavad kahte äärmiselt kaasaegset ja tormiliselt arenevat teaduslikku suunda: tehnilisi teadusi ja maailmaruumi uurimist. Rääkides astronoomilisest aparaadiehitusest, tuleb meil kogu selle arengu ulatuses puudutada antud ajastu tehnika kõige tähelepanuväärsemaid saavutusi, mitmelgi juhul on astronoomid innustanud insenere looma seda, mis on saanud antud ajastu tehnika šedöövriks. Nende kahe, tehnika ja astronoomia liidule ongi pühendatud käesolev raamat. Riistad ja meetodid, mida kasutab kaasaegne astronoomia informatsiooni maksimaalseks dešifreerimiseks meile kaugetelt taevakehadelt saabuvast kiirgusest, iseloomustavad paljude teistegi teadusharude tehnilisi vahendeid ja metoodikat. Ühel või teisel viisil teenivad nad kõik üht eesmärki: informatsiooni hankimist loodusest teadusliku maailmapildi loomiseks.

I. teleskoobi ajalugu

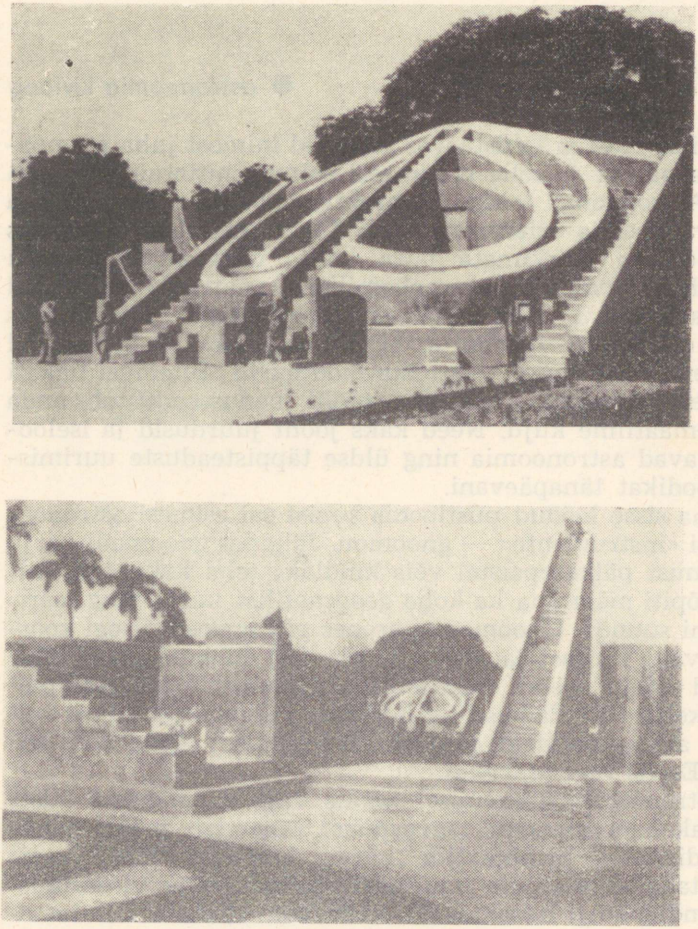
● astronoomia kiviaeg

Päike, Kuu ja tähistaevas paelusid inimest juba ammustest aegadest ja selle põhjuseks polnud mitte ainult taeva ilu. Astronoomia tekkis elupraktika nõuete täitmiseks aja määramisel ja orienteerumisel. Ta kujunemisel teaduseks aga ei saa märkimata jätta kahte väga sügavat mõju avaldanud nähtust: astronoomilised vaatlused muutusid lihtsast taeva silmitsemisest teaduslikuks mõõtmiseks alles vastavate vahendite, olgugi primitiivsete ilmumisel ja nende uut liiki vaatluste-mõõtmiste tulemusi hakati ümber arvutama, kusjuures püüti loodusseadustele anda matemaatiline kuju. Need kaks joont juurdusid ja iseloomustavad astronoomia ning üldse täppisteaduste uurimismetoodikat tänapäevani.

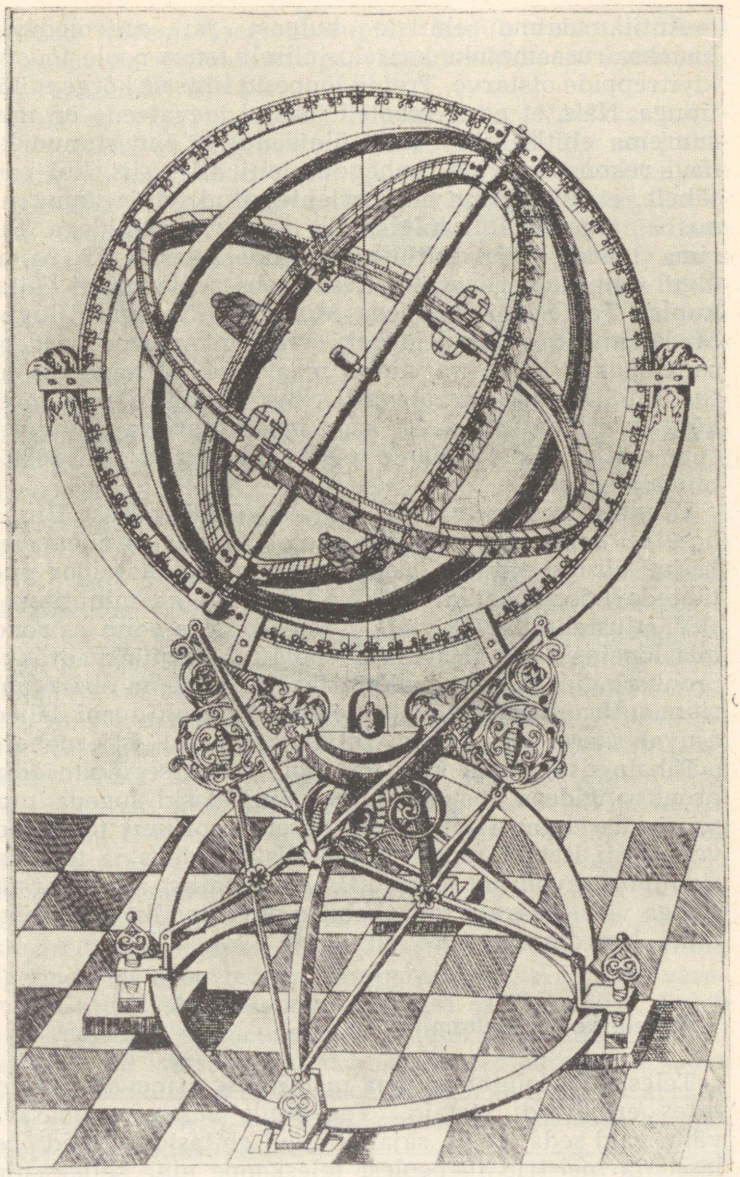
Maa sisse löödud püstloodis kepist sai esimesi astronoomilisi «instrumente» — gnoomon. Jälgides gnoomoni varju liikumist päikesepaistel võis kindlaks teha kellaaega, hiljem õpiti määrama ka koha geograafilist laiust ning meridiaani suunda. Gnoomonist arenes päikesekell. Seegi koosneb vaid vardast ja skaalaga plaadist Päikese poolt tekitatud varju asendi määramiseks. Sisuliselt määrati päikesekella abil Päikese tunninurka. Päikesekell teenis inimesi aastatuhandeid; praktiliselt kasutusel olnud kelli leidub Eestis veel praegugi.

Astronoomia arenemisel tekkis vajadus määrata teiste taevakehade asendeid taevasfääril, tähendab, mõõta nende koordinaate. Et objektide nõrga heleduse tõttu varje kasutada ei saa, siis muutusid sihtimis- ehk viseerimisvahendid kõigi koordinaate määravate riistade lahutamatuks osaks, koordinaadid loeti pärast viseerimist jaotustega ringidelt. Harilikult ei vajatud mõõtmisel täisringi, vaid 60—90 kraadini ulatuvat skaalat, seepärast piirduti

kvadrantideks nimetatavates nurgamõõtmisriistades 90-kraadise ja sekstantides 60-kraadise kaarega. Mõõtmistäpsuse suurendamiseks tuli ringile kanda võimalikult rohkem jaotisi, nende mahutamiseks pidi aga suurendama ringi läbimõõtu. Nii hakkasid koordinaatringid taevakehade asendite määramise riistadel üha kasvama ning riistad ise muutusid terveteks ehitisteks (joonis 1).



Joonis 1. Müür-vaatlusriistad muistsest Indiast: ehitis Päikese vaatlemiseks ja hiiglagnoomon.



Joonis 2. Armillaarsfäär Tycho Brahe observatooriumis (1602. aastal ilmunud joonise järgi).

Antiikmaailma ehitiste hulgast jäi arheoloogidele kauaks arusaamatuks kaarekujuliselt taeva poole tõusvate kivitreppide otstarve. Trepid lõppesid lihtsalt kõrge müüritipuga. Näis, et need «pooleli jäänud taevateed» on mingi suurema ehitise osad, kuid ülejäänut ei õnnestunud kuidagi rekonstrueerida. Lahendus leiti alles siis, kui pandi tähele, et müürid on alati orienteeritud põhja-lõuna suunas — tegemist oli hiiglaslike müürkvadrantidega. Suurima teadaolevaist müürkvadrantidest laskis 15. sajandi algul oma Samarkandis asuvasse observatooriumi ehitada kuulsa Tamerlani pojapoeg Muhamed Taragai Ulugbek. Madalaimas osas on Ulugbeki kvadrant marmorvooderdisega sügava kraavina viidud maa sisse, ülemine ots ulatus müüritipuna arvatavasti kuni kolmekümne meetri kõrgusele maapinnast. Et kogu laboratoorium oli tohutult suur ehitis, sellest annab praegu tunnistust umbes 6000 m^3 müürijäänuseid.

Ulugbek koostas uue tähekataloogi, mis pärast Hipparhost oli esimeseks iseseisvaks kataloogiks ja ületas eelkäijat ühtlasi täpsuse poolest: Ulugbeki kataloog andis tähtede koordinaadid nii kraadides kui ka minutites.

Vaatlustehnilise «kiviaja», teleskoopide-eelse astronoomia lõpetasid 16. sajandil Tycho Brahe müürkvadrant ja pronksringidega nurgamõõtmisvahendid tema observatooriumis Uraniborgis («Taevalossis» Kopenhaageni lähedal asuval saarel) ja samas hiljem ehitatud Stjerneborgis («Tähelossis»). Kuni kahe ja poole meetrise läbimõõduga pronksringidega instrumendid võimaldasid lugeda nurki paari kaareminuti täpsusega; observatooriumi töökodades valmistati isegi 6-meetrine metallskaaladega ja toruvisiiriga puust kvadrant. Tycho Brahe metallist armillaarsfääridega võis määrata taevakehade ekvaatorilisi ja horisondilisi koordinaate.

● teleskoobi leiutamine

Teleskoobi leiutamisajana mainitakse erinevates raamatutes erinevaid aastaid. Tegelikult võime usaldatavalt väita vaid seda, et 17. sajandi algul ehitasid mitmed õpetlased ja meistrid tõepoolest teleskoope ning sellest ajast sai alguse nende levik üle kogu maailma. Kahjuks aga ei ole kuigi tõsist alust kinnitada, nagu poleks teleskoopi

ehitatud varem. Isegi vastupidi, leidub rohkearvuliselt mitmesuguse usaldatavusega väiteid teleskoobi kasutamisest varasemail aastail.

Mida on vaja teleskoobi leiutamiseks? Võidakse muidugi vastata, et kõigepealt andekat leidurit. Nii see kahtlemata on, kuid siiski vajab iga leiutis teatud teaduslikke ja tehnilisi eeldusi; kas või seda, et oleksid olemas üksikosad, millest uus riist koostatakse. Hollandi teadlane Christian Huygens arvas, et vaid üliinimlik geenius oleks suutnud teleskoobi leiutada ainuüksi teoreetiliste teadmiste põhjal. Ta oletas, et teleskoop leiutati tänu õnnelikule praktilisele juhusele, ning imestas, miks see ei sündinud varem.

Lihtsaim teleskoop koosneb torust, mille otstesse kinnitatakse läätsed. Kasutades kaht kumerläätse, pöörab teleskoop kujutise ümber («jalad ülespidi»), kui aga võtame silmapoolseks läätseks nõguslääte, siis näeme kaugel asuvate esemete suurendatud kujutisi päripidiselt. Oluline on läätsede sobiv omavaheline kaugus, s. t. toru pikkuse valik. Kui nõuda teleskoobi leiutamiseks suhteliselt tagasihoidlikke eeldusi (2 läätse + toru + õige vahemaa + + juhus või andekas leidur), siis muutub üsna tõenäoliseks, et see toimus palju varem kui 17. sajandi algul. Läätsi on väljakaevamistel avastatud õige vanadest aegadest: nii näiteks leiti Troojast mitmesuguseid looduslikust kvartsist valmistatud läätsi. Sealhulgas oli korralik tasakumer lääts läbimõõduga 5,5 cm ja fookuskaugusega umbes 15 cm ning mitu väiksemat, osa neist poolkerakujulised. Läätsede valmistamisaja hindasid ajaloolased umbes aastale 2300 enne meie ajaarvamise algust. Sadu aastaid enne meie ajaarvamise algust valmistatud kvartsläätsi on leitud veel Kreeta saarelt, Niinivest ja mujalt. Esimesed teadaolevad klaasläätsedki kuuluvad sellesse aegkonda, neid on leitud Mesopotaamiast, Kartaago varemeist, hiljem Vana-Rooma ehitistest ja Pompeiist. Tuleb siiski märkida, et tõenäoliselt polnud need küll optilised läätsed, vaid läätsekujulised klaasesemed ehteasjade jaoks või muuks taoliseks otstarbeks. Kuid pole ka alust arvata, et selliste läätsede optilised omadused oleksid kauaks tähele panemata jäänud.

Babüloonlastel, egiptlastel ja hiljem kreeklastel oli juba kõrgelt arenenud astronoomiateadus. Nad tegid vaatlusi, mõõtmisi ja arvutusi, mis hämmastavad oma täpsusega,

ja võib tekkida põhjendatud kahtlus, et nende käsutuses olid palju paremad riistad, kui me seni oleme arvanud.

Vana- ja keskajal püüti silma vaatlusvõimsust tõsta läätsedeta vaatlustorude ja viseerimisvahendite abil. On andmeid, et vähemalt vanad kreeklased ja araablased kasutasid optikata vaatlustorusid. Ühelt poolt olid need vahenditeks taevakehade asendi täpsemaks määramiseks, viseerimiseks ja viseeritud joone nurkade mõõtmiseks. Teiseks läätsedeta vaatlustorude ülesandeks oli silma kaitsmine võõrvalguse eest, tähelepanu koondamine vaadeldavale objektile, järelikult nägemisteravuse tõstmine. Et läbi pika toru kaugeid esemeid paremini näha võib, see oli selge juba Aristotelesele. Siinkohal tuleb aga märkida, et enamik inimesi näeb läbi toru küll selgemini ja täpsemalt, kuid vaadeldavad esemed näivad vähendatuna. Sedasama füsioloogilist efekti on tähele pandud ka optiliste teleskoopide juures: kui riista suurendus on $1^{\times}$, tundub vaatlejale, et tegemist on vähendamisega, selleks et näiv suurendus oleks võrdne ühega, peab optilise süsteemi tegelik suurendus olema umbes $1{,}5^{\times}$.

Sellised vaatlustorud, samuti polemoskoobid (periskoobid) leidsid rakendamist ka sõjalistel eesmärkidel. Torud täiustusid: suurenes nende pikkus ja nad varustati mõlemas otsas nõndanimetatud dioptritega, seadmetega torude suunamiseks vaadeldavatele objektidele, viseerimisvahenditega. Mõnedes vähem täpsetes geodeesiariistades kasutatakse selliseid dioptritega viseerimistorusid veel praegugi. Ka muistsete astronoomide vaatlustorudes oli kaks dioptrit: väike ümmargune ava silma pool ja niitrist suuremas ümmarguses avas objekti pool. Vaatlustel seati objekt (näiteks planeet või täht) niitristi keskpunkti, ühele joonele silma ja dioptritega. On tõenäoline, et niisugust dioptritega toru kasutas 15. sajandil ka Ulugbek visiirina oma müürkvadrandi ja teiste vaatlusriistade juures.

Teoreetilised teadmised optika alal tekkisid aeglasemalt. Geomeetrilise optika algtõdesid leiame küll juba vanadelt kreeklastelt, kuid mõneski osas olid need segatud väärkujutlustega. Näiteks tundsid Eukleides ja Ptolemaios küll valguse sirgjoonelise levimise ja peegeldumise seadusi, kuid arvasid samal ajal, et valguskiired väljuvad inimsilmast ja nendega kombitakse vaadeldavaid esemeid. Ptolemaios tegi katseid valguskiire levimisega vees ja tal

jäi vaid üsna pisut puudu valguse murdumisseaduste avastamisest. Selle «üsna pisut» ületamiseks aga kulus inimkonnal tuhat aastat! Antiikmaailm lagunes ning keskajal selliseid uurimisi ei jätkatud.

Seitsmendal aastasajal arenes astronoomia, eriti vaatlustehnika, just araablastel. Ehitades uusi vaatlus- ja mõõtmisvahendeid, jõudsid nad taevakehade asendite määramisel täpsuseni 10 kaareminuti piires. Optika alal tuleb nimetada Alhazeni (Ibn al Haithami), kes Eukleidese optikaalaseid töid hästi tundis ning edasi arendas. Ta uuris silma ehitust ja jõudis arusaamisele, et nägemiskiired ei välju mitte silmast, vaid vastupidi, lähtuvad esemetelt. Alhazen kirjeldas esimesena läbipaistva kerasegmendi (läätse) kasutamist suurendusklaasina, hiljem tegi ta katseid läätse kasutamisel kujutise tekitamiseks.

Kokku võttes on ilmne, et tehnilised eeldused teleskoobi valmistamiseks olid olemas juba ammust ajast, teoreetilised teadmised geomeetrilisest optikast küll puudusid, kuid see ei välista võimalust lihtsalt juhuse kaudu teleskoop koostada.

13. sajandil elas Inglismaal mees, keda võib lugeda teleskoobiehituse teerajajaks: äärmiselt laialdaste loodusteaduslike teadmiste pärast «imedoktoriks» hüütud Roger Bacon. Optikast tundis Bacon arvatavasti Alhazeni töid, kuid viimase väärarvamuste kriitikata kordamine laseb arvata, et ise ta katsetega peaaegu ei tegelnud. Siiski jõudis Bacon üllatavalt ettenägelike järeldusteni: näiteks luubi suurendava toime kirjeldamise lõpetas ta arvamusega, et selliseid vahendeid võiksid kasutada vanad inimesed, kui nende silmanägemine on nõrgaks jäänud. Mõne aastakümne pärast ilmusidki esimesed prillid — vanim pilt prillidega inimesest pärineb aastast 1352 (Tommaso da Modena maal). Kahtlemata oli prillide leiutamine järjekordne tähtis samm teleskoobi loomise suunas.

Imestama panevad Baconi kujutlused tulevastest optilistest riistadest: «Murtud kiirte nägemise läbi võivad väga suured asjad väga väikestena paista. Samuti võib seda, mis väga kaugel on, väga lähedalt vaadata ja vastupidi. Selleks tuleb läbipaistvad ained silma ja objekti vahele asetada nii, et neis kiired murduksid meile soovitava nurga all. . . . Samal viisil võime Päikese ja Kuugi taevast alla tuua.»

Huvitav on R. Baconi arvamus, et sellist riista olevat

tundnud juba Julius Caesar esimesel sajandil enne meie ajaarvamist!

Renessansiajastu geenius Leonardo da Vinci huvitus astronoomiast ja optikast ning püüdis koduses tähetornis kasutada taeva vaatlemisel kumerläätse. Tema märkmetes esineb soov: «Teha klaasid Kuu suurelt nägemiseks.» On teada, et Vinci oli kaugnägelik, ja sel juhul on põhimõtteliselt võimalik teleskoopiline, suurendav optiline süsteem üles ehitada ühe kumerläätse baasil — kaugnägev silm ise kujutab endast nõguslääts elist okulaari! Kas teadlane sel kombel tõesti suurendatud taevakehade kujutisi nägi, pole kindlaks tehtav.

1538. aastal kirjutas Fracastoro: «Prilliklaasid pannakse nii ritta, et kui läbi nende Kuud või mõnda teist taevakeha vaadata, siis ei ole see kaugemal tornitippudest.» 16. sajandist pärinevais Johann Baptista della Porta optikaalastes töödes mainitakse samuti pikksilma moodustavat läätsede kombinatsiooni, kuid sedavõrd ebamääraselt, et pole võimalik otsustada, kas pikksilm tegelikult ehitati või mitte.

Küllalt kindlad andmed teleskoobi leiutamise kohta pärinevad 16.—17. sajandi vahetuselt. Nii väidetakse, et keegi itaallane valmistanud enne 1590. aastat teleskoobi ning ehkki leiutist ümbritsenud saladuskate, levinud teade sellest kiiresti üle kogu maailma. Edasi on teada veelgi täpsemalt, et 1608. aastal ehitas teleskoobi Hollandi linnakeses Middelburgis prillimeister Hans Lipperhey. Galilei andmete kohaselt valis Lipperhey läätsi ning vaatas kaugel asuvat eset juhuslikult läbi kahe, kumer- ja nõguslääts e. Optikuna mõistis ta kohe, et teatud läätsede kombinatsioonid mõjuvad kaugete esemete vaatlemisel suurendavatena.

Teise Middelburgi prillimeistri, Zacharias Janseni poeg tõendas, et tema isa valmistanud teleskoobi sama skeemi kohaselt juba 1604. aastal. Umbes samal ajal koostas teleskoobi veel kolmas hollandlane — J. Adriaanszon-Metius. Metiuse kohta väidetakse, et teda tõuganud sellele leiutisele lapsed, kes prilliklaasidega mängides näinud äkki läbi kahe klaasi (kumera ja nõgusa) kauget linnatorni lähedasena ning suurendatult.

Galileo Galilei valmistas esimese «hollandi toru» Paduas (Põhja-Itaalias) 1609. aastal. Ta sai rahuldava kvaliteediga suurendatud kujutise. Pikksilma ja selles avaneva vaatepildi demonstreerimine Püha Markuse tornis Veneetsias jättis Galilei kaasaegsetele põrutava mulje. Galilei nimi sai laialt tuntuks nii Itaalias kui ka väljaspool selle piire. «Hollandi toru» hakati hiljem Itaalia filoloogi Demiziani ettepanekul nimetama teleskoobiks (kreeka keeles *tele* — kauge, kaugus, *skopeo* — vaatan, näen). Galilei kasutas 1610. aastal ilmunud töös veel ladina päritoluga sõna «perspektiiv» (ladina keeles *perspicillium*) või itaaliakeelset sõna *occhiale* — silmatoru, okulaar, vaatetoru. Tähtis on aga just see, et pikksilmade valmistajad, meistrid ja teadlased eesotsas Galileiga taipasid uusi riistu suunata taevasse. Enne Galileid tegid astronoomilisi vaatlusi teleskoobiga inglane Thomas Harriot ja sakslane Simon Mayer, kuid kummagi vaatluste väärtus ei küündinud Galilei tööde tasemele.

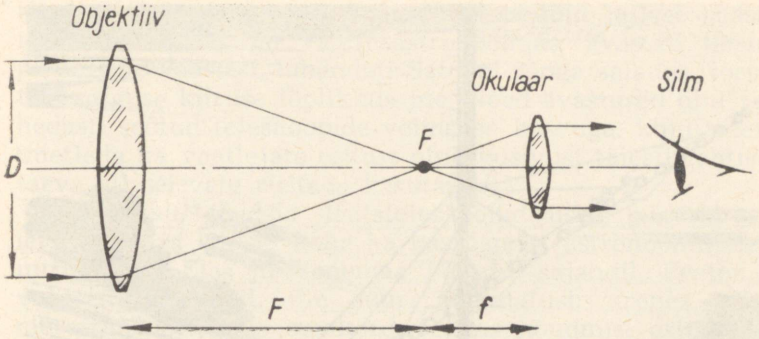
Teleskoop koosneb objektiivist ja okulaarist (ladina keeles *objectum* — ese, *ocularis* — silmapoolne). Esimeste teleskoopide objektiiv oli tasakumer lääts, okulaar — tasanõgus lääts, hiljem hakati kasutama samas skeemis kaksikkumerat ja kaksiknõgusat läätse. Galilei kõige esimesel riistal oli objektiivi läbimõõt 4 cm ja toru pikkus 50 cm, suurendus kolm korda. Varsti valmistas ta aga riista objektiivi läbimõõduga 4,5 cm ja tinatoru pikkusega 125 cm, mille suurendus oli juba 32 korda (32×). Kaks Galilei teleskoopi 1,4 cm ja 4,4 cm läbimõõduga objektiividega ning umbes ühe meetri pikkuste kartongtorudega (ühisel alusel) asuvad praegugi Firenze ajaloomuuseumis. Galilei pikksilma eelisteks olid suhteline lühidus (objektiivi ja okulaari fookuskauguste vahemaa oli väike), väikesed valguskaod õhukestes läätsedes ja päripidine kujutis. Puudustena peab nimetama väikest vaatevälja (umbes veerand Kuu läbimõõtu), objekti ebakujutist, mis ei võimaldanud torusse asetada viseerimiseks vajalikku niitristi, ja läätsede parandamatutest vigadest tingitud halba kujutist.

Galilei elas ja töötas teaduse ja kultuuri üldise tõusu perioodil, millal algas progressiivse teaduse võitlus loodusnähtuste materialistliku seletamise eest teadusliku

analüüsi, vaatluse ja katse kaudu. Aristotelese, Ptolemaiose ja Galenuse õpetusi dogmaatiliselt kordavad, piiratud silmaringi ning mõtlemisvõimega keskaegsed õpetlased sunniti taganema. Galilei avastused andsid otsustava löögi keskaegsusele astronoomias. Juba 1610. aastal avastas Galilei neli Jupiteri kuud, millele hiljem anti nimeks Io, Europa, Ganymedes ja Kallisto. Uurides kuude liikumist püüdis Galilei lahendada tolle aja kõige olulisemat probleemi — varem väljaarvutatud liikumisteede ehk efemeriidide ja vahetute vaatluste kaudu õppida määrama geograafilist laiust merel. Samal aastal avastas ta veel kraatrite olemasolu Kuul, Veenuse faasid ja Päikese laigud. Vaatlustulemustest koorus välja Koperniku heliotsentrilise süsteemi õigsus. Galilei pikksilmad lahutasid Linnutee heledad laigud esmakordselt üksikuteks tähtedeks, näitasid Plejaadides (Sõelas) kuue-seitsme silmaga nähtava tähe asemel kolmekümmend kuut. Tähtede asendite määramisel katsetas Galilei teleskoobi okulaari külge monteeritavat mikromeetrilist mõõteseadet, tänapäeva okulaarmikromeetri prototüüpi.

Pärast inkvisitsioonikohut elas Galilei villas Firenze lähedal ja sai inkvisiitorite valve all vaevu veel töötada. Kuid tehtugi oli juba rikastanud inimkonna teadmisi päikesesüsteemist ja tähesüsteemidest. Mitmed tähistaeva saladused muutusid mõistetavaks ega kutsunud enam esile imestust või hirmu. Silmaring taevas avardus nende sõnade otseses mõttes. Edukaid vaatlusi tegid Galilei ajastul ka teised astronoomid. S. Mayer avastas 1612. aastal Andromeeda udukogu; tänapäeval teame, et tegemist on gigantse tähesüsteemiga, mis asub enam kui miljoni valgusaasta kaugusel ja meenutab meie Galaktikat (Linnuteed). 1618. aastal avastas šveitslane J. Cisot Orioni vöös suure udukogu, mida hiljem, 1656. aastal uuris H. Huygens. 19. sajandi spektroskoopilised vaatlused selgitasid, et tegemist on gaasuduga.

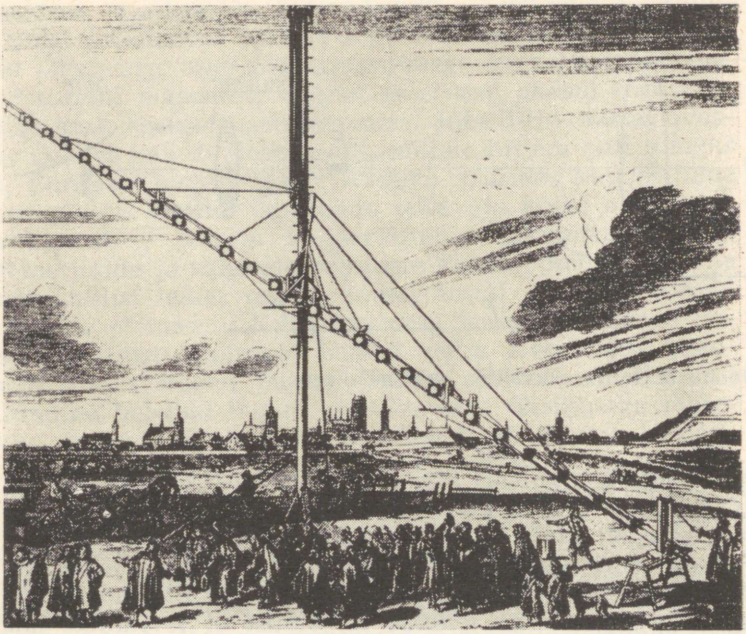
Galilei ajastul töötas veel kuulus saksa teadlane Johann Kepler, kes lõi Galilei pikksilma matemaatilise teooria ning esitas omapoolse, täiuslikuma optilise skeemi, milles ta okulaarina soovitas kasutada kaksikkumerat läätse (joonis 3). Kumerläätselised või sellele lähedased on enamik teleskoopide okulaare kaasajalgi. Kepleri skeemi kohaselt ehitas aastatel 1613—1617 esimese teleskoobi H. Schneider. Saadi hea kujutis, suurem vaateväli ja ava-



Joonis 3. Galilei pikksilma optiline skeem.

nes võimalus okulaari ette paigutada hästi nähtav niitrist. 1640. aastal lisas inglane W. Gascoigne niitristile mikromeeterkruvi abil nihutatava mõõteniidi, mõõtes sellega Päikese ning Kuu nurkläbimõõdud ja mitmete lähedaste kaksiktähtede omavahelised nurkkaugused Plejaadides. Et aga Gascoigne oma leiutise kirjeldust ei levitanud, siis leiutasid okulaarmikromeetri järgneva paarikümne aasta jooksul temast sõltumatult veel mitu astronoomi. Alles 1659. aastal kirjeldas Huygens seda põhjalikult.

Kepleri pikksilma hakati hiljem nimetama astronoomiliseks, ta tõrjus oma täiuslikkusega Galilei pikksilma üsna ruttu välja. Maapealsete vaatluste puhul oli puuduseks ümberpööratud («jalad ülespidi») kujutis, astronoomilistel vaatlustel polnud sellel muidugi vähimatki tähtsust. Püüdes katseliselt parandada kujutist ja tõsta riistade suurendust, hakati 17. sajandil pikendama teleskoopide torusid ilma objektiivide läbimõõtu eriti suurendamata. Nii ehitas poolakas J. Hevel 1673. aastal Danzigis 45 meetri pikkuse fookuskaugusega pikksilma, mille objektiivi läbimõõt oli 20 cm (joonis 4). Teleskoobitoru kinnitusmast oli 27 meetrit kõrge. Kahjuks hävis see riist suure Danzigi tulekahju ajal 1679. aastal. Objektiive fookuskaugustega 37,5 m, 40 m, 55 m ja 64 m kasutasid oma teleskoopides veel hollandi optik ja astronoom H. Huygens, A. Auzout Prantsusmaalt, E. Divini ja D. Campani Itaaliast ja mitmed teised. Astronoomidele ja teleskoobiehitajaile oli selgeks saanud, et taevakehalt teleskoopi sattuva valguse



Joonis 4. Heveli ehitatud läätsteleskoop ($F = 45$ m) Danzigis 1673. aastal.

hulk on võrdeline objektiivi pindalaga, järelikult tema läbimõõdu ruuduga (D^2), suurendus aga on objektiivi ja okulaari fookuskauguste (vt. joonis 3) suhe $G = F:f$. Suhtelist ava $\frac{D}{F}$ suurendada ei olnud soovitatav, sest valgusjõulisem objektiiv oleks olnud väga suurte optiliste vigadega ja moonutanud kujutist, seepärast jäi üle vaid mõlema, nii D kui ka F suurendamine. Pikad torud ei võimaldanud pikksilmi 17. sajandil küllalt liikumatult paigal hoida ja taevakehadele suunata. Vaatlused, eriti tuulise ilmaga, nõudsid astronoomidelt suurt osavust ja jõudu. Vaatlustingimuste parandamiseks hakati Prantsusmaal, Inglismaal ja teistes maades ehitama nn. õhkteleskoope, milles objektiivi ja okulaari ühendavat toru polnud olemas: mõlemad kinnitati eraldi postidele. 1724. aastal valmistas sellise «õhkteleskoobi» Isaac Newton; objektiivi läbimõõt oli 20 cm ja fookuskaugus 50 m. Optiliselt olid

need riistad varasematest paremad ja tõid jällegi kaasa rea uusi edusamme vaatlusastronoomias: avastati teiste planeetide kaaslasi, lahendati Saturni rõnga saladus, tõestati valguse kiiruse lõplikkus jne. Need avastused olid tihedasti seotud teleskoopide võimsuse kasvuga, kuid tuleb imetleda ka vaatlejate oskust ning püsivust täiesti lahtise taeva all seisvate riistade kasutamisel.

Venemaale jõudsid läätsteleskoobid üsna pea pärast leiutamist ja leidsid kohe ka kasutamist astronoomilistes uurimustes. Elas ju Venemaa 17.—18. sajandil, Peeter I valitsemisperioodil, üle suuri muudatusi; arenes eriti meretransport, mis omakorda esitas nõudmisi astronoomiale. Esimese observatooriumi organiseeris aastail 1692—1696 Holmogorõs A. A. Ljubimov, selles tehti vaatlusi läätsteleskoopidega. Peterburi lähedal vaatles oma suvilas Feofan Prokopovitš, kes hiljem töötas vaatlejana ka A. D. Menšikovi observatooriumis Oranienbaumis. Viimane organiseeriti aastatel 1711—1725 ja oli riistadega hästi varustatud, ajuti käis seal vaatlemas ka Peeter I ise.

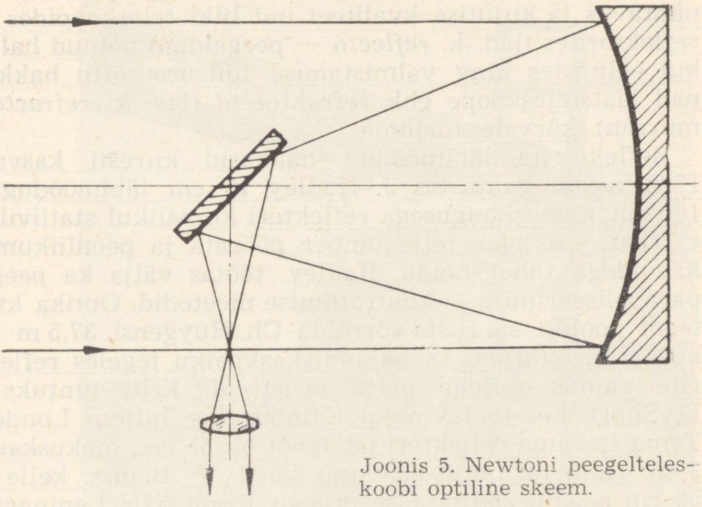
Peeter I kaaskondlastest soodustas astronoomia ja teleskoobiehituse arengut Venemaal eriti just J. V. Brjuss. Ta sisustas astronoomiaobservatooriumi Suhharevi torni Moskvas, kus alates 1700. aastast 15 aasta jooksul vaatlusi tehti. Spetsiaalses koolis õpetas ta samal ajal noortele astronoomiat, sealhulgas ka teleskoobiga vaatlemise tehnikat. Erruläinuna asutas Brjuss observatooriumi oma Moskva-lähedases mõisas. Selle observatooriumi sisseseadet pidas prantsuse astronoom Lalland oma aja parimaks. Seejuures osa läätsteleskoope Brjussi observatooriumis oli valmistanud vene meister I. I. Kalmõkov. Pärast Brjussi surma läksid vaatlusriistad Peterburi Teaduste Akadeemia käsutusse (üks teleskoopidest asub praegu Leningradis Ermitaažis).

Brjuss tundis huvi eelkõige virmaliste ja Päikese laikude vastu ning määras uuesti Päikese pöörlemisperioodi. Päikese laigud projitseeris ta läätsteleskoobiga ekraanile ning tutvustas sellise vaatlemisviisiga ka Peeter I.

16. sajandi lõpul ja 17. algul levisid läätsteleskoobid kõikjal. Kuid peagi õppisid astronoomid ja optikud tundma üksikläätsobjektiivide tehnilisi piire: kui ei tahetud, et optilised vead ehk aberratsioonid kujutist kahjustaksid, sai ehitada vaid väga nõrga valgusjõuga riistu. Kvaliteetse kujutise saamiseks pidi näiteks 20-sentimeetrise läbimõõduga objektiivi fookuskaugus olema 300 m, ühemeetrise läbimõõdu korral aga 7,5 km! Näiteks ühe Saksamaal lihvitud 80-sentimeetrise läätsobjektiivi poolt koondatud päikesekiirtega võis fookuses sulatada küll portselani ja teemante, kuid kujutised tekkisid üsna ähmased ja vikerkaarevärvilise oreooliga (kromaatiline aberratsioon). Omajagu oli süüdi klaasi ebaühtlus. Enam-vähem korralikku aknaklaasi hakati keetma alles 13. sajandil, kuid astronoomiariistade optika tarbeks osutus see ikka veel ebaühtlaseks. Erisortidest tunti vaid kergeid klaasisorte õige väikese metallisisaldusega, mida tänapäeval liigitatakse kroonklaaside hulka.

Peale puhtoptiliste takistuste (klaasi ebaühtlus, pindade madal lihvimistäpsus, optilised vead ehk aberratsioonid) segasid astronoome ja teleskoopide konstruktoreid paremate ning võimsamate riistade loomisel veel ehitusraskused (pikafookuseliste riistade kohmakus ja suur kaal, tuule mõju jne.). Peaaegu samal ajal läätsteleskoopide ilmumisega tehti ettepanekuid objektiivina kasutada nõguspeegleid. 1616. aastal koostas itaallane N. Zucchia lihtsaima peegelteleskoobi skeemi: nõguspeegel oli objektiiviks ja kumerlääts okulaariks. Sellist riista olevat ta ka katsetanud. 1663. aastal töötas šotlane D. Gregory teoreetiliselt välja objektiivi, mis koosnes kahest nõguspeeglist. 1672. aastal esitas prantsuse skulptor F. Cassegrain veel ühe skeemi, mille järgi objektiiv koosnes suuremast paraboolsest peapeeglist ja väiksemast hüperboolsest abipeeglist. 1674. aastal ehitas R. Hooke Gregory skeemi kohaselt kahe nõguspeegliga teleskoobi valmis ja sellest peale algas nende riistade hoogne areng.

Taevasse suunas peegelteleskoobi esmakordselt 1672. aasta paiku Isaac Newton. Peegelteleskoobi ehitamisele viis teda eksitus. Newton jõudis nimelt järeldusele, et mitte mingisugune klaaside kombinatsioon ei saa anda värvusvigadest vaba (akromaatilist) läätsobjektiivi. Liht-



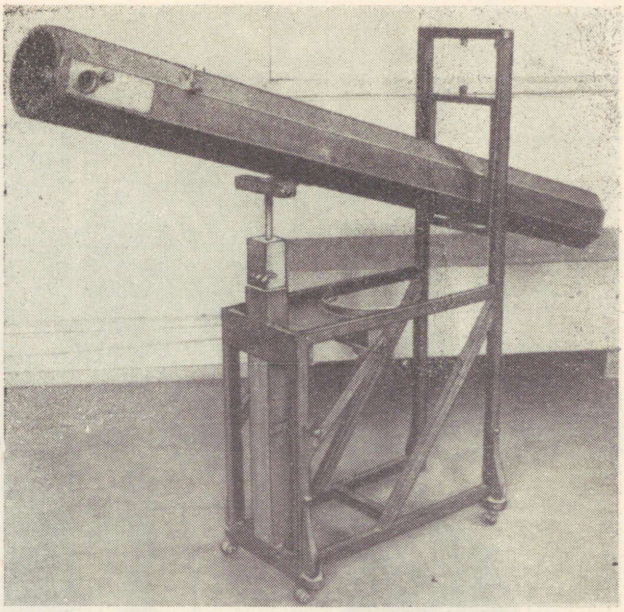
Joonis 5. Newtoni peegelteleskoobi optiline skeem.

sale, ühest nõguspeeglist objektiivile lisas Newton fookuse ette väikese kaldu tasapeegli ja juhtis sel teel kiired torust välja — muidu poleks vaatlejal olnud võimalik pead okulaari juurde panna (joonis 5). Newtoni peegelteleskoopi on üldiselt palju kergem valmistada kui läätsteleskoopi, ent õige nõguspeegel peab kindlasti olema paraboolse kujuga. Käsitsi lihvimisel saadakse aga alati sfäärilised nõguspeeglid. Sellele järgneb «paraboliseerimine»: peeglit tuleb teatud tsoonis üsna veidi süvendada, õige ettevaatlikult ja tihti kontrollides töö tulemusi. Newtoni ajal puudusid optilised meetodid peeglite kontrollimiseks ja kõik tema valmistatud peeglid olid sfäärilised. Arvutused näitavad, et kui suhtelised avad ei ületa teatud piiri, siis võib paraboolse peegli asemel tõepoolest võtta sfäärilise ja kujutise vead on tühised. Newtoni esimestel teleskoopidel oli see tingimus täidetud ning järelikult oli antud juhul peegli asendamine lubatud. Kahjuks jõudis teadlane selle põhjal ekslikule järeldusele, nagu võiks peeglid alati sfäärilise kujuga teha. Suurema peegeldusvõime saamiseks valmistas Newton oma peeglid nn. peegelpronksist (67% vaske ja 33% inglistina). Üks tema reflektoreid on praegugi hoiul Inglise Kuningliku Ühingu raamatukogus ning kannab silti «Leiutatud Isaac Newtoni poolt ja valmistatud tema enese kätega 1671. a.». Taeva

nähtavus ja kujutise kvaliteet uut liiki teleskoopides ehk reflektorites (lad. k. *reflecto* — peegeldan) polnud halvem kui eelmistes ning valmistamise lihtsuse tõttu hakkasid nad läätsteleskoope ehk refraktoreid (lad. k. *refracto* — murran) kõrvale tõrjuma.

Reflektorite läbimõõdud hakkasid kiiresti kasvama. 1722. aastal valmistas J. Hadley 15 cm läbimõõduga ja 160 cm fookuskaugusega reflektori korralikul statiivil, nii et riista sai kahe telje ümber pöörata ja peenliikumisekruvidega tähel hoida. Hadley töötas välja ka peeglite paraboliseerimise ja kontrollimise meetodid. Optika kvaliteedi poolest sai riista võrrelda Ch. Huygensi 37,5 m pikkuse refraktoriga. 18. sajandi keskpaiku tegeles reflektorite valmistamisega palju meistreid. Eriti tuntuks sai D. Short, kes töötas algul Edinburghis, hiljem Londonis. Tema suurima reflektori läbimõõt oli 55 cm, fookuskaugus 3 m. Häid tagajärgi saavutas ka J. V. Brjuss, kelle üht 50 cm peeglit säilitatakse praegu Ermitaažis Leningradis. Sellega nägi valmistaja küllalt peeni detaile Kuul. Brjussi uurimisi jätkas M. V. Lomonossov, keda abistas terve grupp oskuslikke meistreid.

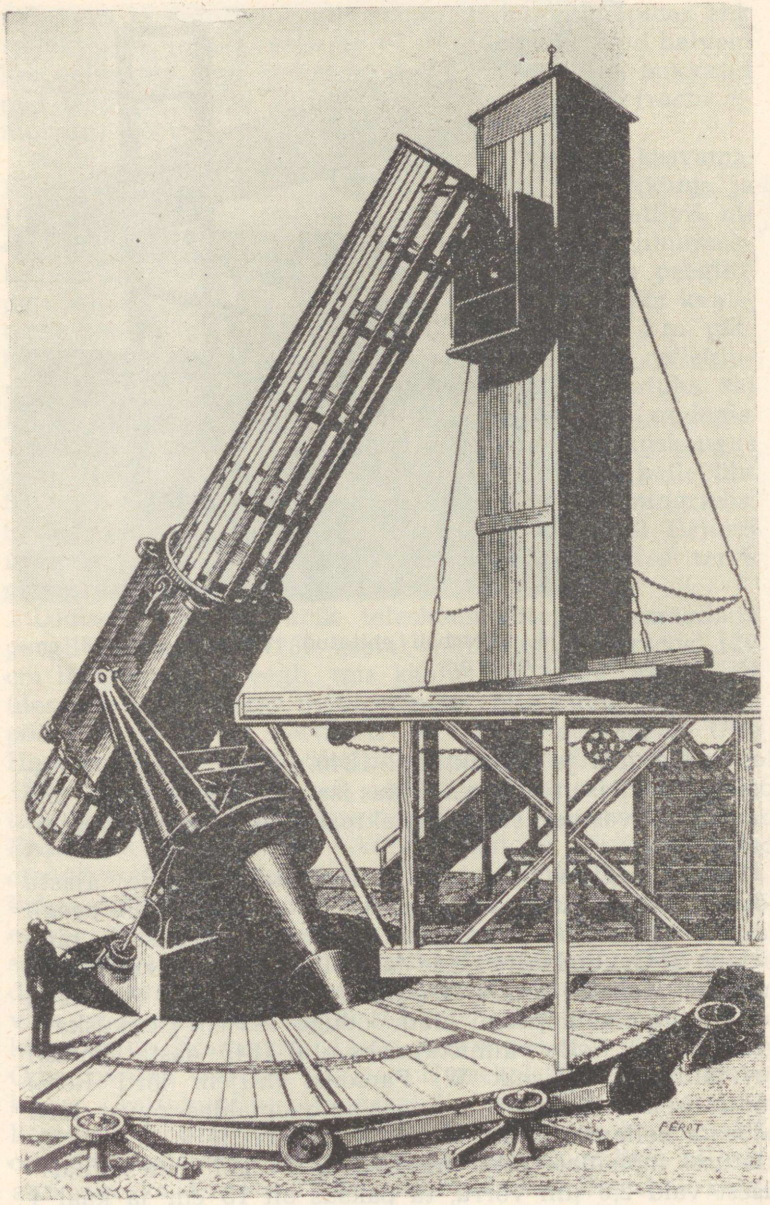
Üldiselt püüdsid kõik teleskoobiehitajad suurendada peeglite läbimõõtu. 1789. aastal valmistas W. Herschel 122 cm läbimõõduga peegli, mis kaalus ligi tonni. Peegel oli üles seatud keerukas monteeringus, mis kindlustas tema pööratavuse ümber vertikaal- ja horisontaaltelgede. Ühe Herscheli töökodades ehitatud väikese reflektori muretses 1806. aastal Tartu ülikool, see oli varustatud 16 cm metallpeegliga ja töötas Newtoni optilise skeemi kohaselt. Enam kui kahe meetri pikkune puutoru kinnitus üsna omapärasele neljajalgsele alusraamile, kuid oli siiski kahes teljes teatud piirides pööratav ja seda isegi kahe erineva ülekandega vända abil (joonis 6). Tartu tähetornis seisab see 18. sajandi lõpu teleskoobiehituse tehnilist taset demonstreeriv riist praegu muuseumiesemena. Võib arvata, et see on ainus William Herscheli valmistatud teleskoop, mida Nõukogude Liidu territooriumil sälitatakse. Oma parima riistaga avastas Herschel Kaksikute tähtkujus kettakujulise taevakeha, mis pisut meenutas komeeti. Vene astronoom A. I. Leksel tõestas, et tegemist on päikesesüsteemi seitsmenda planeediga, millele hiljem anti nimeks Uraan. 1787. aastal avastas Herschel kaks Uraani kaaslast; oma suurima riistaga (D = 122 cm) vaat-



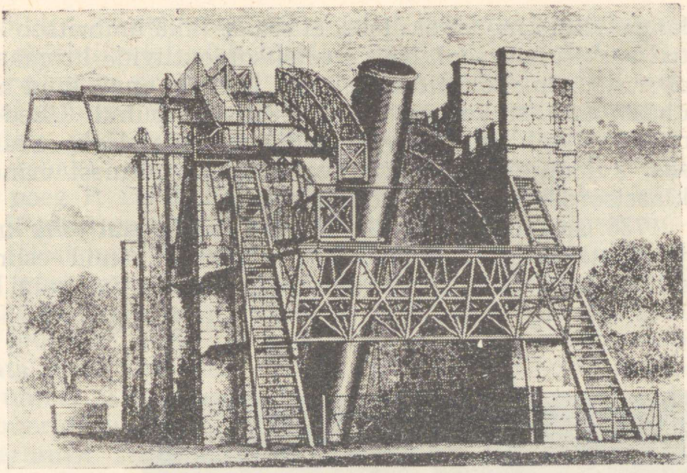
Joonis 6. Herscheli ehitatud reflektor ($D = 16$ cm) Tartu tähetornis.

les ta Saturni ja kaksiktähti. 1840. aastal muutis väljapaistva teadlase poeg, kes jätkas isa vaatlusseeriaid ja tegi mitu uut avastust, suure reflektori oma isa mälestussambaks.

Pronkspeeglitega suurte reflektorteleskoopide ajastu lõppes kolme riista valmimisega. Neist kahel oli peegli läbimõõt 122 cm (valmistasid inglane W. Lassell ning iirlane T. Grubb Malta saare ja Melbourne'i observatooriumidele). Kolmas, nn. «Parsonstowni Leviathan» (joonis 8) oli tõeline gigant peegli läbimõõduga 182 cm (fookuskaugus 15,8 m). Selle valmistajateks olid 1845. aastal lihtsad iiri talupojad mõisnik W. Parsonsi (hiljem lord Ross) juhtimisel. Reflektori monteering võimaldas puust toru pöörata kellamehhanismiajamiga vertikaaltelje ümber 10° ulatuses mõlemale poole meridiaani. Peegel erines sfäärilisest vaid 2,6 μm võrra, ta paksus oli 15 cm ja kaal 4 tonni. Läbipaindumist vältisid 27 toetuspunkti peegli taga-



Joonis 7. Lasselli-Grubbi suur reflektor ($D=122$ cm, $F=11$ m) Malta saarel 1861. aastal.



Joonis 8. Parsonsi (lord Rossi) suur reflektor «Parsonstowni Leviathan» ($D = 182$ cm, $F = 16$ m) 1845. aastal.

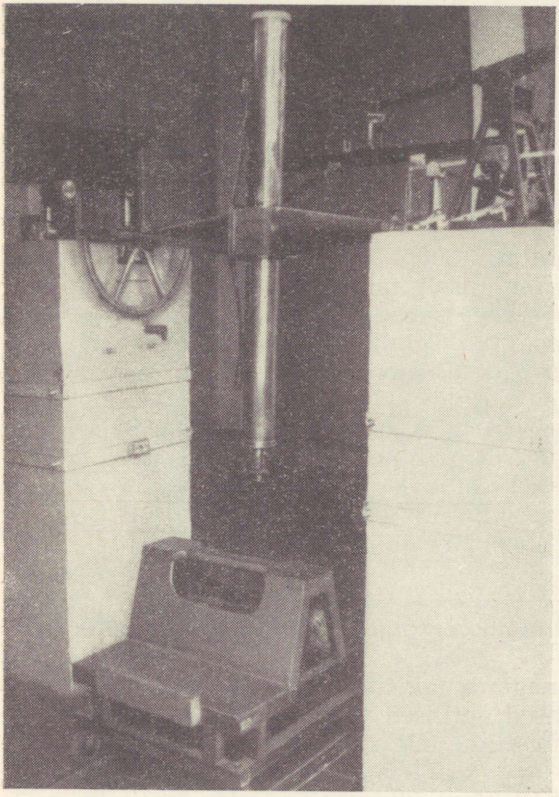
küljel. Kasutati kuni 1300× suurendusi. Kuigi kaks esimest riista olid tehniliselt täiuslikumad, tehti ka «Parsonstowni Leviathaniga» teadusliku väärtusega avastusi, näiteks fikseeriti mitme udukogu spiraalstruktuur. Kuid neile pandud suuri lootusi nood metallpeeglite ajastu viimased gigandid ei täitnud — liiga ruttu tuhmusid peegelpinnad, muutus peeglite kuju ning ka monteeringud olid kaugel täiuslikkusest. Astronoomide tähelepanu suundus jälle refraktoritele, sest vahepeal oli klaasivalmistamisel tehtud paljutõotav tehniline edusamm: oli õpitud keetma flintideks nimetatavaid raskeid klaasisorte.

● fraunhoferi objektiividest hiiglarefraktoriteni

Nagu eespool nägime, takistasid läätsteleskoopide arendamist neile omased optilised vead (aberratsioonid), sealhulgas eriti kromaatiline aberratsioon. Kromaatilise aberratsiooni põhjuseks on erineva lainepikkusega valguskiirte erinev murdumine klaasläätsedes, mistõttu näiteks punaste ja siniste kiirte jaoks läätse fookused kokku ei

lange. Kuhu me ka okulaari ei seaks, ikka ümbritseb kujutist värviline oreool. Näis, et läätsobjektiivide kromaatilist aberratsiooni kõrvaldada ei saa. Nii see ongi, kuid ainult ühest läätsest koosnevate objektiivide puhul. Uued võimalused optiliste värvusvigade parandamiseks avanesid siis, kui objektiive hakati valmistama mitmest erinevast klaasisordist valmistatud läätsedest.

1733. aastal soovitas Ch. M. Hall Inglismaal teha kroon- ja flintklaasist kaheläätselise objektiivi, kuid esimesed selliste objektiividega refraktorid ei õnnestunud kuigi hästi. 1742. aastal tõestas kuulus Peterburi matemaatik Leon-



Joonis 9. Dollondi passaažiriist Tartu tähetornis.

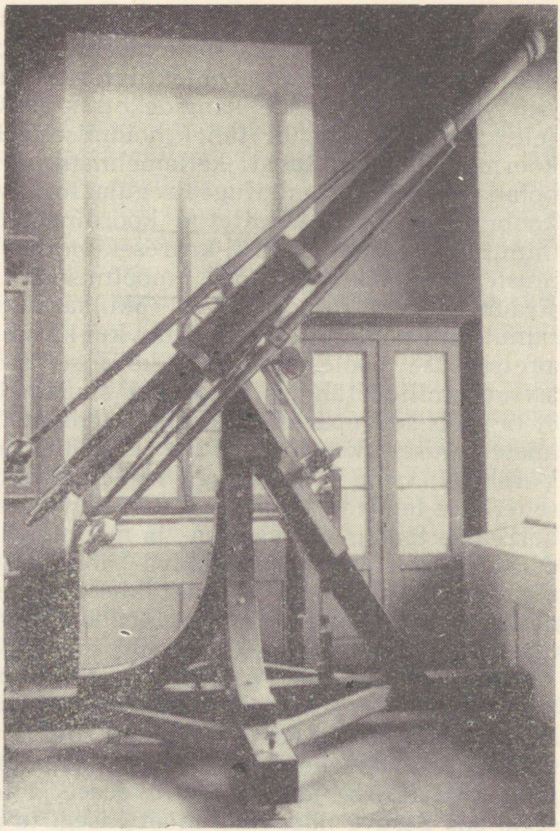
hard Euler, et erinevast materjalist läätsedest kombineeritud objektiividel võib tõesti kaotada värvusvead. Neid ideid rakendas praktiliselt D. Dollond ja 1758. aastal valmis tal esimene kroon- ja flintklaasist läätsedest koosnev objektiiv, mida võis nimetada akromaadiks (värvusvigadest vabaks objektiiviks). Objektiive täiustasid veelgi tema poeg P. Dollond ja sugulane D. Ramsden, kes kõik koos jõudsid ehitada üsna palju akromaatsete objektiividega teleskoope. Dollondi firma ehitas ka Tartu ülikooli jaoks veel enne Toomemäel asuva tähetorni valmimist passaažiriista (joonis 9). Selle objektiivi läbimõõt on 11 cm ja ta muretseti õige aja määramiseks. Passaažiriista saab pöörata ainult ida-lääne suunas orienteeritud horisontaaltelje ümber ja seega saab temaga vaadelda üksnes täpselt taevameridiaanil asuvaid objekte, s. o. taevakehade kulmineerumist. Teades tähtede kulminatsioonimomente, võib kelli vaadeldavate kulminatsioonimomentidega võrreldes saada kellade näitude parandid. W. Struve alustatud vaatlusi Dollondi passaažiriistaga 1814. aastal loetakse astronoomiliste vaatluste alguseks Tartu tähetornis. Dollondite tegevus avas läätsobjektiividele uuesti suured väljavaated. Objektiive hakati kombineerima erinevatest klaasisortidest kumer- ja nõguslääätsede ühendustena, ja kaheläätselisel objektiivilgi vähenes kromatism vaid mõne protsendini sellest, mis ta oli üheläätselistel objektiividel. Oli aga täiesti ilmne, et need tähendasid alles esimesi samme mitmekomponendiliste optiliste süsteemide loomisel. Dollonditel ei õnnestunud kromatismist lõplikult vabaneda, vaatlustel näisid tähed siiski veidi vikerkaarevärvilistena. Alles klaasivalmistamise tehnika arenedes saadi objektiive veelgi parandada. Erakordselt edukas oli sakslase Joseph Fraunhoferi tegevus, kes oma suurepäraste akromaatidega tõepoolest «lähendas tähti», nagu seisab tema hauamonumendil. Joseph Fraunhofer seisis kaua Müncheni optikafirma «Fraunhofer-Utzschneider» eesotsas, tema esimeseks suuremaks tööks aga oli teleskoop Tartu tähetornile. See sai Fraunhoferi tõeliseks meistriteoseks, mida «Fraunhoferi Tartu refraktori» nime all kirjeldatakse kõigis astronoomia ja teleskoopide ajaloo kursustes. Fraunhoferi nime kandis kaua üks paremaid kaheläätseliste akromaatobjektiivide skeeme: eespool kaksikkumer kroonklaasist lääts ning selle vastas nõguskumer hajutav flintklaasist lääts. Vastamisi seisvate pindade võrdse kõverusraadiuse

korral võis läätsed omavahel kokku liimida läbipaistva kanada palsamiga.

Friedrich Georg Wilhelm Struve sai Tartu tähetorni astronoom-vaatlejaks 1813. aastal. Seni polnud paar aastat tagasi valminud uues tähetornis Toomemäel veel midagi olulist korda saadetud ja isegi põhiline instrument — Dollondi passaažiriist — seisis lahti pakkimata kastides. Struve seadis passaažiriista üles, uuris teda ning asus vaatlema. Seoses järgmise vaatlusriista — Reichenbachi meridiaanringi muretsemisega juhtus Struve ühel Saksamaa-reisil ka Fraunhoferi Müncheni töökotta, kus ta nägi aastatel 1818—1819 valmistatud 24 cm akromaatobjektiivi. Seda oli auhinnatud Baieri tööstusnäitusel ning ka Struve kirjutas ehitatavast teleskoobist vaimustusega: «Ma nägin sellise suurusega akromaatilist teleskoopi, millist inglased kunagi pole riskinud saavutada, ja mis seejuures on valmistatud suurima püüdlikkusega ja täiuslikkusega kõikides üksikosades.» Riist telliti Tartu tähetornile, kuid tema valmimiseni kulus veel mõni aasta. 1824. aastal seadis Fraunhofer teleskoobi selle monteeringu ning käigu kontrollimiseks üles ühes Müncheni kirikus, mis kujunes omamoodi sensatsiooniks. Mõni kuu hiljem saadeti lahtivõetud ja 21 suurde kasti pakitud instrument Tartusse. Kaaskirjas märgib Fraunhofer, et selle valmistamiseks kulutati 900 puuda messingit, 400 puuda rauda ja terast ning 250 puuda tina.

Et torn polnud Tartus veel valmis, siis seadis Struve refraktori ajutiselt üles observatooriumi läänesaali. Montaaž oli hästi ette valmistatud ning seetõttu lõpetas ta töö viie päevaga; 1824. aasta jõululaupäeva õhtuks seisis «Tartu refraktor» kasutamisvalmina, ja samal ööl tegi Struve temaga esimesed vaatlused. 24,4 cm (9-tollise) läbimõõdu ja 4,34 m fookuskaugusega ületas ta kõik senised maailma akromaatilised läätsteleskoobid (joonis 10).

Enne Fraunhoferit ei suutnud keegi seada sellise suurusega riista üles ekvaatorilises monteeringus ja varustada kellamehhanismiga tähtede ööpäevase liikumise jälgimiseks. Eelmise, mainituga lähedase monteeringuga riista valmistas Münchenis Reichenbach, see oli 7-tolline refraktor Naapoli observatooriumile, kuid seda instrumenti polnud üldse võimalik pooluse ja seniidi vahele suunata. Fraunhofer lahendas ekvaatorilise monteeringuga seotud probleemid hiilgavalt, ja Tartu refraktor sai kaasaegsete, nn.



Joonis 10. Fraunhoferi refraktor ($D = 24{,}4$ cm, $F = 4{,}34$ m) Tartu tähetornis.

saksa monteeringute algkujuks, selle konstruktiivseid lahendusi kopeeriti aastaid. Statiiv on ehitatud 20 cm paksustest mahagonkattega kandilistest tammepalkidest: kahel ristpalgil seisab püstsammas ning selle küljes maailma teljega rööbiti seatud palk. Hea statiivi muutis vaatlusel küll pisut ebamugavaks ristpalkidele komistamise võimalus, kuid paremini oleks teda omal ajal vaevalt õnnestunud konstrueerida. Teleskoobi 4,5 m pikkune toru on puust. Et statiiv liiga kõrgeks ei läheks, selleks on toru

ja statiivi ühenduskoht toru raskuskeskmest pisut okulaari poole nihutatud. Tasakaalustamiseks ja toru läbipaindumise vältimiseks on osa objektiivi raskusest viidud okulaari lähedale pikkade kangide otsas asuvatele koormistele. Ajam teleskoobi tähel hoidmiseks kujutab endast koormistega käitatavat kellamehhanismi, mille kiiruse hoiab püsivana tsentrifugaalregulaator. Mõlemale teleskoobi teljele olid kinnitatud koordinaatringid 10-kaareminutiliste jaotistega ja 5-kaaresekundilise täpsusega nooniustega. Kaksiktähtede mõõtmiseks komplekteeris Fraunhofer refraktorile veel okulaarmikromeetrid, mis samuti nii põhimõttelise uudsuse kui ka oma valmistamise pretsiissuse poolest ületasid kõik senised. Instrumendi astronoomiline tähtsus avalduski suurimal määral selles, et ta sobis suurepäraselt kaksiktähtede mõõtmiseks. Mõõtmiste alusel koostas Struve kaksiktähtede kataloogid. Varem oli sama probleemiga tegelnud vaid William Herschel, kes leidis 813 kaksiktähte. Struve arendas tema töid korrektse teadusliku vaatlus- ja mõõtmismetoodika alusel edasi, ning 120 000 vaadeldava tähe hulgast avastas ta algul 3112 kaksik- ja mitmiktähte. Järgnevalt mõõtis ta nende nurkkaugused ja orientatsiooni ning määras isegi täpsed positsioonid (Reichenbachi meridiaanringiga).

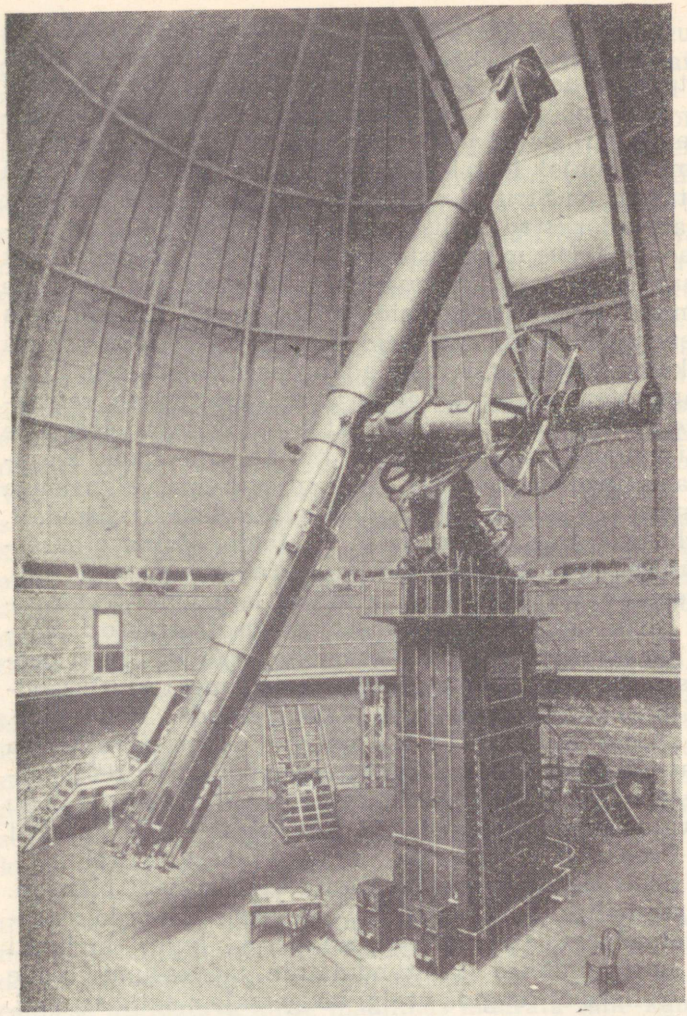
Struve koostas ka Fraunhoferi refraktori üksikasjalise kirjelduse — teadlasevaimustusest õhkuva monograafia, kus ta võrdles seda riista Herscheli suurte peegelteleskoopidega. Kui Herschel võis näiteks kaksiktähe Riigeli nõrka punakat kaaslast jälgida ainult öösel ja teatud pingutusega, siis Struve nägi ning mõõtis isegi ta asendit, ja seda kõike lausa päeva ajal.

Tartu refraktor sai kogu maailmas tuntuks veel seetõttu, et Struvel õnnestus määrata tähtede kaugusi Maast nende parallaksi mõõtmise kaudu. Kaksiktähtedele pühendatud töö «Mensurae micrometricae» 14. peatükk sisaldas esimese usaldatava katse maailmas määrata tähe kaugust. Et Maa tiirleb ümber Päikese, siis näeme lähemaid kinnistähti taevavõlvil õige pisut liikuvat: nad joonistaksid taevasse nagu vähendatud pildi Maa orbiidist ehk paralaksiellipsi. Teades ellipsi suure pooltelje nurksuurust (tähe parallaksi), saame arvutada tähe kauguse päikesesüsteemist, sest Maa orbiidi suure pooltelje pikkus on teada. Kõik varasemad mõõtmiskatsed jäid aga tagajärjetuks, kuna tegemist on väga väikeste nurkadega. Struve

valis 17 tähte, mida ta luges suhteliselt lähemateks ja mille parallaksi ta arvas nende suhtelise läheduse tõttu olevat suurema kui kümnendik kaaresekundit. Aastatel 1835—1838 mõõtis ta hoolikalt heleda tähe Veega positsioone ja sai parallaksi suuruseks 0″, 125. (Praeguste mõõtmiste põhjal loetakse Veega parallaksiks 0″, 123; nii suur täpsus oli Struvel osalt juhuslik kokkusattumus, sest kasutatavad riistad sellist täpsust ei oleks tohtinud võimaldada.) Struve mõõtmistest selgus, et Veega asub Maast ääretult kaugel — 26 valgusaastat. Järgnesid parallakside mõõtmised teiste astronoomide poolt; Bessel Königsbergis ja Henderson Kaplinnas said aastail 1838—1839 samuti üsna kaasaegsetele väärtustele lähedased tulemused.

Fraunhoferi Tartu refraktor avas teistkordselt refraktorite ajastu. Täiuslikke akromaatobjektiividega teleskoope hakati valmistama nii Euroopas kui ka Ameerikas. Kujutise sama kvaliteedi korral olid nad suurema valgusjõuga ja umbes 16 korda lühemad üheläätselistest riistadest. Münchenis tegid G. Merz ja F. J. Mahler Pulkovo observatooriumile kõrgekvaliteedilise refraktori ($D = 38$ cm), mis seati üles 1839. aastal ja töötas laitmatult terve sajandi. Mõni aasta hiljem sai samasuguse refraktori Harvardi observatoorium. Teleskoopide kõrge kvaliteet peegeldus selles, et tehti avastusi ja kogunes vaatlusandmeid planeetide, komeetide, kaksiktähtede, udude jne. kohta. Ameeriklase A. Clarki ehitatud 46 cm refraktoriga avastas tema poeg A. G. Clark Mississipi ülikoolis 1862. aastal heleda tähe Siiriuse kaaslase, 1892. aastal märgati Licki observatooriumis vaatlustel 91 cm refraktoriga kaaslast tähel Prooküon. Veel tuleks nimetada 1856. aastal I. G. Halle poolt Berliinis avastatud uut, kaheksandat planeeti. Kõik see näitas, et 19. sajandi refraktorid keerasid astronoomiateaduses järjekordse lehekülje, kuhu kirjutati palju uusi andmeid senitundmatute universumi osade kohta. Selleks et tungida veelgi kaugemale maailmaruumi, nõudsid aga astronoomid refraktorite küündivuse edasist tõstmist objektiivide läbimõõtude suurendamise teel.

Möödunud sajandi lõpu hiiglarefraktorite ehitamine algas aastast 1871. Siis astus inglise firma «Cooke & Sons» senisest suurimast refraktorist läbimõõduga 46 cm suure sammu edasi ja lõpetas 63,5 cm läbimõõduga akromaatteleskoobi ehitamise. Edasi ilmus iga aasta või paari tagant kuni sajandi lõpuni üha uusi ja suuremaid läätsteleskoope.



Joonis 11. Maailma suurim refraktor ($D = 1$ m, $F = 20$ m) Yerkesi observatooriumis.

Cooke'ide rekordi lõi juba samal aastal ameeriklane Alvan Clark, kes ehitas Washingtoni jaoks refraktori läbimõõduga 66 cm. Paari aasta pärast kordas ta sama Charlottesville'i jaoks, siis aga õnnestus Howard Grubbil valmistada Viini tähetornile 68 cm objektiiviga refraktor. 1885. aastal haaras maailma suurima refraktori nimetuse Alvan Clarki 76 cm riist Pulkovo observatooriumile. Statiivi konstrueeris Repsoldi firma Hamburgis, aasta hiljem ehitati samasugune teleskoop Nizza observatooriumi jaoks.

Alvan Clark suri 1887. aastal, kuid tema tööd jätkas poeg Alvan Graham Clark, kes jõudis veelgi kaugemale. Kuni suurte refraktorite õitseaja lõpuni — sajandivahetuseni — hoidsid Clarkide objektiivid maailma juhtpositsioone nii kvaliteedis kui ka suuruses. 1888. aastal seati üles nende refraktor Licki observatooriumis (D = 91,4 cm; F = 18,28 m) ning 1897. aastal ilmus astronoomide käsutusse hiiglane, mille suurust ületada ei loeta enam mõistlikuks: Yerkesi observatooriumis on ta praeguseni ning arvatavasti jääbki oma 102 cm läbimõõduga suurimaks maapealseks läätsteleskoobiks (joonis 11). Viimase ülesseadmise aastal suri ka A. G. Clark, olles krooninud oma refraktorite valmistamisele pühendatud elu väärilise mälestusmärgiga.

Läätsobjektiivide läbimõõdu suurendamine põrkas läätse enda kaalu ja jäikuse suhetele. Suured läätsed ei säilita neile valmistamisel antud kuju, kui nad objektiivi

Tabel 1

Maailma suurimad refraktorid

Objektiivi läbimõõt cm	Fookuskaugus m	Asukoht	Riik	Valmistamise aasta
102	19,8	Yerkesi obs.	USA	1897
91,4	18,3	Licki obs.	USA	1888
83	16,2	Meudoni obs.	Prantsusmaa	1896
80	12,0	Potsdami obs.	SDV	1899
76	14,1	Allegheny obs. (Pittsburgh)	USA	1914
*76	14,1	Pulkovo obs.	NSVL	1885
76	15,8	Pariisi ülikooli obs. (Nizza)	Prantsusmaa	1886

* Teise maailmasõja ajal teleskoop hävis.

raamistuses on vaid servast kinnitatud-toetatud. Teleskoobi erinevais asendeis on läätsede läbipaindumine pealegi erinev. Paksuse suurendamisel kasvab samuti kiiresti läätse kaal ning läbipaindumine hakkab seetõttu suurenema. Selles mõttes on peeglid optiliste süsteemide elementidena eelistatavamad, kuna neid saab tagaküljelt ühtlaselt toetada.

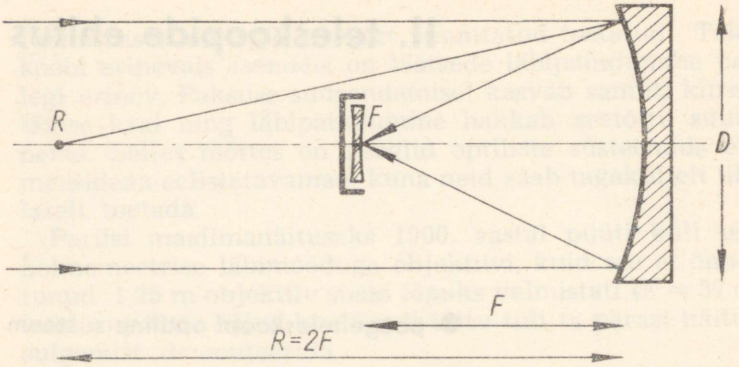
Pariisi maailmanäituseks 1900. aastal püüti küll teha kolmemeetrise läbimõõduga objektiivi, kuid see ei õnnestunud. 1,25 m objektiiv siiski lõpuks valmistati ($F = 57$ m), kuid kujutiste halva kvaliteedi tõttu tuli ta pärast näituse sulgemist demonteerida.

II. teleskoopide ehitus

● peegelteleskoobi optiline süsteem

Peegelteleskoopide põhiliseks optiliseks elemendiks on nõgus peapeegel. Nõguspeegel koondab lõpmatusest tulevad kiired peegli fookusesse *F*. See paikneb optilisel teljel peegli kõveruskeskme *R* ja peeglipinna vahemaa keskpunktis (joonis 12). Nii saamegi ühe nõguspeegli kasutamisel kaugel asuvate esemete (tähtede) kujutised fookust läbival pinnal, ning asetades sinna kasseti fotoplaadiga, võime taevast pildistada. Kõige lihtsam on valmistada sfäärilise pinnaga nõguspeeglit; lihvijad räägivad, et sfääriliseks läheb küllalt suure täpsusega iga õigesti lihvitav peegel ise. Kahjuks aga rikuvad sfäärilise peegli kujutist optilised vead ehk aberratsioonid. Määravaimaks on sfääriline aberratsioon, mis seisab selles, et peegli keskosa ning servade fookused ei lange kokku. Plaadi nihutamisel edasi-tagasi piki optilist telge (fokuseerimisel) ei õnnestu tähtedest saada teravat punktkujutist: kui plaat on peegli serva fookuses, siis pole ta seda keskosa suhtes ja vastupidi; nii jääb tähe kujutis ikka laiguks. Lihtsa reflektori peapeegel peab olema paraboolne, täpsemini väljendudes, peegelpinnal peab olema paraboloidi kuju.* Paraboolsel peeglil puudub sfääriline aberratsioon ja lõpmata kauge objekti kujutis peegli optilisel teljel on täiesti veatu. Muud optilised vead kahjustavad kujutise kvaliteeti alles optilisest teljest eemaldumisel; seega ei saa kasutada suurt vaatevälja, vaid tuleb leppida optilise telje ümbrusega. Niisugune lihtne ühepeegliline optiline süsteem on aga juba täiesti edukalt kasutatav astronoomilis-

* «Paraboolne» märgib õigupoolest joone kuju, kuid peeglite puhul kasutatakse seda sõna peegli ristlõike kuju iseloomustamiseks.



Joonis 12. Fotoplaat nõguspeegli peafookuses.

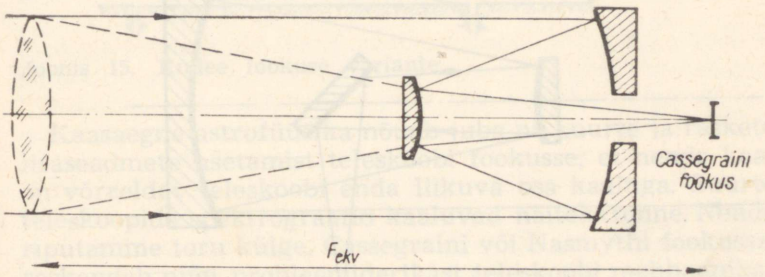
teks vaatlusteks joonisel 12 toodud fotografeerimisskeemi kohaselt (fotoplaat asub nn. peafookuses). Raskused tekivad visuaalsetel vaatlustel, kui vaatleja peab okulaari ja oma silma seadma peegli fookusse. Väikeste ja keskmiste instrumentide puhul pole see üldse mõeldav: vaatleja pea varjaks või kataks täiesti sisenemisava. Isegi suuremate riistade korral, mille torus pea ei segaks, pole vaatlejat ennast kuhugi mahutada. Alles mitmemeetriste läbimõõtude puhul tuleb kõne alla vaatlejakabiini ehitamine peafookusse, nagu seda tehti 5-meetrise läbimõõduga teleskoobil (joonis 23, lk. 63).

Kirjeldatud raskusest vabanetakse tasapeegli lisamisega optilisse skeemi, mille tulemusena peafookus tuuakse välja toru küljele (vt. joonis 5, lk. 23). Esimese sellise teleskoobi ehitaja järgi nimetatakse joonisel 3 kujutatud peafookuse varianti praegugi Newtoni fookuseks. Diagonaalpeegli asemel rakendatakse mõnikord täpselt samade ülesannete täitmiseks optilist prismat. Kaasaegsetel peegelteleskoopidel on peafookuses või Newtoni fookuses töötamise võimalus alati ette nähtud, kuigi sama peeglit kasutatakse ka keerulisemate optiliste süsteemide koostisosana. Peeglid tehakse enamasti suhtelise avaga (D/F) 1 : 3 ... 1 : 5; läbimõõdud, mis määravad peegelteleskoopide optilise võimsuse, ulatuvad mõnekümnest sentimeetrist mõne meetrini. Paraboolse peegli peafookuses kasutatav väli ei ole väga suur, sest teljest eemaldumisel ja suhtelise ava suurendamisel kujutise kvaliteet halveneb.

Fotografeerimisel seatakse enamasti tingimuseks, et vead ei teeks tähekujutist suuremaks fotoplaadi teralisusest (20 ... 30 μm). Sellisel juhul annavad paraboolsed peeglid suhtelise avaga 1 : 4 fotografeerimiseks kasutatava välja vaid 5′ läbimõõduga! Suurema välja saavutamiseks tuleb kujutise parandamiseks appi võtta korrektsiooniläätsed peafookuse ees.

Peafookuses töötatakse peamiselt siis, kui vajatakse suurt suhtelist ava, tahetakse fotografeerida laiemaid taevaalasid või taotletakse lihtsat optilist skeemi valguskadude vältimiseks. Niiviisi ei saa aga suuri suurendusi ja üksikute taevakehade suuremastaabilisi kujutisi, sest fookuskaugus on liiga lühike. Peapeegli fookuskauguse pikendamisega kaotaksime eelnimetatud eelised ja teleskoobitorudki läheksid väga pikaks: paljude astrofüüsikaliste ülesannete lahendamisel on vaja mitmekümnemeetrisi fookuskaugusi. Fookuskaugust pikendatakse täiendavate kõverpeeglite lisamisega ja siis saadakse juba komplitseeritud peegelsüsteemid. Teist peeglit nimetatakse *sekundaarpeegliks*.

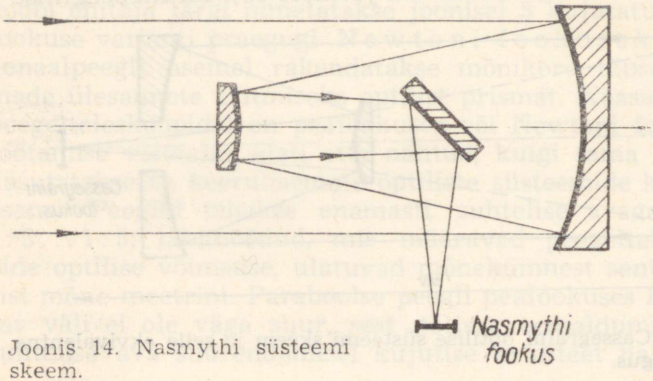
Üks levinumaid lühifookuselise peapeegli baasil loodud astronoomilise «teleobjektiivi» skeeme on toodud joonisel 13. Kumerpeegel enne peafookust peegeldab fookusse koonduvad kiired tagasi ja hajutab neid vajalikul määral, nii et uus koondumispunkt tekib juba peapeeglisse puuritud ava taga. Skeemi koostaja, prantsuse skulptori Cassegraini nime järgi kannab see *Cassegraini süsteemi* nime. Fookuskaugust tuleb siin arvutada kiirte koonduvuse kaudu, võrreldes seda kujuteldava läätsobjektiiviga (punktiiriga antud osa joonisel 13). Mitmepeeglilise



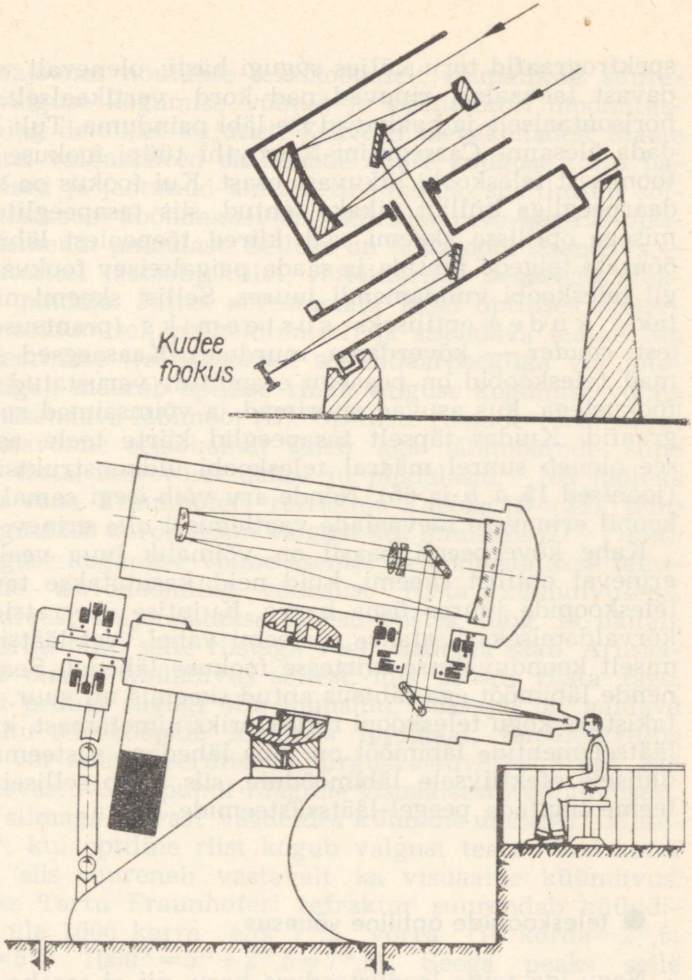
Joonis 13. Cassegraini optilise süsteemi skeem ja selle ekvivalentne fookuskaugus.

optilise süsteemi korral kõneldaksegi ekvivalentsest fookuskaugusest. See võib olla üsna suur, ületades mitu korda teleskoobitoru pikkuse. Suurematel teleskoopidel oleks Cassegraini süsteemi kasutatavaima suhtelise ava 1 : 16 korral 1-meetrise reflektori ekvivalentne fookuskaugus näiteks 16 m. Fookuse pikenemist võib endale selgitada, kui kujutleda sekundaarpeeglit algul tasapeeglina ja siis järk-järgult kumerduvana. Tasapeegel pöörab lihtsalt peafookuse tahapoole; kiirte koonduvus ei muutu ja ilmselt ka fookuskaugus jääb samaks. Kui aga peeglit pisut kumerdada, siis hakkab ta langenud kiiri hajutama ja need koonduvad kaugemal kui enne. Cassegraini optilises süsteemis peab kumer sekundaarpeegel olema hüperboolse kujuga.

Cassegraini fookuse võib tuua torust välja ka teisiti: juhtida ta diagonaalpeegliga toru küljele (joonis 14). Seda varianti nimetatakse N a s m y t h i optiliseks s ü s t e e m i k s. Teleskoop kujuneb pisut kompaktsemaks, sest kiirgusvastuvõtja ja muu selle juurde kuuluv ei ulatu enam peegli tagant kaugele välja, vaid paikneb toru küljel. Tihti varustatakse diagonaalpeegel seadeldisega tema 90-kraadiseks pööramiseks ja fookuse suunamiseks ühele või teisele küljele, mõlemal pool aga seisavad erinevad kiirguse vastuvõtuseadmed (näiteks spektrograaf ja fotomeeter). Nii saame kiiresti ühelt teisele üle minna. Nasmythi optiline skeem ühendab Newtoni ja Cassegraini skeemid, kuid ta ise on ka vahepealseks astmeks selliste optiliste skeemide loomisel, millede fookus seisaks paigal, hoolimata riista toru liikumisest.



Joonis 14. Nasmythi süsteemi skeem.



Joonis 15. Kudee fookuse variante.

Kaasaegne astrofüüsika nõuab juba nii suurte ja raskete lisaseadmete asetamist teleskoobi fookusse, et nende kaal on võrreldav teleskoobi enda liikuva osa kaaluga. Suurte teleskoopide spektrograafid kaaluvad näiteks tonne. Nende riputamine toru külge, Cassegraini või Nasmythi fookusse, raskendab niigi probleemiderikast teleskoobi mehhaanikaalast konstrueerimist, kus esikohal on suure jäikuse, tasakaalustatuse ja kerguse taotlus. Pealegi ei käitu rasked

spektrograafid toru küljes sugugi hästi: olenevalt vaadeldavast taevaalast ripuvad nad kord vertikaalselt, kord horisontaalselt ja hakkavad ise läbi painduma. Tuli lahendada ülesanne Cassegraini-Nasmythi tüüpi fookuse väljatoomisest teleskoobi liikuvast osast. Kui fookus on sekundaarpeegliga küllalt pikaks tehtud, siis tasapeeglite lisamisega optilisse skeemi saab kiired tõepoolest läbi riista õõnsate telgede juhtida ja saada paigalseisev fookus kusagil teleskoobi vundamendi juures. Sellist skeemi nimetatakse k u d e e optiliseks s ü s t e e m i k s (prantsuse keelest: *couder* — kõverdama, murdma). Kaasaegsed suuremad teleskoobid on peaaegu eranditult varustatud kudee fookustega, kus asuvad suurimad ja võimsaimad spektrograafid. Kuidas täpselt tasapeeglid kiirte teele asetada, see oleneb suurel määral teleskoobi üldkonstruktsioonist (joonised 15, *a*, *b* ja 65). Nende arv võib isegi samal teleskoobil erinevate taevaalade vaatlemisel olla erinev.

Kahe kõverpeegli baasil on võimalik luua veel mitu erinevat optilist skeemi, kuid neid kasutatakse tavaliste teleskoopide juures üsna harva. Kujutise aberratsioonide kõrvaldamiseks lisatakse süsteemi vahel veel läätsi, peamiselt koonduvatesse kiirtesse fookuse lähedal. Seal pole nende läbimõõt ega tähtsus antud skeemis nii suur, et see takistaks kogu teleskoopi reflektoriks nimetamast, kui aga läätselementide läbimõõt on juba lähedane süsteemi enda üldisele efektiivsele läbimõõdule, siis tuleb selliseid süsteeme liigitada peegel-läätssüsteemide hulka.

● teleskoopide optiline võimsus

Nagu iga teine loodusteaduse haru, nii ei saa ka astronoomia areneda ilma uute andmeteta uuritavate objektide kohta, neid andmeid aga saab vaid kosmosest saabuvatelt kiirtelt. Selle ülesande teenistuses seisavadki vaatlusriistad: nad peavad saabuvaid kiiri kinni püüdma ja aitama neid salvestada, mõõta ning analüüsida. Suuremaid vaatlusriistu on kasulik nii ehitada, et nad oleksid suutelised andmeid koguma üsna erinevate astronoomia valdkondade jaoks. Sel juhul tõusevad esiplaanile alati ühesugused põhinõuded optilisele süsteemile ja tehnilised andmed allutatakse just nende soovide rahuldamisele.

Esmajoones nõutakse teleskoopidelt võimalikult suuremat valguse kogumise võimet ja võimalikult moonutusteta ning detailset kujutist. Kuivõrd taevakehadelt Maale jõudnud valguskiired on kehade suure kauguse tõttu paralleelsed ja jaotunud ühtlase tihedusega, siis ilmselt sõltub teleskoobi koondamisvõime kiiri haarava-koguva optilise elemendi pindalast. Selleks on teleskoobi sisendava — refraktoritel läätsobjektiivi, reflektoritel peapeegli efektiivne pindala. Jättes arvestamata kaod optilises süsteemis (neeldumisel, peegeldumisel) ja sisendava teatud osa ekraneerimise (reflektoritel sekundaarpeegliga või fotokassetiga), määrab optilise riista valguse kogumise võime tema sisendava läbimõõt (D). Optiliste riistade võrdlemisel kogumisvõime seisukohalt tuleb aga läbimõõtude suhe ruutu tõsta, sest võrreldakse ju pindalasid. Nii näiteks kogub vana Fraunhoferi refraktor Tartus ($D = 244$ mm) peaaegu 1200 korda enam valgust kui inimsilm ($D = 7$ mm).

Valguse kogumise võime asemel iseloomustatakse teleskoopide astronoomilist võimsust riista küündivusega. Küündivust väljendatakse tähesuurustes ning ta näitab, kui nõrku tähti selle riistaga veel vaadelda saab. Arusaadavalt oleneb küündivus sellest, mis seisab riista taga. See ei pruugi sugugi olla inimsilm, kaasajal on valdava enamiku teleskoopide fookuses fotoplaat, fotoelektriline seade või mõni keerulisem kiirgusvastuvõtja. Silma kui kiirgusvastuvõtja puhul räägime visuaalsest küündivusest. Palja silmaga taevast vaadeldes küünime umbes 6^m tähtedeni *, kui optiline riist kogub valgust teatud arv kordi enam, siis suureneb vastavalt ka visuaalne küündivus. Näiteks Tartu Fraunhoferi refraktor suurendab küündivust üle 1000 korra ehk $7^m,5$ võrra (10 korda $= 2^m,5$; $100^\times = 5^m$; $1000^\times = 5^m + 2^m,5 = 7^m,5$). Seega peaks selle refraktori visuaalne küündivus olema vähemalt $13^m,5$.

* Tähesuuruse märk m tuleneb ladinakeelsest sõnast «magnitudo». Esimese tähesuurusega (1^m) taevakeha tekitab maapinnal niisuguse valgustatuse (8×10^{-7} luksi) nagu küünal 1,1 km kauguselt; 6^m tähtede ekvivalendiks oleks küünlaleek 11 km kaugusel; võimsate teleskoopidega fotografeeritakse pikkade säritusaegadega ka 21^m tähti, millele vastab 11 000 km kaugusele viidud küünla poolt tekitatav valgustatus (8×10^{-15} luksi). Tähtede heleduste omavahelisel võrdlemisel tuleb seda teha tähesuuruste lahutamise kaudu. Vahes tähendab iga tähesuurus 2,512-kordset heleduste erinevust; seega tähesuuruste vahe $2^m,5$ tähendab 10-kordset ja vahe 5^m tähendab 100-kordset heleduse muutumist.

Et visuaalne küündivus oleneb paljudest silma ja vaatlustingimustega seotud iseärasustest, siis võimaldavad sellised arvutused ja ka mitmesugused valemid ning tabelid siiski vaid ligikaudselt hinnata küündivust.

Tabel 2

Teleskoobi visuaalne küündivus läbimõõdu järgi

$D_{(mm)}$	50	100	250	500	1000	2500	5000
m_{vis}	10^m	12^m	14^m	$15^m,5$	17^m	19^m	$20^m,5$

Riista fotograafiline küündivus määratakse nõrgima tähe järgi, mis veel plaadile jälje jättis. Riistu võidakse iseloomustada ka fotoelektrilise, spektrograafilise jne. küündivusega. Põhilisteks optilisteks võimalusteks küündivuse suurendamisel on aga alati teleskoobi läbimõõdu suurendamine ja selles tekkivate valguskadude vähendamine. Absoluutse piiri maapealsete vaatlusriistade fotograafilisele ja fotoelektrilisele küündivusele panevad muidugi taevafoon ning selle fluktuatsioonid (vt. joon. 46).

Teiseks põhinõudeks vaatlusriistadele on võimalikult detailse ja moonutusteta kujutise saamine. Nagu edasises näeme, pole suurte suurenduste saamine kaasaja optikale mingi probleem, kuid olulisem on kujutise detailiderohkus ja loomutruudus. Seda, kui peeni detaile võib kujutisel veel leida, iseloomustab optilise süsteemi lahutusvõime.

Teleskoobi lahutusvõimet on vaatluspraktikas hea määrata ja kontrollida: testiks on taevatähed. Nagu silmaarsti juures hinnatakse inimeste nägemisteravust ikka väiksemate kujutiste äratundmisega vastavalt tabelilt, nii määratakse teleskoobi lahutusvõimet taevas väga lähestikku asetsevate tähtede või kaksiktähtede eraldamisega. Kui kaht lähestikku asuvat tähte enam eraldi punktikestena ei näe, vaid nad sulavad kokku, siis on nendevaheline nurkkaugus alla lahutusvõime piiri. Lahutusvõimet väljendataksegi kaaresekundites, see on vähim nurkkaugus, mille võrra teineteisest eemaldatud tähti see riist veel eraldatuna laseb näha (või fotografeerida). Kui kujutise tekitab ideaalne objektiiv, siis määrab lahutusvõime jällegi ainult objektiivi läbimõõt; lahutusvõime kaaresekundites p avaldub objektiivi läbimõõdu D kaudu järgmise lihtsa seosega:

$$p'' = \frac{114}{D_{mm}} .$$

Niisugune arvutuslik lahutusvõime võib realiseeruda tegeliku objektiivi juures ainult siis, kui seda ei vii alla muud põhjused. Kui näiteks kontrollime lahutusvõimet silmaga, siis peab okulaari suurendus olema selline, et silm ise lahutab kujutist kõigis detailides — on ju võimalik, et objektiiv annab väga peene ja detailse kujutise, kuid silm lihtsalt ei näe seda, sest kujutis on liiga väike. Okulaar peab olema nii tugev, et nähtavale tulevad tähe punktkujutist ümbritsevad difraktsioonirõngad, siis oleme objektiivi lahutusvõime ammendanud ning edasine suurenduse tõstmine ei anna enam detaile juurde. Sama kehtib fotografeerimise kohta: fotoplaadi teralisus ei tohi olla suurem kui teleskoobi lahutusvõime, muidu määrab tegelikult lahutatava vähima nurkkauguse plaadi enese teralisus. Ka optilise süsteemi enda vead (aberratsioonid) võivad lahutusvõime alla viia, kuid neid püütakse alati arvutuste ja valmistamise kvaliteediga väiksematena hoida. Võimetuks osutuvad astronoomid ja optikud ainult võitluses ühe suure häiriva teguriga teoreetilise lahutusvõime saavutamisel: see on Maa atmosfääri mõju teda läbivatele valguskiirtele. Suure suurendusega vaatlusriist näitab hästi, kuidas eriti horisondi lähedal, kus läbitav õhumass on suurem, tähe kujutis väriseb ja vilgub. Ta kujundab korrapäratult virvendades teatud turbulentsketta, mille läbimõõt võib kümnendikest kaaresekunditest ulatuda mitme kaaresekundini. Just sellepärast otsitakse observatooriumide jaoks heade vaatlustingimustega, niinimetatud hea astrokliimaga paiku. Ainult rahuliku, selge ja läbipaistva õhkkonna puhul läheneb vaatlusriistade tegelik lahutusvõime teoreetilisele.

Tabel 3

Objektiivide läbimõõt ja lahutusvõime

D_{mm}	50	100	200	250	350	500	700	1000	2000	5000
p	2″,3	1″,14	0″,57	0″,46	0″,33	0″,23	0″,16	0″,11	0″,06	0″,023

Suurendus kui optilist riista iseloomustav tegur pole astronoomias enam üldse päevakorral. Suurendus avaldub teleskoobi objektiivi ja okulaari fookuskauguste suhtena

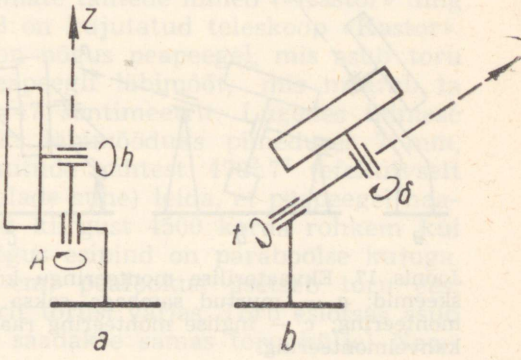
$$G = \frac{F}{f} .$$

Okulaare on igal visuaalseteks vaatlusteks määratud teleskoobil terve hulk ja neid vahetades võib valida mistahes suurenduse. Tartu Fraunhoferi refraktori objektiivi fookuskaugus on 4,5 meetrit, üldiselt on olemas ka näiteks okulaarid fookuskaugusega 4,5 millimeetrit — seega võime vaadelda 1000-kordse suurendusega. Seda lugedes vangutab aga pead igaüks, kes on kordki proovinud okulaare vahetada ja suurematel suurendustel vaadelda: Kuu pinna, planeedi või tähe asemel näeme vaid ähmaseid virvendavaid laike. Suurendus kaotab mõtte, sest teleskoobi, eriti aga atmosfääri lahutusvõime on ammu ületatud. Proovige luubiga uurida ajalehepilti — selle asemel et paremini näha ja uusi detaile leida, ilmuvad nähtavale trükivärvipunktid ning paberikarvakesed!

Suurendusest ei räägita teleskoopide juures enam ka seepärast, et visuaalsete vaatluste aeg on möödas. Fotoplaadi puhul aga kõneleme juba mastaabist, mis näitab, mitu taeva kaaresekundit vastab plaadil ühele millimeetrile või sentimeetrile, selle aga saame üsna lihtsalt arvutada objektiivi fookuskaugusest.

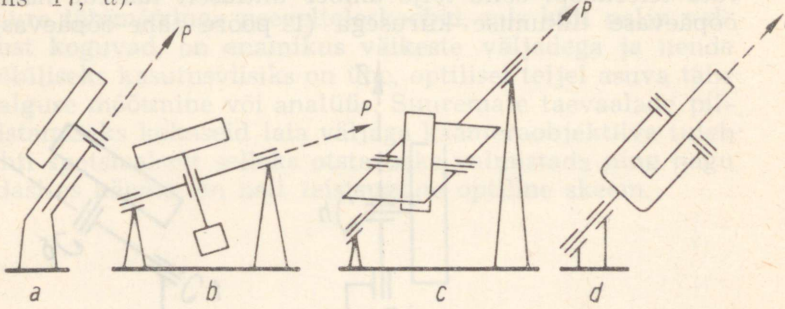
Optilise süsteemi vigade tõttu saadakse tavaliselt parim kujutis optilise telje ümbruses, teljest eemaldudes pildi kvaliteet halveneb. Seepärast märgitakse teleskoobi juures tihti veel ära, kui suur on kasutatava kujutise läbimõõt. Et see ei oleks fookuskaugusest sõltuv lineaarsuurus, selleks antakse kasutatav väli nurgamõõdus ja see näitab järelikult, millise nurkläbimõõduga taevaosa võime veel kasutada vaatlusteks (peamiselt fotografeerimiseks), ilma et kujutis oleks aberratsioonidest rikutud. Võimsad suure läbimõõduga peegelteleskoobid, mis küll palju valgust koguvad, on enamikus väikeste väljadega ja nende põhiliseks kasutusviisiks on ühe, optilisel teljel asuva tähe valguse mõõtmine või analüüs. Suuremate taevaalade pildistamiseks kohaseid laia väljaga kaameraobjektiive tuleb tihti spetsiaalselt selleks otstarbeks valmistada ning nagu edasises näeme, on neil teistsugune optiline skeem.

Teleskoobi põhiosaks on optiline süsteem. Läätsed või peeglid kinnitatakse tavaliselt torusse (mida vahetevahel ka tuubuseks nimetatakse), suurte pikksilmade puhul aga asendatakse see tihti lahtise, sõrestikulise metallkonstruktsiooniga. Optikaelementidega toru peab saama mistahes taevaossa suunata, vajalik objekt üles otsida ja sellele suunatult hoida; fotografeerimisel tuleb mitmete tundide jooksul teleskoopi hoolsalt ühel taevakehal pidada. Teleskoobi toru kinnitubki alusele ehk statiivile teatud viisil, mida nimetatakse monteeringuks. Selleks et riista saaks soovitud punkti suunata, peab olema võimalik teda pöörata kahe risti asuva telje ümber. Kõige lihtsam oleks pöörlemisteljed paigutada horisontaalselt ja vertikaalselt nii nagu näiteks teodoliidi ja mõnede väiksemate astronoomiliste riistade juures. Selliseid monteeringuid nimetatakse asimuudilisteks, sest teljed vastavad horisondilistele koordinaatidele (asimuut ja kõrgus). Kui aga asimuudiliselt monteeritud riistaga öist taevast hakata jälgima, siis ilmnevad raskused. Tähel hoidmiseks tuleb teleskoopi samaaegselt mõlema telje ümber pöörata, vajalikud kiirused pole aga ühesugused ega ka püsivad. See on loomulik: tähed pöörlevad näivalt koos taevavõlviga ümber taeva pooluse (Põhjanaela), nende asendid ja liikumine taevas määratakse ekvaatorilistes koordinaatides. Asimuudiline monteering sellele ei vasta. Ainult siis, kui üks monteeringu telgedest suunata taeva poolusele ja pöörata teleskoopi selle telje ümber ühtlaselt tähtede näiva ööpäevase liikumise kiirusega (1 pööre tähe-ööpäevas),



Joonis 16. Asimuudilise (*a*) ja ekvaatorilise (*b*) monteeringu skeemid.

püsib ta kogu aeg suunatuna samasse taevapunkti. Niisugune on ekvaatorilise monteeringu põhimõte (joonis 16, *b*). Vanimad teleskoopide monteeringud olid asimuudilised või suurte riistade korral isegi meridiaansed (pööratavad ainult meridiaani tasapinnas ümber ühe horisontaalse telje). Primitiivsed ekvaatorilised monteeringud ilmusid varsti pärast teleskoobi leiutamist 17. sajandil, kuid esimene õnnestunud variant oli Fraunhoferi tuntud Tartu refraktor. Ekvaatorilise monteeringu korral vastavad teleskoobi pöörlemisteljed ekvaatorilistele taevakoordinaatidele (kääne ja tunninurk). Käändenurk on antud tähe jaoks püsiv suurus ja kui ta on kord juba teleskoobile seatud, siis pole selle tähe vaatlemisel teda enam vaja kuigi palju muuta. Tunninurk koosneb kahest komponendist: taevakeha otsetõusust, mis on samuti püsiv, ja muutuvast täheajast. Tähel hoidmiseks peame teleskoopi ilmselt ümber polaartelje pöörama täheajaga määratud kiirusega (1 pööre tähe-ööpäevas), selleks kasutatakse kellamehhanismi. Tartu refraktor oli esimesi kellamehhanismiga varustatud instrumente maailmas. Ekvaatoriliselt on monteeritud peaaegu kõik viimase saja aasta jooksul valmistatud astronoomilised riistad. Monteeringu tehniline realiseerimine statiivina on aga olnud üsna erinev. Fraunhoferi statiivi üldkuju korratakse tänapäevani saksa monteeringu nime all. Et lihtsa saksa monteeringu korral kipub teleskoobitoru okulaaripoolne ots mõnede pooluselähedaste vaatluste korral vastu sammast minema, siis on teda täiendatud veel statiivi samba murdmisega (joonis 17, *a*).



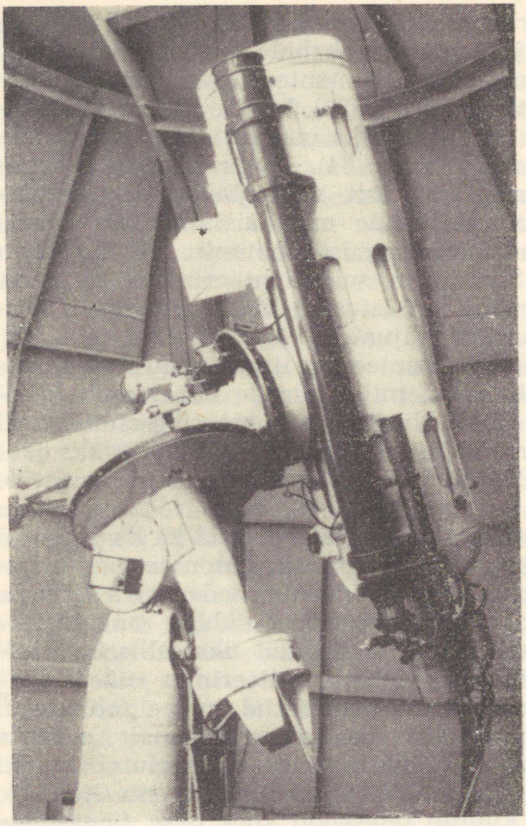
Joonis 17. Ekvaatorilise monteeringu konstruktiivsete lahenduste skeemid: *a* — murtud sambaga saksa monteering; *b* — inglise monteering; *c* — inglise monteering raamiga; *d* — ameerika ehk kahvelmonteering.

Inglise monteering ilmus 18. sajandi algul. Seda iseloomustab polaartelje toetamine kahele sambale (joonised 17, *b* ja 65), hiljem täiendati monteeringut raamiga sammaste vahel (joonised 17, *c* ja 20). Inglise raammonteeringut kasutati veidi muudetult ka maailma suurima reflektori juures (vt. joonis 24 lk. 64). Nagu nähtub skeemidest, on monteering kindlasti väga jäik, kuid pooluselähedase taevaala vaatlemine on takistatud või nõuab põhiskeemi teisendamist (raamist loobumist või ühe laagri hoburaudkuju). Samuti ei saa monteeringut kasutada suurematel geograafilistel laiustel, kus poolus asub kõrgel ja üks sammastest kujuneks väga pikaks.

Ameerika ehk kahvelmonteering ilmus samuti 18. sajandil. See meenutab harki, mille harude vahel asub teleskoobitoru (joonis 17, *d*). Niisugune monteering on viimasel ajal üks populaarsemaid, seda on kasutatud näiteks joonistel 7, 21, 25, 29, 30, 31 ja 37 kujutatud instrumentide juures.

Peale nimetatute esineb nii ajaloolisi kui ka kaasaegseid astronoomilisi riistu üsna omapärastes monteeringute kujudes, eriti kui on tegemist eriolukordade, väga kitsaste ülesannete lahendamisega või mõnes suhtes rangete tingimustega. Joonisel 15, all oli toodud üks selliseid originaalseid monteeringuid (inglise monteeringu «ühesambaline» variant), mis on kombineeritud kudee fookusega.

Väiksema teleskoobina vaatleme lähemalt näiteks Struve-nim. Tartu Astrofüüsika Observatooriumi 47 cm peegelteleskoopi. Teleskoobi tehasenimetus on АЗТ-14, observatooriumis kuulub teleskoop koos teise samasugusega nn. kaksikteleskoobi kompleksi ja neile on antud kaksikute tähtkuju heledamate tähtede nimed («Kastor» ning «Polluks»). Joonisel 18 on kujutatud teleskoop «Kastor». Teleskoobi põhiosaks on nõgus peapeegel, mis asub toru (tuubuse) tagaosas. Peapeegli läbimõõt, mis määrab ta optilise võimsuse, on 47 sentimeetrit. Lugedes inimese silmaava maksimaalseks läbimõõduks pimeduses 7 mm, võime läbimõõtude ruutude suhtest $470^2:7^2$ (efektiivselt valgust koguvate pindalade suhe) leida, et peapeegel haarab taevakehalt tulevat kiirgust 4500 korda rohkem kui inimsilm. Peapeegli nõgus esipind on paraboolse kujuga. Fookuskaugus on 215 cm; peafookus asetseb toru ees, kümmekond sentimeetrit torust väljas. Toru esiotsas asub diagonaalpeegel ja nii saadakse samas toru küljel New-



Joonis 18. Struve-nimelise observatooriumi 50 cm reflektor AZT-14 («Kastor») elektrofotomeetriga.

toni fookus (vt. joonis 5 lk. 23). Newtoni fookuse fotoplaatide ja okulaaride hoidja on fotol nähtav teleskoobi esiosa küljel. Kasutatava fotograafilise välja laius on umbes 1° ja sellele vastav kujutise läbimõõt plaadil 4 cm, suhteline ava 1 : 4,5.

Teleskoopi saab veel tööle rakendada Cassegraini optilise skeemi kohaselt, põhiliselt seda süsteemi muide kasutataksegi. Newtoni diagonaalpeegel on siis ära võetud ja umbes samas kohas asub kumer sekundaarpeegel. Süs-

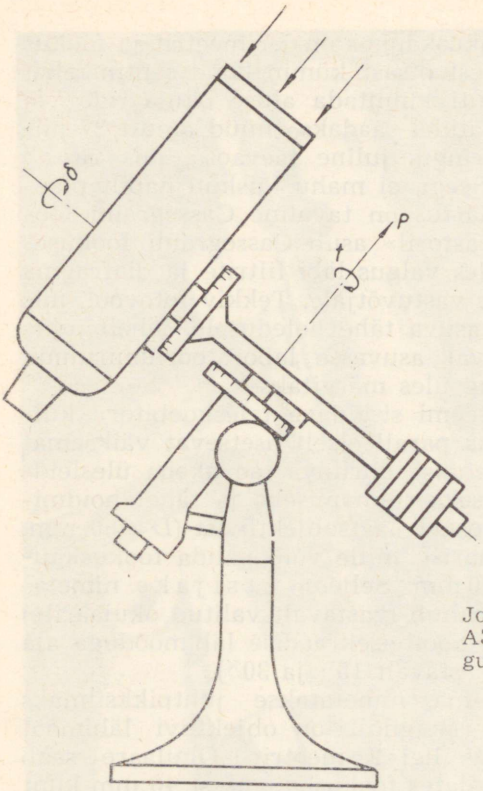
teemi ekvivalentne fookuskaugus on 7,7 meetrit ja fookus ise asub toru tagumisest otsast kümmekond sentimeetrit väljas. Siia võib samuti kinnitada aluse okulaaride või fotoplaatide jaoks. Plaatidel saadakse nüüd ainult 27-minutilise läbimõõduga ringikujuline taevaosa, mis vastab kuuele sentimeetrile. Seega ei mahu täiskuu napilt plaadile! Suhtelise ava väärtus on tavaline Cassegraini fookuste jaoks: 1 : 16. «Kastoril» asub Cassegraini fookuses elektrofotomeeter, milles valgus läbi filtrite ja diafragma langeb fotoelektrilisele vastuvõtjale. Tekkiv fotovool, mis vastab optilisel teljel asuva tähe heledusele, läheb juhtmeid kaudu torni kõrval asuvasse laboratooriumiruumi, kus ta mõõdetakse ning üles märgitakse.

Põhilist optilist süsteemi sisaldava teleskoobitoru küljele kinnitub veel kaks paralleelselt asetsevat väiksemat pikksilma. Neid kasutatakse uuritava taevakeha ülesleidmiseks, teleskoobi täpseks suunamiseks ja tähel hoidmiseks. Väiksem neist koosneb läätsobjektiivist ($D = 60$ mm, $F = 600$ mm) ja okulaarist, mille võib valida fookuskaugusega näiteks 20 või 40 mm. Sellesse o t s i j a k s nimetatavasse abipikksilma mahub (vastavalt valitud okulaarile) kas kolmekraadise või poolteisekraadise läbimõõduga ala taevast (suurendused vastavalt 15× ja 30×).

Suuremat abipikksilma nimetatakse juhtpikksilmaks ehk g i i d i k s. «Kastori» giidil on objektiivi läbimõõt 13 cm ja fookuskaugus ligi 2 meetrit. Okulaare saab panna mitmesuguseid, alates fookuskaugusest 40 mm kuni 3,5 mm. Suurendused kasvavad siis vastavalt 50 kuni 560 korrani, nähtav väli aga väheneb 56 kaareminutilt neljale (läbimõõdus). Nii giid kui ka otsija on varustatud reguleeritava heledusega niitristidega, mis määravad vaatevälja keskpunkti (optilise telje).

Toru giididega kinnitub ekvaatorilisele statiivile AIIIII-6 (joonis 19). See on paljude väiksemate teleskoopide kandmiseks kasutatav standardne saksa monteeringuga statiiv. Torni ülejäänud ehitisest eraldi rajatud vundamendile toetub statiivi sammas. Samba ülemises osas asub ekvaatoriline pea, mis võimaldab toru pöörata ümber kahe telje — polaartelje t ja käändetelje δ. Polaartelje suhtes tasakaalustatakse pöörlev süsteem vasturaskusega. Polaartelg suunatakse teleskoobi ülesseadmisel täpselt taeva poolusele. Riista pööramiseks kasutatakse elektriajameid, mida juhitakse väikesest puldikesest vaatleja

IRU Raamatukogu



Joonis 19. 47 cm reflektor АЗТ-14 saksa monteeringuga statiivil АПШ-6.

käes, ümber polaartelje pöörab teleskoopi ühtlase kiirusega üks pööre tähe-ööpäevas kellamehhanism. Algkujul on statiiv АПШ-6 varustatud koormisraskusega (pommiga) käitatava kellamehhanismiga, mille ülekandemehhanismi hulka kuulub kiirust püsivana hoidev tsentrifugaalregulaator. Uuematel riistadel on sellest loobutud ja kasutatakse ajamis sünkroonmootorit, mida toidetakse väga stabiilse sagedusega kvartsgeneraatorilt.

Teleskoobi vaatluseks ettevalmistamine ja tähele suunamine toimub umbes järgmiselt. Pärast riista vabastamist katteriidest, optiliste süsteemide kaante ja kupli vaatluspilu avamist pööratakse kupli pilu ja seejärel teleskoop uuritava objektiga taevaosa poole. Edasi võib ob-

jekti leidmiseks kasutada kaht moodust. Tähtkujude järgi orienteerudes võib soovitava tähe või tema läheduses asuva muu heleda objekti silmaga üles otsida ning siis teleskoobi ligikaudselt sihtides temale suunata. Võib aga ka uuritava objekti koordinaadid enne välja selgitada ja riista siis nii seada, et koordinaatlimbidel oleksid vastavad käändenurga ja tunninurga väärtused. Mõlemal juhul peaks vajalik objekt seejärel otsijas nähtav olema — seega eelneva suunamise täpsus peab olema ühe kaarekraadi suurusjärgus. Nüüd nihutatakse täht otsijas niitristi keskele, seega ühtlasi suurema suurenduse ja väiksema väljaga giidi vaatevälja. Kui ka seal on tähekujutis niitristi keskele seatud, peab ta riistas endas olema optilisel teljel või selle lähedal. Ka fotomeetri ehituses on ette nähtud võimalus kontrollida, kas täht asub ava keskel; kui see on tehtud ja osutub, et giidi niitristi ning fotomeetri ava keskpunktid kokku langevad, võib tähte rahulikult jälgida ainult giidist. Samal ajal fotomeeter mõõdab. Üleminekul uuele, lähedasele objektile opereeritakse giidi või otsija vaatevälja piirides, suurema nurkkauguse puhul aga tuleb kogu suunamist korrata.

Fotografeerimisel pikkade säritusaegadega ei kindlusta kellamehhanism taevakehade ööpäevase liikumise küllalt täpset jälgimist ning aeg-ajalt tuleb riista asendit pisut korrigeerida: teleskoopi ettevaatlikult ja õige aeglaselt liigutades viiakse täht giidis jälle niitristi keskele. Niisugust tegevust nimetatakse teleskoobi gideerimiseks.

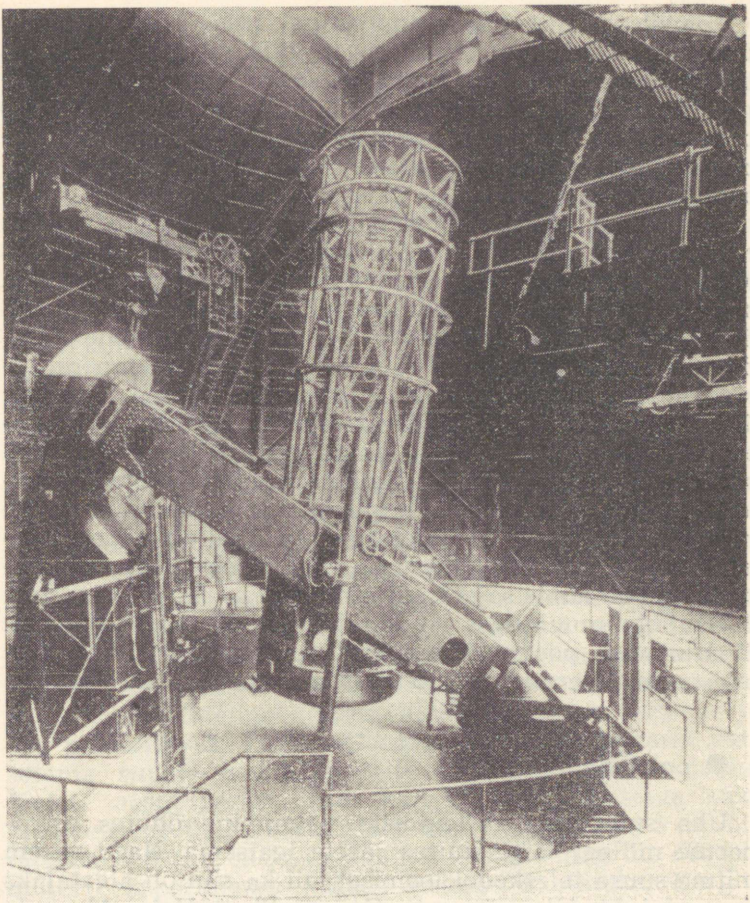
Kaasaegsete reflektorite arenguloo jälgimiseks peame pöörduma tagasi eelmisse sajandisse. 19. sajandi keskpaiku viis peegelteleskoopide ehitamist edasi prantsuse füüsik Léon Foucault. Ta hakkas (enam-vähem üheaegselt sakslase C. A. Steinheiliga) katsetama nõgusaks lihvitud ja hõbetatud pinnaga klaasketastest peapeeglitega ning jõudis reflektorite valmistamisel seega peeglimaterjalini, mis on oma tähtsuse säilitanud kaasajani. Veel suuremad on Foucault' teened peeglite nõguspinna kontrollimise optiliste meetodite väljatöötamisel: tema loodud varjumeetodil kontrollivad peegelpindasid tänapäevalgi kõik optikud. Foucault' osavõtul alustati 1,2-meetrise läbimõõduga peegelteleskoobi ehitamist, see eksponeeriti pärast teadlase surma 1878. aastal Pariisi maailmanäitusel, kuid riista eduka kasutamise kohta puuduvad andmed.

Möödunud sajandi lõpul valminud 1-meetrine refraktor

oli küll Alvan Graham Clarki ja firma «Warner & Swasey» looming, kuid selle riista saamisloos etendas võibolla veel tähtsamat osa suurepäraste organisaatorivõimetega astronoom George Elery Hale. Ühel teaduslikul konverentsil kuulis Hale juhuslikult, et kunagi grupi astronoomiahuviliste ärimeeste tellimisel valmistatud kaks ühemeetrise läbimõõduga klaasketast jäid kasutult seisma majanduslike raskuste tõttu. Hale astus ühendusse A. G. Clarkiga ja sai sellelt nõusoleku ühemeetrise objektiivi lihvimiseks. Siis oskas ta hankida raha veel Chicago trammikuningalt C. T. Yerkesilt, seda muidugi rahameestele tüüpilisel tingimusel: teleskoop olgu maailma suurim ja kandku raha omaniku nime. Nagu teada, lõppeski Hale'i üritus maailma suurima refraktori sünniga.

G. E. Hale oli üks kõigi aegade väljapaistvamaid insenere-eksperimentaatoreid astrofüüsika alal. Ta mõistis varem kui paljud teised, et kuivõrd seniste astromeetria ja taevamehhaanika probleemide asemel kerkib esiplaanile taevakehade ehituse ja neil toimuvate protsesside astrofüüsikaline uurimine, siis vastavad selle uue suuna nõudmistele edaspidi veelgi suurenevate läbimõõtudega peegelteleskoobid. Koos suurepärase optiku ja konstruktori G. W. Ritcheyga hakati kohe sajandi algul uues Yerkesi observatooriumis ehitama peegelteleskoope. 1901. aastal ehitas Ritchey 60 cm reflektori, millel kaasaegsete peegelteleskoopide prototüübina olid Newtoni ja Cassegraini fookused ning mis kõlbas visuaalseteks vaatlusteks, fotografeerimiseks ja spektroskoopiaks. Hale'i õhutusel asus Ritchey järgmisena juba 1,5 m reflektorit tegema. Prantsusmaalt telliti klaastoorik ja valmistati masin lihvimiseks ning poleerimiseks. 20 tonni raskust teleskoobi liikuvat osa kandev polaartelje suur laager valmistati elavhõbedavannis ujuva õõnsa rattana, muidu meenutab riista üldkonstruktsioon tavalist kahvelmonteeringut. Teleskoopi sai kasutada Newtoni, Cassegraini ja kudee optiliste skeemide kohaselt. 1908. aastaks valminud riist ületas kujutise kvaliteedilt kõik senised. Peafookuses fotografeerimisel küündis ta 4-tunnilise säritusajaga 20^m-ni.

Veel polnud 1,5 m reflektor lõpetatud, kui Hale koostas plaane järgmiseks suureks sammuks. Aastail 1906—1908 valatigi esimene 2,5 m läbimõõduga klaastoorik, kuid defektide tõttu (õhumullid) see ei sobinud. Järgnes veel



Joonis 20. Mount Wilsoni observatooriumi 2,5 m reflektor.

kolm ebaõnnestumist ning alles neljas klaasketas tunnistati vastuvõetavaks. Teleskoobi ehituse finantseerimise võttis enda peale Carnegie' fond. Peegli töötlemine kestis viis aastat, ta kaal ulatus üle nelja tonni. Kogu inglise raammonteeringus instrument ise kaalus aga üle 90 tonni ja lõpetati aastail 1917—1919 (joonis 20).

Esmakordsel taevasse suunamisel 1917. aastal toimus üsna dramaatiline vahejuhtum: kujutis oli äärmiselt kehv, lausa võimatult moonutatud. Möödus mitu tundi närvipinget, ja alles siis rahunesid Hale ning Ritchey: teleskoop oli päeval seisnud päikese käes ning ebaühtlaselt soojenenud peegel deformeerus tugevasti. Peegli jahtudes muutus kujutis jälle heaks.

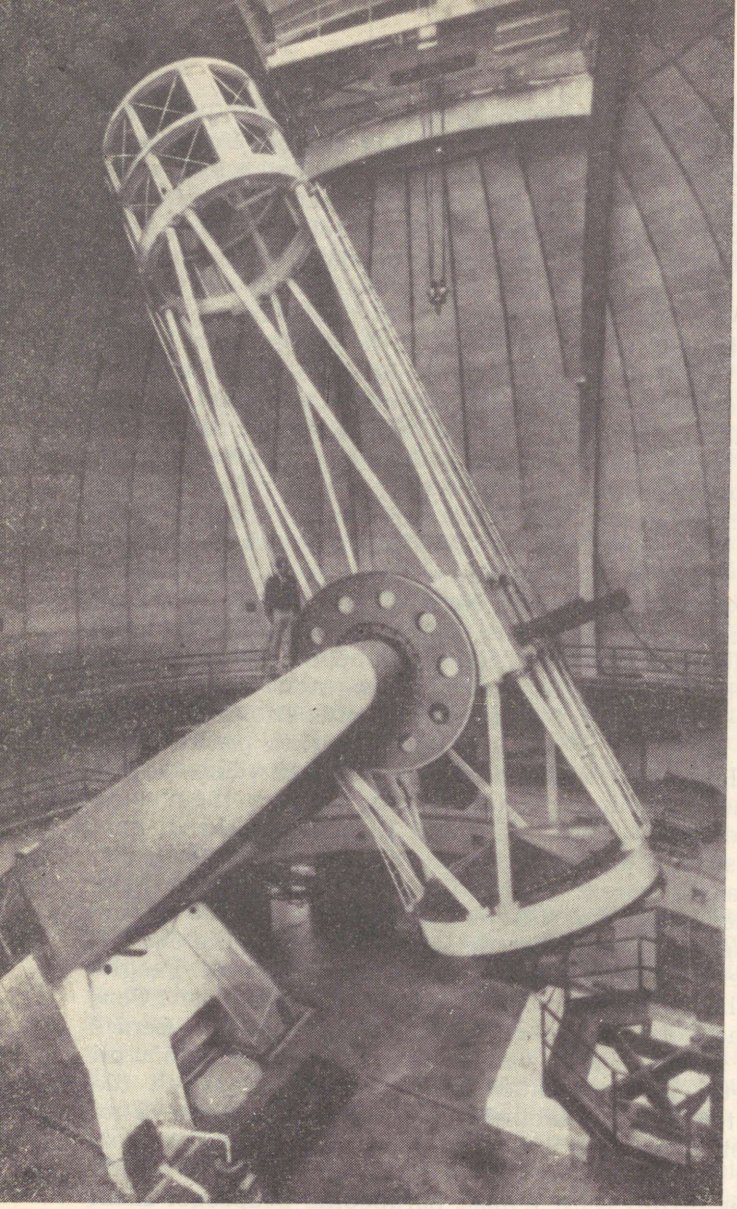
Enam kui kolmekümneks aastaks jäi see instrument maailma võimsaimaks teleskoobiks. Võrdse edukusega rakendati teda paljudes erinevates astronoomia harudes ja tema arvele võib kirjutada hulgaliselt avastusi. Esimesed fotod Kuust andsid palju senistel parimatel fotodel puuduvaid detaile; järgnesid Kuu ja planeetide temperatuuride mõõtmised, rea gaaside identifitseerimine Veenuse, Jupiteri ja Saturni atmosfääride spektraaluurimisel, Jupiteri kahe uue kaaslase avastamine; eriti palju väärtuslikku saadi aga täheatmosfääride kohta. Suudeti lahutada üksikuid tähti teiste galaktikate fotodel, nii et need seni udude nime all figureerinud objektid loeti kindlalt tähesüsteemide hulka ja nende tähesüsteemide üldarvu hinnati nähtavas universumis sajale miljonile. 2,5 m reflektoriga tegi E. Hubble muuhulgas ka kindlaks, et Tartu astronoomi E. Hartwigi poolt 1885. aastal Andromeeda udukogust avastatud supernoova asub väljaspool meie galaktika piire.

● palomari hiiglane

Üha suuremate reflektorite valmimine õhutas astronoome millegi «õige suure» järele igatsema. Nagu varem mitme suure teleskoobi loomisel, nii ka siin oli algatajaks ja organisaatoriks väsimatu George Elery Hale. Alustada tuli muidugi raha muretsemisest. 1926. aastal hakatigi pinda ette valmistama toetuse saamiseks Rockefelleri fondist. Juttu oli seejuures ei rohkem ega vähem kui 7,5 m teleskoobi ehitamisest! 1928. aastal õnnestus Hale'il suure teleskoobi vajalikkus ja tohutu tähtsus Rockefelleri fondi presidendile selgeks teha ning edasi polnud ülejäänud juhatuseliikmete ühine veenmine enam nii raske. 5 m teleskoobi ehitamiseks eraldati 6 miljonit dollarit — suurim summa, mida Rockefelleri fond kunagi ühe ülesande täitmiseks on välja andnud. Tuleb märkida, et oli ka viimane aeg: 1929. aastal algas suur majanduskriis, mille tin-

gimustes teleskoobi ehitamise finantseerimine lähemate aastate jooksul vaevalt oleks kõne alla tulnud. Vastloodud komitee määras kõigepealt peegli läbimõõduks 5 meetrit, mõnede entusiastide propageeritud 7,5 meetrit peeti siiski liiga suureks hüppeks eelmiselt, 2,5 m teleskoobilt. Komiteesse kuulus üsna mitme eriala spetsialiste: astronoome, insenere, füüsikuid, keemikuid, geolooge. Esimeseks põhiliseks tehniliseks probleemiks oli peegli materjali ja konstruktsiooni valik. Seda tuli ka kõige olulisemaks lugeda — peegli õnnestumine või ebaõnnestumine määrab suure teleskoobi tõelise efektiivsuse. Klaas polnud peeglimaterjalina kuigi sobiv juba ebaühtluste pärast soojuspaisumisel: halva soojusjuhtivuse tõttu jahtuvad (või soojenevad) peegli servad varem kui keskosa ning seetõttu deformeerub peegel temperatuuri muutumisel. Peegli serva kuju ei vasta siis keskosa kujule, optikud nimetavad seda nähtust «ääreefektiks». 2,5 m peegli puhul otsiti aastaid vahendeid võitluses ääreefektiga. Selge oli ka see, et massiivsete klaaspeeglite kaalu ülempiir 2,5 m läbimõõdu juures oli saavutatud. Läbimõõdu kahekordistamine toob nende peeglite korral kaasa massi kaheksakordistumise. Niisiis, kui 2,5 m peegel kaalus 4 tonni, kaaluks 5 m üle 30 ja 7,5 m üle 100 tonni. Märksa parem oleks olnud sulatatud kvarts, mida iseloomustavad väike soojuspaisumine, suhteline kergus, klaasist suurem tugevus ja hea poleeritavus. Firma «General Electric» hakkaski katsetama suurte kvartstoorikute valamist peeglite jaoks. Kolme aasta pärast saadi küll suurte raskustega kaks pooleteisemeetrist kvartsketast, kuid väljavaateid 5 m valmistamiseks tuli siiski lugeda kahtlasteks ning üle 600 000 dollari eksperimendi kulude katteks kaotatuks. Peegliketas telliti väikese soojuspaisumisega pairekssklaasist Corningi klaasitehaselt. Seegi polnud kerge ülesanne. Senise suurima selles tehases valatud pairekssketta läbimõõt oli alla meetri. Alustati katsetest ja mindi järk-järgult üle suurematele tooriku läbimõõtudele: 75 cm, 150 cm, 3 m. Viimasest taheti teha tasapeegel suure 5 m peegli kontrollimiseks; hiljem sellest loobuti, klaas jäi kauaks seisma ning alles hiljuti tehti temast paraboolne peapeegel Licki observatooriumi 3 m reflektorile (joonis 21).

Massiivne pairekssseib läbimõõduga 5 m oleks kaalunud 40 tonni ja seda oleks tulnud pärast valamist maha jahutada umbes 9 aastat. Üks Hale'i kaastöötajaid tegi ette-



Joonis 21. Licki observatooriumi 3 m reflektor.

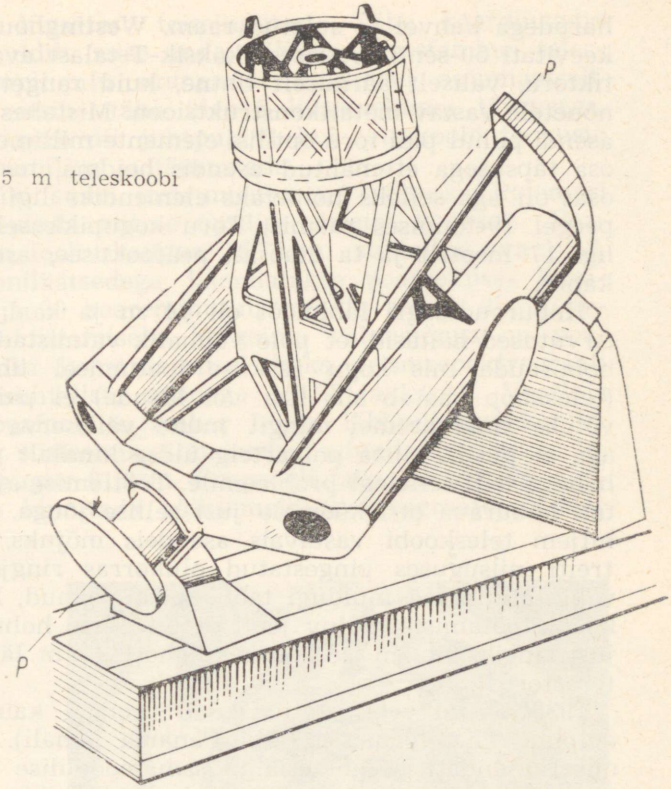
paneku peegli tagakülg kujundada ribilisena, nii et peegli mass oleks vähenenud, tugevus aga poleks kuigi palju kannatanud. See idee võetigi aluseks. Peeglit võis kujutleda 12 cm paksuse plaadina, mille tagaküljel olid 50 cm kõrgused tugevusribid. Muidugi tuli kõik koos valada ja vormi põhja paigutada 114 plokki ribidevaheliste õõnsuste moodustamiseks. Raskused tekkisid tühise asjaga: tulekindlast materjalist plokid tuli kuidagi vormi põhja külge kinnitada. Et aga paireks sulab 1500° C juures ja tardub umbes 1350° C juures, siis võis nii kõrge temperatuur olla ohtlik vormile ja kinnitusdetailidele. Corningi klaasitehase meister laskis plokid tugevate teraspoltidega põhja külge kinnitada. 23. märtsil 1934. aastal kogunes valamisele rohkearvuliselt pealtvaatajaid. Siis, kui enamik sulaklaasi juba vormis oli, kerkisid äkki vedela klaasi pinnale mõned vormiplokid — teraspoldid olid läbi sulanud. Neid püüti küll ruttu pikkade tangidega välja õngitseda, kuid siiski oli üritus nurjunud. Alles aasta lõpuks jõuti jälle valamiseni. Nüüd olid plokid vormipõhja kinnitatud erilisest tulekindlast kroomnikkelterasest poltidega. 2. detsembril 1934. aastal täpselt kell 7.17 võttis hiiglakulp 350 kg vedelat hõõguvat klaasimassi ja viis selle rippteed mööda liikudes peegli valamisvormi. Pealelõunaks jõuti peegli vormi valada 104 kopatäit. Õhtupoolikuks oli klaas tardunud punaselt hõõguvaks klombiks ja edasist jahtumist hakati aeglustama elektrilise soojenduse abil. Kokku kestis jahtumine kaheksa kuud ning siis tuletas ketas meelde suurt ümarikku jääks külmunud tiiki. Jahutamise käigus seisis ta kord ka õnnetuse äärel: jõgi, mille kaldal tehas asus, ujutas kaldad üle ning vähe puudus ka suurt peeglit sisaldava ahju katastroofist. «17-jalaseks veskikiviks» nimetatud hiiglaketta transport Atlandi ookeani rannikult läbi kontinendi Vaikse ookeani äärde oli erakordne sündmus Ameerika Ühendriikide raudtee ajaloos. Corningist Pasadenani viidi peegli toorik erirongiga selleks ümberehitatud erivagunis. 20-tonnise ketta teraskast kaalus 12 tonni. Rong liikus aeglaselt, 40-kilomeetrise tunnikiirusega, ja ainult päevavalgel. Tee iga osa nõudis hoolast eelkontrolli võimalike takistuste vältimiseks (tunnelid, sillad jms.). Oli kohti, kust peegel mahtus läbi vaid kümmekonnasentimeetrise vahega. Reis läbi Ameerika kestis kaks kuud. Vastloodud optikatöökojas Pasadenas ootas klaastoorikut uus, maailma kõige

täiuslikum ja suurem lihvimismasin. Normaalselt töötades tegi peegel sellel pingil 1 pöörde 159 sekundiga (ehk 0,377 pööret minutis). 20-tonnine ketas lihviti kõigepealt eest ja tagant tasaseks, seejärel lihviti üle 36 ümmargust ava tagakülgedes. Need olid ette nähtud kinnitusseadmetele ja jõudude jaotumise ühtlustamise seadmete jaoks.

Nõgusa esikülje vajalik sügavus (10 cm) saavutati kolme kuuga. Eraldati kokku 5 tonni klaasi. Siis mindi edasi pinna täpsemale töötlemisele. Nüüd tuli juba kõik vahendid tarvitusele võtta, et juhuslik liivaterake peegli pinnale raskesti kõrvaldatavaid kriimustusi ei tekitaks: töölised riietusid enne tööd täielikult ümber, üks kord päevas pumbati ruumist õhk välja ja asendati filtreerituga, külalised võisid tööd jälgida vaid klaasseina tagant. Sfäärilise pinna ja parabooli vahe oli peeglil umbes 0,14 mm. Ainult poleerimisega seda peeglit paraboliseerida ei saanud, tuli kasutada ka lihvimist. Suure töö katkestas sõda ja lõpuni jõuti alles 1947. aastal. Viimistlus seisis vahetpidamatus kontrollis ja märgatud vigade ettevaatlikus retušeerimises. Arvestusega, et peegel teleskoobis siiski mõnel määral kuju muudab, jäetigi servaossa mõningane viga. Parim on hea vaenlane — see aforism kehtib optika valmistamisel kindlasti.

1947. aasta novembrikuus alustas peegel politseikomando valve all viimast reisi Mount Palomari, mis viisteist aastat enne seda hoolsate astroklimaatiliste uurimuste ja vaatluste alusel teleskoobi asukohaks valiti. Kümne väikese teleskoobiga oli enne mõõdetud tähekujutiste stsintillatsiooni paljudes kohtades ja 1934. aastal oli 170 km kaugusel Mount Wilsonist kinnistatud lõpuks maatükk uue observatooriumi jaoks. Mount Wilsoni observatooriumisse endasse giganti enam üles panna ei saanud, sest siin oleksid teda pimestanud Los Angelesi ja Hollywoodi tuledesärad. 1700 m kõrgusel mägedes asuva platooni ehitati kõigepealt tee, mida mööda kuni viiskümmend tonni kaaluvaid raskusi üles sai toimetada. Kaugele helendas tohutu kuppel, 42 m läbimõõdus ja 41 m kõrge. Kupli all asus 2 majakorrust laboratooriumide, ettevalmistusruumide ja tehniliste seadmetega. Riista ennast saavad külalised vaadelda ainult läbi klaasseina.

Statiivi valmistamisega oodati seni, kuni lõplikult sai selgeks peegli õnnestumine. Palju oli diskussioone sta-



Joonis 22. 5 m teleskoobi monteering.

tiivi ja monteeringu üle. Tavaline raammonteering oleks mehhaanika seisukohalt kõlvanud, kuid kahjuks jääb sel puhul taevapooluse ümber üsna suur ala teleskoobile kättesaamatuks. Selle poolest on kahvelmonteering parem, kuid siin oleksid tekkinud väga rasked konstruktsioonilised probleemid — toru ja peegli orienteeruvat kogukaalu hinnati 150 tonnile. Lõpuks jõudis grupp insenere ja teadlasi ühiselt üsna originaalse kahvel- ning raammonteeringu kombinatsioonini (joonis 22). Toru kinnitati tavalisel viisil raami vahele, kuid ülemises otsas oli raam kahvlitaoliselt avatud ning mõlemad harud ühendatud hoburauakujulise toega. Seesama hoburaud ise oli ühtlasi polaartelje ülemiseks laagriks. Niisiis ühendati avatud

harudega kahvel ja suletud raam. Westinghouse'i firmas keevitati 50-sentimeetrisest kaksik-T-talast avatud sõrestiktoru, väliselt äärmiselt lihtne, kuid rangetele jäikusnõuetele vastav metallkonstruktsioon. Mistahes teleskoobi asendi puhul pidi toru optilisi elemente millimeetri murdosa täpsusega ettenähtud asendis hoidma, toru alumises osas oli aga selleks hoitavaks elemendiks ligi 15-tonnine peegel 19-tonnises raamis! Toru kogupikkuseks kujunes ligi 17 meetrit ja ta ülaosas, peafookuses, asus vaatleja kabiin.

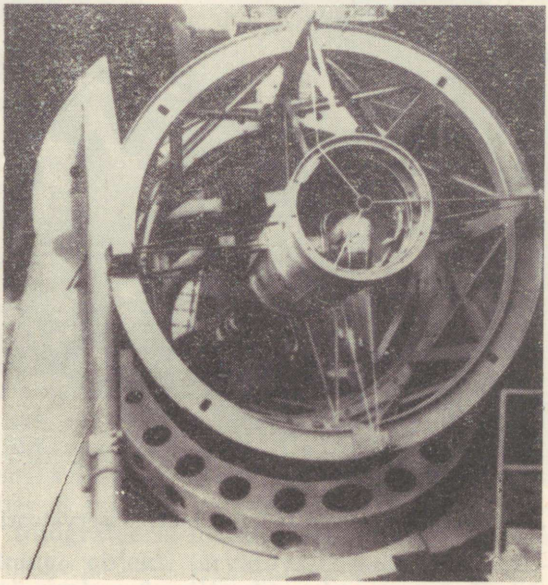
Hoburaudlaagri läbimõõt oli 14 m ja kaal 145 tonni. Arvutused näitasid, et pole võimalik valmistada nii jäika hoburauda, mis kogu raskuse toetumisel ühele harule (teleskoop vaatab siis itta või läände) ei painduks ega võtaks ringi asemel mingit muud välisserva kuju. Siis aga ei püsiks riista polaartelg üldse kindlalt paigal. Lahendus leiti sellelegi probleemile. Töötlemise ajaks pingutati hoburaua otsi koomale just sellise jõuga, nagu neile hiljem teleskoobi vastavais asendeis mõjuks. Väliskuju treiti niisuguses pingestatud olukorras ringjooneliseks, vabastatuna see muidugi taoliseks ei jäänud, kuid teleskoobi töötamisel mõjuv jõud deformeerib hoburaua alati just ringiks. Raam ise koosnes kahest 3,2 m läbimõõduga terastorust.

1938. aastal veeti statiivi osad veeteed kaudu Philadelphiast Kaliforniasse (läbi Panama kanali). Monteerimisel asendati peegel esialgu samamõõdulise betoonkettaga. Tohutut raskust kandvad laagrid pidid olema valmistatud kõrge täpsusega ning peale selle laskma riista kergelt ja sujuvalt mõlemas teljes pöörata. Eelmisel hiiglateleskoobil, Licki observatooriumi 2,5 m reflektoril, saavutati see elavhõbedaga, siin aga tuli otsida uut lahendust. 5 m teleskoop toetati õlipatjadele. Polaartelje hoburaudlaager toetub näiteks kahele pooleruutmeetrisele täpselt lihvitud klotsile, mille keskelt pumpadega klotsi ja hoburaua vahele õli surutakse. Mõnekümne-atmosfäärise surve all olev õli tõstab hoburauda kümnendikmillimeetri võrra ja seda oligi vaja. Teleskoobi 500-tonnine liikuv osa ujub õlil, nii uskumatu kui see ka on. Et riist on hästi tasakaalustatud, siis jätkub tema liigutamiseks kergest tõukest, ja kellamehhanismi elektrimootori võimsus on vaid 1/12 hobujõudu. Mootorit juhitakse kvartskellaga.

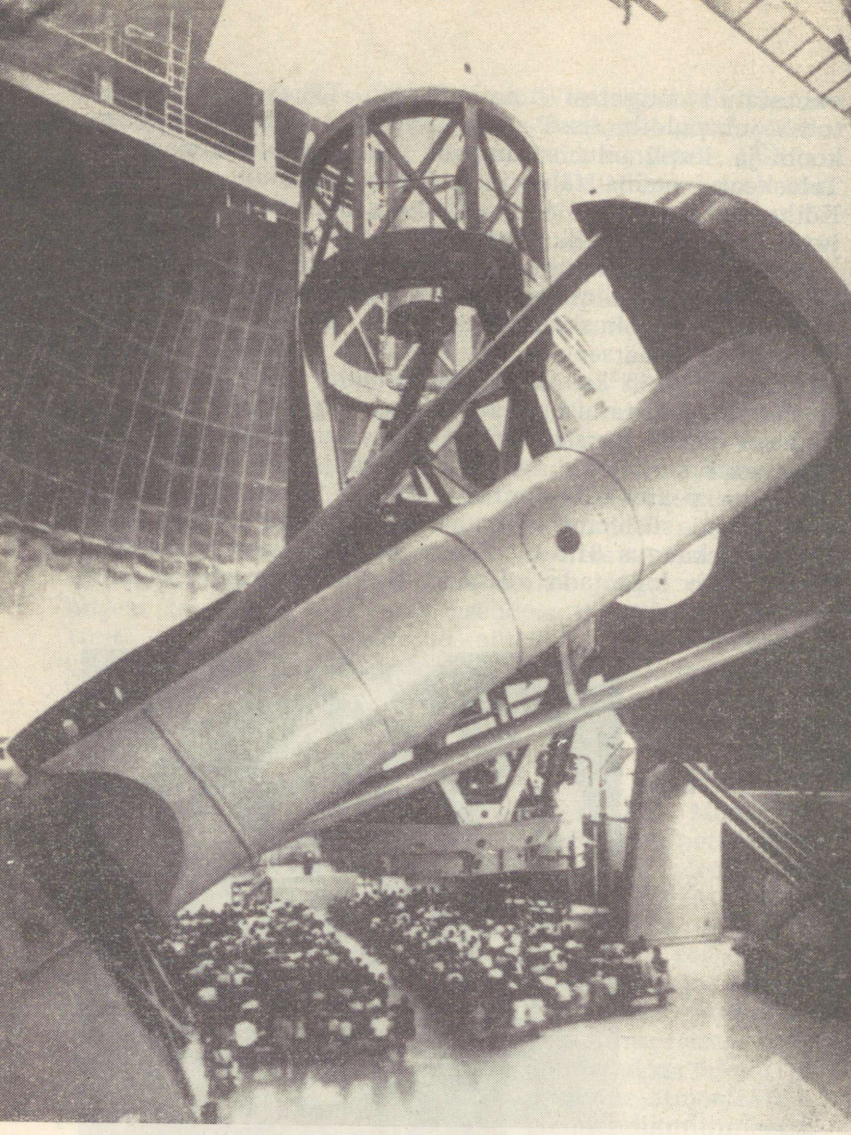
Teleskoobi juhtimine on automatiseeritud ja vaatleja on

vabastatud liigsetest toimingutest. Tähe koordinaadid tuleb juhtpuldilt sisse anda, täheaja arvestamine, teleskoobi ja kupli pilu suunamine toimuvad automaatselt. Teleskoop «otsib» tähe üles 5 kaaresekundi täpsusega. Kõike seda saab nii juhtpuldist kui teleskoobi fookuste juurest kontrollida ja täpsustada.

Nagu kõiki suuri instrumente, nii võib ka Palomari hiiglast kasutada mitme optilise skeemi kohaselt. Peafookuses on fookuskaugus 16,75 m, suhteline ava 1:3,3. Korrektsioonilääatsedega laiendatakse peafookuses kasutatavat välja 30 kaareminutini (muidu ainult 3′). Tähespektrite pildistamiseks kõrgeima valgusjõuga on peafookuse jaoks konstrueeritud kaks prismaspektrograafi kaamerate suhteliste avadega 1:0,95 ja 1:0,47. Vaatleja jaoks on peafookuse ümber 1,8 m läbimõõduga kabiin. Cassegraini süsteemis, standardse suhtelise avaga 1 : 16, on fookuskaugus 81,3 m. Peapeegli taha, Cassegraini fookusse, võib kinnitada väiksemaid spektrograafe. Kudee



Joonis 23. Vaatleja 5 m teleskoobi peafookuse kabiinis.



Joonis 24. 5 m reflektor Palomari observatooriumis.

fookus tuuakse liikuvast teleskoobiosast välja ühe või kolme tasapeegliga ja siin on fookuskaugus juba 152,5 m. Fookus asub konstantse temperatuuriga ruumis, kus kiirte teele võib asetada suuremaid, difraktsioonivõrede ja Schmidti kaameratega spektrograafe.

1947. aasta lõpul jõuti viimaks betoonketta asendamiseni tõelise peegliga. 21. detsembril 1947 vaatas inimene esmakordselt Maalt taevasse riistaga, mille sisendava pindala ületas miljonikordselt tema silmaava pindala. Küsimusele, mida ta näeb, vastas esimene vaatleja: «Oi, tähti!»

3. juunil 1948 anti teleskoop pidulikult ekspluatatsiooni (joonis 24). Kohal viibinud mõnesaja inimese hulgas polnud enam riista loomise initsiaatorit G. E. Hale'i, ka paljud teised komitee liikmed olid vahepeal surnud. Instrumendile anti avamisel George Elery Hale'i nimi.

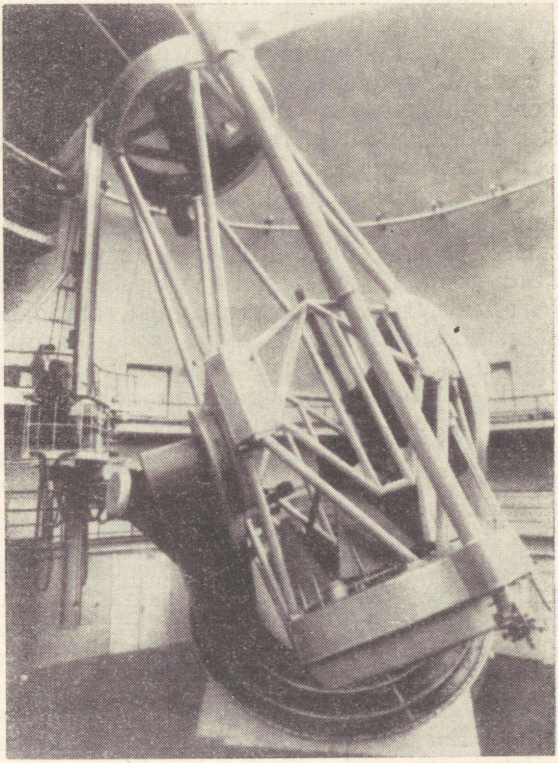
Järgnesid terved kuud justeerimist, proovifotosid, teste. Peegli servaosa, mis poleerimisel pisut kõrgemaks jäi, paistis nagu veelgi kerkinud olevat. Ka temperatuurimuutused ei mõjunud hiiglase peapeeglile just eriti hästi. 1949. aastal võeti peapeegel maha ja poleerimine jätkus. Ehkki poleerimistöö ise kestis vaid 9 tundi, läks proovivaatluste jätkamiseni siiski kokku pool aastat.

1950. aasta algusest peale on Hale'i teleskoop olnud igal selgel ööl taevasse suunatud. Programmides seisavad vaid kõige olulisemad ning kõige suuremat küündivust (või ka lahutusvõimet) nõudvad ülesanded ning neid on 5-meetrine väärikalt lahendanud. Üks neist oli näiteks spiraaludude probleem, mida riistaga saadi vaadelda kuni miljardi valgusaasta kaugusele maailmaruumis. Andromeeda udukogu uueks kauguseks andis teleskoop endisest kaks korda suurema arvu, sellega seoses tuli aga korrigeerida mõningaid teisigi galaktikaväliste objektide kaugusi. 5 m teleskoobiga pildistatud galaktika M 51 spiraalstruktuuri märkas esimesena 1845. aastal W. Parsons (lord Ross), nüüd aga jõuti üksikute heledamate tähtede eraldamiseni selles tähesüsteemis (galaktika M 51 asub meist umbes 8 miljoni valgusaasta kaugusel). Rudolf Minkowski fotografeeris mõne aasta eest 4,5-tunnise säritusajaga ülikauge objekti (arvatavasti galaktika), millest meid lahutab umbes 6 miljardit valgusaastat. Paralleelselt optilise reflektoriga tuli selle leidmisel kasutada veel kõrgema küündivusega raadioteleskoope.

Uute suurte teleskoopide projekteerimisele asudes tuleb inseneridel ja teadlastel lahendada palju äärmiselt raskeid ja vastuolulisi probleeme. Suurte maapealsete teleskoopide ehitamise otstarbekohasus üldse on seatud mõninga kahtluse alla. Kaasaegne suur teleskoop kujutab endast unikaalset ehitiste, konstruktsioonide ja aparatuuri kompleksi, mis ei jää maksumuselt ega keerukuselt maha kõige suurematest teadusliku uurimistöö vahenditest, nagu seda on aatomireaktorid ja elementaarosakeste kiirendajad. Samas on aga teada, et suurte riistade lahutusvõimed ei ulatu tegelikel vaatlustel kunagi nende teoreetiliste väärtusteni: Maa atmosfääri ebaühtlus ja liikumine rikub kujutise. Väidetakse, et teatud läbimõõdust (umbes 60 cm) alates määrab teleskoobi tegeliku lahutusvõime tähekujutise atmosfäärne turbulentsketas ja seega olevat suurema läbimõõduga teleskoopide ehitamine peaaegu mõttetu. Kinnituseks tuuakse näitena 5 m teleskoobi lahutusvõime, mis optika poolest peaks olema paar sajandikku kaaresekundit, kuid tegelikult on mitukümmend korda halvem. Viimasel ajal on reaalseteks saanud vaatlused väljaspool Maa atmosfääri, kus teleskoobi lahutusvõime tõesti saavutab teoreetilise väärtuse ja lisaks avanevad võimalused vaatlemiseks Maal kättesaamatutes spektriosades.

Suurte teleskoopide ehitamist siiski jätkatakse. Nimelt pole lahutusvõime teleskoobi ainsaks nõutavaks omaduseks ja ka lahutusvõime kohta võib öelda, et esineb häid atmosfääriolukordi ja -tingimusi, kus suured riistad võivad selleski osas näidata oma tõelist võimsust. Suurt ning kallihinnalist instrumenti kitsalt spetsiaalsete vaatluste jaoks ehitada läheks liiga kulukaks ja seepärast eelistatakse universaalseid, mitme optilise skeemi järgi töötavaid teleskoope. Lihtne loogika näitab, et teleskoobi küündivus suureneb võrdeliselt tema valgust koguva pindalaga, seega läbimõõdu ruuduga. Teiselt poolt väheneb valgusallika näiv heledus võrdeliselt kauguse ruuduga ja neid suhteid omavahel ühendades näeme, et vaatlusteks kättesaadava maailmaruumi raadius suureneb ligikaudu võrdeliselt teleskoobi läbimõõduga. Instrumendi kogukaal ning ehitamiskulud kasvavad aga võrdeliselt läbimõõdu kuubiga!

1954. aastal telliti Leningradi optika-mehhaanikatehaselt Krimmi astrofüüsika observatooriumile 2,6 m läbimõõduga reflektor. Nõukogude optikatööstusele oli see väga tõsiseks ülesandeks: valmistada tuli Euroopa suurim teleskoop ning lahendada kõik tehnilised ja isegi põhimõttelist laadi raskused. Siingi jäi otsustavaks universaalsus: teleskoopi võib ühe peapeegli ($D = 2{,}6$ m, 1:4) baasil panna tööle peafookuse, Cassegraini, Nasmythi ja kudee optilises süsteemis. Peale selle projekteeriti peafookuse jaoks kolm läätsedest korrektsioonisüsteemi, millega saab suurendada kasutatavat fotografeerimisvälja (12′, 28′ või 45′) ja varieerida suhtelist ava. Cassegraini ning



Joonis 25. Euroopa suurim reflektor ЗТШ ($D = 2{,}6$ m) Krimmi observatooriumis.

Nasmythi süsteemides on suhteline ava 1:16 ($F = 41$ m), kudee süsteemis 1:40 ($F = 104$ m). Teleskoobi monteering kujutab endast kahvelmonteeringu erikuju (joonis 25). Kahvli harude aluseks on 5,5-meetrise läbimõõduga metallplatvorm, mis servast toetub hüdraulilistele patjadele. Ka kahvli alumine ots on hüdrostaatilise laagerdusega ja kujutab endast peaaegu optilise täpsusega töödeldud 1,4-meetrise läbimõõduga poolsfääri. Hüdrostaatilised laagrid on tegelikult üksikud padjad, milledesse pumbatakse umbes 40-atmosfäärisel rõhul õli. Õli tõstab padjal toetuva kahvli koos optilise süsteemiga üles ja moodustab õhukese kile, millel ujub teleskoobi liikuv osa. Selliste täpselt töödeldud laagritega saavutatakse pöörlemise erakordne kergus ja sujuvus, nii et 62-tonnist hiiglakonstruktsiooni võib pöörata lihtsalt käesurvega. Kahvli harude vahele kinnitub kahel käändetelje kuullaagril teleskoobitoru, täpsemalt, toru asendav metallkonstruktsioon. Et vältida lõtkusid käändetelje laagerduses, selleks monteeriti mõlemad laagrid umbes 15-tonnise eelpingestusega.

Teleskoobitoru konstrueerimisel seati põhimõtteks, et selle eesmine ja tagumine ots võivad teleskoobi horisontaalseisundis pisut küll nihkuda ristsuunas optilise teljega, kuid peavad seda tegema võrdselt ja jääma omavahel paralleelseks. Niisugust tingimust rahuldab metalltorudest sõrestikkonstruktsioon, nagu seda kasutati ka 5 m ja hiljem 3 m teleskoobi puhul. Valmistamine õnnestus hästi ja üheski teleskoobi asendis ei erine tema toru otste läbipainded üle 0,4 mm. Peegel toetub tagant erilisele toe vasturaskuste süsteemile, mis 24 punktis peegliketta sisse ulatudes ei lase tal deformeeruda üle sajandiku millimeetri, põhiliselt säilitab peegli esipind aga oma kuju vaatlustel 0,035 μm täpsusega.

Teleskoobi põhiosa — 2,6-meetrise läbimõõduga peegel — on nõukogude optilise klaasi tootmise suursaavutus. Toorik valati spetsiaalsest väikese paisumisteguriga klaasisordist ja teda jahutati aeglaselt maha erilises programmeeritava soojusrežiimiga ahjus 5 kuu jooksul. Sellega välditi sisepingete tekkimist 5,7 tonni raskuses klaaskettas. Edasi tuli peegli esipinnale anda paraboloidi kuju mikromeetri sajandikesse osadesse ulatuva täpsusega. Gorki freespinkide tehases projekteeriti ja valmistati selleks lühikese aja jooksul unikaalne lihvimis-poleeri-

mispink, mis kaalus 142 tonni ja seati üles 450-tonnisele vundamendile. Kokku eraldati lihvimise, poleerimise ja aukude puurimisega 1,7 tonni klaasi.

Teleskoop on hästi automatiseeritud. Kasutatakse enam kui 160 elektrimootorit; rida operatsioone, mida varem pidi juhtima astronoom, tehakse arvutusseadmetega, koordinaatide teisenditega, jälgivsüsteemidega. Teleskoobi juhtimine tähele, tähe jälgimine, fotokatikute avamine ja sulgemine, fokuseerimine, kassettide vahetamine — kõike saab korraldada kuplialusest suure klaasaknaga eraldatud juhtimispuldi ruumist või abijuhtimispultidest teleskoobi fookustes. Automaatsel suunamisel läheb teleskoop juhtimispuldi skaaladele seatud koordinaatidega määratud taevapunkti ± 10″ täpsusega.

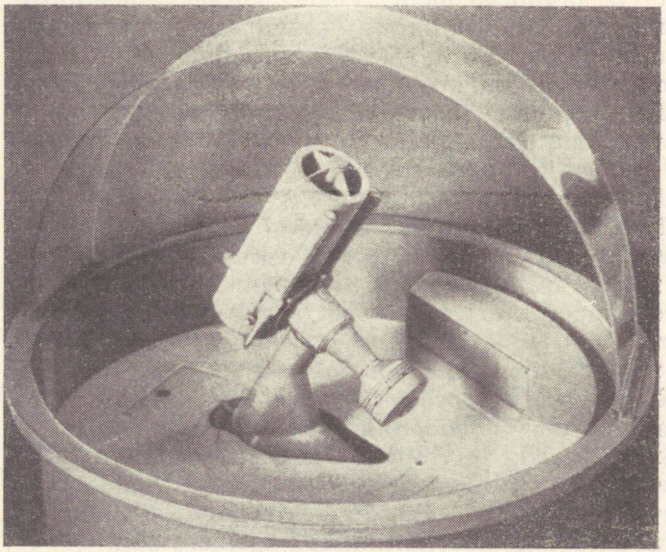
2,6 m teleskoop anti ekspluatatsiooni 1961. aastal. Talle anti väljapaistva nõukogude astronoomi G. A. Šaini nimi (ЗТШ — зеркальный телескоп имени Г. А. Шайна, G. A. Šaini nimeline peegelteleskoop). Teleskoobi, kupli, abiseadmete ja nende koostisosade projekteerimisest ja ehitamisest võttis osa 40 meie kodumaa mitmesugust ettevõtet ja organisatsiooni. Peale kõrgekvaliteediliste optilis-mehhaaniliste näitajate saavutamise teleskoobi enda juures pöörati palju tähelepanu sellele, et niipalju kui võimalik vältida kujutise kvaliteedi halvendamist atmosfääri maapinnalähedase kihi ja kuplisisese õhu poolt. Toetudes uusimatele sellealastele uurimustele, nähti ette mitmeid aktiivseid ja passiivseid võtteid heade optiliste omadustega keskkonna säilitamiseks teleskoobi sees ja ümber. Kuplialune ruum on varustatud õhu konditsioneerimise agregaadiga, teleskoobitoru on kuplialuse õhu termilisest mõjust isoleeritud, peegli ümber hoitakse oodatava õise temperatuuriga võrdset temperatuuri. Torni välisseinad kaeti päikesekiirgust peegeldava kaitsevõrestikuga, mis väldib seinte soojenemist päeval. Nähakse ette veel teleskoobi sõrestiktoru katmine polüetüleenkilega ja selle otsa ühendamine ülalt kupli avaga.

Reflektori juurde kuulub rikkalik lisaseadmete kogu mitmesugusteks vaatlusteks-mõõtmisteks. Peafookuses saab taevast pildistada valguse elektronoptilise võimendiga varustatud automaatjuhtimisega kaamera abil.

Mõneaastase ekspluateerimise jooksul on teleskoop end näidanud võimsa ja kõrgekvaliteedilise vaatlusriistana, ta on andnud nõukogude astronoomidele palju uut väärtus-

likku vaatlusmaterjali. Selle instrumendiga korraldati ka Kuu lokatsioon laserikiire abil: Kuult peegeldunud laserikiirt vaadeldi ja mõõdeti teleskoobi fookuses. Arvatakse, et taolised katsed võivad viia kuupinna detailse kaardistamiseni laserikiirega «kompimisel» saadud andmete järgi, aga tulevikus olla energia ülekandeviisiks Maalt Kuul asuvasse baasi.

1958. aastal, kui Krimmi observatooriumi suur teleskoop oli alles ehitamisel, konstateeriti NSV Liidu Teaduste Akadeemia Presiidiumi koosolekul, et samal ajal kui teoreetilised tööd on viinud meie kodumaa astronoomiateaduse juhtivale kohale maailmas, oleme ikka veel puudulikult varustatud instrumentidega praktilisteks vaatlusteks. Eriti andis tunda suurte teleskoopide puudumine observatooriumides Galaktika kaugemate osade, teiste galaktikate ja tähtede kujunemise uurimisel ning tehiskaaslaste ja kosmoserakettide vaatlemisel. Võeti vastu ajaloolise tähtsusega otsus: Nõukogude Liidus ehitatakse uus, maailma suurim teleskoop, mille peegli läbi-



Joonis 26. Struve-nimelisele observatooriumile ehitatava 1,5 m reflektori makett.

mõõt on 6 meetrit. Grandioosse riista loomiseks kavandati konkreetsed abinõud ja nähti ette mitmete instituutide ning organisatsioonide osavõtt üritusest. Lisaks Euroopa suurimale teleskoobile 3TIII Krimmi observatooriumis ja ehitatavale 6-meetrisele gigandile saavad nõukogude astronoomid enda käsutusse lähemal ajal veel mitu suurte teleskoopide klassi kuuluvat riista. Saksa Demokraatlikust Vabariigist, Zeissi tehaselt sai 2 m reflektori Šemahha astronoomiaobservatoorium Aserbaidžaani NSV-s, 2,6 m teleskoopi ehitatakse Bürakani observatooriumile Armeenia NSV-s, alustatakse 1,5 m reflektori ehitamist Struve-nimelisele observatooriumile Tartus (joonis 26). Ka USA-s on lähema kümne aasta jooksul planeeritud üsna mitme suure teleskoobi ehitamine. On tehtud juttu kuni kümnemeetrise läbimõõduga riistast, kuid ilmselt tuleb sellesse suhtuda veel nagu tulevikufantaasiasse, pealegi on taolise üligigandi asemel kasulikum ehitada mitu väiksemat reflektorit. 5 m teleskoobi kordamise korral hinnatakse tema üldmaksumust umbes 15—20 miljonile dollarile. Näib, et nelja-viiemeetrise läbimõõduga riistade ehitamise poole USA astronoomid kalduvadki.

Tabel 4

Maailma suurimad optilised reflektorid

Läbimõõt m	Observatoorium	Riik	Valmimise aasta
6,0	—	NSVL	Ehitamisel
5,08	Palomari obs.	USA	1948
3,75	Kitt Peaki obs. *	USA	Ehitamisel
3,05	Licki obs.	USA	1959
2,6	Krimmi obs.	NSVL	1961
2,6	Bürakani obs.	NSVL	Ehitamisel
2,54	Mount Wilsoni obs.	USA	1918
2,5	Greenwichi obs.	Inglismaa	Ehitamisel
2,1	Kitt Peaki obs.	USA	1961
2,1	McDonaldi obs.	USA	1939
2,0	Tautenburgi obs.	SDV	1960
2,0	Šemahha obs.	NSVL	1966
2,0	Ondřejovi obs.	Tšehhoslovakkia	1967

* Alustatud on veel kahe 3,75 m läbimõõduga teleskoobi ehitamist Kanada jaoks ja Euroopa ühendatud lõuna-observatooriumi jaoks.

Kahekümnenda sajandi esimesel poolel peeti refraktorite ja reflektorite omavaheline ajalooline võistlus juba otsustatuks: moodsate, võimsate vaatlusriistadena tulid kõne alla ainult reflektorid. Paraboolse peapeegli korral oli neil optilisel teljel asuva tähe kujutis tõesti täiesti aberratsioonidevaba, kuid optilisest teljest pisutki eemaldudes hakkasid tähed muutuma väljavenitatud laigukesteks. Põhjuseks oli peamiselt optiliste kujutiste viga koma. Niisuguse teleskoobiga mõnest taevaalast tehtud fotol on kõigi vaatevälja keskkohast eemal asuvate tähtede kujutised varustatud sabadega, mis enamikus on pööratud vaatevälja keskele. Mida suurem on süsteemi suhteline ava, seda väiksemaks jääb fotografeerimiseks kõlblik väli. Siit on näha, et paraboolse peapeegliga teleskoop on väga hea riist üksiku objekti või kitsa taevaala uurimiseks enam-vähem optilisel teljel. Fookuses tekkivat head kujutist võib siis mõõta fotomeetriliselt, analüüsida spektraalselt või ka pildistada. Nii saadakse objekti või taevalõigu kohta küllalt üksikasjalisi astrofüüsikalisi andmeid. Reflektorid ei anna võimalusi saada suuremaid vaatevälju, nendega pole seega võimalik teha kiiresti fotosid suurematest aladest taevas. Selles osas olid klassikalisteks vahenditeks tavalised astrograafid, kuid kahjuks peatus ka nende areng koos läätsteleskoopidega. Astrograafide objektiividelt taheti korraga suurt fotografeerimisvälja ja suurt suhtelist ava; kuidas optikud ka ei pingutanud, häid tulemusi läätsobjektiivid ei andnud.

1931. aastal üllatas astronoomilise optika spetsialiste kogu maailmas uudis Hamburgist: Bergedorfi observatooriumi optik Bernhard Schmidt leiutas komavaba teleskoobi. Varem olid teada küll mõned katsed, kus püüti arvutada komavaba peegelsüsteemi, kuid tegemist oli peamiselt põhimõtteliste arvutustega ning tulemused näisid üsna raskesti realiseeritavatena. Schmidti idee oli aga geniaalselt lihtne ning tehniline teostamine näitas, et autoris oli tegemist ühtlasi suurepärase optikameistriga.

Kitsamas ringis oli Schmidt varemgi tuntud. Sajandi algul saabus Potsdami observatooriumi pakk, mille kaaskirjas paluti kontrollida pakis leidunud nõguspeegli kvaliteeti. Suur oli eriteadlaste üllatus, kui leiti, et peegli

valmistaja tuli lugeda oma ala väheste heade meistrite hulka — peegli kvaliteet osutus esmaklassiliseks. Järgnevate aastate jooksul valmistas Mittweidas elunev amatööroptik ja -astronoom Schmidt optilisi elemente veel mitme vaatlusriista jaoks.

Esimese maailmasõja ning sellele järgnenud kriisi- ja inflatsiooniaastatel tegeles Schmidt mitmesuguste asjadega: lihvis ümber vanu objektiive, konstrueeris optilisi seadmeid lennukitele ja arstiteaduse tarbeks, leiutas isegi tuulemootori laevadele, sai mitu patenti. Vahepeal tuli viibida ka vangilaagris ja töötada politsei järelevalve all, kuna Schmidti peeti kahtlaseks välismaalaseks.

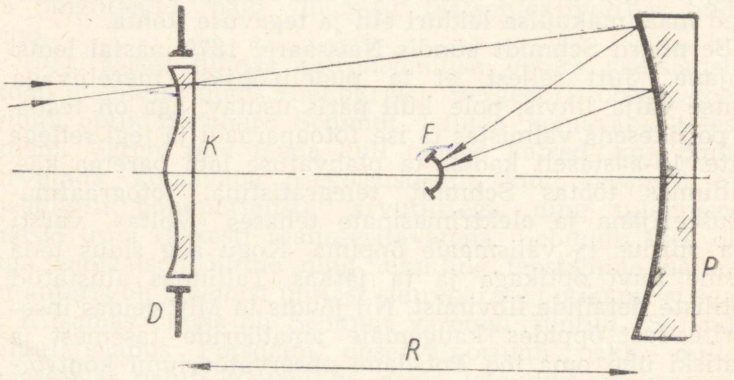
1926. aastast peale töötas Schmidt Hamburgis Bergedorfi observatooriumis. Siin tegeles ta põhiliselt suure vaateväljaga valgusjõulise optilise süsteemi loomisega. 1930. aastaks kroonis tööd edu. Valmis esimene taoline vaatlusriist, mida Schmidti kaamerate nime all tänapäeval tunneb kogu maailm. 1931. aastal avaldas autor ühes optika-mehhaanikaajakirjas selle kohta lühikese artikli ja jõudis Bergedorfi observatooriumile ise veel vaid ühe suurema kaamera teha. Geniaalne leidur suri 1935. aastal.

Bernhard Schmidti loeti kuni viimaste aastateni kogu maailmas sakslaseks. Seda üllatavam oli meie üldsusele teada saada, et tegelikult pärines Schmidt Eestist ning saksa astronoomid kinnitavad kategooriliselt, et ta oli rahvuselt eestlane. Mõne aasta eest asuti Struve-nimelises observatooriumis seda küsimust lähemalt selgitama ning praegu on meie käsutuses juba üsna põhjalikud andmed maailmakuulsa leiduri elu ja tegevuse kohta.

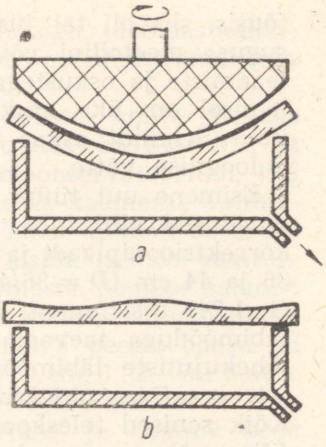
Bernhard Schmidt sündis Naissaarel 1879. aastal lootsi pojana. Jutt sellest, et ta pudelipõhjast mereliivaga läätse välja lihvis, pole küll päris usutav, aga on teada, et poisikesena valmistas ta ise fotoaparaadi ja tegi sellega pilte. 15-aastaselt kaotas ta plahvatuse läbi parema käe. Tallinnas töötas Schmidt telegrafistina, fotograafina-retušeerijana ja elektrimasinate tehases «Volta», varsti aga siirdus ta välismaale õppima. Kogu aeg sidus teda tõsine huvi optikaga ja ta jätkas Tallinnas alustatud optiliste detailide lihvimist. Nii jõudis ta Mittweidas inseneriteadust õppides kaugemale amatööride tasemest ja saatiski ühe oma töö Potsdami observatooriumi kontrollimiseks. Edasisest Schmidti käekäigust oli eespool juba juttu.

Schmidti nime kuulsaks teinud optiline süsteem polnud patenteeritud ja autor kaitses seda vaid valmistamismetoodika saladuses hoidmisega. Et Schmidt suri vallalisena, siis avaldati pärast surma kõik materjalid tema leiutise kohta kirjanduses ning sellele järgnes uue süsteemi levimine üle kogu maailma.

Schmidti optilise süsteemi aluseks oli sfääriline peegel. See näitas võib-olla kõige enam leiduri julgust uue lahenduse otsimisel; kõik senised katsed lähtusid ikka paraboolse peapeegliga klassikalisest süsteemist, kusjuures koma üritati vähendada muude võtetega. Schmidt pani sfäärilise peegli *P* kõveruskeskme kohale diafragma *D* (joonis 27). Sellega olid korrapealt kaotatud koma ja temale sarnane teine kujutise viga astigmatism: diafragmat läbivate paralleelsete kaldkiirte kimpude koondumine ei erine Schmidti teleskoobis milleski piki optilist telge langenud kiirte koondumisest. Igal juhul langevad kiired sfäärilisele pinnale ühtemoodi ja koonduvad kumerale fokaalpinnale *F*. Seega tekitab sfäärilisest peeglist *P* ja diafragmast *D* koosnev süsteem üsna laia vaateväljaga komavaba kujutise sfäärilisel pinnal *F*. Olles aga paraboolselt peeglilt tagasi läinud sfäärilisele, tekkis sfääriline aberratsioon. Selle parandas Schmidt uue optilise elemendi *K* — asfäärilise korrektsiooniplaadi — lisamisega diafragmasse. Sfääriline aberratsioon seisab selles, et peegli välimise osa fookus on peeglile lähemal kui keskosa fookus. Korrektsiooniplaat on servadest nõgusläätse



Joonis 27. Schmidti optilise süsteemi skeem.



Joonis 28. Schmidti korrektsiooniplaadi valmistamise vaakuummenetlus.

omadustega ja viib sel viisil fookust pisut peeglist kaugemale, plaadi keskosa aga on kumerläätse omadustega ja toob fookust veidi lähemale. Õigel korrektsiooniplaadi valmistamisel saavutatakse fookuste ühtelangemine — süsteem vabaneb sfäärilisest aberratsioonist. Joonisel 27 on korrektsiooniplaadi kuju esitatud tugevasti liialdatuna. Suhtelise ava 1 : 3 korral on plaadi pinna erinevus tasasest ainult sajandikmillimeetrid ja alles suhtelise ava 1 : 1,5 korral ulatub 0,3 millimeetrini (plaadi läbimõõduks on võetud 50 cm).

Bernhard Schmidti leiutises oli veel üks oluline komponent: asfäärilise korrektsiooniplaadi valmistamismeetod. Ehkki eeltoodud arvud ei paista olevat suured ja korrektsiooniplaati pealiskaudselt vaadates leiaksime ta olevat täiesti tasase, pole plaadile võimalik õiget kuju anda poleerimise teel, nagu seda enamiku sfääriliste peeglite paraboliseerimisel tehakse. Schmidt leidis, et midagi lähedast soovitavale plaadi kujule tekib servast toetatud plaadi deformeerimisel ühtlaselt jaotatud jõuga. See saigi valmistamismeetodi põhimõtteks. Tasaparalleelne õhuke klaasketas asetati ligi niisama suure läbimõõduga silindrilise nõu kaane kohale (joonis 28, *a*) nii hästi sobitatult puutejoonega, et nõust oli võimalik õhku välja pumbata. Tekkiva hõrenduse mõjul vajus plaadi keskosa nõgusaks ja sellises olukorras lihviti ning poleeriti teda sfäärilise pinnaga lihvimiskettaga. Nii lihviti plaadist teatud tsooni ja kui pärast õhu tagasilaskmist nõusse plaat uuesti üles

tõusis, siis oli tal just vajalik kuju (joonis 28, *b*). Niisuguse meetodini võis jõuda vaid põhjalike praktiliste teadmiste ja oskustega inimene. Suurte klaasketaste töötlemisel on üks raskemaid probleeme läbipaindumine, kuid Schmidt oskas sellest puudusest teha uudse tehnoloogilise võtte.

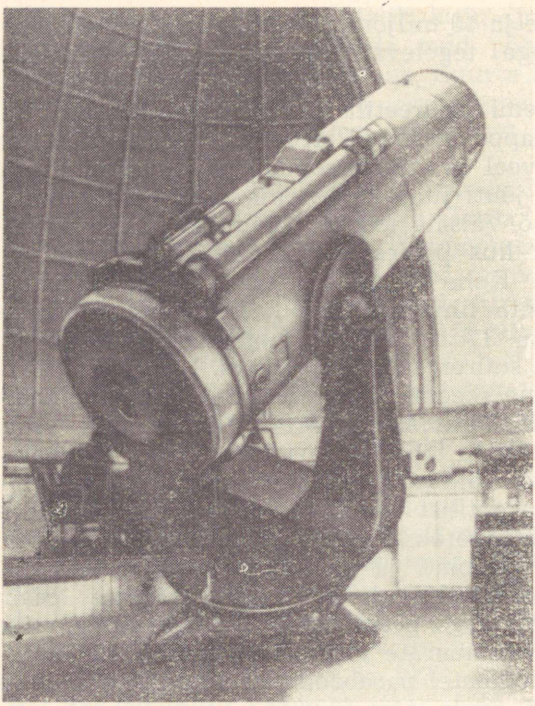
Esimene uut tüüpi kaamera valmis 1930. aastal ja ta omadused olid tolle aja kohta lausa sensatsioonilised: korrektsiooniplaadi ja peegli läbimõõtude puhul vastavalt 36 ja 44 cm (D = 36/44 cm) lubas see väga valgusjõuline (1 : 1,74) instrument kumerdatud filmile pildistada 16° läbimõõduga taevaala. Kogu välja ulatuses ei tõusnud tähekujutiste läbimõõt üle 30 μm, mis täielikult vastab astrograafide objektiividele esitatavatele tingimustele. Kõik senised teleskoobiliigid ei ulatunud oma fotograafilise võimsuse poolest Schmidti kaamerale lähedalegi. Esimesed teated uue süsteemi kohta äratasid kogu maailmas väga suurt huvi, sest täideti just need nõudmised, mida astrograafidele seni tagajärjetult esitatud oli: suuremate taevaalade fotografeerimine lühikeste säritusaegadega. 5 m peegelteleskoobi ehitamisega seotud Hale ja Anderson said Schmidti leiutise kohta andmeid kohe Bergedorfi esimese kaamera valmimise järel Schmidtiga koos töötanud W. Baadelt ja 1935. aastaks oli ka Ameerikas üks Schmidti kaamera (D = 45/65 cm, 1 : 2, väli 9°,5) juba valmis. Järgneva kolme aasta jooksul tehti sellega suurel hulgal ülesvõtteid ududest (fotodel registreeriti 3000 spiraalset galaktikat) ja avastati selle kõrval 12 supernoovat. Viimaste spektroskoopiliseks uurimiseks kasutati juba 2,5 m reflektorit. Nii ongi sellest ajast alates ülesanded ikka ära jaotatud: Schmidti kaamera on uurimisobjektide valikul võimsate reflektorite suurepäraseks abiliseks. Suure valgusjõu tõttu sisaldavad Schmidti kaameraga tehtud ülesvõtted ka nõrgalt helenduvaid objekte. Koostööks 5 m reflektoriga ehitati USA-s nn. «Big Schmidt» — hiiglakaamera järgmiste tehniliste andmetega: D=125/180 cm, 1:2,5, väli 6°. Kasutatakse fotoplaate 36×36 cm, millele 10-minutilise säritusajaga juba 20-nda tähesuurusega objektid peale jäävad. Peale muu võeti selle riistaga ette veel suur taeva kaardistamine: nähtav taevaosa fotografeeriti ala ala järel umbes tuhandele plaadile, igast alast üks võte punastes ja teine sinistes kiirtes. See suur taevaatlas, millele on kantud umbes

500 miljonit tähte ja 10 miljonit udukogu, jääb aastakümneteks vaatlustega tegelevate astronoomide põhiliseks abimaterjaliks.

Optilise süsteemi teoreetiliste aluste kohta avaldas Schmidt väga nappe andmeid. Huvitav on märkida, et maailmas leidus veel üks astronoomiaobservatoorium, kus Schmidti eluajal jõuti juba kaks tema kaamerat valmistada. See oli Yrjö Väisälä loodud Turu ülikooli observatoorium Soomes, kus professor Väisälä ise ka vaatlusriistad valmistas. Kohe pärast esimeste teadete saamist uue kaamera kohta lihvis Väisälä katseks enne väikese Schmidti kaamera 17 cm läbimõõduga peegli baasil ja 1934. aastal teise, suurema ($D = 50/50$ cm, 1 : 2, väli 6°40′).

Schmidti optiline skeem oli kahtlemata komavaba kaamera valmistamise optimaalne variant ja enamik seda liiki kaameraid kordab täpselt sama skeemi. Siiski tehakse katseid olemasolevaid puudusi kõrvaldada ja — eriti viimasel ajal — riista optilist võimsust veelgi tõsta. Schmidti kaamera konstruktiivseteks puudusteks on suhteliselt pikk toru, kõver kujutisepind ja fokaalpinna kättesaamatus visuaalseteks vaatlusteks. Et korrektsiooniplaat peab asuma koos diafragmaga peegli kõverustsentri kohal, siis kujuneb Schmidti kaamerate toru pikkus kaks korda suuremaks kui analoogilistel paraboolse peegliga riistadel — kõveruskeskpunkt asub teatavasti peeglist kaks korda kaugemal kui fookus. Ebamugav on ka filmi, eriti plaatide kõverdamine. Sellest pahest vabanemiseks soovitas juba Schmidt ise õhukest tasakumerat läätse kujutise ette paigutada ja pisut teisendatult (kaksikkumer lääts) tegigi seda Väisälä. Väisälä alustas ka katseid kaamera üldpikkuse vähendamiseks, tuues korrektsiooniplaati peeglile lähemale. Lõpuks jõudis ta sellega kujutise pinnani, s. t. toru pikkus vastas täpselt peafookuse optilise skeemi kohaselt töötava paraboolse peegliga teleskoobi pikkusele. Siiski ei saavutatud sellise lühendatud Schmidti kaameraga, mida ka Väisälä-Wrighti süsteemiks nimetatud on, niisugust kujutise kvaliteeti nagu originaalkujul.

Järgnevate aastakümnete jooksul esitati üsna mitmeid Schmidti kaamera täiendatud variante ehk modifikatsioone. Neljakümnendail aastail lisas James G. Baker skeemi kumera sekundaarpeegli, millega ta saavutas üldpikkuse mõningase lühenemise ja tegi kujutise pinna paremini kättesaadavaks. See skeem tuletab meelde Casseg-



Joonis 29. Bergedorfi observatooriumi (Hamburg) Schmidti süsteemi teleskoop (D = = 80/120 cm, F = 2,4 m).

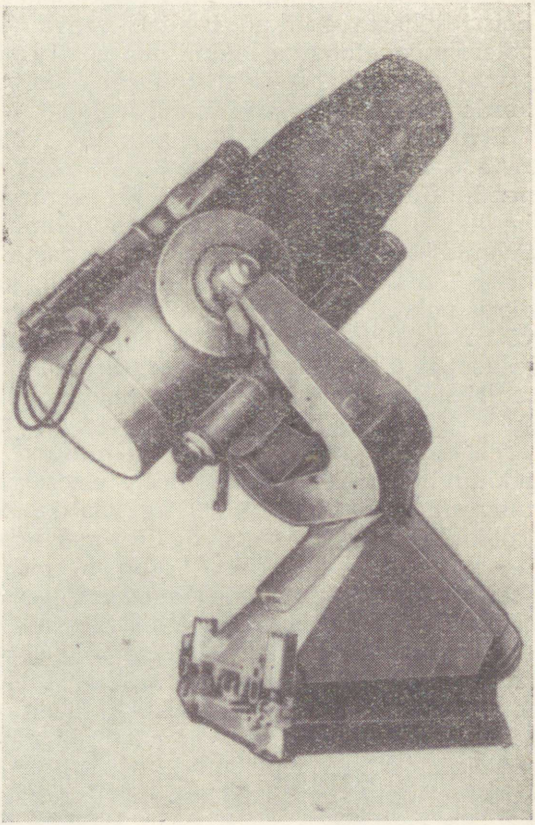
raini süsteemi ja teda nimetataksegi Bakeri-Schmidti või Schmidti-Cassegraini süsteemiks.

Uuematest ja suurematest Schmidti kaameratest olgu nimetatud 1955. aastal Zeissi tehaste poolt Hamburgi Bergedorfi observatooriumile tehtud instrument (statiivi valmistas üks Hamburgi firmasid) järgmiste tehniliste andmetega: $D = 80/120$ cm, 1:3, väli $5° \times 5°$ (joonis 29), samasuguse kaamera said 1965. aastal ka Riia astronoomid. Seda liiki riistadele pandud ülesannet — ülevaatefotode saamist taevaaladest — täidab Riia teleskoop kõige kaasaegsemal kujul: ta töötab raadioteleskoobi «abilisena» optilises spektriosas.

Leningradi optika-mehhaanikatehases konstrueeriti suur Schmidti kaamera mõned aastad tagasi Bürakani

observatooriumile Armeenias (D = 100/125 cm, 1 : 2,1, väli 4°30′). Kaamera varustati kolme objektiivprismaga. Valgusjõulisustava (vääristava) kattekihiga suur lääts muudab kujutise tasapinnaliseks 16×16 cm fotoplaatidel, küündivus fotografeerimisel on $20^m,5$ (joonis 30).

Kõige kaugemale on suure vaatlusriista universaalsuses mindud Saksa Demokraatlikus Vabariigis, kus firma «Carl Zeiss Jena» lõpetas 1960. aastal midagi Schmidti kaamera ja klassikalise reflektori hübriidi taolist. See on maailma



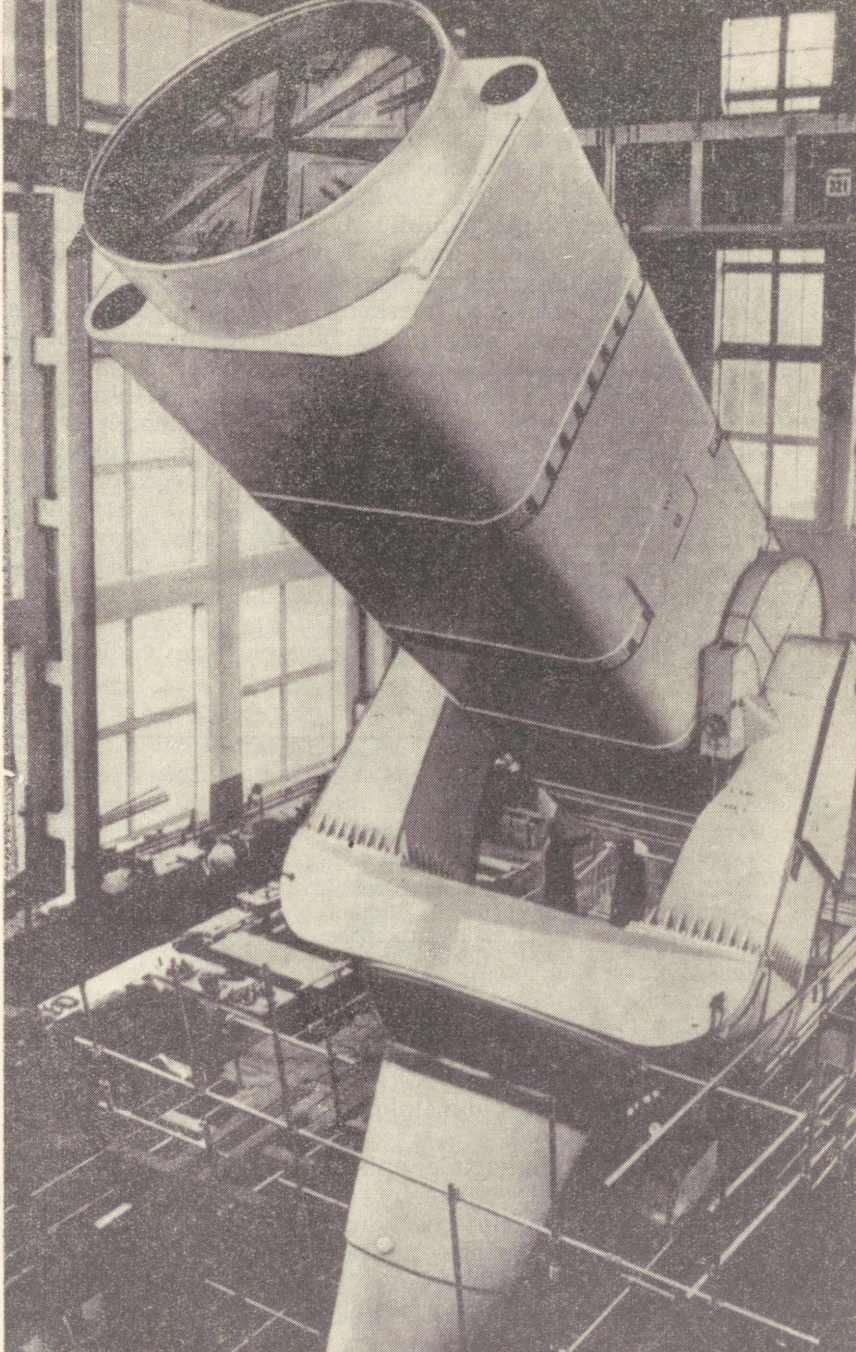
Joonis 30. Bürakani observatooriumi (Armeenia NSV) Schmidti süsteemi teleskoop (D = = 100/125 cm, F = 2,1 m).

suurim Schmidti kaamera: peapeegli läbimõõt on 2 meetrit, korrektsiooniplaadil 134 cm. Kuid astronoom H. Kienle, riista loomise initsiaator, julges sama peapeegli baasil ilma korrektsiooniplaadita ette näha ka teiste optiliste skeemide koostamise (Nasmythi ja kudee fookused). Et peapeegel on sfääriline, siis ei ole sekundaarpeeglid sugugi hüperboolse kujuga nagu tavaliste klassikaliste reflektorite sekundaarpeeglid, vaid hoopis teistsugused. Peapeegli valmistamine oli selle instrumendi juures palju lihtsam, sest jäi ära töömahukas ja hoolsat kontrolli nõudev paraboliseerimine, kuid sekundaarpeeglitega nägid Zeissi tehaste optikud tublisti vaeva. Õige lihvimis- ja poleerimismetoodika leidmiseks võeti appi isegi elektronarvuti. Sekundaarpeegel tuli teha umbes paarkümmend korda asfäärilisem kui muidu!

Schmidti süsteemis on kasutatav väli 4°, fotografeeritakse kõverdatavatele plaatidele 24×24 cm. Paarikümneminutilise säritusajaga küünib kaamera 21^{m},7 tähtedeni ja ületab seega endise suurima Schmidti kaamera «Big Schmidt» 0^{m},6 võrra. Esimese viie aasta jooksul saadi temaga ligi 2000 head suurt fotot, selgus ka, et kuigi küündivus pole «Big Schmidtiga» võrreldes eriti palju suurem, võis negatiividelt leida 50% võrra enam galaktikaid. Teleskoop varustatakse järk-järgult kõigi tavaliste universaalriistade lisaaparatuuriga nagu elektrofotomeeter ja spektrograafid.

Teleskoobil on omapärase nelinurkse ristlõikega 10 m pikkune toru (joonis 31), mille esiosas asub koos kinnitusseadmetega umbes 300 kg kaaluv Schmidti korrektsiooniplaat, tagaosas aga ligi 6 tonni kaaluv peapeegel ja tema raamistus (hoidik). Fotoplaat pidi igas võimalikus asendis ja temperatuuril jääma optilise süsteemi fookusse sajandikmillimeetri täpsusega. Lihtsad arvutused näitasid, et nii jäika toru pole üldse võimalik valmistada. Tuli kasutada deformatsioonist tingitud nihete kompenseerimist eraldi mehhanismidega. Optilised elemendid kinnitati liikuvatele hoidjatele ja need ühendati omavahel kangide süsteemiga. Kui nüüd toru viimisel ühest asendist teise (näiteks vertikaalsest horisontaalsesse) ta teatud

Joonis 31. Tautenburgi observatooriumi universaalne teleskoop (D = 134/200 cm). ▶



määral kõverdub, siis kangide süsteem nihutab optilisi elemente just vastassuunas ning need jäävad küllaldase täpsusega tsentreerituiks. Ka 92 m pikkuses kudee fookuses tohib tähe kujutis riista 360-kraadilisel pööramisel ainult paari millimeetri võrra nihkuda. Eraldi kompenseeritakse temperatuurimuutuste mõju. Toru sisemus oma rohkearvuliste mehhanismidega meenutab lennuki keret.

2-meetrine universaalteleskoop seati 1960. aastal üles vastloodud Karl Schwarzschildi nimelises observatooriumis Jena lähedal Tautenburgis. Observatoorium ja teleskoop on mõlema Saksa riigi teadlaste kasutada ning juhtivasse kuratooriumi kuuluvad esindajad mõlemalt poolt. Nagu mõne aasta jooksul teostatud teleskoobi uurimine ja teaduslikud vaatlused näitavad, on riist hästi õnnestunud. Maailma suurimat Schmidti kaamerat on astronoomide juures nii iseloomuliku koostöö ja vastastikuse abistamise korras kasutanud ka külalisvaatlejad Tšehhoslovakkiast, Poolast, Nõukogude Liidust, Kanadast ja mujalt. Lühemat aega on observatooriumis töötanud ka W. Struve nimelise Tartu Astrofüüsika Observatooriumi teadlased.

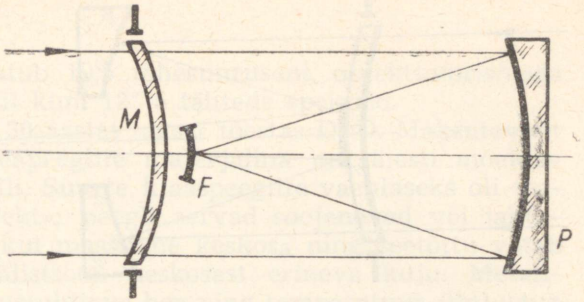
Tabel 5

Maailma suurimad Schmidti kaamerad

Läbimõõt cm	Suhteline ava	Asukoht	Riik	Valmimise aasta
134/200	1 : 3	Tautenburgi obs.	SDV	1960
125/180	1 : 2,5	Palomari obs.	USA	1948
100/135	1 : 3	Upsala ülikool	Rootsi	1962
100/125	1 : 2,1	Bürakani obs.	NSVL	1962
84/117	1 : 2,5	Uccle obs.	Belgia	1958
80/120	1 : 3	Bergedorfi obs. (Hamburg)	SFV	1955
80/120	1 : 3	Riia	NSVL	1966
80/91	1 : 2,6	Bloemfonteyn	L.-Aafrika	1949

maksutovi süsteem ja metallpeeglid

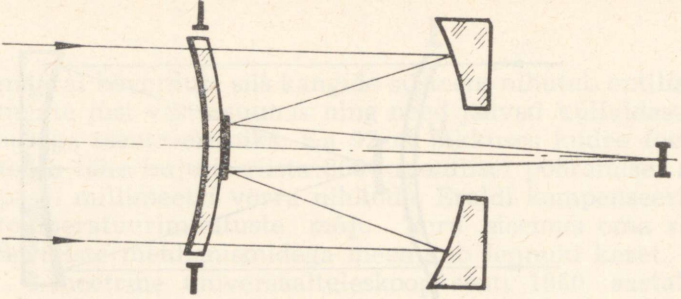
Väljapaistev nõukogude optik D. D. Maksutov leiutas 1941. aastal optilise süsteemi, mis seisab Schmidti kaamera tasemel ja milles osa viimase puudusi on kõrvaldatud. Oma astronoomilise optika küsimustele pühendatud raamatus kirjeldab Maksutov huvitavalt neid mõttekäike, mis viisid teda uue süsteemi leiutamiseni. Seades endale



Joonis 32. Maksutovi menisksüsteemi skeem.

ülesandeks odavate kooliteleskoopide loomise, jäi ta peatuma reflektorite klassikalisel paraboolse peegliga skeemil ja nägi siin suure puudusena toru avatust, mis jätab põhilise ning hinnalisema koostisosa — peapeegli — täiesti kaitseta välismõjude eest. Tolmus ja niiskuses tuhmub peegelpind kiiresti, aga pole ka võimatu esemete kukkumine peeglile. Tekkis mõte sulgeda sisendava klaasplaadiga. Selle külge võis omakorda kinnitada Newtoni diagonaalpeegli või isegi Cassegraini sekundaarpeegli. Aga võimalik oli ka klaasplaati kohe kõverdada või ta keskosa selliselt lihvida, et peegeldava kihiga kaetuna oleks ta ise sekundaarpeegliks. Kui eesmine külg teha plaadil samamoodi nõgus, nagu tagumine on kumer, siis selline meniskiks nimetatav element ei koonda ega hajuta kiiri. Kas ei tekita ta aga aberratsioone? Kipub küll ilmuma kromaatiline aberratsioon, kuid sellest saab vabaneda. Siit pidi D. D. Maksutov peaaegu väärale teele sattuma, soovides hakata aberratsioonivaba meniskit kujundama. Kuid õigel ajal tuli tal mõte, mis antud skeemist tegi uue suurepärase optilise süsteemi: kui peapeegel oleks sfääriline, siis võiks tema sfäärilist aberratsiooni kõrvaldada meniski vastupidise aberratsiooniga. See oli Maksutovi menisksüsteemi sünnihetk. Järgnesid arvutused ja esimeste kaamerate valmistamine. Kõik oletused osutusid õigeks. Lühikese aja jooksul levisid uued kaamerad astronoomide hulgas ja said hea hinnangu.

Menisksüsteem koosneb lihtsamal juhul (joonis 32) sfäärilisest peapeeglist *P* ja selle ees paiknevast meniskist *M*. Menisk on õhuke kumernõgus element, mille mõlemate pindade kõverusraadiused on peaaegu võrdsed. Meniski asukoht arvutatakse, kuid üldiselt asub ta peegli peafoo-



Joonis. 33. Maksutovi menisksüsteemi Cassegraini skeemiga variant.

kuse lähedal. Süsteemis kaovad sfääriline aberratsioon, koma, astigmatism ja kromatism. Suhtelise ava 1:2 korral on näiteks menisksüsteemi sfääriline aberratsioon 22 korda, kromaatiline aga enam kui sada korda väiksem kui vastaval läätsobjektiivil. 1944. aastal valmistati riiklikus optikainstituudis ülisuure valgusjõuga meniskobjektiiv ($D = 133$ mm, 1:0,75, väli 15°). Enamikus piirab väljade edasist suurendamist sfäärilise aberratsiooni jääk, kuid vajaduse korral saab sedagi kaotada, andes meniskile poleerimisel väikese asfäärilisuse (retušeerimine). Põhiskeemi baasil võib konstrueerida menisksüsteeme kõigi klassikaliste reflektorite optiliste süsteemide analoogidena. Kinnitades meniski külge diagonaalpeegli, saame peafookuse tuua torust välja; pannes samasse kohta kumera sekundaarpeegli, saame pikendatud (Cassegraini) fookuse suunata läbi peapeegli ava toru taha (joonis 33) jne. Kõiki skeeme on edukalt ka praktikas kasutatud.

Üks võimsamaid Maksutovi meniskkaameraid seati 1955. aastal üles Abastumani observatooriumis Gruusia NSV-s. Optika autoriks on G. G. Sljussarev, peakonstruktorina töötas B. K. Ioannisjani. Riist omab peafookuse ja Nasmythi fookuse. Sfääriline peegel ($D = 98$ cm, 1 : 3) ja ultraviolettklaasist menisk ($D = 70$ cm) annavad peafookuses kasutatava välja 4°50′. Kujutise kõverus korrigeeritakse läätse abil 18×18 cm fotoplaadi ees. Nasmythi fookuses ($F = 1050$ cm, 1 : 15) on väli 20′ või 40′ olenevalt kasutatavast kompensatsioonilääts ede komplektist. Spektraalseteks vaatlusteks kuuluvad teleskoobi juurde objektiivprisma ja difraktsioonivõrespektrograaf. Teleskoop on konstrueeritud tüüpilise kahvelmonteeringuga ja ta juhtimiseks asub kuplialuses ruumis eraldi pult (joonis 61).

Küündivus ulatub 19,5 tähesuuruseni, objektiivprismaga saadakse plaadil kuni $12^{m},5$ tähtede spektrid.

Rohkem kui 30 aastat tagasi tõestas D. D. Maksutov, et teleskoopide peapeeglite materjalina on täiesti mõeldav kasutada metalli. Suurte klaaspeeglite vaenlaseks oli teatavasti «ääreefekt»: peegli servad soojenevad või jahtuvad kiiremini kui massiivne keskosa ning seetõttu võtab peegelpinna välistsoon keskosast erineva kuju. Metallpeeglil on soojusjuhtivus hea ning temperatuur ühtlustub kogu peegli ulatuses väga kiiresti. Kui temperatuuri muutumisel teleskoobitoru soojuspaisumise tõttu muutubki fookuse asukoht, siis võib isegi loota, et metallpeeglite korral peegli enda kuju mõningane muutumine selle defokuseerumise just tasakaalustab ja kujutis jääb ikka teravaks.

Umbes kümmekond aastat tagasi asutigi Pulkovo observatooriumis ehitama 70-sentimeetrise metallpeegliga reflektorit PM-700. Esmakordselt maailmas prooviti sama teleskoobi juhtimissüsteemis rakendada numbrilist elektronarvutit. Tööst võttis osa rohkesti optikuid, konstruktoreid, elektroonikainsenere ja mehhaanikuid. Optilise süsteemi arvutamine ja peeglite valmistamine toimus D. D. Maksutovi juhendamisel, konstruktorina töötas 2,6 m teleskoobi peakonstruktor B. K. Ioannisjani ja juhtimissüsteem töötati välja N. N. Mihhelsoni juhtimisel. Roostevabast terasest valati 72 cm läbimõõduga, tagaküljelt ribiline metalltoorik, mille üldpaksus oli umbes 10 cm. Pärast kuju esialgset väljalihvimist alustati Pulkovo observatooriumi optikatöökojas poleerimist. Üsna ruttu jõuti optiliselt väga hea sfäärilise pinnani ja siis, nagu tavaliselt, asuti seda paraboliseerima. Tuletame siinkohal enne meelde, kuidas paraboliseeritakse klaaspeeglit: poleerimiskettale tehakse sisselõiked selliselt, et sügavamaks muudetav tsoon peeglil soojeneb poleerimise tõttu rohkem, soojuspaisumisest tingituna kerkib seesama tsoon siis kõrgemale ja poleeritakse maha, pärast jahtumist aga langeb ta alla, nagu oligi soovitud. Metallpeegli juures ootas optikameistreid üllatus — nii nagu metallpeegli puhul ei esine «ääreefekt», nii ei soojene tal ka poleerimisel ükski tsoon kuigivõrd rohkem kui teised. Tuli välja töötada hoopis uus poleerimismetoodika ja ületada väga palju raskusi. Mitukümmend korda tavalisest töömahukam paraboliseerimine lõpetati alles poolteise aasta pärast. Võrdluseks

valmistati teleskoobile teine samasugune peapeegel paireksklaasist. Praegu kestab selle omapärase eksperimentaalteleskoobi katsetamine ja uurimine.

Üsna originaalse metallpeegliga teleskoobi ehitas 1908. aastal USA-s «füüsikalaboratooriumi võluriks» hüütud väljapaistev eksperimentaator Robert Wood. Woodi reflektori peapeegel oli elavhõbedast, mis lamedas kausikujulises nõus pöörlema pandi. Ühtlase kiirusega pöörlevas anumas võtab elavhõbe paraboloidi kuju. Mõistagi saab sellist peeglit kasutada vaid rangelt horisontaalasendis ja seega võib teleskoobiga vaadelda ainult seniiti. Wood konstrueeris elektrimootorile spetsiaalse ülekande, mis ei andnud vibratsioone edasi peeglile, ja paigutas siis mootori ning peegli kaevu põhja. Seistes kaevu serval võis hästi näha parajasti seniidis olevaid tähti. Instrumendi fookuskaugust sai pöörlemiskiiruse reguleerimisega muuta 1,2 kuni 4,7 meetrini. Woodi uut liiki peegliga «kaevteleskoop» tekitas omal ajal ajakirjanduses palju kõmu, kuid asjatundjaile oli muidugi algusest peale selge sellise leiutise väärtusetus. Kuigi Wood olevat hiljem vaadeldavat taevaosa laiendanud periskoobitaolise suunatava tasapeegliga kaevu serval, nõudis elavhõbepeegel äärmiselt ühtlast ning vibratsioonita ja tõugeteta käitamist, mida tegelikkuses ellu viia ei saanud. Pole teada, et hiljem kusagil seda teravmeelset, ent praktiliselt kasutut ideed veel keegi oleks rakendanud.

Alles plastmasside ajastul ilmus ajakirjanduses teade, et Woodi peeglit olevat kasutatud kumerate plastmassmatriitside valamiseks. Pöörlevale elavhõbepeeglile valati kerge vedel plastmassi tooraine, mille tahkestumisel saadi hea paraboloidikujulise pealispinnaga matriits uute nõguspeeglite vormimiseks plastmassist.

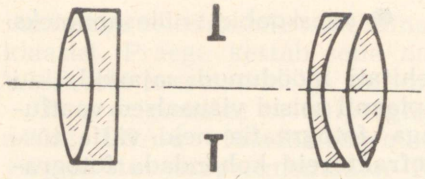
Tabel 6

Suuremad Maksutovi süsteemi meniskteleskoobid

Läbimõõt cm	Suhteline ava	Asukoht	Valmimise aasta
70/100	1 : 3	Pulkovo obs. vaatlusbaas Tšiilis	1965
70/98	1 : 5	Abastumani obs. Gruusia NSV-s	1955
50/70	1 : 4	Moskva ülikooli obs. vaatluspunkt Krimmis	1956
50/67	1 : 2,4	Alma-Ata obs. Kasahhi NSV-s	1950

Suurimad refraktorid ehitati möödunud sajandil, kui astronoomias ikka veel esiplaanil seisid visuaalsed vaatlused. Aegamööda hakkas aga fotograafia neid välja tõrjuma ja vastavalt püüti refraktoreid kohandada fotografeerimiseks. Siin tekkis tõsiseid raskusi. Instrumentide objektiivid koondasid samasse fookusse vaid kollased ja rohelised kiired, ülejäänute puhul oli kromatism parandamata. Tähekujutisi ümbritses isegi visuaalsel vaatlemisel purpurne oreool, sest punased ja sinised kiired, mille suhtes silm on vähem tundlik, ei koondunud samasse fookusse. Fotoplaadid olid aga algul tundlikud just sinistele ja violetsetele kiirtele. Tuli kasutada mitmesuguseid parandusvõtteid, lisati läätsi objektiivi koosseisu, et nihutada akromaatsus fotograafiale vajalikku spektriossa. Hiljem ilmusid kollaste kiirte suhtes tundlikud ortokromaatilised plaadid ja kui sinised kiired kollase filtriga ära lõigati, punastele aga plaadid polnud tundlikud, siis võidi visuaalseid refraktoreid üsna edukalt fotografeerimiseks tarvitada. Pealegi tehti suured refraktorid väikese suhtelise avaga (1:15... 1:30), mis vähendas veelgi jääkkromatismi. Kaheläätseliste astrograafi-objektiivide arvutustes parandatakse praegu kromatism enamasti tavalise fotoemulsiooni kõige suurema tundlikkuse piirkonnale 0,43 μm ligidal. Tegelikkuses piiravadki selliste objektiivide kasutatavat välja muud aberratsioonid (välja kõverus ja astigmatism). Viimaste otsustaval parandamisel tuleb üle minna objektiividele, mis sisaldavad rohkem kui kaks läätse. Seda ka üldiselt tehakse, kuid astronoomias piirdutakse üsna paljudel juhtudel lihtsate kaheläätseliste akromaatidega.

Kaks aastat pärast fotograafia sündi, 1840. aastal, toimus läätsobjektiivide valmistamises revolutsiooniline pööre: Viini matemaatik Joseph Petzval koostas esmakordselt maailmas objektiivi optilise skeemi ainult arvutuste põhjal. Firma «Voigtländer» poolt valmistatud ja turule lastud portreeobjektiiv «Petzval» tõestas suurepäraselt arvutusmeetodi üleolekut seni valitsenud proovimismeetodist. Juba valgusjõud oli tolle aja kohta fantastiline — suhteline ava 1:3,4 ületas ligi paarikümnekordselt seniste parimate objektiivide suhtelised avad. «Petzvalid» koosnevad kahest osast: eesmises kaks liimi-



Joonis 34. Objektiivi «Petzval» optiline skeem.

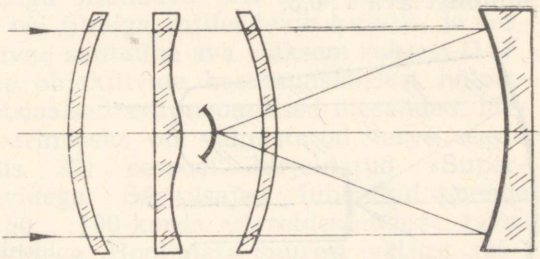
tud läätse nagu akromaatidel, tagumises kaks eraldi läätse (joonis 34). Portreeobjektiividel oli kahjuks märgatav kujutise kõverus ning eriti suurt välja seetõttu ei saadud, sama objektiivi astrograafilisel variandil aga õnnestus hästi parandada kõik põhilised kujutise vead (sfääriline aberratsioon, koma, astigmatism ja välja kõverus). Hiljem on Petzvali objektiivi suuremate või vähemate muudatustega korranud paljud konstruktorid ja optikafirmad; professionaalses ja rakendusfotograafias pole ta oma tähtsust kaotanud tänapäevani. Petzvali skeemi kohaselt ehitatakse portree-, projektsiooni- ja valgusjõulisi pikafookuselisi objektiive. Petzvali valgusjõuline objektiiv aitas kaasa fotograafia tähtsuse üldisele tunnustamisele, autori enda ulatuslikud teoreetilised arvutused, mis kahjuks pole publitseeritud ega säilinud, panid aluse objektiivide arvutamisele. Petzvali objektiiviga astrograaf ($D = 16$ cm, $F = 80$ cm) muretseti mõned aastakümned tagasi ka Tartu tähetornile. Algul kuulus ta teise refraktori juurde, kuid varsti eraldati iseseisvaks kaameraks ning on praeguseni töökorras. Astrograaf asub vana tähetorni kõrval Toomemäe serval seisvas väikeses tornis ning teda on edukalt kasutatud komeetide ja päikesesüsteemi väikekehade fotografeerimiseks. Kasutatava välja suuruseks on $4° \times 5°$.

Möödunud sajandi viimasel aastakümnel hakkasid optikakonstruktorid otsustavalt ründama kõigi seniste objektiivide suurt puudust: kujutise moonutumist teatud optilise aberratsiooni — astigmatismi mõjul ja sellega seotud parima kujutisepinna kõverust. Esimese anastigmaadi (astigmatismivaba objektiivi) arvutas saksa optik Paul Rudolph ja selle laskis 1890. aastal välja Carl Zeissi firma «Protari» nime all. «Protar» koosnes kahest komponendist, kumbki omakorda liimitud kahest läätsest. Kui seni lähtuti objektiivide konstrueerimisel põhimõttest vähendada iga komponendi vead miinimumini, siis

Rudolph toetus esimesena ainult kogu objektiivi korrigeerimise nõudele. Seega võis komponentidel eraldi olla küllaltki suuri aberratsioone, tähtis oli vaid see, et need üheskoos enam-vähem kompenseerusid. Niisugune lähenemine avardas tunduvalt konstruktorite võimalusi.

1902. aastal sündis P. Rudolphi arvutustest uus objektiiv, mille Carl Zeissi firma aasta hiljem «Tessari» nime all seeriatootmisse ja müügile laskis. See oli kolmekomponendiline ehk tripletanastigmaat, milles viimane komponent koosnes kahest liimitud läätsest. Võrreldes lihtsa tripletiga suurenesid korrigeerimisvõimalused, kuid säilis siiski vähesele komponentide arvule omane lihtsus ja odavus. Põhiskeemi kohaselt on «Tessareid» kerge ehitada kuni suhtelise avani 1:2,7 ja küllaldase väljaga (kuni 60°). Lahutusvõime ja tehnilise täiuslikkuse poolest moodustavad seda tüüpi objektiivid kõige õnnestunuma lihtsamate objektiivide variandi ning neid on paljud firmad ja konstruktorid jäljendanud sadades variatsioonides erinevate nimetuste all.

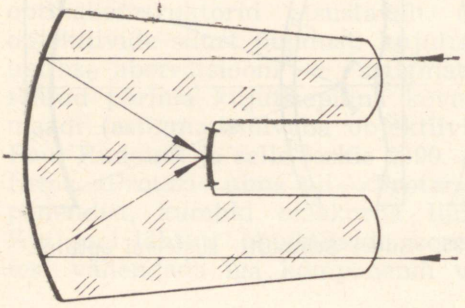
Objektiivide valgusjõu suurendamist on konstruktoreilt nõutud kogu fotograafia ajaloo jooksul. Ehkki primitiivne objektiiv suhtelise avaga 1:3,4 ehitati juba fototehnika arenemise algaastail, möödus enam kui pool sajandit, enne kui rakendusfotograafiat ja sealhulgas ka astrofotograafiat rahuldavad anastigmaatobjektiivid jõudsid suhteliste avadeni 1:6 ... 1:8. Alles 20. sajandi algul ilmusid tollal valgusjõulisteks nimetatud anastigmaadid 1:5 ... 1:4,5. Tänapäeval loetakse aga valgusjõulisteks juba objektiive suhteliste avadega 1:2 ... 1:1,2, kusjuures ülivalgusjõulisuse all mõistetakse üle 1:1 ulatuvaid suhtelisi avasid. Esimesed ülivalgusjõulised fotoobjektiivid töötati



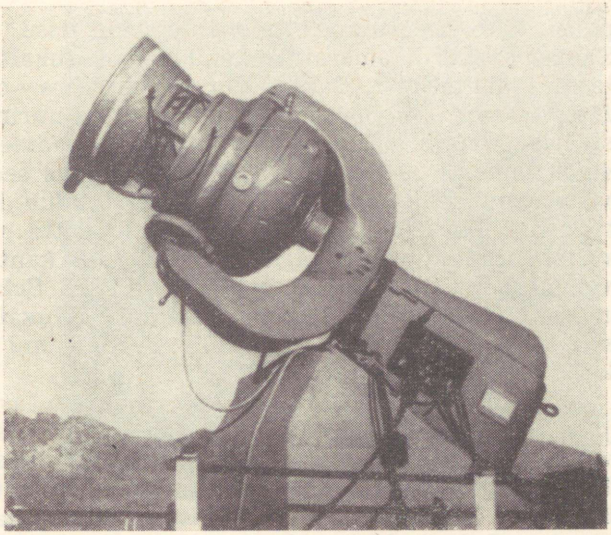
Joonis 35. «Super-Schmidti» süsteemi optiline skeem.

välja käesoleva sajandi kahekümnendail aastail tavaliste läätsobjektiivide baasil, et aga ülivalgusjõulisuse saavutamine oli seotud suurte raskustega nii otstarbekohase optilise skeemi leidmisel kui ka objektiivi tehnilisel valmistamisel, siis pöördus tähelepanu peegleid ja läätsi sisaldavatele objektiividele. Enamikul juhtudel võeti aluseks Schmidti või Maksutovi skeem, mis juba originaalkujus annavad suure väljaga valgusjõulised objektiivid, kuid leidub ka veel terve hulk kombinatsioone (Schmidti ja Maksutovi süsteemide modifikatsioonid), mida võib kasutada ülivalgusjõuliste objektiivide loomisel. Näiteks kaamerad «Super-Schmidt» koosnevad optilises osas sfäärilisest nõguspeeglist ja selle ette paigutatud kahest meniskist (Maksutovi süsteem) ning asfäärilisest korrektsiooniplaadist (Schmidti süsteem) (joonis 35). Peale saavutatavate ülisuurte suhteliste avade väärib sel puhul tähelepanu veel lai väli — meteooride fotografeerimiseks määratud astrokaamerail on näiteks objektiivide «Super-Schmidt» väli 55° ($D = 310$ mm, $F = 200$ mm, 1 : 0,65).

Äärmist valgusjõulisust taotledes loodi monoliitsest klaasist Schmidti kaamerad, kus õhk korrektsiooniplaadi ja peegli vahel on asendatud klaasi või mõne muu läbipaistva materjaliga (joonis 36). Kujutis tekib klaasi ja õhu piiril ning fotoemulsioon ühendatakse objektiiviga immersioonivedeliku abil, mille murdumisnäitaja ei erine objektiivi materjali omast. Kogu kaamera on äärmiselt kompaktne ja annab klaasist valmistatuna kergesti suhtelise ava 1 : 0,62. Et materjali murdumisnäitaja suurenedes kasvab valgusjõulisus ruutastmes, siis väidetakse, et suure murdumisnäitajaga materjalidest (teemant) monoliitseis Schmidti objektiivides võidakse realiseerida isegi suhtelist ava 1 : 0,3.



Joonis 36. Monoliitse Schmidti kaamera optiline skeem.



Joonis 37. Meteooride fotografeerimiseks määratud ülivalgusjõuline «Super-Schmidti» tüüpi kaamera.

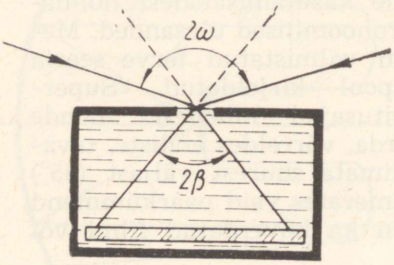
Peegel-läätsobjektiivide suureks puuduseks on nende kujutise kõverpinnalisus, millest tekkiva ebateravuse ja moonutuste vältimiseks tuleb kas filmi kujutise järgi kõverdada või püüda kujutist spetsiaalse lisaläätse abil tasapinnastada. Ebaühtlasemaks jäävad ka lahutusvõime ja kujutise heleduse jaotus mööda pinda. Mis puutub objektiivide reaalsesse valgusjõudu, siis tuleb siingi teha vajalikud korrektiivid. Nagu nähtub joonistelt 35 ja 36, ei tööta kasulikult kogu sisendava, sest selle keskmine osa on kaetud plaadi või filmiga, millel tekib kujutis, ja seetõttu on ka efektiivne suhteline ava väiksem suhtest $D : F$.

Ülivalgusjõuliste objektiivide kasutamisaladest hõlmavad suure osa spetsiaalsed astronoomilised ülesanded. Meteooride fotografeerimiseks on valmistatud terve seeria kaameraid (joonis 37) eespool kirjeldatud «Super-Schmidt»-objektiividega. Säritusajad lühenesid nende kaamerate puhul 50 . . . 100 korda, võrreldes endiste, tavaliste läätsobjektiividega. Hoolimata suurest väljast (55°) on tähe kujutise läbimõõt kaamerates vaid paarkümmend mikromeetrit, kuid vajalik on ka kõverdatud filmi või

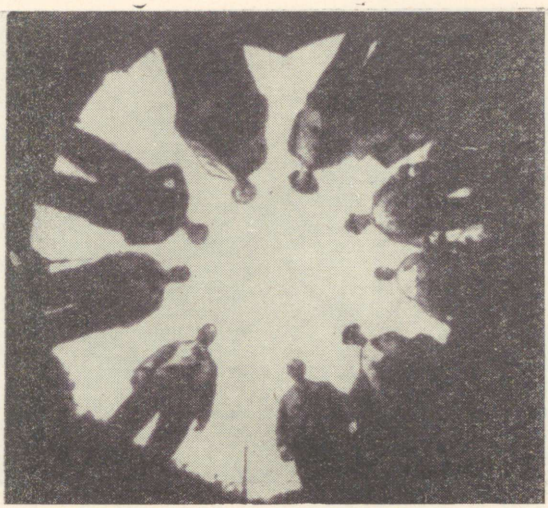
plaadi fokuseerimine mõnemikromeetrise täpsusega. Samasuguseid kaameraid rakendatakse edukalt tehiskaaslaste jälgimisel (Bakeri-Nunni kaamera objektiiviga $D = 780$ mm, $F = 500$ mm) ning ballistika uurimisel atmosfääris. Seeria «Super-Schmidt» astrokaameraid ($D = 46/58$ cm, $F = 25$ cm, 1:0,85, väli 52°) omas sedavõrd kõvera kujutise, et plaati või filmi ei saadud kuidagi nii tugevasti kõverdada ja tuli kasutusele võtta spetsiaalselt valmistatud kumerad plaadid (emulsioon kanti vastavalt vormitud plastmassketastele). Monoliitseid Schmidti kaameraid kasutatakse spektrograafides. Edukalt on neid selleks valmistatud Krimmi observatooriumi optikatöökojas.

Mõnede ülesannete täitmiseks vajatakse astronoomias ja sellega külgnevais teadusharudes erakordselt suurte vaateväljadega objektiive. Tihti soovitakse haarata ühele fotole isegi kogu taevast, mis teatud nähtuste (virmaliste, helkivate ööpilvede, välgu, pilvituse, õhkkonna läbipaistvuse) puhul sisaldab informatsiooni nende nähtuste esinemise või olukorra kohta antud momendil kogu nähtavas taevasfääri osas. Tervet taevast haaravad kaamerad võimaldavad taolisi vaatlusi automatiseerida, sest kaamera suunamine pildistatavale objektile võib täiesti ära jääda, rääkimata kirjalikest märkustest nähtuse iseloomu ja esinemiskoha suhtes.

Ühe esimese ülisuure vaateväljaga fotoaparaadi ehitas 1908. aastal füüsik-eksperimentaator Robert Wood. Woodi kaamera, mis haaras peaaegu 180-kraadise välja, paistis silma üllatava lihtsusega: see oli tavaline *Camera obscura*, mille Wood täitis veega. Et kiired õhust vette minnes murduvad (joonis 38), siis on sellise kaamera kujutisepoolne nurk 2β tunduvalt väiksem kui tegelik vaatenurk 2ω. Oma kaamera nimetas Wood «kaameraks kala



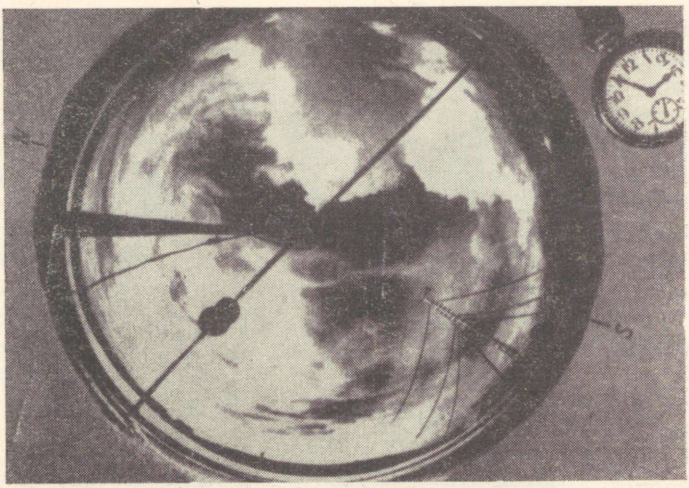
Joonis 38. Woodi «kala vaatepunktiga kaamera» skeem.



Joonis 39. «Kala vaatepunktiga kaameraga» tehtud foto — rühm inimesi ümber maapinnale asetatud kaamera.

vaatepunktiga», sest umbes samuti näeb kala vee alt pealvee-ümbrust. Kalal koondub kogu veepealne maailm 180° vaatenurgast palju kitsamasse, punktiiriga märgitud vaatevälja suurusega 2β. Näib, nagu vaadataks tumedasse lakke, milles on pea kohal ümarik valgustatud aken; sellesse aknasse on aga kokku surutud kogu taevas horisondist horisondini ja kõik, mis veekogu ümbritseb: puud, majad ning muidugi kalamehed. Inimese sukeldumisel on seda pilti silmaga väga raske tabada, sest segavad vee liikumine, lainetus ning halvad fokuseerimistingimused. Joonisel 39 on foto Woodi kaameraga, mis asus maas, ringis seisvate inimeste keskel. Nii näeks kala kalamehi, kes seisavad väikese tiigi ümber.

Täiuslikumad fotografeerivad süsteemid 180°-ni ulatuva vaateväljaga ilmusid rakendusfotograafiasse enne Teist maailmasõda nn. taevapeeglite kujul. Taevapeegli põhiosaks oli suur poolkera-kumerpeegel, milles horisontaalasendi puhul peegeldus kogu taevas. Peegelpilti fotografeeriti sama poolkera kohal asuva tavalise kaameraga. Kaadri vabaksjäävale osale võis samaaegselt fikseerida muud informatsiooni (kella ja kalendrilehe paigutamisega



Joonis 40. Kogu taevast haarav foto kumeralt «taevapeeglilt».

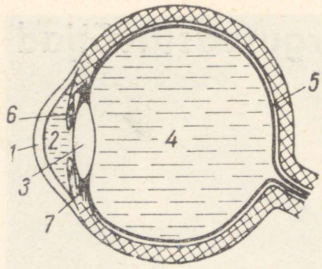
peegli kõrvale pildistamismomendil, samuti ka baromeetri, anemomeetri vms. näidud). Joonis 40 on näiteks pildistatud «Leicaga» 45 cm läbimõõduga sfääriliselt peeglilt ja ta haarab kogu taevast, mida rõngakujuliselt ümbritseb pildi servas nähtav horisont. Kitsa sektorikujulise varju jätab pildile kaamera kinnitusnõjas, ümariku variekraaniga on kaetud päike. Paraboolse kujuga taevapeeglite väli ulatub praegu 240°-ni: meteoroloogilis-okeanograafilistel vaatlustel kasutatakse neid näiteks taeva ja mere samaaegseks fotografeerimiseks.

III. kiirgusvastuvõtjad

● silm ja optika

Tänapäeval on astronoomias sõna «vaatlus» kaotanud otsese tähenduse. Ammu on möödunud ajad, mil teleskoobi okulaari taga seisis astronoom, kes juhtis riista ühele või teisele taevakehale ning püüdis nähtavast midagi välja lugeda ainult silmamulje põhjal. Need muljed on ligikaudsed, möödununa kontrollimatud ja subjektiivsed. Selleks et kaugete tähtede valguskiirtelt võimalikult rohkem informatsiooni saada, tuleb teha täpseid mõõtmisi, püüda jäädvustada pilte ja mõõtmistulemusi, analüüsida valgust füüsikaliste aparaatidega. Seadet, mis kiirgust vastu võtab ning mõõtmiseks või registreerimiseks sobivaks signaaliks muundab, nimetatakse kiirgusvastuvõtjaks (ka kiirguse detektoriks või muundiks).

Maailma tunnetamisel on siiski raske ülehinnata nägemise tähtsust. Silmade kaudu saame välisilma kohta rohkem informatsiooni kui kõigi teiste meeleorganite kaudu; seejuures ei piira informatsioonivoogu mitte silmade läbilaske-, vaid juba aju vastuvõtuvõime. Pikaajalise evolutsiooni tulemusena on meie nägemisorganid koos teiste optilis-füsioloogilise sidekanali osadega saavutanud täiuslikkuse, mille tasemele kaasaegsed kiirgusvastuvõtjad paljude kvalitatiivsete näitajate poolest vaevu ulatuvad. Silma kui optilise seadme lähemal uurimisel võib seal avastada palju huvitavaid momente, mis kaasaegse rakendusoptika seisukohast panevad imestama äärmise konstruktiivse teravmeelsuse, kuid ka mõnede suhteliselt lihtsasti välditavate puudustega. Üha suurenev tähelepanu silma ehitusele ja sellega seotud nähtustele tulenebki ühelt poolt võimalusest rakendada silma eeskuju tehislike optiliste analoogide ja informatsioonitraktide loomisel ning teiselt poolt püüdest komplitseeritud vaatlus-, auto-



Joonis 41. Silma ehituse skeem.

maatika- ja sidesüsteeme maksimaalselt kooskõlastada neis töötava inimese tähtsaima meeleorganiga.

Kujutis tekitatakse silmas mitmekomponendilise objektiiviga, mille fookuskaugus normaalse silma puhul muutub vahemikus 14—17 mm. Kujutise tekitamisest võrkkestal e. retinal *5* (vt. joonis 41) võtavad osa sarvkest *1*, vesivedelikust meniskikujuline lääts *2*, kaksikkumer silmalääts *3* ja vedel klaaskeha-lääts *4*. Nagu igas heas fotoobjektiivis, nii ei puudu silmaski vahekatik (diafragma) ehk iiris *6*. Läätskomponentide arvukus silmas ei ole määratud mitte aberratsioonide parandamiseks, vaid see tuleneb puhtehituslikest kaalutlustest: sarvkest kaitseb silma väljastpoolt, vedelate läätsede *2* ja *3* abil fokuseeritakse kujutis ja klaaskeha kindlustab võrkkesta-ekraani moodustavate närviotste asumise vedelikus. Rakendusoptika terminoloogia kohaselt on viimane lääts immersioonis kujutisega; sellist konstruktsiooni esineb tavaliste optiliste riistade juures üsna harva. Pealiskaudsel käsitlusel näib, nagu poleks silmaoptikas midagi erilist ette võetud aberratsioonide vähendamiseks ja tuleks nagu järeldada, et tegemist on madalakvaliteedilise optilise süsteemiga. Miks aga me nägemistajus siiski eriti suuri moonutusi ei tähelda? Osutub, et silmas on realiseeritud kaks originaalset võtet, milleni optikakonstruktorite oskused pole veel küündinud: läätse asfääriline kuju ja muutuva murdumisnäitajaga materjal. Peaaegu kõik teadaolevad optilised riistad koosnevad sfääriliste või neile lähedaste pindadega elementidest ja vaid suurte raskustega valmistatakse erandjuhtudel üsna vähese asfäärilisusega läätsi (näiteks Schmidti korrektsiooniplaat). Hoopiski pole veel loodud tehislääatsi, mille materjali murdumisnäitaja keskelt ääre poole pidevalt muutuks; see efektiivne võte sfäärilise aberratsiooni vähendamiseks on seni jäänud looduse «paten-

diks». Tavalistes optilistes riistades häirivana mõjuvat kujutise kõverust kompenseerib silmas võrkkesta-ekraani vastav nõgusus. Aberratsioonide mõju vähendab ka väike suhteline ava — umbes 1 : 2 hämaras, päeval aga keskmiselt 1 : 10. Lisaks eeltoodule ei tohi unustada, et kujutis on kõige enam moonutatud perifeerias, kuid see osa on meil teisejärgulise tähtsusega (orienteerumiseks ja üldpildi saamiseks), sest detailide vaatlemisel pöörame silmi alati selliselt, et vajalik objekt asuks optilisel teljel. Silma kui objektiivi kvaliteet rahuldab optimaalselt nägemistaju vajadusi. Normaalne silm näeb täiesti pingutuseta lõpmata kaugel asuvaid objekte. Lähemal asuvate kujutiste fokuseerimiseks pingutub ripsvöötmeke 7 ja silmaläätse kõverus muutub: silm akommodeerub. Niisugust teravustamist pole vist optikakonstruktorid julgenud rakendada ka kõige viimase aja muudetava fookuskaugusega objektiivides, mida küll mõnikord kummiläätsedeks nimetatakse.

Võrkkest, millel tekib kujutis, koosneb ülipeentest valgustundlikest närvilõpmetest — kepikestest ja kolvikestest. Mõnikümmend miljonit kepikest on tundlikud ainult valgusele üldse, ca 7 miljonit kolvikest aga moodustavad värvusi tajuva aparaadi. Hämaruses värvustundlikkus kaob: «pimedas on kõik kassid hallid». Samal põhjusel näeme ainult heledaid taevakehi värvilistena: punakate, kollakate või sinistena, kõik nõrgemad tähed aga jäävad lihtsalt helendavateks punktikesteks, mille värvust silmaga ei saa määrata.

Silmal tuleb töötada väga erinevates tingimustes, eredast päikesevalgusest kuni öise hämaruseni. Sadu miljoneid kordi erineva heledusega objektide vaatlemiseks peab umbes samas mastaabis muutuma silma tundlikkus (adapteerumine). Lihtsustatult samastatakse nõrgale ja tugevale valgustusele adapteerumist tihti ainult silmaava (iirise) diameetri muutumisega, kuid juba ligikaudnegi mõõtmine ja arvuline kontroll näitavad niisuguse arvamuse alusetust. Inimese silmaava maksimaalse suuruse võib kergesti leida, pildistades täiesti pimedas ruumis elektron-välklambiga: iiris ei jõua reageerida sekundituhandikke kestvale sähvatusele. Sel põhjusel tunduvadki inimeste silmaavad paljudel välklampfotodel ebaloomulikult suurtena — nad olid adapteerunud pimedusele. Moskva ülikooli astronoomiainstituudis mõõdeti suure hulga erineva vanusega ini-

meste silmaavade läbimõõdud, kusjuures pimedusele adapteerunud silma valgustati nähtamatu infrapunase kiirgusega ja vaadeldi elektronoptilise muundiga, mis infrapunastes kiirtes saadud kujutise nähtavaks transformeeris. Osutus, et vanusega silmaava maksimaalsuurus väheneb: alla 20 aasta vanustel on ta ca 9 mm, 30-aastastel 7 ... 8 mm ja 50 ... 60-aastastel 6 ... 7 mm. Võrdluseks mõõdeti muide samas ka kassi silmaava läbimõõt — see oli umbes 15 mm! Inimsilma iirise keskmise minimaalse ja maksimaalse ava (diameetrid vastavalt 1,5 ja 8 mm) võrdlemine näitab, et sellest tingitud adaptatsioon ei saa mingil juhul ületada sada korda. Adaptatsioon laiemas ulatuses toimub keerulise ehitusega võrkkestas, kus nägemispurpuri ja närviotste tundlikkus suureneb või väheneb, olenedes kattumisest erilise valgust nõrgendava pigmendiga.

Iiris reageerib väikestele valgustatuse muutustele suhteliselt kiiresti, võrkkestas aga ulatub täielikule pimedusele adapteerumise aeg mitmekümnele minutile — silma tundlikkus pärast pooleminutilist ja pärast tunniajalist pimedas viibimist erineb 10 000 korda. Fotomeestele on hästi teada, et pärast pikemaajalist pimikus viibimist (ilma punase valguseta) osutuvad ka üsna täiuslikud pimekambrid «auklikeks» — silm hakkab tabama ääretult nõrku valgusvooge pragudest, õhuavadest või mõnede esemete helendusest. Võib tekkida küsimus, kui suur on siis silma tundlikkuse alumise läve absoluutväärtus? Astronoomias loetakse nõrgimaiks silmaga vaadeldavaiks tähtedeks keskmiselt $6^m,0 \ldots 6^m,5$ tähed, kuid on teada ka vaatlejaid, kes suutsid näha ligi kümme korda nõrgemaid tähti ($8^m,5$). Arvutused annavad, et $8^m,0$ tähelt jõuab silma umbes 50 valguskvanti (footonit) sekundis; võib arvata, et tegelikult neeldub neist vähem kui pool. Nõukogude väljapaistva füüsiku S. I. Vavilovi spetsiaalsed uurimused näitasid, et silmas tekib valgusaisting siis, kui sinna 0,2 ... 0,3 sekundi jooksul jõuab 7—10 valguskvanti.

Üheks silma kui optilise seadme eripäraks on see, et parima nägemisteravuse ala ei asu mitte optilisel teljel, vaid sellest umbes kolm kaarekraadi kõrval (kollastähn). Kasutatav väli on aga ääretult väike ja silm peab alatasa liikuma, et vaadeldava objekti üksikosi parima nägemisteravuse piirkonda viia. Proovige näiteks kaht kõrvuti joonistatud tähesuurust märki (risti, rõngast) üheaegselt selgesti näha, ilma et tähelepanu (s. t. tegelikult silma)

kummalegi neist teravamini suunata. Paber tuleb silmast üsna kaugele viia, mis näitab kasutatava nurkvälja kitsust.

Nagu eespool mainitud, koosneb võrkkest valgustundlikest kepikestest ja värvustundlikest kolvikestest. Välja keskosas domineerivad kolvikesed, serva poole aga kepikeste hulk üha suureneb. Umbes 0,25 mm läbimõõduga kollastähni keskosa on täidetud ainult poolteise kuni mõnemikromeetrise läbimõõduga kolvikestega. Kolvikestevaheline kaugus — umbes 10 μm — määrab ka võrkkesta lahutusvõime. Et kepikesed on valgustundlikumad kui kolvikesed, siis osutuvad ka vaatevälja servad näiteks tähe avastamise jaoks tundlikumateks, ehkki kujutise kvaliteet on madal. Vilunud vaatlejad kasutavadki nõrkade objektide leidmiseks nn. külgnägemist: tähelepanu viiakse otsitavast kohast pisut kõrvale.

Tihti võib kuulda arvamust, et töötamisel optiliste riistadega ületavad valgustundlikud tehismaterjalid ja -seadmed igati silma, eriti on aga fotoplaat täiesti asendanud silma teleskoobi taga. Alahindamata fotograafia tohutut tähtsust astronoomias, tuleb siiski märkida, et silm kasutab astronoomiliste vaatlusriistade kõrget lahutusvõimet võrratult paremini kui fotoplaat. Väike valgustundlikkus, suur fotograafiline hajumine (jäme tera) ja atmosfäärilised häired halvendavad fotomeetodi efektiivsust astronoomias ning pole midagi imestada, et gigantsete instrumentidega saadud parimatel Kuu ja planeetide fotodel ei leidugi rohkem detaile, kui seda võib näha silmaga keskmises heas teleskoobis. Nagu näitavad arvutused, halveneb astrofoto lahutusvõime eriti just suurte valgusjõudude puhul. Suhtelise ava vähendamisel asi paraneb, kuid silmaga võrdse lahutusvõime saavutaks astrofotokaamera alles siis, kui ta suhteline ava oleks 1 : 400. Marsi suure vastasseisu ajal 1956. aastal tegid nõukogude vaatlejad ligi 500 joonist Marsi pinnast — kõik väikeste teleskoopidega visuaalsete vaatluste põhjal. Ehkki silm kui optiline süsteem omab mõningaid tehnilisi puudusi, on nendest puudustest tingitud nägemistaju halvenemine äärmiselt heas kooskõlas reaalsuses esinevate vaatlustingimustega, ja loodust, ehk täpsemalt inimorganismi paljusajandilist kohanemist, võib julgesti nimetada suurepäraseks optikainseneriks-konstruktoriks, kes on leidnud nägemisorgani optimaalse lahenduse.

Teleskoopide kasutamisest on seni lahutamatu fotografeerimine. Fotograafia rakendamine astronoomia huvides on vajutanud jälje vaatlustehnikale, põhjustanud suuri muutusi teleskoobi üldises konstruktsioonis ja viinud täiesti uut tüüpi teleskoopide loomiseni.

Esmakordselt õnnestus astronoomilist objekti pildistada 1840. aasta märtsikuus. Äsja avastatud dagerrotüüpia vanus polnud veel kaht aastat, kui J. W. Draper sai New Yorgis Kuu dagerrotüüpia. See on tüüpiline näide korduvalt avaldunud tendentsist: võimalikult kiiresti rakendada astronoomiliste vaatluste teenistusse kõik vähegi lootustandvad füüsika ja tehnika saavutused ning leiutised. Mõneski osas on see püüd avaldunud nii aktiivselt ja ennetavalt, et ta on neid uusi saavutusi ka stimuleerinud või nende üldist rakendamist kiirendanud.

Tähe esmakordse fotografeerimiseni kulus küll kümme aastat: 1850. aastal tegid seda Harvardi observatooriumi (USA) 38 cm refraktoriga J. P. Bond ja J. A. Whipple. Ehkki algul suudeti jäädvustada vaid kõige heledamaid tähti, olid fotograafia eelised visuaalsete vaatluste ees silmanähtavad. Bond ja Whipple jätkasid katsetusi, fotograafia arenes edasi, ning mõne aja pärast hakati Harvardi observatooriumis taevast süstemaatiliselt pildistama. Nii tekkis aja jooksul suur taevafotode kogu, mis nüüd sisaldab juba üle poole miljoni originaalnegatiivi. See on hindamatu väärtusega ülevaade taevast.

Möödunud aegadel joonistasid astronoomid visuaalsete vaatluste põhjal taevakaarte. Hoolsalt liikusid nad teleskoobiga tähelt tähele ja püüdsid kõike nii täpselt kui võimalik üles tähendada. Juba esimesed fotod tähistaevast aga näitasid, et see tohutu töö lausa kubises vigadest, vahelejätmistest ja juurdemõeldistest. Iga vaatleja oli joonistanud taevast nii, nagu ta seda nägi, ja alles nüüd võidi asuda objektiivse tõe jaluleseadmisele. Pealegi suurenes fotoplaadi kasutamisel tähtede arv. Kaardistamist tuli praktiliselt otsast peale hakata.

1887. aastal leppisid maailma 18 observatooriumi rahvusvahelisel konverentsil pidulikult kokku vallutada taevas ühise «fotograafilise tormijooksuga». Võeti vastu nähtava universumi fotograafilise kaardistamise plaan. Igale osa-

võtjale eraldati kindlad taevaalad, tööd püüti korraldada võimalikult ühesuguste vahenditega. Tegevust jätkus aastakümneteks. Teleskoopide ja plaatide omaduste paranemisel tuli osa vanu võtteid korrata, kuid pikkamööda jõuti ikka täiuslikumate ning täpsemate taevaatlaste koostamiseni. Neid eeliseid, millega fotograafia visuaalsed teaduslikud taevavaatlused peaaegu välja tõrjus, oli terve rida. Kõigepealt nimetatakse siin tavaliselt fotografeerimismeetodi integraalsust, mis väljendub valguse mõju kogumises teatud aja jooksul. Silmaga vaadeldes ei anna vaatlusaja pikendamine midagi juurde ja küündivus jääb ikka samaks, pildistamisel aga võimaldab pikem säritusaeg saada plaadile üha nõrgemaid ja nõrgemaid tähti. Teiseks eeliseks on dokumentaalsus — fotod jäävad objektiivseteks dokumentideks taevakehade olukorrast ja neid on hiljem võimalik uurida kuidas tahes ja millal tahes. Fotod on ka momentaansed, s. t. neile võib teatud kindlal ajamomendil jäädvustada hetkelisi nähtusi. Panoraamsuse all mõistetakse võimalust registreerida korraga terve taevaala kujutist hulga taevakehadega, silmaga saab taolist vaatlust jäljendada vaid pikema aja jooksul ja järkjärgult. Detailsus avaldub niisuguste peensuste fikseerimises, mida silmaga alati küllalt hästi ei märgata või mida on raske kirjeldada. Fotoemulsioonide erinev tundlikkus lainepikkuste suhtes annab laiemad spektraalsed võimalused; saab pildistada ka silmale nähtamatutes infrapunastes ja ultravioletsetes kiirtes.

Fotoplaat nagu summeeriks temale langevat valgust ja kui taevakehalt saabuv valgusvoog on liiga nõrk, selleks et hetkeliselt plaadile jälge tekitada, võib see siiski toimuda pikema säritusaja tulemusena. Avaldatakse isegi küllalt konkreetseid andmeid, mille kohaselt ühe ilmutatava tera saamiseks kõrge tundlikkusega fotoplaadil vajatavat 200 valguskvanti; seda arvu võib lugeda õigeks küll normaalsete pindkujutiste korral, ent üksiku tähe kindlalt märgatava punktikujulise jälje jaoks tuleb arvestada mitu korda suuremat valgushulka. Igal juhul kehtib astrofotograafias kindel seos säritusaja ja teleskoobi fotograafilise küündivuse vahel. Tuleb muide tunnistada õigeks, et lühikeste säritusaegade puhul on teleskoobi fotograafiline küündivus väiksem kui visuaalne, säritusaja teatud pikkuse juures (olenevalt plaadisordist) saavad nad aga võrdseks ja edasi fotograafiline küündivus üha suurendab oma edu-

maad. Ühe tuntud, kuid sugugi mitte parima kaasaegse fotoemulsioonide margi «Extra Rapid» puhul kujunevad need vahed järgmisteks: 1-minutilise särituse korral jäävad plaadile vaid ligi 3^m võrra heledamad tähed kui neid sama riistaga visuaalselt näha võib, umbes 20-minutilise särituse korral saadakse fotoplaadil kõigi nähtavate tähtede jäljed, 1 tunni pärast on seal juba ka 1^m võrra nõrgemad tähed, 3 tunni pärast 2^m võrra nõrgemad, 10 tunni pärast enam kui 3^m võrra nõrgemad jne. Võit 3^m,1 vastab aga teleskoobi läbimõõdu suurendamisele 3,8 korda. Niisiis suurendab fotografeerimismeetod 5-meetrise teleskoobi küündivust 10 tunniga kujuteldava 19-meetrise visuaalse teleskoobi küündivuseni! Arvutuslikult võime veel leida, et 100-tunniline säritusaeg viiks fotograafia küündivuse visuaalsest 5^m kaugemale.

Säritusaja suurendamine on piiratud taevafooni poolt tekitatava plaadi tumenemisega. Kui plaadil on foon juba selgesti märgatav, siis säritusaja suurendamine enam küündivust ei tõsta, sest nõrgemad tähed ei saa samuti üha tumenevast foonist eralduda. Säritusajad, millega jõuame fooni registreerimiseni plaadil, olenevad peale taeva enda heleduse põhiliselt teleskoobi suhtelisest avast. Plaadi «Extra Rapid» jaoks on need hästi pimedal ööl suhtelise ava 1 : 1 korral 4 minutit, 1 : 2 korral 20 minutit, 1 : 3,5 korral 1,2 tundi, 1 : 5 korral 2,8 tundi ja 1 : 10 korral 14 tundi. Arvutusi võib jätkata — 1 : 100 korral ootaksime plaadile fooni 2970 tundi!

Kõiki eeltoodud näitajaid ei saa kuigi absoluutselt võtta. Peale teleskoobi ja fotoplaadi iseärasuste olenevad nad veel üsna mitmetest kaudsetest teguritest. Linnade läheduses asuvate observatooriumide kohal on taevafoon alati palju heledam, seda eriti siis, kui õhus sisaldub palju tolmu; sel korral halvenevad eeltoodud näitajad katastroofiliselt. Kaasaegne astrofüüsikaobservatoorium ei tohi seetõttu asuda suurema asustatud punkti läheduses.

Tähtede kujutised fotoplaadil on erinevate läbimõõtudega. Fotoplaadi enda teralisusest lähtudes peaks nõrgimate tähtede kujutise läbimõõt vastama ühe tera suurusele, mis kõigub mikromeetri murdosast mõne mikromeetrini. Kuid ka nõrgimate tähtede kujutisse kuulub emulsioonil mitu hõbedatera ja nii loetakse astronoomias fotoplaadi lahutusvõimet määravaks minimaalseks punktkujutise läbimõõduks 15—30 μm. Väiksemaid tähekujutisi

takistab saamast fotograafiline hajumine. Tuleb märkida, et eksisteerib küll ka peenemateralisi emulsioone, näiteks lahutusvõimega 100 joont millimeetri kohta (joone paksus oleks 10 μm), kuid astrofotograafia tarbeks pole nad küllalt tundlikud. Säritusaja pikenedes suurendab fotograafiline hajumine tähekujutist järjest rohkem. Nii vastavad heledatele tähtedele plaatidel mitmemillimeetrise läbimõõduga tumedad laigud. Plaadi lahutusvõime on kõige suurem ainult küündivuse piiril asuvate tähtede jaoks ja seal loetakse seda paremal juhul võrdseks 67 joonega millimeetri kohta (väikseimaks lahutatavaks vahemaaks võttes 15 μm). Siit tuleneb tingimus astrograafide objektiivide kvaliteedile: objektiivide lahutusvõime peab olema sellega võrdne või parem, muidu ei kasutata fotoemulsiooni lahutusvõimet täielikult ära.

Astrofotograafias kasutatakse ainult selleks eraldi valmistatavaid fotoplaate. (Täpseteks mõõtmisteks ning pikaajaliseks säilitamiseks on filmid vähekõlblik negatiivmaterjal.) Olenevalt lahendatavatest ülesannetest võidakse kasutada tavalisi emulsioone, mille tundlikkus spektri rohelises osas kiiresti langeb (nn. sinised plaadid), või kollastesse, punastesse ja isegi infrapunastesse kiirtesse ulatuva tundlikkusega ortokromaatilisi, pankromaatilisi ja infrakromaatilisi emulsioone. Andmetes astrofotomaterjalide kohta ei puudutata tavaliselt ainult üht olulist omadust — absoluutset tundlikkust. Kui tavalistel fotofilmidel on see alati pakendile märgitud (22, 65, 130 GOST-ühikut jne.), siis astroplaatidelt seda ei leia ja tema määramisega isegi ei tegelda. Põhjus peitub fotoemulsiooni omapärases käitumises pikemate säritusaegade korral. Umbes 100 aastat tagasi jõudsid Rosco ja Bunsen üsna loogilisena näivale järeldusele, et fotograafiline efekt sõltub vaid langenud valguse koguhulgast, see tähendab, valgustatuse ja säritusaja korrutisest. Valgustatuse vähenemisele teatud arv korda peaksime vastama säritusaja suurendamisega sama arv korda ja vastupidi; tavalise fotoaparaadiga pildistades kasutamegi seda seadust ava ja säritusaja seadmisel. Pikkade säritusaegade korral pole asi aga sugugi enam nii — tundub, nagu oleks valgustatuse osatähtsus palju suurem ja valgustatuse vähenemisel tuleb seda säritusajaga mitmekordselt kompenseerida. Hiljuti meie kodumaa keskses foto-kinotehnika teadusliku uurimise instituudis loodud astroemulsiooni tundlikkus on

näiteks 1/20-sekundilise säritusaja korral 120 GOST-ühikut, 1-tunnilise säritusaja korral aga vaid 32 GOST-ühikut. Vajalikud säritusajad konkreetsetele plaatidele konkreetsel instrumendil määratakse katseliselt või toetudes varasematele kogemustele. Kui see on eriti vajalik, siis tõstetakse emulsioonide tundlikkust hüpersensibiliseerimise teel (kuumutatakse neid 50°C paari päeva jooksul või hoitakse elavhõbedaaurudes).

Fotograafia andis astronoomiale rikkalikult materjali teoreetiliste üldistuste tegemiseks, kuid kõlbas ka arvutuste otseseks kontrolliks. Nii nagu üle saja aasta tagasi prantsuse astronoom Leverrier avastas puhtmatemaatiliselt tollal tundmata planeedi Neptuun, nii «arvutati» käesoleval sajandil välja veel üks kaugem planeet. See toimus just astrofotograafia hiilgeajal. 1930. aastal suunasid ameerika astronoomid võimsa teleskoobi toru matemaatikute näidatud taevaossa ja leidsidki fotolt nõrga tähe. Järgnevad uued fotod kinnitasid, et «täht» muudab oma asendit teiste kinnistähtede suhtes ning on niisiis tõesti planeet. Talle anti nimeks Pluuto.

Kõige hea kõrval, mis fotograafia astronoomiale tõi, pole see meetod sugugi vaba puudustest. Tegelikkuses kaotatakse fotografeerimisel alati lahutusvõimes, võrreldes visuaalsete vaatlustega, — alles väga väikeste suhteliste avadega (1:50 ... 1:100) astrograafides läheneb lahutusvõime sellele, mida samad objektiivid annaksid visuaalsetes teleskoopides. Nii väikesi suhtelisi avasid ei kasutata peaaegu kunagi ja seepärast tuleb leppida peente detailide kadumisega.

Kiirguste intensiivsuste määramisel tuleb arvestada, et fotoemulsiooni reaktsioon — tumenemine — pole langenud kiirgusega seotud lineaarselt, vaid on keerulisemas, logaritmilise iseloomuga sõltuvuses. Tähtede heleduste määramise täpsus tumenemiste kaudu jääb ebarahuldavaks üsna paljude ülesannete lahendamisel.

Fotografeerimistehnika senises arengus üldse ja samuti ka astrofotograafias seisab kesksel kohal üldise tundlikkuse tõstmine. Dagerrotüüpia päevilt kaasajani on tundlikkuse tõus olnud hiiglaslik — valgusenergia hulk, mida vajab tänapäeva pildistaja, on umbes sada miljonit korda väiksem kui tema eelkäijal 130 aastat tagasi. Põhiliseks «süüdlaseks» on siin negatiivmaterjal, mille arvele

langeb tundlikkuse miljonikordne parenemine, ülejäänud sajakordne võit kuulub optikale. Ühtlasi avaldavad paljud fotospetsialistid arvamust, et fotoemulsioonide võimalused tundlikkuse edasise tõstmise suhtes on peaaegu ammendatud ja evolutsiooniline kasv selles osas ei ületa tulevikus üht suurusjärku (10 korda). Jääb üle otsida uusi, fotograafilises mõttes efektiivsemaid valgustundlikke materjale, kuid praegu on väljavaated nende leidmiseks veel üsna ebamäärased. Mõningaid lootusi annavad küll otsingud elektrofüüsikaliste meetodite ja valgustundlike pooljuhtide ning polümeeride valdkonnas, kuid lähemas tulevikus pole sealt oodata veel midagi üllatavat. Niisuguseid «pessimistlikke» tulevikuperspektiive kinnitab ka juhtiva nõukogude fotokeemiaspetsialisti K. V. Tšibissovi arvamus. Dokumentaal- ja enamjagu rakendusfotograafia harusid peaaegu palju enam ei vajagi: tundlikkusega suurusjärgus 1000 GOST-ühikut ollakse rahul. Astronoomias, kus aga soovitav piir võiks olla kaugemal ja lisaks nõutakse materjali peeneteralisust, tuleb fotografeerivaid vahendeid täiendada või isegi asendada füüsikalis-tehniliste seadmetega.

Mõne aasta eest kogunesid kogu maailma silmapaistvamad fotospetsialistid Londonisse konverentsile, et arutada fotografeerimise piirtundlikkuse küsimust kaasajal ning tulevikus. Konverentsi algul pöörduti kõigi osavõtjate poole ettepanekuga arvutada fotografeerivate süsteemide arvatav maksimaalselt saavutatav tundlikkus tulevikus. Kui hiljem hakati arvamusi koguma, ilmnes suhteliselt hea kooskõla: peale paari erandi olid osavõtjad kõik saanud tulemuse sama suurusjärgu piirides. Arvuliselt oli see miljon kuni kümme miljonit GOST-ühikut! Arusaadavalt pole see üksnes emulsiooni, vaid kogu fotografeeriva kompleksi tundlikkus. Näitena demonstreeriti osavõtjaile veerandkuu valgusel vändatud filmi, kusjuures valgustundlikkuse tõstmiseks oli kasutatud kogu kaasaegse fototehnika arsenali: elektronoptilist muundit valgusvõimendina, objektiivi suhtelise avaga 1:0,75 ja ülitundlikku filmi. Arvutused andsid selle konkreetse süsteemi tundlikkuseks mõnikümmend tuhat GOST-ühikut. Keegi osavõtjaist ei julgenud aga vastata küsimusele, mis ajaks nende poolt arvutatud tundlikkus saavutatakse.

Esimesed sammud on astutud ka värvusastrofotograafia alal. Palomari observatooriumi (USA) teaduslik fotograaf

William C. Miller sai esimesed värvifotod taevast 1959. aastal. Et taevakehad (planeedid, tähed, udud, galaktikad) helendavad värviliselt, seda teavad astronoomid juba ammu spektraalsete uurimuste ja lihtsalt läbi filtrite tehtud fotode kaudu, kuigi silmale näivad nad peaaegu kõik (välja arvatud kõige heledamad) ühesuguselt värvitult helendavatena, sest silma värvustundlikud elemendid (kolvikesed) astronoomiliste vaatluste korral praktiliselt kaasa ei tööta. Värvifotod taevakehadest olid omalaadseks sensatsiooniks, kuid katseid siiski ei jätkatud: teaduslikult andsid need fotod väga vähe, sest värvusülekanne rikuti emulsiooni praeguste puuduste, pika eksponitsiooni, ebaharilike kontrastide ja ümberpööramisprotsessi mõjul põhjalikult. Midagi mõõdetavat neilt filmidelt leida ei olnud, nad olid vaid efektsed illustratsioonid. Hoolimata kasutatud värvifilmi suurest tundlikkusest kestis iga pildistamine 5 tundi ning tähtsamate ülesannetega koormatud suurtel teleskoopidel polnud seda aega võimalik leida. Üks vaatlusöö 5 m teleskoobil maksab mitu tuhat dollarit!

Mõne aasta eest tehti ühes teises USA observatooriumis (Flagstaffis, Arizona osariigis) süstemaatilisi katseid külmutada tavalisi mustvalgeid astrofotoplaate fotografeerimise ajaks. Saavutati mõningane tundlikkuse tõus, eriti kui plaadid olid enne seda olnud kõrgemal temperatuuril, ja sellega avanes võimalus peeneteraliste vähetundlike fotoplaatide kasutamiseks. Peeneteralisus on aga spektroskoopias ja astromeetrias väga nõutav fotoplaatide omadus. Juhuslikult külmutati koos mustvalgete «Kodak»-plaatidega ka üks «Ektachrome High Speed», mis oli tollal kõige tundlikum värvifilm maailmaturul (23°DIN, 90 GOST-ühikut). Pildistamiskatsetel avastati ootamatult, et see film oli —78° C temperatuuril muutunud 5 korda tundlikumaks ja 20-minutilise säritusajaga küündis 1-meetrise läbimõõduga teleskoobil 19^{m} tähtedeni. Veel üllatavam oli aga see, et filtrita pildistamisel polnud külmutatud olukorras isegi tunniajalise säritusaja korral veel erilisi häireid värvusülekandes märgata, normaalsel temperatuuril esinesid suured kõrvalekaldumised õigest ülekandest juba 1 minuti pärast. Udude fotografeerimisel on fotoplaadil tavaliselt ikka mõned tugevasti ülevalgustatud ja laialivalgunud tähekujutised, Flagstaffis tehtud Orioni udu värvifotodel aga polnud neid peaaegu üldse.

Heade tulemuste esiletõstmisel ei tohi siiski unustada raskeid tehnilisi tingimusi, mida fotode autor Arthur H. Hoag pidi looma: kuna külmutamisel sadestub vähimgi niiskus jääna filmile, siis peab film asuma vaakuumkassetis, külmutada tuli algul jahutatud elavhõbedaga —35° C-ni ja edasi kuiva jääga —78° C-ni, raskusi oli madala temperatuuri täpse hoidmisega pika säritusaja jooksul.

Kõigest hoolimata on värvifotod taevast siiski veel vaid illustratiivse abimaterjali tasemel ja teadusliku uurimistöö huvides pole nad midagi nimetamisväärset andnud.

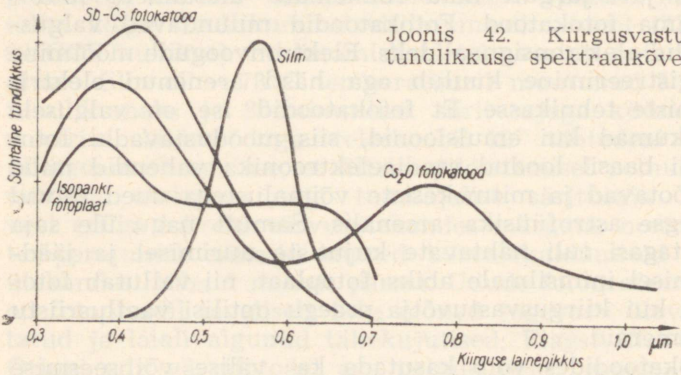
● fotokatood loendab valguskvante

Nagu eelnevast selgus, pole fotoemulsioon kaasajal enam võimeline säilitama «juhtiva» kiirgusvastuvõtja kohta astronoomias. Põhilisteks süüdistusteks, mida talle esitatakse, on madal tundlikkus ja väike saavutatav mõõtmistäpsus, kuid ka muus osas pole ta puudusteta. Eriti teravaks muutusid need probleemid üksikobjektide heleduste mõõtmisel — astrofotomeetrias —, kus teaduse areng nõuab küündivuse ja mõõtmistäpsuse olulist suurendamist. Fotoplaat ei saanud sellele vastata isegi «lubadustega»; kahtlemata püütakse omadusi mõlemas nõutavas suunas parandada, kuid suurt edasiminekut pole loota. Jäi üle pöörduda uute valgustundlike materjalide poole, kus saadav efekt oleks suhteliselt suurem. Niisugused materjalid andiski füüsikaline elektroonika, ja fotoplaati hakkas järk-järgult ikka rohkemate ülesannete juures asendama fotokatood. Fotokatoodid muundavad valgussignaalid elektronsignaalideks. Elektronvoogude mõõtmine ja registreerimine kuulub aga hästi arenenud elektrimõõtmiste tehnikasse. Et fotokatoodid ise on valgusele tundlikumad kui emulsioonid, siis moodustavadki fotokatoodi baasil loodud raadioelektroonika vahendid nüüd paljutõotavad ja mitmekesiste võimalustega uued relvad kaasaegse astrofüüsika arsenalis. Samuti nagu üle saja aasta tagasi tuli nähtavate kujutiste uurimisel ja jäädvustamisel inimsilmale abiks fotoplaat, nii vallutab fotokatood kui kiirgusvastuvõtja praegu optilisi vaatlusriistu ja kaameraid.

Fotokatoodides võib kasutada kas välise või seesmise

fotoefekti nähtust. Välise fotoefekti korral löövad valguskvandid teatud ainetest elektrone välja ja need moodustavad fotovoolu. 1888. aastal leidis vene teadlane A. G. Stoletov, et fotovoolu tugevus on võrdeline langenud valguse intensiivsusega. Niisiis saab voolu täpse mõõtmisega täpselt määrata valgusvoo intensiivsuse, fotoplaadi juures oli seos langenud valguse ja tekitatud efekti vahel keerulisem. Edasi pakub huvi, millist absoluutset tundlikkust omab fotokatood. Ka siin on olukord parem kui fotograafias. Tundlikkust võib määratleda fotovoolu tugevuse suhtena langenud valgusvoo suurusse ja nii seda fotokatoodide tehnilistes andmetes esitataksegi: olenevalt katoodi materjalist 10 ... 100 mikroamprit luumeni kohta. Selgema ettekujutuse annab tundlikkuse teine iseloomustamismeetod — kvantsaagis. Kvantsaagisega näidatakse, mitme valguskvandi langemine fotokatoodile on vajalik, et katoodist väljuks üks elektron. Kui iga kvant lööks välja ühe elektroni, oleks fotokatoodi kvantsaagis 100%; tegelikult aga on reaalsete katoodide kvantsaagis 10 ... 30%. Tuletame siinkohal meelde, et fotoemulsioon vajab ühe ilmutatud tera tekkimiseks umbes 1000 kvanti, seega on kvantsaagis sada korda madalam (0,1%).

See, millise lainepikkusega valgusele fotokatood reageerib, oleneb fotokatoodi materjalist ja valmistamise tehnoloogiast. Väga tuntud katoodimaterjalid on antimoni ja tseesiumi ühendid ning segud (peamine $SbCs_3$), millega saadakse hea tundlikkus nähtava valguse ning ka ultravioletse kiirguse osas. Kui tahetakse aga mõõtmistega haarata infrapunast kiirgust, siis tuleb valida tseesiumi ja



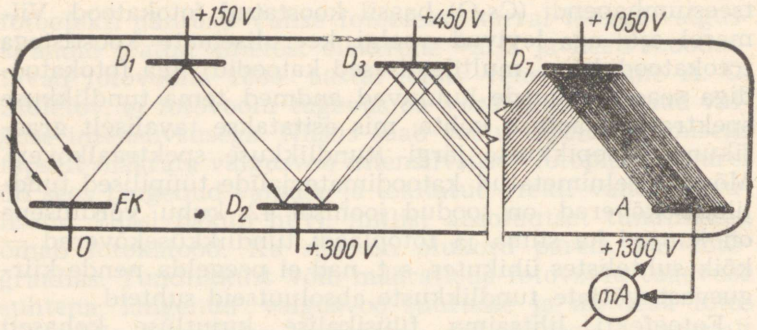
Joonis 42. Kiirgusvastuvõtjate tundlikkuse spektraalkõverad.

tseesiumhapendi (Cs_2O) baasil koostatud fotokatood. Viimasel ajal aga levivad veelgi keerulisemate koostistega fotokatoodid (nn. multileelisesed katoodid). Iga fotokatoodiga seadme juurde kuuluvad andmed tema tundlikkuse spektraalse jaotuse kohta, mis esitatakse tavaliselt graafikuna lainepikkuste järgi (tundlikkuse spektraalkõver). Mõnede eelnimetatud katoodimaterjalide tüüpilised tundlikkusekõverad on toodud joonisel 42, kuhu võrdlusena on kantud ka silma ja fotoplaadi tundlikkusekõverad — kõik suhtelistes ühikutes, s. t. nad ei peegelda nende kiirgusvastuvõtjate tundlikkuste absoluutseid suhteid.

Fotoefekti lihtsaima füüsikalise kujutluse kohaselt peaks fotovool täielikus pimeduses katkema. Tegelikult aga väljub vähesel määral elektrone katoodist ka ilma pealelangeva valguseta ja moodustab nn. pimevoolu. Pimevool segab väga nõrkade valgusvoogude täpset mõõtmist ja seda püütakse kõigiti vähendada. Et pimevoolu peamiseks põhjustajaks on elektronide soojuslik väljumine, siis jahutatakse fotokatoode süsihappelume või vedela õhuga.

Lihtsaimaks fotokatoodiga seadmeks valgusvoo elektrivooluks muundamisel oleks tavaline fotoelement: õhust tühjakspumbatud klaasballoonike fotokatoodi ja väljunud elektrone koguva anoodiga. Pannes fotoelemendi teleskoobi fookusse, saame fotovoolu mõõtmise kaudu määrata tähtede heledusi. Esimestes fotoelektrilistes fotomeetrites kasutatigi fotoelemente. Üliväikeste valgusvoogude tekitatud fotovoolud on aga liiga väikesed täpseks mõõtmiseks. Näiteks 30 cm peegelteleskoobi fookuses saadakse 10-nda tähesuurusega valgelt tähelt valgusvoog 10^{-11} luumenit ja isegi erakordselt tundliku fotokatoodi (1000 µA/lm) fotovool oleks vaid 10^{-14} amprit. Otseseks mõõtmiseks on see liiga väike ning alalisvooluelektronvõimendidki ei paista sellise voolu mõõtmisel silma kõrge stabiilsuse ja täpsusega.

1934. aastal leidis nõukogude insener L. A. Kubetski uue meetodi nõrga elektronvoo võimendamiseks vahetult fotokatoodi läheduses. Ta paigutas katoodist väljunud elektronide teele fotoelemendi klaaskolbi niisuguse elektroodi, millest elektriväljaga kiirendatud fotoelektronid lõid välja uusi elektrone, arvuliselt rohkem kui oli langevaid. Väljunud elektrone, mida nüüd nimetati sekundaarseiks, võis aga uuesti elektriväljaga kiirendada



Joonis 43. Fotoelektronkordisti töötamispõhimõte.

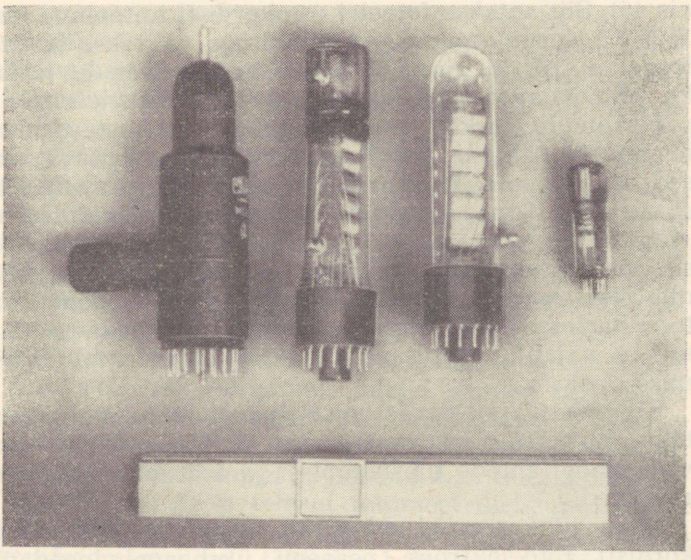
ja pommitada nendega järgmist elektroodi. Nii leiutati fotoelektronkordisti, mille nimetus ütleb tabavalt ära tema funktsiooni: fotoelektronide hulga mitmekordistamine. Fotoelektronkordisti koosneb tervest reast elektroodidest õhutühjas klaaskolvis (joonised 43, 44). Fotokatoodist *FK* löövad valguskvandid välja fotoelektroni, mis liigub 150-voldise pingega kiirendatult elektroodile D_1 ja lööb sealt välja (antud näites) 2 sekundaarelektroni, neid kiirendatakse omakorda 150-voldise pingega elektroodile D_3 jne. Anoodile *A* jõuaks joonisel toodud fotoelektronkordistis iga fotoelektroni kohta 128 elektroni, tegelikult on aga astmete arv tavaliselt veelgi suurem (10 ... 14) ja fotovoolu kordistatakse miljon või isegi sada miljonit korda. Tundlikkusest 100 μA/lm saame sel viisil tundlikkuse 100 ... 10 000 A/lm. Viimased arvud pole trükiviga, fotoelektronkordisti tundlikkus on tõesti nii suur, kuid muidugi ei tohi siit välja lugeda, et üheluumenilise valgusvoo korral on väljundvool 100 või 10 000 amprit. Fotoelektronkordisti töötab sellise tundlikkusega normaalselt vaid väljundvooludeni milliampri suurusjärgus, s. t. valgusvoogudeni 10^{-7} ... 10^{-5} luumenit, millest tähtede valgusvood on enamuses palju väiksemad. Järjest kasvavad pinged antakse elektroodidele tavaliselt ühest kõrgepingeallikast pingejagaja kaudu; kogupinge on seejuures 1000 ... 2500 volti. Võimendust saab reguleerida pinge muutmisega.

Kordistamisele läheb ka fotokatoodi pimevool. Headel katoodidel on ta juba ilma jahutamata mõni elektron

sekundis, mis ka suurtel kordistustel ei lähe anoodahelas üle 10^{-9} A. Heade, väikese pimevooluga fotokatoodide valmistamine on aga suur kunst. Kogu maailmas on tuntuks saanud prantsuse astronoomi Lallemandi fotokatoodid nii fotoelektronkordistite kui ka keerulisemate fotokatoodseadmete jaoks. Infrapunasesse spektriossa ulatuva tundlikkusega fotokatoodidel kujuneb pimevool suuremaks ning seda tuleb jahutamisega vähendada.

Fotoelektronkordisti on väga tundlik seade. Kõrgema kvantsaagisega fotokatoodi puhul võib avastada valgusvoogusid mõni footon sekundis, seega veidi nõrgemaid kui silmaga. Et üksikud fotoelektronid tekitavad anoodahelas miljoneid kordi tugevamad impulsid, siis on elektronkordisti näol tegemist ka väga nõrkade elektrivoolude võimendamise vahendiga. Võib isegi öelda, et fotoelektrone saab loendada kasvõi ükshaaval! Üks elektron sekundis tähendaks aga voolu $1{,}5 \cdot 10^{-19}$ amprit, mida järelikult fotoelektronkordisti kaasabil praktiliselt mõõdetakse.

Kaasaegses astronoomias tehaksegi kõige täpsemad tähtede heleduse mõõtmised fotoelektronkordistitega varus-

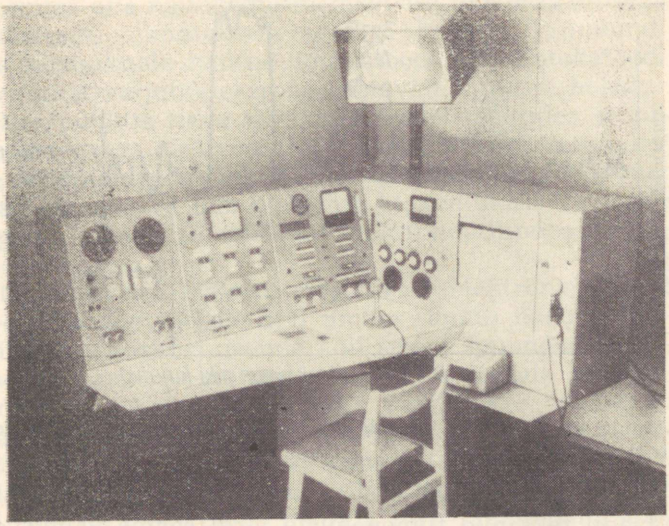


Joonis. 44. Fotoelektronkordistid.

tatud fotomeetritega ehk lühemalt elektrofotomeetritega. Tähelt tulev valgus koondatakse teleskoobi objektiiviga kordisti fotokatoodile, kordistatud fotovoolu võimendatakse veel elektronlampvõimendiga ja registreeritakse siis nagu tavalist elektrisignaali. Elektrofotomeetri seadmestik jaotub enamasti kahte ossa: fotoelektronkordisti ja selle juurde kuuluvad valgusega seotud elemendid teleskoobi küljes (fookuses) ning muud elektroonsed plokid kas teleskoobi lähedal või isegi eemal asuvas ruumis. Vaatleme näitena lähemalt W. Struve nimelise Tartu Astrofüüsika Observatooriumi üht elektrofotomeetrit. 47 cm reflektori «Kastor» Cassegraini fookuses ($F = 7{,}7$ m) asub plokk fotomeetri optika-mehhaanikaelementidega ja fotoelektronkordistiga (joonis 15). Selle sees on diafragmad, millega saab vaateväljast eraldada kitsa ringikujulise ala mõõdetava tähe kujutisega; filtrid, millega valitakse mõõtmiseks üks või teine värvus; okulaar, millega saab kontrollida, kas täht on õigel kohal, diafragma keskel; katik; fotoelektronkordisti ja väike väljundvoolu eelvõimendi. Võimendatud vool antakse kaablite kaudu edasi paarkümmend meetrit eemal asuvasse ruumi, kus ülejäänud aparatuur on koondatud juhtimis-registreerimispulti (joonis 45). Siit antakse fotoelektronkordisti toitepinge (umbes 1500 V), surunuppudele vajutamisega valitakse õiged diafragmad, filtrid ning mõõtmispiirkond. Siin kirjutatakse ka võimendatud mõõdetav vool isekirjutava riista abil paberilindile. Lindilt saadakse pärast vaatluste-mõõtmiste lõpetamist tähtede heledustele vastavad voolude suurused ja sealt pole enam raske leida lõplikke tulemusi tähesuurustes. Kuna heleduste määramine elektrofotomeetriga kulgeb kiiresti ja materjali koguneb üsna palju, siis katsetatakse siin andmeid perfolindile või perfokaardile registreerida. Viimasel juhul koguneb mõõdetud tähtede kartoteek juba masinarvutitele «arusaadavas» kujus, mis on vajalik vaatlusandmete mehhaniseeritud läbitöötamise jaoks.

Kirjeldatud elektrofotomeetriga saab mõõta kuni 15^m tähti, kusjuures nõrgemate tähtede fotomeetriat takistavad nende tähtede ülesleidmisel ja äratundmisel tekkivad raskused.

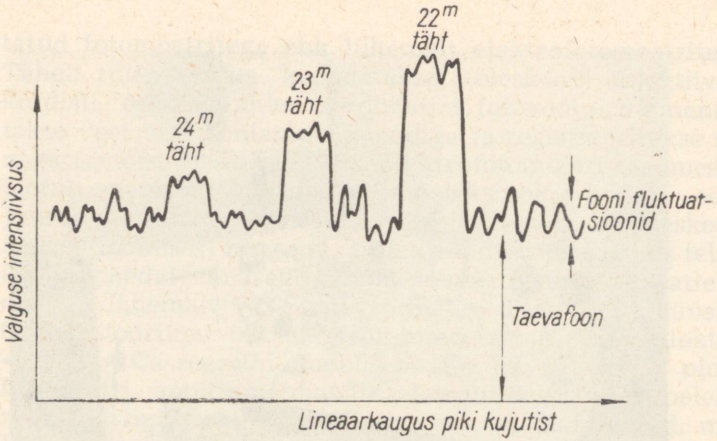
Nagu juba eespool märgitud, võimaldab fotoelektronkordisti fotoelektrone peaaegu ükshaaval loendada, et aga iga elektron vastab kindlale valguskvantide arvule



Joonis 45. Kahe 50 cm reflektori ja nende elektrofotomeetrite juhtimis-registreerimiskeskus Struve-nimelises observatooriumis.

fotokatoodil, siis on see samaväärne kvantide loendamisega. Niisuguse erilises loenduslülituses elektrofotomeetriga küünitakse kõige nõrgemate tähtedeni. Et täpsus poleks liiga madal, siis tuleb loendada pikemat aega ja võtta keskmine — nii kulutati näiteks 5-meetrise teleskoobiga ühelt väga nõrgalt tähelt tulevate footonite loendamiseks kord terve öö. Tähe ümbert mõõdetud taevafooni arvele tuli 40 impulssi sekundis, pimevool oli 4 impulssi sekundis ja ainult 1 impulss sekundis pärines tähelt. Lõppeks oli töö tehtud — ehkki ainult 10-protsendilise täpsusega —, aga siis oli küünitud ligi 24^m täheni (sinise filtriga). Kaugemale maapealsete vahenditega enam kuigi palju minna ei saa: nõrgemad tähed kaovad taevafooni ebaühtlustesse ja korrapäratutesse muutustesse (fluktuatsioonidesse). Kuidas 22^m—24^m tähed taevafoonist eralduvad, selle kohta on joonisel 46 toodud 5 m teleskoobi fookuses läbi 0,1 mm ava tehtud fotomeetriliste mõõtmiste alusel koostatud graafik.

Elektrofotomeetriline tähtede heleduste määramine annab palju täpsemaid tulemusi kui fotograafia: foto-



Joonis. 46. Nõrkade tähtede eraldumine foonist (5 m teleskoobi fookuses).

plaadil tekkinud tumenemiste järgi saame valgusvoogude suurusi hinnata vaid üsna mitme protsendini ulatuva veaga, elektrofotomeetriga mõõtmisel on viga aga alla ühe protsendi.

● kujutiste võimendid

Fotoelektronkordistiga lahendatakse taevakehalt saabuva valguse mõõtmine tundliku fotokatoodi ja täpse elektrimõõtmistehnika baasil. Tähtede heleduse määramiseks pole vaja neid enam fotografeerida ning pärast plaadilt tumenemisi mõõta, vaid heledusele vastava näidu saame elektrofotomeetrilt kohe riista suunamisel tähele.

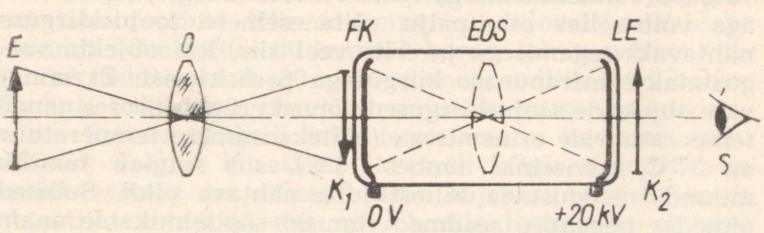
Suurem tähtsus oli aga fotograafial kujutiste saamisel, sõna otseses mõttes piltide tegemisel tähtkujudest, udukogudest ja teistest taevakehadest, aga ka nende spektritest. Siingi tulevad viimasel ajal üha rohkem appi fotokatoodiga kiirgusvastuvõtjad, esmajoones elektronoptilised muundid.

Elektronoptiline muundi kujutab endast õhutühja silindrilist klaasballooni, mille ühele põhjale (sisendisse) langenud kiirgusvoog või optiline kujutis saadakse võimendatuna-muundatuna silindri vastaspõhjalt. Muundi töötamispõhimõtet selgitab joonis 47. Objektiivi *O* abil (see võib

astronoomias olla näiteks mitmemeetrise fookuskaugusega peegelsüsteem) tekitatakse objekti *E* kujutis K_1 muundi sisendis klaasaknale kantud fotokatoodil *FK*. Fotokatoodi igast punktist väljub elektrone vastavalt kujutise heledusele selles punktis nagu tavalistes fotoelementides ja nii tekib katoodi taga elektronidest kujutis. Muundi sees tekitatakse kõrge pingega elektriväli, mis kiirendab elektrone, ning nad suunduvad piki õhutühja klaassilindrit väljundakna poole. Kujutise säilitab elektronoptiline süsteem *EOS*.

Elektronoptilised läätsed mõjutavad elektronvoogusid elektri- ja magnetväljade abil umbes samuti nagu optilised läätsed valguskiiri. Nende abil saame muundis muuta kujutise mastaapi — suurendada või vähendada kujutist väljundaknal. Lühikeses muundis piirdutakse lihtsamal juhul ainult elektronkujutise kiirendamisega ning kantakse ta paralleelnihkes ühest seinast teise. Et muundile rakendatavad kiirenduspinged ulatuvad 10 000 ... 30 000 voldini, siis on elektronide energia toru tagaseinani jõudes väga suur ja nad tekitavad luminestseerival ekraanil *LE* heledama valguskujutise K_2, kui see oli sisendis (K_1). Ekraan ise sarnaneb väga televiisorites kasutatavate kineskoopide ekraanidega (sellest on ta muidugi palju väiksem). Võimendatud pilti võib vaadelda silmaga *S*, kuid saab ka fotografeerida või filmida.

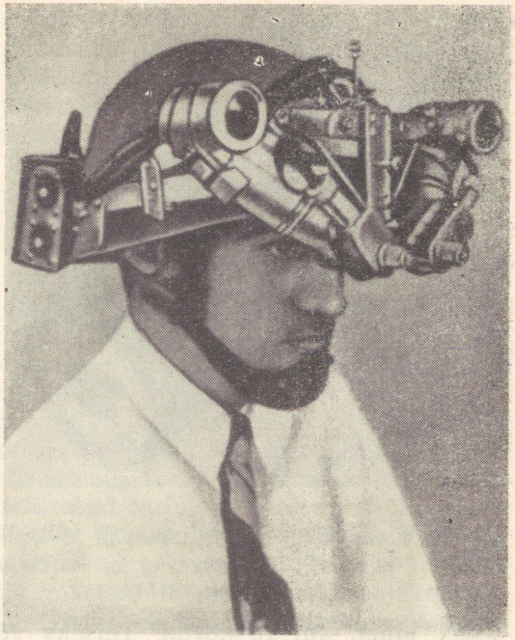
Nagu näha, toimib elektronoptiline muundi valguskujutise võimendina. Seda teeb ta kõigepealt fotokatoodi umbes 100 korda kõrgema tundlikkuse arvel (nagu eespool öeldud, vajatakse fotoplaadile jälje jätmiseks umbes 1000 valguskvanti, fotokatoodist lööb aga elektroni välja iga kümnes footon). Peale selle mõjutab elektronoptilise muundi võimendust kiirenduspinge, mis suurendab elektronide energiat liikumisel piki muundit — suurema ener-



Joonis 47. Elektronoptilise muundi töötamisskeem.

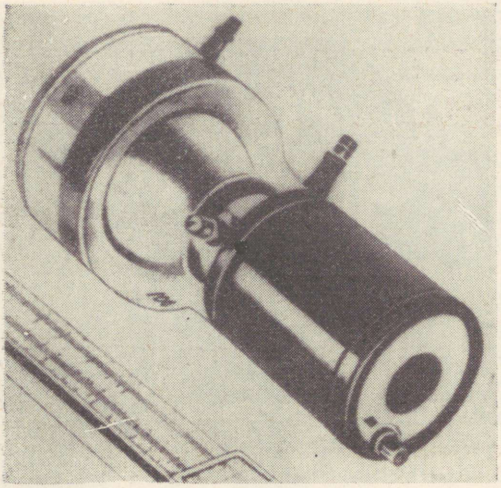
giaga elektronid tekitavad väljundekraanil arusaadavalt suurema valgusefekti. Fotokatoodi efektiivsuse, kiirenduspinge väärtuse ja ekraani kasuteguri kaudu saab leida muundi otsese võimendusteguri, mille juures ei ole arvestatud siseneva ja väljuva valguse spektraalkoostist. Energeetilist võimendust pole raske hinnata. Oletame, et fotokatoodile langevad 0,4 μm lainepikkusega valguskvandid. Ühe niisuguse kvandi energia on 3 elektronvolti. Kui katoodi kvantsaagis on 10%, siis iga kümne kvandi kohta väljub katoodist üks elektron. Olgu elektronoptilisele muundile rakendatud kiirenduspinge 15 kilovolti. Elektroni energia on siis pärast sellise elektrivälja läbimist 15 kiloelektronvolti ehk see vastab 5000 langenud kvandi energiale. Ekraani kasutegur on aga vaid umbes 20% ja nii tekitab see elektron ekraanil sähvatuse 1000 kvanti (kui ekraan kiirgab just sama lainepikkusega 0,4 μm valgust). Et 1000-kvandilise sähvatuse tekitab iga kümnes sisenenud valguskvant, siis kokkuvõttes oleks muundi otsene võimendus 100 korda.

Olulisemad on elektronoptilise muundi spektraaloma-dused. Nimelt võib valmistada fotokatoode, mis on tundlikud ka nähtamatutele või raskesti fotografeeritavatele kiirgustele (infrapunane, röntgenikiirgus), muundi väljundis aga saame ikka nähtava kujutise. Kui väljundkujutist pildistada tahame, siis valime muidugi sellise ekraani, mille kiirgus langeb just fotoemulsiooni tundlikkuse spektraalkõvera maksimumi piirkonda. Muundi nagu transformeeriks kujutise ühest lainepikkusest teise. Kaasaegsel tehnilisel tasemel on muundite spektraalse transformatsiooni omadus olulisem, otsene võimendus jääb teisele kohale. Spektraalne transformatsioon teeb näiteks võimalikuks valmistada nn. pimedas nägemise prillid. Silma ülitundlikkuse tõttu ei annaks muundi nähtava valguse võimendamisega nähtavusele midagi juurde; küll aga võib selles osas palju võita esemete soojuskiirguse nähtavaks tegemisega ja eriti veel siis, kui objekte valgustatakse infrapunase kiirgusega prožektorist. Et erinevate objektide soojuskiirgused võivad erineda seoses nende temperatuuride erinemisega (näiteks inimese temperatuur on 37°C, kiviseinal umbes 15°C), siis suudab tundlik muundi moodustada sellest juba nähtava pildi. Sellised pimedas nägemise seadmed ilmusid sõjatehnikasse enam kui paarkümmend aastat tagasi (joonis 48).



Joonis 48. Elektronoptiliste muunditega «pimedas nägemise prillid».

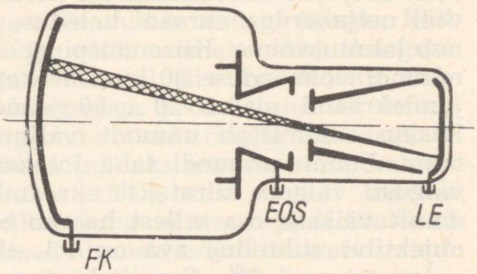
Kaasaegsed elektronoptilised muundid (joonis 49) on säilitanud eespool kirjeldatud põhiskeemi. Joonisel 50 toodud muundi läbilõikel torkab silma vaid keerulisema elektroodide kujuga elektronoptiline süsteem *EOS*, kujutise moonutumise vältimiseks on ka fotokatood *FK* kumer. Kujutist vähendatakse 2 korda, millega saavutatakse veel neljakordne ekraani heleduse suurenemine ja paraneb lahutusvõime. Kiirenduspingel 20 kilovolti annab see muundi võimenduse 30 kuni 50 korda, lahutusvõime väljundekraanil ulatub 20 ... 50 jooneni millimeetri kohta. Raskusi valmistab muundi väljundkujutise registreerimine. Pannes muundi taha fotokaamera, kaotame palju valgust: valgust kiiratakse ekraanilt kõigis suundades ja ainult väikese osa sellest haarab objektiiv. Kui kaamera objektiivi suhteline ava on 1:1, siis haarab ta ekraani valgusest vaid 8%. Ilmselt kaotame sel viisil üldvõimen-



Joonis 49. Elektronoptilise muundi väliskuju.

duses enam kui 10 korda. Teiseks võimaluseks on fotomaterjali surumine vastu muundi väljundakent. Sel juhul peab aga väljundaken olema eriti õhuke, et ekraanilt läbi akna otse fotomaterjalile langev valgus ei hajuks ning lahutusvõime ei väheneks. Seepärast on taeva fotografeerimiseks kasutatavate nn. kontaktmuundite väljundekraan tihti üliõhuke (10 μm) vilguleht, mille vastu immersioonivedeliku abil viiakse film. Ekraanide läbimõõdud pole sel juhul kuigi suured — ainult kümmekond millimeetrit.

Astronoomias soovitakse elektronoptiliselt muundilt nõrkade kujutiste võimendamist. Ekslik oleks aga arvata,



Joonis 50. Elektrostaatilise läätsega elektronoptilise muundi skeem.

et sellega kaasneb igal juhul teleskoobi küündivuse kasv, et muutuvad kättesaadavaks mingid uued, ülinõrgalt helendavad objektid. Fotograafia on siiski juba paljudel juhtudel tunginud piirini ja nagu eespool selgus, paneb selle piiri foon. Et elektronoptiline muundi ei saa kuidagi fooni vähendada — see tähendaks objekti heleduse tõstmist fooni suhtes —, siis küündivust tõsta pole enamalt jaolt võimalik. Küll võib muunditega töötades jõuda sama piirini sadu kordi kiiremini, lühemate säritusaegadega. Võidakse võita küündivuses ka siis, kui näiteks fotografeerimiseks vajalik säritusaeg ulatub teostamatute väärtusteni (mitukümmend tundi). Esineb ka vastupidine hädaoht: elektronoptiline muundi kipub fotokatoodi pimevoolu arvel fooni heledust tõstma ja sellega küündivust vähendama. Omapärased võimalused avab kujutise mastaabi muutmine muundis. Kujutleme muundi ees näiteks objektiivi suhtelise avaga 1 : 1,5 ja oletame, et muundi vähendab katoodil tekitatud kujutist 5 korda. Kõigepealt suureneb sellest heledus ekraanil kohe 25 korda (ilma muundi enda võimendust arvestamata). Teiseks vastab antud väljundkujutis mastaabilt mõeldavale objektiivile suhtelise avaga 1:0,3. Niisiis on see üks ülivalgusjõuliste süsteemide ehitamise võimalusi. Kahjuks halveneb aga niisugusel juhul tugevasti lahutusvõime.

Võimenduse tõstmiseks võib elektronoptilisi muundeid ühendada järjestikku. Ühe muundi ekraanilt kujutist objektiiviga järgmise fotokatoodile üle kandes läheb palju valgust kaduma, parem on muundid tihedalt ots otsaga kokku ühendada. Praktiliselt on siis muundite vahel väga õhuke vahesein, mille ühel küljel asub ekraan, teisel fotokatood. Iga astme võimendus jääb endiseks: umbes 100 korra piires, nagu eespool arvutatud. Pole võimatu koostada mitmeastmelisi elektronoptilisi muundeid miljoniliste võimendusteguritega, kuid mitme katoodi pimevooludest kogunev foon ja lahutusvõime vähenemine piiravad praegu maksimaalsed võimendused umbes saja tuhandega. Tuleb tõsiselt arvestada sedagi, et mitmeastmelises muundis antakse toitepinged astmetele järjestikku ning nii vajatakse kolmeastmelise muundi toiteks juba 50 000 . . . 70 000 volti.

Elektronoptiliste muundite astrofotograafias rakendamise pioneeriks oli nõukogude teadlane V. I. Krassovski, kes öise taeva spektri fotografeerimisel lühendas säritus-

aega 10 korda. Varasemad andmed öise taeva intensiivse infrapunase kiirguse kohta pärinesid fotoelektronkordistite loojalt L. A. Kubetskilt, kuid spektri fotod olid saadud ainult lainepikkuseni 0,89 μm. Krassovski spektritel (säritusaeg oli 3 tundi) võis aga selgesti eraldada kaht uut kiirguse maksimumi lainepikkustel 0,89 μm ja 1,04 μm. Üldse leiti, et kogu nähtamatu infrapunane kiirgus öiselt taevalt on sadu kordi heledam kiirgusest nähtavas piirkonnas. Järgnes veel mitu detailsemat spektraalvaatlust, mis andsid hulgaks ajaks tööd teoreetilise interpretatsiooni osas. Grupp nõukogude astrofüüsikuid (A. A. Kalinjak, V. I. Krassovski ja V. B. Nikonov) uuris 1948. ja 1949. aastal Galaktika tsentri ümbrust 1 μm lainepikkusel, kusjuures saadi andmeid selle jagunemise kohta kaheks tumeda ribaga eraldatud pilvetaoliseks moodustiseks.

Kosmoseraketi koordinaatide määramiseks kasutati Nõukogude Liidus 1959. aastal teatavasti tehiskomeedi meetodit: raketi pardalt pihustati ruumi naatriumipilv, mis päikesekiirguses fluorestseeris. Pilve fotografeeriti maapinnalt ja koordinaadid mõõdeti fotole jäävate tähtede suhtes umbes 2 kaaresekundi täpsusega. Teleskoobi suhtelise ava 1:2,5 korral oleks vajatud säritusaega 20 . . . 30 sekundit, pilve kiire hajumine aga nõudis lühemaid säritusaegu. Elektronoptiliste muunditega teleskoobid võimaldasidki saada normaalsed fotod säritusajaga 1 sekund.

Paljutõotavaid tulemusi on andnud ka katsed pildistada planeete elektronoptiliste muundite vahendusel. Kontakttüüpi muundiga saadi näiteks Jupiteri foto (teleskoobiga $D = 31$ cm, $F = 22$ m, suhteline ava 1:70) säritusajaga 1/100 sekundit. Mõnikord ühendatakse mitmeastmelise elektronoptilise muundiga kinokaamera — hiljem saab siis suurest hulgast planeetide ja tähtede fotodest valida välja parimad, mis on juhuslikult tehtud hea atmosfääri korral.

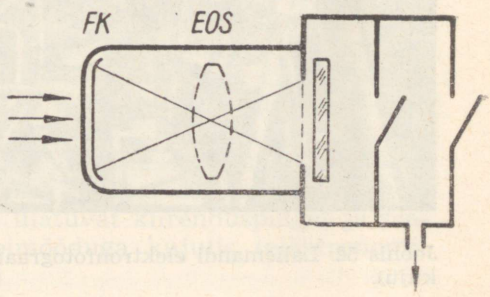
Ka Euroopa suurima reflektori 3TIII ($D = 2{,}6$ m) peafookuses eelistatakse taevast fotografeerida läbi elektronoptilise muundi, mis säritusaja vähendamise arvel hoiab 200-kordselt aega kokku. Säritusaeg kõigub seal praktiliselt mõne sekundi ja mõne minuti vahel, mis klassikalise astrofotograafia tavaliste mitmetunniliste säritusaegadega võrreldes suurendab tohutult teleskoobi «tootlikkust». Viimasel ajal on elektronoptiliste muunditega hakatud lühendama ka säritusaegu tähtede spektrite fotografeerimisel ja fotokatoodi abil laiendatud kättesaadava

spektri ulatust. Struve-nimelises astrofüüsika observatooriumis ehitati spektrograafi jaoks näiteks elektronoptilise muundiga kaamera, mille abil saab kiiresti pildistada tähtede spektreid infrapunastes kiirtes.

● elektronfotograafia

Nagu elektronoptiliste muundite kasutamispraktikast nähtub, on siin raskeimaks probleemiks ekraanil tekkinud kujutise registreerimine. Objektiiviga fotoemulsioonile projekteerides kaotame palju valguslikult, fotoemulsiooni ennast vastu ekraani klaasseina pannes halveneb lahutusvõime. Uue tee rajamine selle vastuolulise probleemi lahendamisel on seotud prantsuse astronoomi-eksperimentaatori André Lallemandi nimega. Tema kaamerate põhimõte on lihtne: elektronoptilise muundi sisse paigutatakse ekraani asemele elektrontundlik emulsioon. Põhimõtteliselt võib näha siin lausa ideaalset kujutise vastuvõtjat-registraatorit: fotokatood muudab langenud kiirguskujutise küllalt kõrge kvantsaagisega elektroonseks, elektroonne kujutis registreeritakse omakorda tundlikul, peeneteralisel ja väikese fooniga elektronograafilisel emulsioonil. Niisugust metoodikat nimetatakse üldiselt elektronfotograafiaks ja seda kasutatakse teisteski teaduse- ning tehnikaharudes, eriti aga elektronmikroskoopide juures.

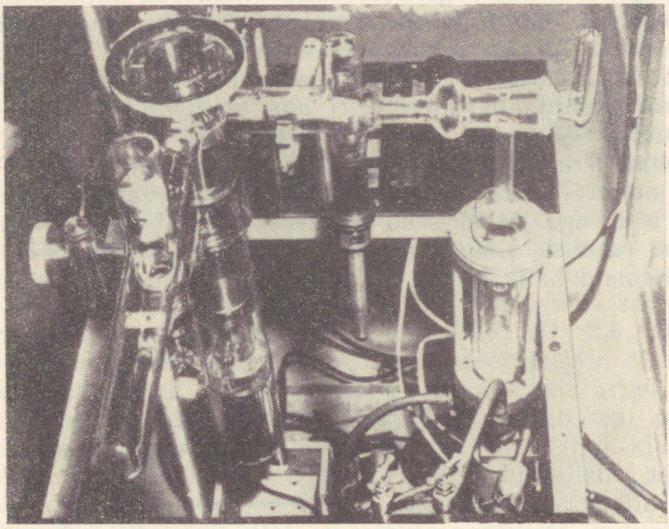
Lallemand alustas töödega astronoomilise elektronkaamera loomisel enne sõda Strassburgi observatooriumis, pärast sõda aga jätkas seda Pariisis. Tuli ületada palju tehnilisi raskusi. Kõigepealt puudusid head fotokatoodid ja Lallemand hakkas neid ise valmistama. Siin jõudis ta



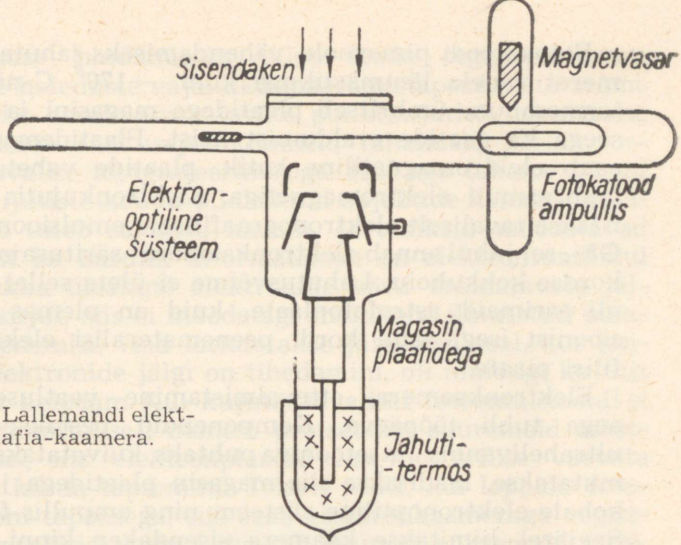
Joonis 51. Mitmekambrilise elektronfotograafiakaamera skeem.

aja jooksul erakordsete tulemusteni — praegu loetakse Lallemandi fotokatoodiga fotoelektronkordisteid ja elektronkaameraid maailma parimate hulka.

Elektronoptiline süsteem on tavaliste elektronoptiliste muundite, samuti elektronmikroskoopide ja elektronkiirseadmete valmistamise praktikas hästi läbi uuritud, elektronograafilised plaadid samuti olemas. Lihtsamad elektronkaamera variandid ühendaksid nagu elektrontundliku fotoplaadi elektronoptilise muundiga. Elektronoptilise muundi (joonis 51) tagaseinaks on väga õhuke, vaakuumtihe, kuid elektronkujutist läbilaskev metall-leht (kulla korral umbes 0,01 μm paksune, alumiiniumi korral 0,1 μm paksune). Järgneb kaks väga tihedalt suletavate ustega kambrit. Laadimisel viiakse plaat esmalt tagumisse kambrisse, uks suletakse ja õhk pumbatakse välja ning siis avatakse uks keskmisse kambrisse, kus plaat surutakse vastu õhukest vaheseina. Kõiki viimaseid operatsioone sooritatakse väljastpoolt, magnetitega. Ehkki õhk ega muud gaasid põhimõtteliselt muundisse endasse ei peaks pääsema, tekivad praktikas siiski lekkimised, fotokatood aga säilib vaid vaakuumis. Ühe Yerkesi observatooriumi



Joonis 52. Lallemandi elektronfotograafia-kaamera (väliskuju).



Joonis 53. Lallemandi elektronfotograafia-kaamera.

(USA) kaamera kohta tehtud arvutuse tulemuseks saadi, et hõrendus fotokatoodi ruumis peaks vähenema 1μm elavhõbedasamba võrra ajavahemiku jooksul, mis võrdub maailma kogu senise eaga, aga tegelikult vähenes fotokatoodi tundlikkus kahe nädalaga paarikordselt!

Tulemused õigustasid end siiski ning praegu on Lallemand jõudnud eeltoodud puudustest enam-vähem vabade kaamerateni. Kaamerad töötavad küllalt hästi, kuid neid ei saa just lihtsaks nimetada, väliskujult meenutavad nad mõne füüsikakatse vaakuumseadet (joonis 52). Elektronkaamera koosneb klaaskestast, millesse on monteeritud fotokatood, elektronoptiline süsteem ja magasin kaheksa fotoplaadiga (joonis 53). Plaatide laadimisel kaamerasse rikutakse vaakuumi ja seepärast kuulub vahetamisele ka fotokatood. Fotokatood on valmistatud väljaspool kaamerat ning seda hoitakse kuni fotografeerimise alguseni kinnises ampullis. Katood ise asub spetsiaalse läätse välispinnal — kumer katood suurendab elektronoptilise süsteemi poolt kasutatavat välja.

Pärast õhu väljapumpamist lüüakse ampull katki ning välise magneti abil seatakse fotokatood kohale. Kasutatakse kuni 30 kilovoldini ulatuvat kiirenduspinget ja saadakse umbes 15 mm läbimõõduga kujutis (elektronoptiline suurendus on 0,75×).

Fotokatoodi pimevoolu vähendamiseks jahutatakse kaamerat vedela lämmastikuga kuni —170° C-ni. Jahutav termosanum ümbritseb plaatidega magasini ja vähendab seega ka gaaside eraldumist neist. Plaatidemagasini ees asub elektromagnetiline katik, plaatide vahetamine toimub samuti elektromagnetiga. Elektronkujutis registreeritakse tavaliselt elektronograafilisele emulsioonile «Ilford G5», sel juhul annab elektronkaamera säritusajas 20 ... 25-kordse kokkuhoiu. Lahutusvõime ei ületa sellel emulsioonil parimaid astrofotoplaate, kuid on olemas fotoemulsioonist isegi sadu kordi peenemateralisi elektronograafilisi plaate.

Elektronkaamera ettevalmistamine vaatluseks võtab aega tubli tööpäeva. Komponendid pestakse hoolikalt ultrahelivannis atsetooniga puhtaks, kuivatatakse ja kuumutatakse, laaditakse siis magasin plaatidega ja seatakse kohale elektronoptiline süsteem ning ampullis fotokatood. Seejärel liimitakse kaamera sisendaken kinni ning õhk evakueeritakse. Järgneb veel üks ülemise kaameraosa kuumutamine 350° C-ni (alumist, plaatidega osa samal ajal jahutatakse), siis fotokatoodi ampull purustatakse ja kinnitatakse kaamera teleskoobi külge. Mõnevõrra raskusi valmistab kujutise fokuseerimine, mida tuleb teha kaudsete meetoditega ja kaotada seejuures tihtipeale isegi üks ülesvõtetest.

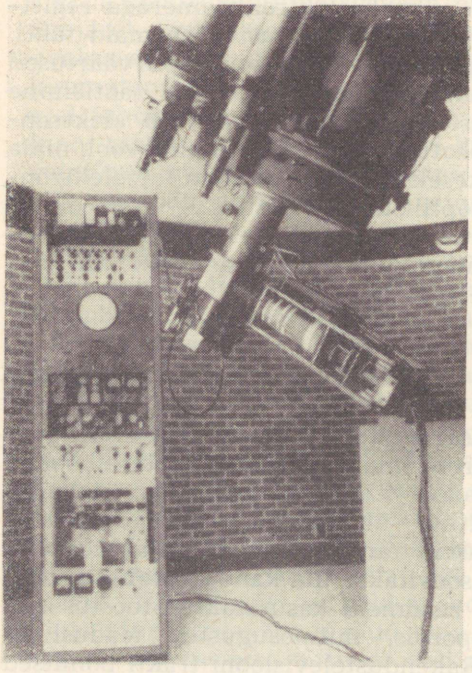
Eeltoodud üksikasjaline kirjeldus peaks näitama, milliste raskustega tehakse elektronfotosid astronoomias ja kui komplitseeritud katseseadmeid vajatakse kosmosest saabuva informatsiooni kinnipüüdmiseks ning salvestamiseks. Mida aga kogu antud aparatuuriga saavutatakse? Eelkõige tuleb nimetada elektronograafiliste emulsioonide endi erakordselt madalat fooni. See koosneb sõna otseses mõttes vaid üksikutest ilmutatud hõbedateradest. Palju häirivamad on radioaktiivse kiirguse ja kosmiliste kiirte jäljed, mida võib ära segada elektronide jälgedega. Näiteks eelnimetatud «Ilford G5» plaadile tekib ka heades tingimustes paarsada sellist jälge iga ruutsentimeetri kohta päevas. Praktiliselt on neid plaadi ilmutamisajaks igale ruutsentimeetrile kogunenud oma mitu tuhat. Niisuguste jälgede kogunemise tõttu ei säili elektrontundlikud plaadid kuigi kaua ja tuleb tarvitada vaid värskeid plaate. Et plaadid on tundlikud ka rõhu ja löökide suhtes, siis tuleb neid kohelda üsna ettevaatlikult. Elektronkaamera

tundlikkuse hindamiseks tuleb teada registreeritavate kujutiste heleduste vajalikku määramistäpsust. Kui seame ülesandeks ainult avastatavate punktkujutiste olemasolu, siis võidame säritusajas kümneid tuhandeid kordi, võrreldes tavalise fotografeerimisega. Kui aga tahame pärast nende kujutiste kaudu pildistatud objektide heledusi määrata, siis tuleb säritada kauem, et tekiksid mõõdetavad jäljed. Et ka kasulik informatsioon on elektrontundlikul plaadil ikka üksikute elektronide hästi eraldatavate jäljekeste kujul, siis ei mõõdetagi mõnikord ilmutatud plaadilt tumenemisi, vaid loendatakse jäljekesi: seal, kus langenud elektronide jälgi on tihedamini, oli muidugi kujutis vastavalt heledam. Kui kujutis tavalisel fotoemulsioonil ei luba põhimõtteliselt mõnest protsendist suuremaid mõõtmistäpsusi, siis elektronplaadid lasevad erilise vaevata mõõta 5 korda täpsemini. Teiselt poolt, kui leppida fotoemulsiooni täpsusega, siis saab elektronkaameraga registreerida poolteist kuni kaks tähesuurust nõrgemaid tähti. Säritusaja, mõõtmistäpsuse ja küündivuse piirväärtused on omavahel seotud ning maksimaalse efekti taotlemine ühes mõjutab teisi vastassuunas. Häirivaks on elektronfotograafia praktikas osutunud fotokatoodi pimevool, mida ei õnnestu viia nii väikeseks, nagu ta seda on fotoelektronkordistites ja elektronoptilistes muundites — mõni elektron katoodi pinna ruutsentimeetrilt sekundis. Elektronkaamerate konstruktsioon ja halvem vaakuum nii madala pimevooluni minna ei lase.

● taevakehad televiisoriekraanil

Tehniliselt kõige keerukamaks fotoelektrilise kiirgusvastuvõtja juhuks astronoomias on televisiooniteleskoobid. Põhimõtteliselt saadakse televisiooniteleskoop tavalise teleskoobi kui objektiivi ühendamisel rakendustelevisiooni traktiga. Viimaseid tarvitatakse kaasajal kõikvõimalikel juhtudel, kui soovitakse üle kanda valguskujutisi. Rakendustelevisiooni seadmeid kasutatakse tööstusettevõtetes, raudteetranspordis, mitmesugustes teaduslikes eksperimentides jne. Rakendustelevisiooni trakti põhilised koostisosad on saatekaamera ja vastuvõtu-vaatlusteleviisor. Saatekaamera, mis enamasti kujutab endast televisioonistuudiotes kasutatava kaamera lihtsustatud varianti,

paigutatakse sinna, kust avanevat vaadet tahetakse edasi anda (raudteesõlmpunkti, kõrgahju juurde, mikroskoobi külge, õhupallile või meresügavuste uurimise kambrisse), ja ühendatakse vaatluspunktis asuvate vastuvõtuseadmetega. Need meenutavad üsna paljus tavalisi televiisoreid. Nii saate- kui ka vastuvõtuseadmeid võib olla mitu ja neid saab omavahel ümber ühendada. Nende seadmete juurde kuulub vajalik abiaparatuur: toite-, juhtimis- ja võimendusplokid. Rakendustelevisiooni lihtsaim funktsioon on ainult optilise kujutise ülekanne paigast, kus seda millegipärast on raske või ebamugav jälgida. Viimasel ajal aga nõutakse enamat, ja rakendustelevisioon toimetab üleantava pildiga üht-teist juba iseseisvaltki: suurendab või vähendab, tõstab kontrastsust, summeerib nõr-



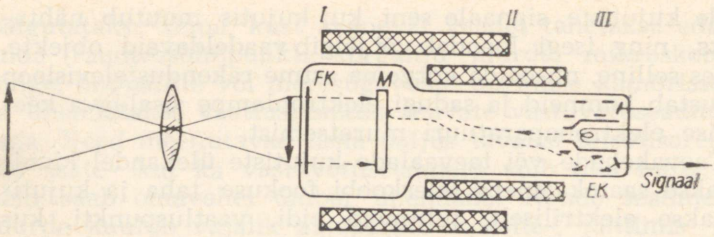
Joonis 54. Televisioonitrakt 60 cm reflektori juures — saatekaamera Cassegraini fookuses ja elektronaparatuur.

kade kujutiste signaale seni, kui kujutis muutub nähtavaks, ning isegi loendab või jälgib vaadeldavaid objekte. Alles selline, nii-öelda kõrgema astme rakendustelevisioon õigustab kümneid ja sadugi elektronlampe sisaldava keerulise elektronaparatuuri muretsemist.

Taevakehade või taevaalade kujutiste ülekandel kinnitatakse saatekaamera teleskoobi fookuse taha ja kujutis antakse elektriliselt, juhtmeid pidi, vaatluspunkti, kus seda saab televiisoriekraanilt jälgida või fotografeerida. Üks selliselt komplekteeritud televisiooniteleskoop on kujutatud joonisel 54.

Mida annab televisioonitehnika astronoomilise teleskoobi kujutisele? Kõigepealt tuleb eelöeldut korrates märkida kujutise ülekannet vaatluste vajaduste seisukohalt täiesti piisavate vahemaade taha. Tornis teleskoobiga saadud kujutist võib jälgida kõrvalruumis või isegi teises hoones ühelt või mitmelt mugavat vaatlemist võimaldavalt suurelt ekraanilt. Teiseks annab rakendustelevisiooni aparatuur täiendava suurenduse umbes 10 korda, mis tähendab kogu süsteemi ekvivalentse fookuskauguse suurenemist sama arv kordi. Kolmandaks saab kujutise heledust, kontrastsust ja mastaapi televiisoriekraanil sujuvalt muuta, kohandada seda visuaalseks vaatlemiseks või fotografeerimiseks. Ning neljandaks tuleb tingimata nimetada saatekaamera puhttehnilist omadust — võimet mõninga aja jooksul koguda (summeerida) kujutist, mis muidu kujutas fotoemulsiooni suurt eelist teiste fotoelektriliste kiirgusvastuvõtjate ees. Iseenesest mõista säilivad kõik fotokatoodile üldiselt omased eelised. Võib näida, et televisioonimeetod, mis ühendab fotokatood-kiirgusvastuvõtja kõrge efektiivsuse väga paindliku vaatluste üldkorraldusega, ongi ainuõige perspektiivne meetod kaasaegsetes astrofüüsikalistes vaatlustes. Ometi pole televisiooniteleskoobid veel sellisele juhtpositsioonile asunud ja seda just üldise aparatuuri keerukuse ning televisioonisaatetorude madalama tundlikkuse tõttu. Üksikute ülesannete täitmisel on need süsteemid näidanud end aga juba väga heast küljest.

Televisioonitrakti kasutamisel on kõige vastutusrikkamaks lüliks saatekaamerasse kuuluv saatetoru. Saatetorude koostisse kuulub tavaliselt fotokatood, millest valguskvandid elektrone välja löövad, ekraan (märklaud) elementaarsete kondensaatoritega, milledesse kogutakse pildipunktide



Joonis 55. Superortikoni põhimõtteline skeem.

heledustele vastavad laengud, elektronkiirt tekitavad ning seda rida-realt mööda ekraani liigutavad elektri- ja magnetsüsteemid. Laengute kompimine ekraanil tekitab elektronkiire ahelas muutuva voolu, mis ongi pildipunktidele vastav signaal. Meil kehtivate standardite kohaselt koosneb televisioonikujutis 625 reast, mis hõlmavad umbes poolt miljonit pildipunkti. Kogu pilt antakse edasi 1/25 sekundi jooksul ja seega peatub elektronkiir igal kondensaatoril üsna lühikest aega, ülejäänud aja jooksul see kondensaator kogub laengut.

Kaasaegsetest standardsetest saatetorudest on kõige tundlikum superortikon. Superortikon koosneb kolmest sektsioonist. Esimene neist on täiesti sarnane elektronoptilise muundiga (joonis 55). Kujutis projitseeritakse fotokatoodile *FK* ja sellest väljunud eletronkujutis kantakse elektri- ja magnetvälja abil üle ekraanile-märklauale *M*. Märklauale kogunevad elektronidest laengud. Et märklaud on väga õhuke (paksusega mõni mikromeeter), siis kanduvad laengud läbi tema ka teisele poole. Siin kombitakse neid rida rea järel elektronkiirega, kusjuures kiire ülejäänud elektronid pöörduvad selles suunas tagasi, kust nad tulid. See nõrk ülejäänud elektronide voog kannab juba signaali — ta suurus oleneb parajasti kombitud pildipunkti heledusest. Elektronvoog suunatakse tagasipöördunult saatetoru kolmandasse sektsiooni, mis pole midagi muud kui elektronkordisti (*EK*) umbes 500 ... 1000-kordse võimendusega. Edasi läheb signaal väljaspool saatetoru asuvasse elektronlampvõimendisse. Kokku ulatub võimendus superortikoniga televisioonitraktis mõnekümne tuhande korrani ja signaali sageduslik ribalaius on 625 rea korral umbes 6,5 megahertsi. Nõukogude stan-

dardne superortikon ЛИ-17 annab heakvaliteedilise kujutise veel pooleluksilise valgustatusega (fotokatoodil), kuid töötab ka mõne sajandiku luksiga. Valmistatakse spetsiaalseid ülitundlikke superortikone nagu USA saatetoru 6849, mille tundlikkuse lävi asub kümnetuhandiku luksi piires (valgustatus fotokatoodil). Mõneastmelise elektronoptilise muundi lisamine sellistele saatetorudele viib äärmiste mõeldavate tundlikkusteni: $10^{-5}...10^{-6}$ luksi (fotokatoodil).

Siinkohal tuleb peatuda segavate atmosfäärsete häirete täpsemal kirjeldamisel. Ääretutest kaugustest saabuvaid taevakehade valguskiiri võime õigusega põhimõtteliselt paralleelseiks lugeda. Maa atmosfäär aga pole sugugi ühtlane ja rahulik, vaid kujutab endast erineva tiheduse, niiskuse ning temperatuuriga õhumasside alaliselt muutuvat segu. Seda läbides ei jää valguskiired paralleelseiks, vaid kohati koonduvad, kohati hajuvad. Maapinnale langeb seega mõnes kohas samalt tähelt rohkem valgust kui teises, need paigad aga muutuvad alatasa. Liikumatule vaatlejale, olgu ta varustatud teleskoobiga või mitte, hakkavad tähed vilkuma. Peale vilkumise ehk teiste sõnadega tähtede heleduste muutumise avalduvad atmosfäärsed häired veel tähekujutise kiiretes geomeetrilistes nihetes, mida nimetatakse värisemiseks. Kõik see rikub oluliselt taevakehade kujutisi maapealsetes astronoomiariistades. Planeetide vaatlemisel võivad näiteks kaks lähestikku asuvat kujutise punkti täiesti sõltumatult vilkuda ja väriseda, planeedi ketas näib juhuslikult deformeeruvat kõikvõimalikes suundades — kujutis üldse nagu «keeb». Eriti suured on atmosfäärsed häired siis, kui vaatleme horisondile lähedast taevakeha, sest sel juhul peavad kiired läbima palju paksema õhukihi kui seniidis. Kujutise mastaabi suurendamisel avalduvad häired samuti tugevamini. Et fookuskauguse pikendamisel väheneb kujutise valgustatus teleskoobi taga võrdeliselt kujutise läbimõõdu ruuduga, siis pikafookuseliste riistadega ($F = 20...30$ m) näeme vaid ähmaseid virvendavaid laike. Pildistamisel kerkivad siis üles kaks täiesti vastuolulist nõudmist: valgustatuse vähenemisel tuleb säritusaega suurendada ja kujutise detailide laialivalgumise piiramiseks peaks säritusaeg olema võimalikult lühike. Siin muutub oluliseks fotoelektriliste kiirgusvastuvõtjatega saavutatav säritusaja vähenemine — saame teha momentvõtteid taevakeha-

lest, nii et atmosfääri liikumine ja muutlikkus ei jõua kontuure laiali määrida.

Katseid televisiooni kasutamisega astronoomiliste kujutiste valgusvõimendamiseks ja nende omaduste parandamiseks alustati enam-vähem üheaegselt Inglismaal Cambridge'i observatooriumis ja Nõukogude Liidus Pulkovos. See oli 1952. aastal, esimeste teadusliku väärtusega resultaatide publitseerimiseni jõuti mõlemais 1956. aastaks.

Cambridge'i observatooriumis kinnitati superortikoniga saatekaamera kõigepealt 25 cm läbimõõduga peegelteleskoobi fookusse ja fotografeeriti vaadeldavat Kuu pinda televiisoriekraanilt. Päikese horisontaalteleskoobi juures katsetati isegi spektraalvaatlusi. Mõningaid Päikese pinnal toimuvaid harukordseid nähtusi, mida varem optiliselt otseselt polnud võimalik vaadelda, sai nüüd jälgida televiisoriekraanilt.

1954. aastal pildistati Lovelli observatooriumis (USA) eriti tundliku superortikoniga televisioonitrakti vahendusel planeete. Saatetorus oli tavalisele superortikonile lisatud veel kaks elektronoptilise muundi kaskaadi, mis umbes sajakordselt võimendasid kujutist. Marsi vastasseisu ajal (kui ta nurkläbimõõt oli 20 kaaresekundit) saadi planeedist 60 cm teleskoobi ja selle televisioonitraktiga suur hulk fotosid. Kogu pilt koosnes tuhandest joonest. Marsi kujutise läbimõõt kinofilmile tehtud fotodel oli 14 millimeetrit.

Pulkovo observatooriumis alustas N. F. Kuprevitš televisioonivaatlusi horisontaalsel päikeseteleskoobil, mis kohandati Kuu pildistamiseks. Tsölostaadist ja pikafookuselisest peegelobjektiivist koosneva riistaga saadi Kuu kujutis kas 15 cm või 50 cm läbimõõduga, millest superortikon kandis üle 28 × 28 mm ala. Televisiooniaparatuur valmistati kohapeal. Kogu süsteemi ekvivalentseks fookuskauguseks kujunes kuni 364 meetrit ja ekraanil nähtava Kuu osa mastaabi järgi oleks kogu ta kujutise läbimõõt olnud 3,2 meetrit. Televiisoriekraanilt saadi üsna häid fotosid Kuu pinnast.

1958. aastal lõpetati Pulkovo observatooriumis uue eksperimentaalse televisiooniteleskoobi ehitamine. Teleskoobi optika oli Cassegraini süsteemi, milles sekundaarpeeglite vahetamisega võis muuta ekvivalentset fookuskaugust 20 meetrilt 54 ja 120 meetrini. Nagu omane Cassegraini optilisele skeemile, jäi ka siin toru ikka lühikeseks (pik-

kus 2 meetrit), peapeegli läbimõõt oli 28,5 cm. Fookuses asuva superortikoni tööreziimis oli ette nähtud laengu kogumise võimalus mõnekümne sekundi jooksul ja see andis juba esimestel katsetel mitmekümne tuhande korrani ulatuva võidu küündivuses (hetkelise särituse suhtes). Ekraanilt oli võimalik fotografeerida kuni kümnenda tähesuuruse tähti, milleks tuli kujutist koguda ainult 6 sekundit. Optilise süsteemi fookuskaugust 120 meetrit pikendas televisioonisüsteemi 9-kordne elektroonne suurendus, summaarne ekvivalentne fookuskaugus tuli üle ühe kilomeetri.

Praegu on Pulkovo observatooriumis tööle rakendatud veel kahekanaliline televisiooniteleskoop, mis koosneb kahest samale statiivile paigutatud reflektorist ja kahest rakendustelevisioonitraktist. Selle abil saab jälgida taevast ja taevakehasid samaaegselt kahes värvuses, mis pakub huvi nii samaaegsete muutuste jälgimisel kui ka atmosfäärihäirete värvusloomuse uurimisel. Et tähekujutise moonutumine atmosfääris kujutab endast kaasaegse maapealse vaatlusastronoomia üht tõsisemat tõket, siis püütakse seda televisiooniteleskoopide juures uurida ja võimaluse korral ta mõju vähendada.

1957. aastal konstrueeriti USA-s Dyeri observatooriumis televisioonitehnikal põhinev kujutiste värisemise kompensaator. Süsteem oli määratud Jupiteri, Veenuse ja Marsi vaatlemiseks. Optilise kujutise valgusest eraldati osa poolläbipaistva peegli abil ning juhiti fotoelektronkordistitele, mis registreerisid värisemise suuna ja ulatuse. Selle värisemissignaaliga mõjutati televisiooni-saatetoru, mis sai peeglit läbinud valgusest kujutise, nii et elektroonne kujutis üldse ei nihkunud paigast. Lahutusvõime suurenes mitmekordselt, võrreldes tavaliste televisiooniteleskoopidega.

Kaasaegsed televisiooni-saatetorud pole võimelised pikema aja jooksul kujutist summeerima — neil puudub või on väga piiratud see fotoplaatide omadus, mida nimetasime integraalsuseks. Selleks et saatetoru märklaual elektronkujutist koguda, peab märklaud koosnema suurest hulgast väikestest punktkondensaatoritest heast isolaatorist alusel. Tavaliseks televisiooniülekandeks niisugune toru ei kõlba, sest ta muutub inertseks, pikatoimeliseks. Inglismaal alustati selliste ülinõrkade kujutiste registreerimiseks ettenähtud saatetoru väljatöötamist

kümme aastat tagasi ja kirjanduses leidub andmeid tema katsetamisest ning üksikutest vaatlustest, kuid toru laialdasema tootmise ja kasutamise kohta seni informatsiooni ei ole. Ülesandeks oli seatud erakordselt nõrkade tähtede fotografeerimine — 24^m ja võib-olla isegi nõrgemad. Ka 5 m teleskoobiga polnud neid tähti võimalik fotoplaadile saada, sest säritusaja pikendamisel katab fooni heledus plaadi täiesti ühtlaselt. Uue toru konstruktsioon sarnanes üldiselt superortikoniga, kuid märklaud oli valmistatud heade isolatsiooniomadustega klaasist ning seda võis 180° võrra pöörata. Märklauale koguti pika aja jooksul fooni ja tähe kujutisele vastavaid laenguid, kuid teatud elektrilise võttega võis fooni aeg-ajalt maha kustutada. Kustutamise tulemusena vähenes muidugi ka tähe kujutisele vastav laeng, aga kui ta üldse foonist erines, siis siiski osaliselt säilis. Kogumise ja kustutamise tsüklite kordamisel kasvab tähele vastav laeng aja jooksul, kuni seda võib juba elektronkiirega «kombata». Selleks pööratakse märklaud teistpidi ja võetakse temalt signaal tavalisel viisil: kompides märklauda elektronkiirega rida rea järel. «Kassisilmaks» ristitud välismaa televisiooniteleskoobiga (D = 25 cm) fotografeeriti 10^m tähti isegi päeval, kusjuures säritusaeg oli 1/30 sekundit. Riista loojad esinesid väitega, et nende televisioonisüsteemiga küüniks 5 m teleskoop 100 sekundiga $26^m,5$ tähtedeni (tuletame siinkohal meelde, et tavalisel fotografeerimisel küünib sama teleskoop umbes poole tunniga vaevalt 24^m-ni). Dearborni observatooriumi (USA) televisiooniteleskoop aga töötab ka fotomeetrina: kõigi vaateväljas asuvate tähtede kujutised fotometreeritakse $0^m,05$ täpsusega ning koos $0'',1$ täpsusega määratud asenditega kuuluvad mõõtmistulemustena kujutise juurde.

Krimmi observatooriumis katsetatud televisioonitrakti saatetorule lisatud elektronoptiline muundi tõstis süsteemi tundlikkust sedavõrd, et 50 cm reflektoriga küüniti vähema kui kümnendiksekundilise säritusajaga pildistama kuni $16^m,5$ tähti. Häid lootusi andis sama süsteemi kasutamine ka tähtede pildistamisel fotomeetrilise mõõtmise otstarbel ja spektrite registreerimisel — säritusajad nähtavas spektriosas vähenesid 60—70 korda, pikemalainelises piirkonnas aga veelgi enam.

Tänapäeval on astronoomilised televisioonisüsteemid jõudnud juba kosmosesse, kust antakse edasi Maa, Kuu,

planeetide ning üsna pea ka tähtede ja udukogude pilte. Esimene televisioonisaade kosmosest toimus 7. oktoobril 1959 — automaatjaama «Luna 3» pardalt pildistati Kuu tagakülge ja anti fotod edasi televisiooni teel. USA astronoomide grupp M. Schwarzschildi juhtimisel on mitu korda tõstnud teleskoope koos fotografeerimiseks või spektroskoopiaks määratud lisaseadmetega õhupallil enam kui paarikümne kilomeetri kõrgusele ja ka siin ei tuldud toime rakendustelevisiooni traktita. Palju fotosid Maast ja ilmastikunähtustest Maa atmosfääris on andnud televisioonikaameratega varustatud meteoroloogilised tehiskaaslased «Tiros». Kuu pinna detailseid pilte andsid kuni Kuule kukkumiseni televisioonikaamerad USA sondraketidelt «Ranger», samuti Kuud ümbritsevale orbiidile viidud ja Kuule laskunud NSVL ja USA automaatjaamad. Veel paljudes käsilolevates ja kavatsetavates astronoomilistes vaatlustes on televisioonitrakt asendamatu tulemuste edasiandmisel suurtelt kõrgustelt või kosmilises ruumis asuvaist vaatlusjaamadest. Lähemaid andmeid mõnede õhupalli- ja orbitaalobservatooriumide televisioonisüsteemide kohta on toodud raamatu viimases peatükis.

IV. teleskoobi abiseadmed

optilisest kujutisest arvuliste andmeteni

Taevasse suunatud teleskoobi fookuses tekib teatud taevaosa optiline kujutis. Teleskoobi omadustest oleneva tõetruudusega kordab see nähtavat olukorda taevas. Astronoomide järgmiseks ülesandeks on siit teaduslike andmete ammutamine, informatsiooni dešifreerimine ja salvestamine. Nagu juba öeldud, pole astronoomias võimalik eksperimenteerida uurimisobjektidega, kuid seda komplitseeritumaid eksperimente korraldatakse Maale jõudnud ja teleskoopide objektiivide poolt kogutud kiirtega. Selleks varustataksegi teleskoobid ja observatooriumid nii-öelda «tehnoloogiliste» lisaseadmetega. Kujutise vastuvõtjana või kiirgust muundava elemendina seisavad teleskoobi fookuses kiirgusvastuvõtjad, mis annavad välja mõnda teist liiki signaali või võimendatud kujutise. Nendega kombineeruvad teleskoobi läheduses ja observatooriumi laboratooriumides paiknevad optika-mehhaanika-elektroonikaaparaadid, mis ühiselt tõstavad vaatluse subjektiivse visuaalse hindamise tasemelt kujutise teadusliku analüüsi, mõõtmise ja salvestamise tasemele.

Põhiliseks teadusliku informatsiooni hankimise viisiks loodusest on mõõtmiseksperiment, astronoomias tähendab see uuritava objekti või nähtuse arvuliste karakteristikute saamist kiirguse mõõtmise kaudu. Juba 1875. aastal rõhutas vene teadlane B. S. Jakobi: «Ei ühtki täppisteadust, ei ühtki rakendusteadust, ei ühtki katset mõõtmisteta. Uued mõõtmisvahendid tähistavad tõelist progressi teaduses!» Kaasajal on astronoomia vaatluslikud edusammud lahutamatult seotud mõõtmistega, vaatlemisest võib praktilises astronoomias rääkida vaid tinglikult, mõistes selle all mitte enam visuaalset taeva jälgimist, vaid taeva-

kehade kiirguse kogumist, analüüsi ja mõõtmist vastavate masinatega.

Mõõtmised-vaatlused ei nõua nimetamisväärset füüsilist tööd, vaid kuuluvad vaimse tegevuse sfääri. Inimese abistamiseks automatiseeritakse pikaajalised, standardselt korduvad ja paljude üksikoperatsioonidega mõõtmised nii juhtimises kui ka andmete registreerimises. Masinad ei väsi, ei lase end segada kõrvalistel ärritajatel ega tee subjektiivseid vigu nagu operaator-vaatleja. Informatsiooni läbilaskevõimes on nad inimese juba ületanud.

Kiirguselt «röövitud» informatsioon kuulub salvestamisele. Tohutul hulgal informatsiooni voolab kaasaegsetest kosmose uurimise vahenditest nagu kosmoseraketid ja tehiskaaslased, seda tihtipeale ka asjatu liigsusega. USA tehiskaaslaselt «Avangard III» salvestati näiteks kolme esimese lennukuu jooksul 6000 rulli magnetlinti, igaüks 800 meetrit pikk. Raketikeskuses tuli hakata uusi hooneid ehitama tehiskaaslastelt saadud informatsiooni säilitamiseks. Fotograafilisel salvestamisel küünib tihedus 10^7—10^8 informatsiooni-kahendühikuni kuupsentimeetri kohta, magnetilisel salvestusviisil on see mõnevõrra väiksem. Spetsiaalsetele spektrograafilistele fotoemulsioonidele mahutatakse isegi kuni 10^{10} ühikut kuupsentimeetri kohta. Informatsiooni salvestustiheduse piir on veel kaugel: praeguste teadmiste kohaselt määrab selle aine aatomite tihedus ruumiühikus — umbes 10^{23} kuupsentimeetri kohta.

Teleskoobi abiseadmete all kitsamas mõttes (kasutatakse ka nimetust aksessuaarid) mõeldakse kõike seda, mis teleskoobi juures kujutise registreerimisest, mõõtmisest või analüüsist osa võtab. Põhimõtteliselt kuuluksid siia tavalised fotokasseti hoideseadmed teleskoobi fookustes, kindlasti aga need fotografeerimisseadmed, kus rakendatakse elektronoptilisi muundeid, elektronfotograafiakaameraid või keerulisemaid kiirgusvastuvõtjaid. Need on teleskoobi abiseadmed kujutise maksimaalselt erapooletuks talletamiseks, millega tehakse võimalikuks selle edasine mõõtmine ja analüüs mistahes ajal laboratooriumitingimustes. Mõõtvatest abiseadmetest oli eespool juba lühidalt kirjeldatud elektrofotomeetrit. Elektrofotomeetriga mõõdetakse taevakehade heledusi, kusjuures filtrite paigutamisega mõõdetavate kiirte teele saab määrata ka nende värvust. Veelgi täpsemat kiirguse analüüsi tehakse aga teleskoobi spektraalsete abiseadmetega. Spektraalana-

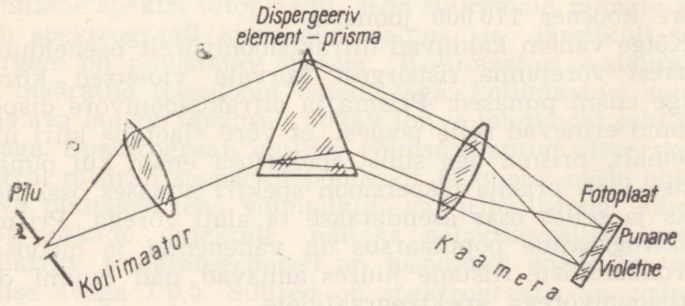
lüüsi andmed on astrofüüsika jaoks esmajärgulise tähtsusega, ükski muu vaatluste liik ei anna nii palju informatsiooni taevakehade keemilise koosseisu, neil valitsevate füüsikaliste tingimuste ja toimuvate protsesside kohta.

Samuti nagu kujutisi, nii ka spektreid võib salvestada mitut liiki kiirgusvastuvõtjatega või kohe teleskoobi juures mõõta. Valdavas enamikus eelistatakse spektrite fotograafilist jäädvustamist ja hilisemat mõõtmist laboratooriumis. Seega nõuavad astronoomilised vaatlused ka laboratooriumiriistu vaatluste ajal ajutiselt salvestatud materjali lõplikuks mõõtmiseks. Siia peavad kuuluma masinad tähekujutiste asendite määramiseks fotoplaatidelt, tähtede heleduse määramiseks plaadi tumenemiste järgi, kiirguse intensiivsuse spektraaljaotuse kindlakstegemiseks spektri fotograafilise kujutise järgi, spektrijoonte lainepikkuselise asendi mõõtmiseks ja paljude teiste selliste ülesannete täitmiseks. Laboratoorse töötlemise tulemused on juba arvulised vaatlusandmed, mida järgnevalt kasutatakse teaduslike oletuste ja teooriate püstitamiseks või kontrolliks, uute teaduslike järelduste tegemiseks astronoomias.

Nagu näha, töötab kaasaegses astronoomias vaatleja osas tegelikult tehniline aparatuur ja astronoomi ülesandeks on õigupoolest vaatluse juhtimine. Arvestades juhtimisele kuuluva seadmestiku suurust ja keerulisust ning nõutavat täpsust, on loomulik, et tuleb mõelda ka juhtimise hõlbustamisele. Selleks varustatakse keskmised ja suuremad teleskoobid juhtimissüsteemidega, milles suur hulk vaatlustega seotud operatsioone on mehhaniseeritud ning automatiseeritud. Küllalt oluliseks on siin ka vaatluste kiirus, sest arvestades, et vaatlusteks kõlbavad vaid selged, hea läbipaistvusega ja soovitatavalt kuupaisteta ööd, saavad kallihinnalised instrumendid töötada vaid mõne protsendi oma kogueast. Suur grupp abiseadmeid peab kindlustama veel teleskoobi normaalsed töötamistingimused, rikkumata seejuures vaatlusolukordi.

Universumi füüsikalise ehituse ja seaduspärasuste uurimisel ei piisa taevakehadelt Maale jõudvate valguskiirte suuna ja tugevuse määramisest visuaalse vaatluse, taeva fotografeerimise ega ka mitmesuguste fotomeetriliste meetoditega. Kiirtekimbud sisaldavad veel palju informatsiooni, mida saame neist kätte spektraalanalüüsiga. Maapinnale jõuab taevakehadelt nähtava valguse tuntud spekter veel koos teatud lisadega mõlemal pool: infrapunase ja ultravioletse kiirgusega, üldse umbes lainepikkuste vahemikus 0,29 kuni 20 μm (nähtav on selle hulgast ligikaudu 0,38 μm ja 0,78 μm vaheline piirkond). Tähtede koostist ja neil toimuvaid protsesse uurivaid astrofüüsikuid huvitab loomulikult, kuidas ühelt või teiselt tähelt saabuv kiirgus selles lainepikkuste vahemikus täpselt jaotatud on. Öeldakse, et spektroskoop on astrofüüsika jaoks niisamasuguse tähtsusega nagu teleskoop astronoomiale üldse.

Tüüpilise prismaspektroskoobi ehituse skeem on toodud joonisel 56. Kitsas pilukujuline ava *P* (lühidalt: pilu) eraldab langevast valgusvoost selle osa, mida tahetakse spektraalselt lahutada, pilu on spektroskoobi enda suhtes nagu valgusallikas. Pilu asub teleskoobi fookuses; koos uue objektiiviga moodustab ta kollimaatori, millest edasi kulgevad kiired paralleelselt. Kollimaatori ülesandeks tavalises spektroskoobis ongi muuta kiired paralleelseiks; kui seda saab teha muul viisil, siis pole kollimaatorit vajagi. Paralleelsed kiired langevad prismale ega välju sealt enam koos, paralleelselt, vaid lainepikkusest olene-



Joonis 56. Prismaspektroskoobi põhimõtteline skeem.

valt iga värv erinevas suunas. Niisugust prisma omadust kallutada eri värvi kiiri erinevalt nimetatakse dispersiooniks. Prismast väljunud valgusest ehitatakse teise objektiivi abil spektri kujutis. Teine objektiiv ja plaadihoidja kujutavad endast seega spektrograafi kaamerat. Üldisemalt koosneb spektrograaf niisiis kollimaatorist, dispergeerivast elemendist ja kaamerast. Füüsikalisest seisukohast on ta südameks dispergeeriv prisma, sest just selles toimub valguse murdumine, mis toob kaasa valge liitvalguse lahutumise tema koostisosadeks lainepikkuste järgi. Klaasprisma pole ainus võimalik dispergeeriv element, viimasel ajal on kasutatavamaks difraktsioonivõre. Difraktsioonivõre saadakse läbipaistvast või peegeldavast pinnast, kui sellele tõmmatakse tihedalt suur hulk paralleelseid jooni. Keskmistel võredel tuleb 200 ... 600 joont millimeetri kohta, see arv aga võib ulatuda 1200 jooneni. Teades, et võrede endi suurused ulatuvad paarikümne sentimeetrini, näeme, et kokku on difraktsioonivõrele tõmmatud kuni paarsada tuhat joont. Difraktsioonivõre tekitab mitu erineval määral laotatud spektrit, mis kannavad esimest, teist, kolmandat jne. järku spektrite nime. Et difraktsioonivõre-spektrograafis valgust ei kaoks kõigisse erinevat järku spektritesse, siis on õpitud valmistama erilisi võresid, kus enamik valgusenergiast (kuni 70%) kontsentreeritakse just seda järku spektrisse, milles tegelikult töötatakse. Kunagi alustas tuntud füüsik Michelson uut liiki suure difraktsioonivõre valmistamist lootusega, et tal õnnestub mõne kuuga konstrueerida selleks uus masin. Michelsonil läks tõesti korda teha 15 sentimeetri pikkune võre, mis 50% võrra ületas kõik senised parimad võred, kuid ühtekokku võttis see töö tal 8 aastat. Võre koosnes 110 000 joonest.

Kõige vähem kalduvad difraktsioonivõrelt peegeldunud kiirtest võrepinna ristsirgest kõrvale violetsed kiired, kõige enam punased. Prisma ja difraktsioonivõre dispersioonid erinevad selle poolest, et võre «laotab» kiiri ühtlasemalt, prisma aga sinist spektriosa enam kui punast. Üldse jääb prisma dispersioon spektri punases osas nõrgaks ja selles osas asendatakse ta alati võrega. Prismaspektrograafide populaarsus on vähenenud ja moodsate astronoomiliste riistade juures annavad nad ruumi difraktsioonivõrega spektrograafidele.

Lineaardispersioon näitab, kui suureks on spekter kaa-

mera objektiivi fokaalpinnas venitatud ja see antakse tavaliselt lainepikkuse ühikutes (μm, nm, varem Å) millimeetri kohta. Eespool öeldust järeldub, et prisma kasutamise korral tuleb ka lisada, missuguses spektriosas antud lineaardispersioon on määratud — erinevais lõikudes on ta erinev. Mida enam on spekter laotatud, seda vähem lainepikkuse-mikromeetreid tuleb ühe mm pikkuse kohta — sel korral on tegemist kõrge dispersiooniga. Madala dispersiooni puhul on spekter tihedalt koos ja lineaardispersiooni näitav arv (μm/mm) suur. Niisiis on 30 nm/mm madal, aga 0,3 nm/mm kõrge dispersioon.

Taevakehade spektraaluurimiseks ühendatakse spektrograaf teleskoobiga; tavaliselt tehakse seda nii, et spektrograafi pilu asetseb teleskoobi objektiivi fokaalpinnas. Sel juhul öeldakse, et teleskoop toidab spektrograafi, varustab teda lahutatava valgusenergiaga. Punktikujulise tähekujutise pilusse laskmisel venitab dispersioon ta kitsaks joonetaoliseks spektriks. Kuna sellise spektri mõõtmine fotoplaadilt pole lihtne, siis fotografeeritakse spektreid, tähekujutist kergelt piki pilu kõigutades. Nii laieneb spekter mõne millimeetri laiuseks ribaks.

Spektraalaparaadiga varustatud teleskoobi küündivus jääb kaugele maha otsese fotografeerimise küündivusest; tavalisel pildistamisel väikesele pinnale (peaaegu punkti) kontsentreeritud tähevalgus jaotatakse spektris tervele pikale ribale ja silmanähtavalt on selle ribaspektri heledus palju väiksem kui punktitaolisel tähekujutisel. Spektrograafi optiline võimsus ja tema dispersioon on omavahel teatud vastuolus: mida suuremaks muuta dispersioon (sellega ka lahutusvõime spektris), seda pikemaks venitame spektri fotoplaadil, seda suuremale pinnale jaotub spektrograafi sisenenud valgus ja järelikult seda nõrgem on pildistatav spekter. Kollimaatori valgusjõud on määratud teleskoobi omadustega; kollimaatori suhteline ava langeb tavaliselt kokku toitva teleskoobi suhtelise avaga. Spektrograafi optilise võimsuse antud dispersiooni korral määrab seepärast põhiliselt kaamera, mille objektiive püütakse teha võimalikult valgusjõulistena. Äärmiselt nõrkade objektide, näiteks galaktikaväliste udude spektrite fotografeerimisel on kasutatud objektiive suhtelise avaga 1:0,5. Suured on spektrograafis ka valguskaod pilul ja dispergeerivas elemendis. Kui dispersiooni suurendamiseks pannakse spektrograafi näiteks järjes-

tikku kolm prismat, siis kaotatakse optikasse kuni pool sisenenud valgusest (peamiselt peegeldustena objektiivide ja prismade pindadelt).

Astrospektroskoopia sünniajaks võib lugeda 19. sajandi algust, millal W. G. Wollaston tegi katset uurida Päikest spektroskoopiliselt. Ulatuslikumalt jätkas seda 1814. aastal Fraunhofer, kes leidis Päikese spektris 600 tumedat joont ja määras neist enam kui poolte asukohad. Mõne aasta pärast jõudis ta isegi heledamate tähtede spektrite võrdlemiseni Päikese spektriga. Kaasaegse tähespektroskoopia rajajaks loetakse siiski itaalia astronoomi A. Secchit, kes 1863. aastal suutis oma täiustatud prismaspektroskoobiga teha tähtede füüsikas uutele järeldustele viivaid vaatlusi.

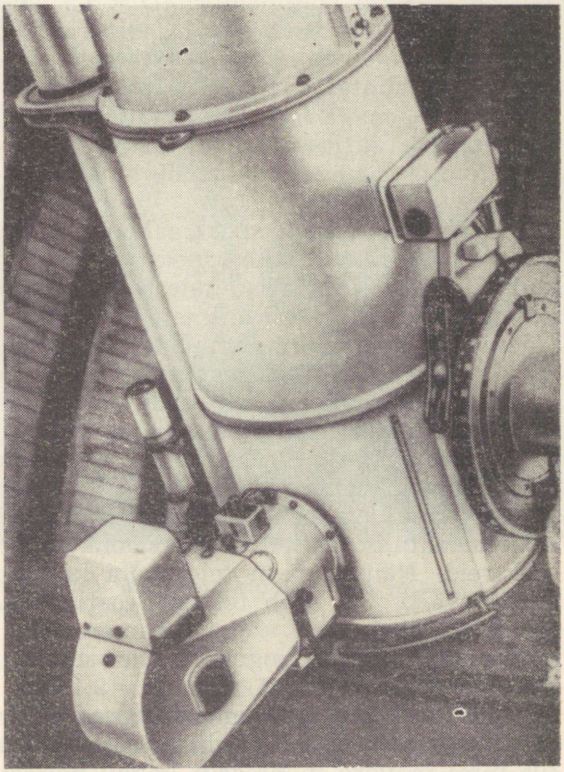
1960. aastal tähistati saja aasta möödumist spektraalanalüüsi avastamisest Kirchhoffi ja Bunseni poolt. See avastus jättis juba kaasaegsetele sügava mulje ja tal oli tohutu tähtsus kogu meie teadmiste süsteemile ümbritsevast maailmast. Ilma spektraalanalüüsita ei teaks me seni peaaegu mitte midagi taevakehade koostise kohta (mitte arvestades meteoriite). Üsna vähe enne Kirchhoffi ja Bunseni avastust kirjutaski prantsuse filosoof O. Comte, et inimkonnal pole vähimatki lootust teada saada, millest koosnevad Päike ja tähed. Möödus vaid mõni aasta, ja Kirchhoffi spektroskoop lükkas selle pessimistliku ennustuse ümber, nagu on ümber lükatud paljud filosoofide ja teoloogide katsed määrata inimliku tunnetuse piire.

Esimesed viiskümmend aastat olid spektraalanalüüsi arengus erakordsete saavutuste ajaks. Alates sellest, kui oli välja selgitatud, et igale keemilisele elemendile vastab iseloomulik spekter nii nagu igale inimesele oma sõrmejälgede muster, algas uute tundmatute spektrite küttimine. Kõigile üllatuseks ilmnes, et tuhandeid aastaid meieni kulgevad nõrgad valguskiired tähtedelt ja udukogudelt toovad kaasa määratul hulgal andmeid maailmade kohta, kust nad lahkusid. Kiirte spektraalkoosseisu uurimisest võib palju teada saada nii taevakehade koostise, temperatuuri kui ka muude füüsikaliste tingimuste ja liikumise kohta.

1861. aastal suunas Kirchhoff spektroskoobi Päikesele, ja gigantse töö tulemusena (mis oleks kergesti võinud lõppeda nägemise täieliku kaotamisega) koostas ta esimese Päikese spektri atlase. Võrreldes seda tuntud ele-

mentide spektritega, tõestas ta ümberlükkamatult raua kuulumise Päikese kromosfääri koostisse ja tegi põhjendatud oletuse kaltsiumi, magneesiumi, naatriumi, nikli ja kroomi eksisteerimisest seal.

Astronoomilisi spektrograafe pole mehhaanika osas kuigi lihtne konstrueerida. Spektrograaf ripub teleskoobi küljes maapinna suhtes erinevais asendeis ja peab mitmete tundideni ulatuvate säritusaegade jooksul spektri kujutist fotoplaadil väga täpselt samal kohal hoidma. Seepärast peab spektrograafi konstruktsioon olema erakordselt jäik. Temperatuuri muutumisest tekkivad dispersiooni häired hoitakse ära termostateerimisega, mis säili-

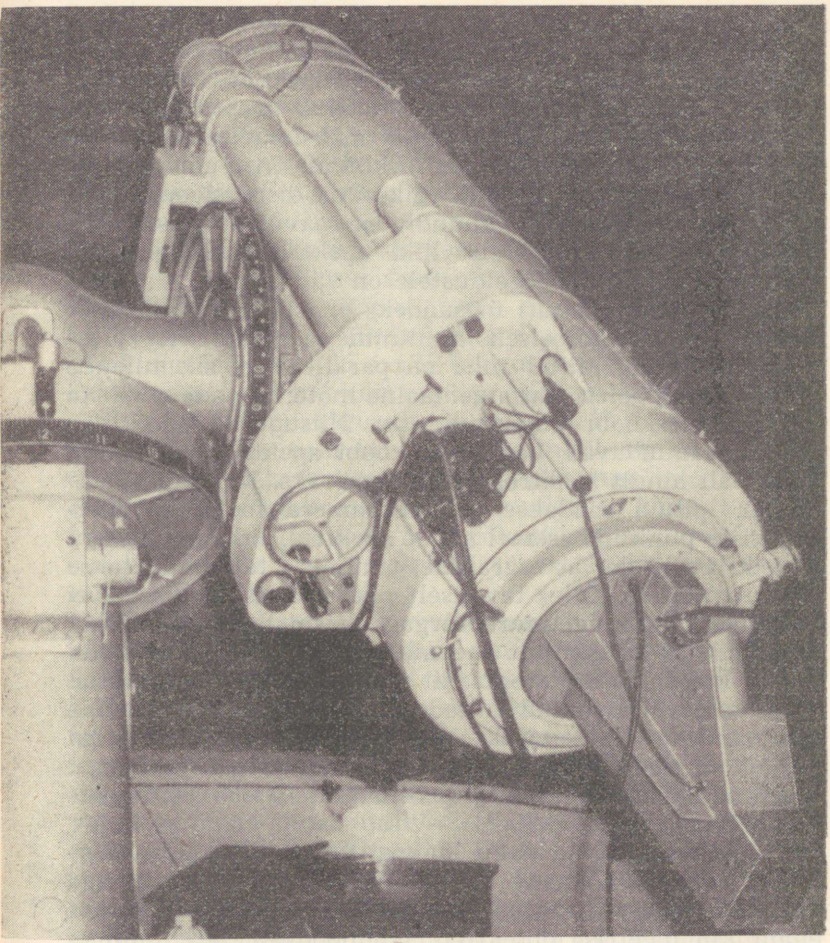


Joonis 57. Prismaspektrograaf teleskoobi Nasmythi fookuses.

tab temperatuuri konstantsena kuni sajandike kraadide täpsusega. Kõige paremini saab suurte spektrograafide juures neid nõudeid täita siis, kui spektrograafi ei kinnitata mitte teleskoobi külge, vaid paigutatakse ta liikumatusse kudee fookusse.

Peafookuse-spektrograafidega lahendatakse ülesandeid, kus on vajalik suur küündivus, kuid võib piirduda madalama dispersiooniga. Keskmise ja väiksema dispersiooniga spektrograafe saab küllalt edukalt konstrueerida siiski ka Cassegraini või Nasmythi fookuse jaoks (joonis 57). Ka joonisel 58 kujutatud 70 cm reflektori Cassegraini fookuses seisab väike difraktsioonivõre-spektrograaf, mis on konstrueeritud ja valmistatud Struve-nimelises observatooriumis. Selle kollimaatori (D = 5,5 cm, 1 : 15) optiline skeem kordab pööratud kujul Cassegraini süsteemi skeemi, dispergeeriva elemendina kasutatakse võret 600 joonega millimeetri kohta. Kaamera objektiiviks on tavaline «Tessar» (F = 30 cm, 1:4,5), saavutatav dispersioon 5 nm/mm. Ühetunnilise säritusajaga saadakse 5^m tähtede spektrid, küündivuse piir aga asub mõne tähesuuruse võrra kaugemal.

Kõige põhilisemad spektraalvaatlused tehakse kaasajal suurte liikumatute spektrograafidega teleskoopide kudee fookustes. Võimsate teleskoopide kudeespektrograafide mõõtmed ulatuvad mitmete meetriteni ja kaalud tonnideni ning nende kinnitamine teleskoobi liikuva osa külge ei tule kõne allagi, rääkimata spektrograafide endi jäikuse ja termostateerimise osas tekkivaist raskustest. Kõigil suurtel reflektoritel (Palomari observatooriumi 5 m, Licki observatooriumi 3 m, Krimmi observatooriumi 2,6 m jt.) on kudee fookustes terved komplektid spektrograafe ja nende vahetatavaid elemente, mis annavad varem täiesti kättesaamatuks loetud dispersiooni ja lahutusvõimega spektreid. Näiteks 5 m teleskoobi kudee fookuses (suhteline ava 1 : 30) saab tervest seeriast kollimaatoritest, difraktsioonivõredest ja kaameratest kombineerida mitmesuguseid spektrograafe. Üks suuremaid neist oleks kollimaatoriga D = 305 mm, F = 9,15 m ja kaameraga D = 305 mm, F = 3,66 m. Niisuguse spektrograafi jaoks ei õnnestunud lõigata ühtset difraktsioonivõret (D = 305 mm) ja võre monteeriti kokku neljast tükist à 14 × 18 cm. Kõigi asendid on omavahel kooskõlastatud, see tähendab, iga ülemise tüki jooned näivad alumise pikendus-



Joonis 58. Struve-nimelise observatooriumi 70 cm reflektor spektrograafiga Cassegraini fookuses.

tena ja teises suunas on võrede vahekaugus täisarv jooni. Kõik kaamerad on Schmidti süsteemi objektiividega, suhteliste avadega 1 : 12, 1 : 6, 1 : 3, 1 : 1,5, 1 : 0,7. Esimene neist on muide nii väikese valgusjõuga, et korrektsiooniplaadi võis ilma märgatava kahjuta ära jätta. Dispersioonid on

violetses spektriosas, kus töötatakse võre kolmandat järku spektris 0,23 nm/mm kuni 3,9 nm/mm, ja punases spektriosas, kus kasutatakse võre teist järku spektrit 0,34 nm/mm kuni 5,9 nm/mm. Fotoplaatidel tulevad spektrid pikkustega 17 cm kuni 56 cm. Lugedes maksimaalseks säritusajaks kogu ööd (8 ... 10 tundi) küünib instrument kõrgeima dispersiooniga 7,5^{m} ja väikseima dispersiooniga 16^{m} tähtedeni. Veel suurema küündivuse saavutamiseks on kasulikum töötada juba teist liiki spektrograafidega peafookuses, kus kaod peegeldustele on väiksemad.

Kuivõrd kollimaatori ülesandeks on spektrograafi sisenevate kiirte paralleelseks muutmine, aga tähtedelt teleskoopi sisenevad kiired juba on paralleelsed, siis tuleneb siit lihtsuse poolest lausa geniaalne mõte: asetada võre või prisma teleskoobi objektiivi ette. Niisugused objektiivprismad muudavad kogu teleskoobi spektrograafiks või täpsemalt ainult spektrograafi kaameraks. Ilma kollimaatori ja piluta saadakse prismakaamera fookuses tähekujutiste-punktide asemel nende spektrid. Prisma on nagu lisand tavalisele astrograafile, millega ta muudetakse spektrograafiks. Olles tavaliselt pika fookuskaugusega, ei vaja teleskoop kuigi suure nurgaga prismat, jätkub mõnest kraadist, ja väliskujult meenutavadki objektiivprismad pigem klaasplaate. Fotoplaadil tekitavad prismakaamerad kõigi vaateväljas olnud tähtede kitsad spektriribad, nende laiendamiseks kõigutatakse teleskoopi pildistamise ajal kergelt ühele ja teisele poole risti dispersiooni suunaga. Maailma suurimad objektiivprismad on 70—85-sentimeetrise läbimõõduga.

Objektiivprismasid nagu läätsigi pole võimalik valmistada erakordselt suurte läbimõõtudega. Kaasajal on aga astrofüüsikute käsutuses juba küllalt palju reflektoreid enam kui meetrise objektiivi läbimõõduga, sel juhul ei tule objektiivprisma valmistamine kõne alla. Sellest raskusest aitavad üle piluta spektrograafid. Piluta spektrograaf paikneb enne teleskoobi objektiivi fookust. Koonduvad kiired hajutatakse nõgusa kollimaatorläätsega paralleelseiks ning juhitakse siis prismale või difraktsioonivõrele. Eksisteerib veel üsna mitu kirjeldatust erinevat piluta spektrograafi skeemi lisapeeglite, Schmidti kaamera või kahepeeglilise afokaalse süsteemi baasil.

Praegu kasutatakse spektrograafides kiirgusvastuvõtjana valdavas enamikus veel fotoemulsiooni ning vaatluse

tulemusena saadakse seega spektri foto. Foto edasine töötlemine toimub fotolaboratooriumis ja spektrite mõõtmiseks määratud masinail. Juba nimetatud fotoemulsiooni puudusi arvestades peaks muidugi eelistama lineaarseid ja kõrgema täpsusega fotoelektrilisi kiirgusvastuvõtjaid, kuid seni on nende praktiline rakendamine siiski olnud üsna piiratud. Peamisteks põhjusteks on fotograafilise registreerimisega hõlmatav suur üksikelementide arv spektris ja kujutist tekitava kiirguse integreerimine kogu säritusaja jooksul. Pannes fotoelektronkordisti aeglaselt liikuma piki spektrit, võime terve spektri põhimõtteliselt küll joon joone järel üle kompida (skaneerida) ja fotovoolu üleskirjutamise kaudu saada kiirgusenergia jaotuse spektraalkõvera, kuid kahjuks ei piisa niisuguseks skaneerivaks registreerimiseks valgusest spektris. Ehkki fotokatood on fotoemulsioonist paar suurusjärku tundlikum, peab ta igas spektripunktis hetkeliselt määrama kiirguse intensiivsuse, fotoplaat aga summeerib kõigis punktides korraga ja pikema säritusaja jooksul. Neil põhjusil pole fotoelektrilise skaneerimisega spektromeetrid tähespektrite registreerimiseks kuigi levinud.

Struve-nimelises observatooriumis töötati viimastel aastatel välja elektronoptilise muundiga kaamera tähtede spektrite pildistamiseks infrapunases osas.

Kaameras kasutati fotokontakttüüpi elektronoptilist muundit, mille infrapunasele kiirgusele tundlikku fotokatoodi jahutati süsihappelumega elektronide soojusliku väljumise vähendamiseks. Jahutamine tõi omakorda kaasa vajaduse teiste konstruktiivsete vahenditega võidelda kaamera objektiivi («Helios-40», $F=85$ mm, 1:1,5) uduseks muutumise ja jäätumise vastu. Samuti langeb madalal temperatuuril muundi väljundekraani kasutegur — siin osutus paratamatuks soojendamine ja automaatse temperatuuri reguleerimisahela sissetoomine. Film viiakse kaamera väljundekraaniga optilisse kontakti immersioonivedeliku abil, edasi keritakse filmi elektrimootoriga. Lühiajalisel fotografeerimisel säilib kujutis ekraanil mõnda aega järelhelendusena — selle kustutamiseks valgustatakse ekraani läbi filmi infrapunase prožektoriga (film ise pole infrapunastele kiirtele tundlik). Kaamera juurde kuuluvasse juhtimisautomaatika plokki lisandub peale eelkirjeldatud operatsiooniks vajalike sõlmede veel säritusaja seadmise lüli ja katiku juhtimisahelad ning 15—

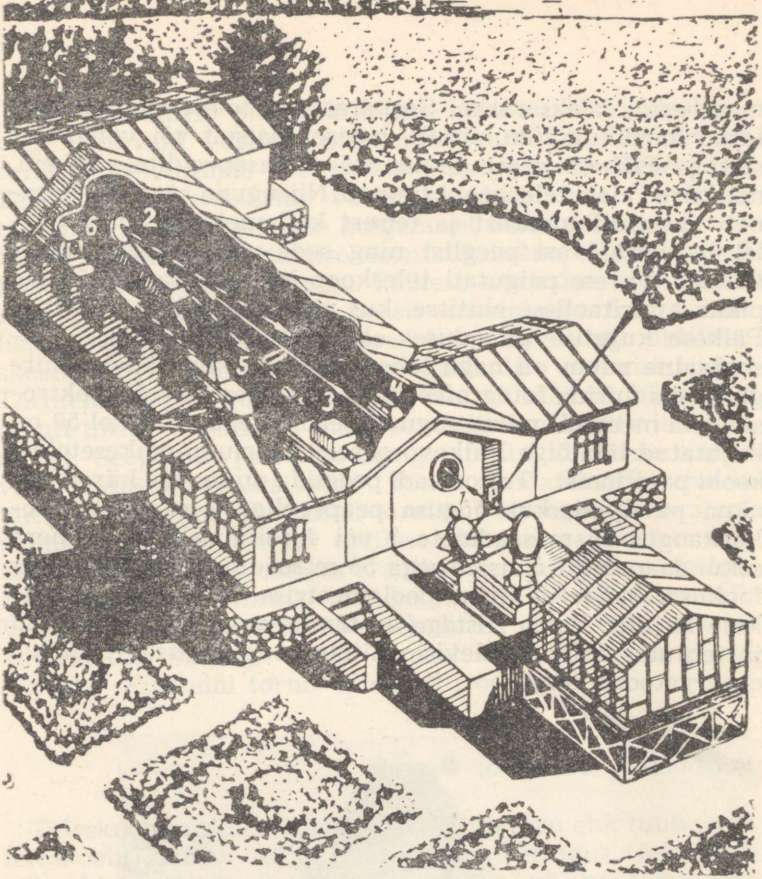
20 kV kiirenduspinge allikas. Kokkuvõttes on seegi kaamera oma küllaltki komplitseeritud lisaaparatuuriga heaks näiteks, milliste tehniliste vahendite osavõtul sünnib kaasaegne astronoomiline vaatlus-eksperiment.

Tähtede ja udukogude spektrite saamine on komplitseeritumaid astronoomiliste vaatluste liike, kuid tulemused õigustavad vaatlustehnilisi jõupingutusi ja kulutusi. Spektrid sisaldavad sellisel hulgal informatsiooni, et selle lõplik dešifreerimine ja matemaatiline töötlemine ei kujune sugugi mitte vähem töömahukaks kui spektrite saamine. Kiirgusenergia jaotuse spektraalkõvera alusel saab teha ulatuslikke järeldusi tähe pealiskihis valitsevate füüsikaliste tingimuste ja seal toimuvate protsesside kohta.

Tähtede spektrid on erakordselt mitmekesised. Nad jaotatakse spektraalklassidesse klassifikatsiooni alusel, mis töötati välja käesoleva sajandi esimese paarikümne aasta jooksul Harvardi observatooriumis ja avaldati 225 300 tähte sisaldava 9-köitelise «Henry Draperi kataloogi» nime all. Tähtede spektriklasse märgitakse temperatuuri alanemise järjekorras tähtedega *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, *M*, millele klassisiseses kümnendjaotuses lisandub number. Kõige kuumemad tähed kuuluvad klassi *O*5, Päike on *G*2 klassi kollane täht.

1929. aastal näitas E. Hubble Mount Wilsoni observatooriumis, et kaugete objektide spektrites on jooned nihutatud pikemate lainepikkuste suunas ja see nn. punanihe on võrdeline nende objektide kaugusega meist. Et aga punanihet põhjustab füüsikas hästi tuntud Doppleri efekt, siis väljendab punanihe objektide eemaldumiskiirust. Sel viisil osutub spektrijoonte asendi täpse mõõtmise põhjal võimalikuks tähtede ja udukogude eemaldumiskiiruse arvutamine. Hubble'i järgi on galaktikate kaugenemiskiirus võrdeline nende kaugusega. See laseb oletada, et kogu meie poolt nähtav mateeria paiskus laiali ühest punktist mingi võimsa plahvatuse tulemusena. A. Sandage arvutas, et niisugune plahvatus pidi toimuma 13 miljardit aastat tagasi. See oli kõige võimsam plahvatus üldse ja temaga on määratud ka meie teadmiste ajaline horisont meile nähtavas maailmaruumi osas, mida nimetatakse Metagalaktikaks.

Üsna iseseisvaks astronoomia osaks on kujunenud Päikese uurimine. See on väga tihedalt seotud geofüüsikaga, kuna Päike mõjutab ja isegi määrab paljude nähtuste ja



Joonis 59. Pulkovo observatooriumi horisontaalne päikeseteleskoop.

protsesside kulgemise Maal. Samal ajal on Päike tavaline G2 spektriklassi täht, mis asub astrofüüsikutele lausa «kättesaadavas» kauguses. Seepärast pühendataksegi Päikese uurimisele erilist tähelepanu ning leidub terveid, ainult Päikesega tegelevaid observatooriume. Arvestades Päikese nurksuurust, heledust ja uurimise detailsust on täiesti arusaadav, et vaatlusriistad on arenenud tavalistest astronoomilistest instrumentidest hoopis erinevas suunas ja moodustavad täiesti omaette alaliigi.

Päikese uurimiseks määratud teleskoopidel on tavaliselt väga pikafookuselised objektiivid, mida ekvaatoriliselt

monteerida oleks raske. Seepärast on teleskoobid paigutatud harilikult liikumatult, horisontaalselt või vertikaalselt, ja Päikest jälgib eraldi seisev tasapeeglite süsteem, mis kiired alati teleskoopi suunab. Niisugune süsteem koosneb ühest liikumatust ja teisest kellamehhanismiga ühtlaselt pööratavast peeglist ning seda nimetatakse tsölostaadiks. Varem paigutati teleskoop ise tsölostaadi kõrvale pikka kuuritaolisse ehitisse, kus pikafookuseline objektiiv Päikese kujutise pimeduses ekraanile projitseeris. Horisontaalne ruum oli nagu laboratoorium, kus Päikese kiirgust võis uurida fotografeerimise, fotomeetria või spektroskoopia meetodil mitmesuguste seadmetega. Joonisel 59 on kujutatud läbilõige Pulkovo observatooriumi päikeseteleskoobi paviljonist. Tsölostaadi peeglid *1* suunavad kiired läbi akna paviljoni, kus nõgusa peapeegliga *2* saadakse fookuskaugus 16 m seadmete *3* või *4* toitmiseks ja kumera sekundaarpeegli *5* lisamisega 56 m seadme *6* jaoks. Teises fookuses saadakse juba poolemeetrise läbimõõduga Päikese kujutis. Sama riistaga on muide vaadeldud ka Kuud ja tehtud esimesed televisiooniteleskoopia katsed Pulkovo observatooriumis.



Joonis 60. Potsdami observatooriumi päikeseteleskoop («Einsteini torn»).

Kahjuks häirib pikafookuselise horisontaalse teleskoobiga tehtavaid vaatlusi päikesekiirte mõjul soojenev ja turbulentselt kiirte teel liikuv maapinnalähedane õhk. Teleskoobi lahutusvõime väheneb märgatavalt. Paremad tulemused saadakse kiirte kulgemisel vertikaalsuunas, mis tingib teleskoobi ehitamise tornikujulisena. Vertikaalsed tornteleskoobid ongi praegu Päikese uurimise põhilisteks instrumentideks ja nende baasil koostatakse fotomeetriliste ning spektraalsete abiseadmete lisamisega optilisse skeemi palju muid Päikese astrofüüsikalise uurimise riistu. Tornteleskoopide juures mõjub teatud määral häirivana ainult torni vibratsioon mikroseismiliste nähtuste ja tuule mõjul. Seepärast püütakse sealgi optilisi elemente kandvad ehituskonstruktsioonid kuni vundamendini hoida täiesti eraldatuna ülejäänud tornist. Potsdami observatooriumi tornteleskoobis on optiline süsteem raudbetoonehitise sees kinnitatud näiteks eraldi seisva puust torni külge, sest puu annab vibratsioone halvemini edasi kui metall. Väljapaistva arhitekti Mendelsohni poolt 1922. aastal kujundatud ehitis on vanim tornteleskoop Euroopas ja sai tuntuks «Einsteini torni» nime all (joonis 60).

● teleskoobi juhtimispult

Teleskoobi optiline süsteem kinnitub toru ehk tuubusega teleskoobi statiivi külge teatud monteeringus, mis peab võimaldama riista kahe telje ümber pöörates suunata igasse vajalikku taevasfääri punkti. Väikesi instrumente suunatakse käsitsi: vabastatakse vastavad fikseerimiskruvid polaar- ja käändetelgedes, pööratakse riist vajalikku asendisse ning keeratakse fikseerimiskruvid jälle kinni. Täpne suunamine lõpetatakse juba telgedega seotud mikromeeterkruvide või gideerimisnuppude abil.

Suuri teleskoope tuleb pöörata elektrimootorite abil. Põhjuseks pole siin mitte niivõrd vajalik suurem jõud — enamikus on ka suurimad riistad nii hästi tasakaalustatud ja nii heade laagritega, et neid võib käega paigast liigutada — kui just elektriajami paindlikkus, lihtne ja kerge juhtimine ning sealjuures avanevad automatiseerimisvõimalused. Viimasel ajal varustatakse juba väiksemategi instrumentide statiivid elektriajamitega. Et teleskoobi käepäraseks juhtimiseks vajatakse mitmesuguseid pööra-

miskiirusi, siis tavaliselt paigutatakse mõlemale teljele mitu elektrimootorit, mille pöörlemised liidetakse ülekannetes diferentsiaalmehhanismide ja elektromagnetiliste sidurite abil. Elektrimootorite arv ühe telje juures võib ulatuda viieni. On aga ehitatud ka ajameid väikese mootorite arvu ja elektrilise või mehhaanilise «käikude» ümberlülimisega.

Teleskoobi liikumist juhitakse mootorite lülimisega surunuppude abil väikestelt juhtme otsas rippuvailt puldikestelt, mida vaatleja saab enda käes hoida giidi juures seistes või mujal teleskoobi läheduses asudes.

Näivalt pöörleb taevavõlv ümber maailma telje ja teeb ühe täispöörde täheööpäevas, mis on umbes 4 minutit lühem tavalisest päikeseööpäevast. Kui teleskoop on monteeritud selliselt, et üks tema telgedest asetseb paralleelselt maailma teljega (ekvaatoriline monteering), siis tuleb ka riista samasuguse kiirusega ümber selle telje (polaartelje) pöörata. Alates Tartu Fraunhoferi refraktorist on peaaegu kõik kaasaegsed teleskoobid monteeritud ekvaatoriliselt ja nad varustatakse ka ühtlast pöörlemiskiirust andva kellamehhanismiga. Kaasaegseid kellamehhanisme on õigem nimetada teleskoobi ööpäevase liikumise elektriajamiteks — need on sünkroonmootorid, mis sobiva ülekandega on ühendatud polaartelje suunamisajamitega. Sünkroonmootorit toidetakse kvartsgeneraatorist, mis sarnaneb lihtsamate kvartskelladega. Mootorite toite nimisagedus on tavaliselt 50 hertsi ja seega võib neid toita ka otse elektrivõrgust, kuid et täheööpäeva pikkus erineb päikeseööpäevast, siis kvartsgeneraatori poolt mootorile antavaks töösageduseks on tihtipeale 50,1369 hertsi.

Kaasaegne teleskoop koos kõige juurdekuuluvaga kujutab endast unikaalset insenertehnilise ja teadusliku loomingu vilja, mis sisaldab suure arvu mehhaanilisi, optilisi, elektromehhaanilisi ja elektroonseid sõlmi. Suured teleskoobid kaaluvad sadu tonne ja nad seatakse üles mitmekordsete majade suurustesse tornidesse, vastavalt ulatub ka nende kogumaksumus miljonitesse rubladesse. Isegi suhteliselt pikka amortisatsiooniaega arvestades (50 kuni 100 aastat) maksab üks vaatlustund sellisel instrumendil sadu rublasid. Peale selle on suur väärtus headel vaatlustingimustel: Maa atmosfäär piirab võimalikku vaatlusaega tugevasti ja harva esinevad suurepärased atmosfääritingimused võimaldavad erakordselt hinnata-

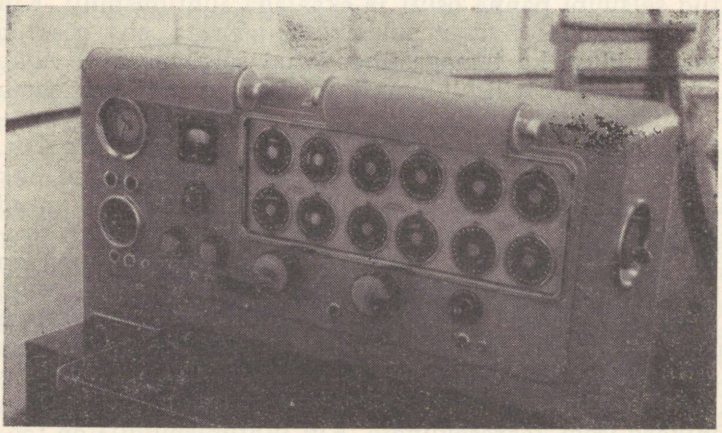
vaid vaatlusi. Seepärast nõutakse tänapäeva teleskoobilt vaatlusaja maksimaalset ärakasutamist, võimalikult intensiivsemat informatsiooni kogumist töötamisajal. Põhiliseks vahendiks instrumentide efektiivsemal kasutamisel on automatiseerimine. Automatiseerimisega lühendatakse vaatlustele eelnevat ettevalmistusaega ja kiirendatakse ka vaatlusi endid; väheneb vaatleja töökoormus ja paraneb tulemuste kvaliteet. Automatiseerimisele kuulub nii teleskoop ise kui ka kõik temaga seotud ja vaatlustest osavõtvad muud mehhanismid. Nagu automatiseeritud tehases, nii ka teleskoobi juures peavad kõik seadmed töötama kiiresti, kooskõlastatult ja inimese võimalikult vähese osavõtuga. Nii see kaasaegsete suurte teleskoopide juures ongi: vaatleja-operaatori töökohaks on juhtimispult. Puldilt saab operaator toimetada enam-vähem kõiki vaatluste juures vajalikke operatsioone, paljudel juhtudel ta ainult jälgib nende teostamist automaatide poolt.

Teleskoopide ja nende abiseadmete juhtimisel kasutatakse tavaliselt võllide pöördenurga elektrilist ülekannet. Selleks on olemas erilised väikesed elektrimasinad — selsüünid, mille nimetus on tuletatud ingliskeelsetest sõnadest «self» (ise) ja «to synchronise» (sünkroniseerima). Selsüünid töötavad alati omavahel elektriliselt ühendatud paarina. Näiteks võib ühe selsüüni kinnitada teleskoobi polaarteljele ja teise, temaga juhtmete kaudu ühendatud selsüüni panna osuti ja skaalaga juhtimispulti. Kui nüüd teleskoopi ümber polaartelje pöörata, siis pöörleb kaasa muidugi ka temaga ühendatud selsüünsaatja väike ankur, kuid elektriliselt sunnib selsüünsaatja täpselt sama pöörlemist järele tegema ka pulti paigutatud selsüünvastuvõtjat. Seega näeme puldis selsüünvastuvõtja skaalalt, millise nurga võrra on teleskoop polaarteljes pööratud, ehk teiste sõnadega, loeme skaalalt riista tunninurga antud hetkel. Samuti võime pulti üle kanda käändenurga suuruse ja operaator puldi juures teab, kuhu teleskoop on suunatud. Üksiku selsüünidepaari täpsus pole küll kuigi suur (vaevalt alla 1°), kuid kahe või isegi kolme selsüüni ühendamisel hammasratasülekandega nii saate- kui ka vastuvõtupoolel saadakse mitmeastmeline skaala, kus üks näit annab nurgakraadid, teine kaareminutid ja kolmas mõnikord isegi kaaresekundid. Kui juhtimispuldile on toodud ka suunavate elektriajamite lülitusnupud, siis võib skaalade näitusid jälgides suunata riista nõutavasse taeva-

ossa täpsusega, mis parematel süsteemidel on alla ühe kaareminuti.

Selsüüne võib lülitada veel teisiti. Juhtimispuldi skaalad varustatakse sel juhul seadenuppudega, millega saab neile koordinaatide väärtused peale seada, ja siis lülitab selsüünidepaari signaal ise mootoreid ning pöörab teleskoopi seni, kuni ta asend umbes eespool nimetatud täpsusega vastab skaaladele seatud koordinaatidele. Niisugust suunamisrežiimi nimetatakse automaatseks. Nõukogude Liidu esimeseks automaatse suunamissüsteemiga teleskoobiks oli Abastumani observatooriumi meniskteleskoop AC-32. Juhtimispult asub teleskoobi kõrval kuplialuses ruumis (joonis 61). Taeva pildistamisel tuleb vaatlejal hoolitseda selle eest, et fotoplaat oleks kassetis, ja edasi võib vaatlust juhtida juba puldist. Mitmeastmelistele selsüünskaaladele seatakse peale kataloogist või atlasest hangitud pildistatava ala koordinaadid, ning nupule vajutamisel läheb teleskoop automaatselt soovitud asendisse. Puldis asuvad ka muud vaatlusega seotud juhtimisorganid: kupli pööramislülitid, katiku avamise ja säritusaja seadmise nupud jms.

Uuematel ja suurematel teleskoopidel paikneb paljude mehhanismide ning operatsioonide distantsjuhtimise kes-



Joonis 61. Abastumani observatooriumi meniskteleskoobi AC-32 juhtimispult.

kus enamasti kuplialusest suure klaasaknaga eraldatud ruumis, kust puldi taga istuv operaator lülitusi tehes ja käsklusi andes võib teleskoopi veel silmaga jälgida.

Euroopa suurima reflektori ЗТШ ($D = 2{,}6$ m) juhtimispuldist saab teleskoopi suunata täpsusega ± 10 kaaresekundit, millest tihti piisab peafookuses fotografeerimiseks. Et fotografeerimist toimetatakse läbi elektronoptilise muundi ja filmi edasikeeramist ning katiku avamist ja sulgemist saab samuti teha juhtimispuldist, siis kujuneb taeva fotografeerimine selle instrumendiga lihtsalt lülitustegevuseks puldi taga. Kuna säritusajad elektronoptilise muundi tõttu lühenevad sekunditesse, siis on tempo üsna kiire ja teleskoobi ning vaatleja-operaatori «tootlikkus» suur.

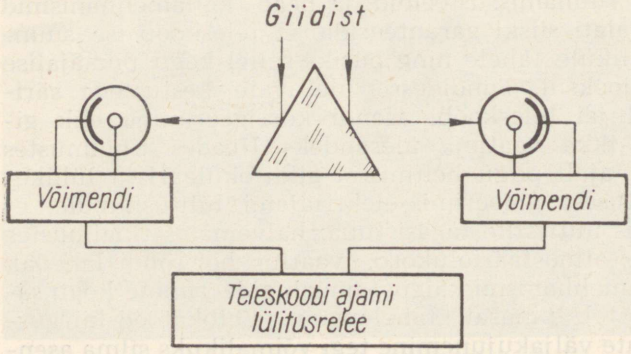
Joonisel 45 toodud juhtimis-registreerimiskeskuse pulti on Tartu Struve-nimelises observatooriumis koondatud kahe 50 cm teleskoobi ja nende elektrofotomeetrite juhtimisorganid. Kuna pult paikneb teleskoopide tornidest eraldi seisvas ruumis, siis katsetatakse siin ettekujutuse saamiseks teleskoopide tegelikest asenditest ka televisioonisidet. Antud juhul on tegemist küll ainult statiivi koordinaatringide näitude ülekandega, kuid põhimõtteliselt lubaks spetsiaalsete saatetorude tundlikkus ka näiteks giidis nähtava taeva kujutise ülekannet. Peale teleskoopide suunamisega seotud aparatuuri sisaldab pult elektrofotomeetrite optilis-mehhaanikaliste elementide distantsjuhtimise klaviatuure ja mõõtmistulemuste registreerimisseadmeid.

Täpsed suunamissüsteemid ja head kellamehhanismid ei suuda alati siiski garanteerida, et teleskoop ise suunduks vajalikule tähele ning püsiks sellel kogu pikaajalise vaatluse jooksul. Tundidesse ulatuvate kestustega särituste ajal jäi teleskoobi asendi korrigeerimine ehk gideerimine ikka vaatleja ülesandeks. Heades tingimustes piisab aeg-ajalt pilgu heitmisest giidi okulaari ja lühikesest vajutusest gideerimis-elektriajami lülitusnupule, et tähte giidis niitristile tagasi tuua; halvemates tingimustes (ebasoodus atmosfääriolukord, vaatlus horisondi lähedal, vead kellamehhanismi käigus) nõuab gideerimine kogu särituse kestel pingsat tähelepanu. Fotokatood-kiirgusvastuvõtjate väljakujunemine tegi võimalikuks silma asendamise giidi taga optilis-fotoelektrilise seadmega. Esimesed katsed sel alal kuuluvad sõjaeelseisse aastaisse, millal

alustati üsna lihtsatest automaatgiididest Päikese vaatlustel. Päikese kujutis ümbritseti nelja fotoelemendiga, niipea kui kujutis mingis suunas paigalt nihkus, langesid päikesekiired ühele fotoelementidest ja sellega ühendatud relee lülitas kohe sisse vajaliku gideerimismootori. Tähtede järgi gideerimiseks tundlikkusest ei piisanud.

1947. aastal konstrueeris H. W. Babcock USA-s täiuslikuma fotoelektrilise giidi tähtede jälgimiseks — neli fotoelementi eelkirjeldatud skeemis olid asendatud ühe ümberlülitatavaga. Järgnevatel aastatel levisid automaatgiidid üha laiemalt ja nende täpsus ning küündivus paranesid kiiresti. Eriti on silma paistnud Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia Elektromehhaanika Instituudis J. A. Sabinini juhtimisel loodud automaatgiidid, millega praegu varustatakse kõik keskmised ja suuremad instrumendid.

Automaatse fotoelektrilise giidi töötamist selgitab joonisel 62 toodud skeem. Tähe kujutis giidist langeb peegeldavate tahkudega prisma teravale servale ja valgusvoog jaotub kaheks osaks. Mõlemad osad mõõdetakse fotoelementidega ning võimendatud fotovoolusid võrreldakse omavahel. Kui üks osa on teisest suurem, siis on täht prisma servalt ära nihkunud ning relee lülitab sisse gideerimisajami, mis pöörab teleskoopi seni, kuni täht on jälle täpselt prisma serval. Antud skeemi kohaselt töötab automaatgiid ainult ühes koordinaadis, kuid prisma asendamisel teravatipulise neljatahulise püramiidiga ning veel kahe fotoelemendi lisamisega saab gideerida mõlemas tel-



Joonis 62. Fotoelektrilise automaatgiidi töötamispõhimõte.

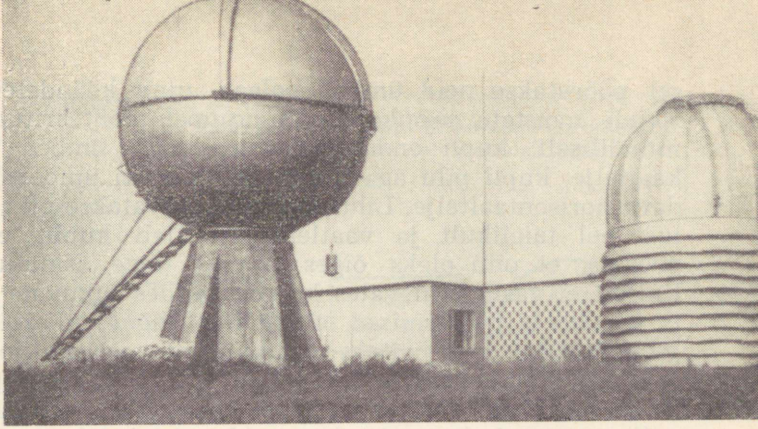
jes. Teatud juhtudel aga piisab gideerimisest ainult polaarteljes (ööpäevase liikumise korrigeerimisest), käändeteljes loetakse tähe asend enam-vähem muutumatuks. Suurema küündivuse saamiseks on tänapäeval fotoelementide asemel fotoelektronkordistid, nende arv vähendatakse enamasti üheni ja juhitakse valgusvood kõigilt tahkudelt järjestikuselt peeglite abil kordistile. Nagu fotoelektriliste fotomeetrite juures, nii ka automaatgiidides määravad küündivuse fotovoolu mürad. Suurtele teleskoopidele paigutatavate 30 cm objektiiviläbimõõtudega giidide küündivus ulatub näiteks $12^m \ldots 14^m$ tähtedeni. Gideerimise täpsus on aga üsna suur: kui giid on tähe kord juba «haaranud», siis enam see vaatevälja keskpunktist rohkem kui $^1/_5$ kujutise läbimõõdu võrra ei eemaldu. On isegi katsetatud automaatgiidiga teleskoobi kellamehhanismi seisma jätta — giid hakkas intensiivselt tööle ja hoidis ikka riista tähele suunatuna, seega asendas ta ise ka kellamehhanismilt antava liikumise. Automaatgiidide suureks eeliseks ongi see, et nad hoiavad teleskoobi suunatuna mistahes seaduse kohaselt liikuvale objektile, nagu planeetidele, komeetidele ja isegi tehiskaaslastele (kui viimased liiga kiiresti ei liigu). Tähtede järgi vaatlusriista asendit säilitavaid seadmeid vajatakse väga veel kosmoseobservatooriumides, kus nad teaduslike vaatlusriistade ja mõõtmisaparaatide vajaliku suuna säilitamiseks peavad tähistaeva järgi orienteerima ja selles asendis stabiliseerima mingi vaatlusriistade alusplatvormi või isegi kogu tehiskaaslase. Tihti nimetatakse tähtede järgi gideerivaid seadmeid ka automaatseteks astrogiidideks.

● tornimehhanismid ja elektronarvuti

Astronoomiaobservatooriumide iseloomulikuks välistunnuseks on fotodelt hästi tuntud suured, tavaliselt hõbedased kuplid. Need paiknesid varem muid observatooriumi tööruume sisaldavatel hoonetel, viimasel ajal aga ehitatakse reeglina eraldi seisvate tornide peale. Kuplid peavad katma pretsiisseid optilis-mehhaanilis-elektroonseid vaatlusinstrumente ja kaitsma neid ilmastikumõjude eest, kuid samal ajal ei tohi takistada mistahes taevaosa vaatlemist ega tekitada häirivaid nähtusi. Vaatluse jaoks avatakse teleskoopi mahutav pilu kuplis, mis ühel kupli küljel

ulatub seniidist horisondini, ja pööratakse see siis koos kogu kupliga sinna ilmakaarde, kuhu riistaga vaadata soovitakse. Kui tähte jälgitakse pikemat aega ja kellamehhanism pöörab teleskoopi ümber polaartelje vastavalt taeva näivale ööpäevasele liikumisele, siis tuleb päripäeva nihutada edasi ka pilu. Hea kuppel peab kogu päeva säilitama enda all eelmise öö kliimat, nii et kui järgmisel ööl ta avatakse ja ilmastik pole vahepeal oluliselt muutunud, siis ei kaasne luukide avamisega kuigi suuri õhuvoole ega temperatuuride muutumist — olukord, mis eelmisel ööl teleskoobi ümber kujunes, on säilinud. Arusaadavalt ei soovitata paigutada vaatlusriistu köetavatele hoonetele, mis tekitavad tõusvaid sooja õhu voolusid ja rikuvad sellega kujutist.

Kahjuks ei seisnud kuni kõige viimase ajani kuplite konstrueerimine ja ehitamine sugugi nende sees peituvate riistade tehnilisel tasemel. Struve-nim. observatooriumis tekitas paksudest teraslehtedest kokkukeevitatud 8 tonni raskuste kuplite pööramine vaatluse ajal kõuemürinat ning hoolimata sellest, et teleskoobi samba ja torni vundamendid rajatakse täiesti eraldatuna, pani ka instrumendi vappuma. Arvestades veel niisuguste kuplite kõrget maksumust, roostetamist ja tülikat hooldamist on ilmne, et nad ei vasta ei teleskoopide ega ehitustehnika kaasajale. Uute materjalide otsingul torkavad kohe silma plastmassid, mis oma kerguse, püsivuse ja tugevusega on kindlalt juurdunud laeva- ja autokerede valmistamisse. Nii asuti ka Tartus Pulkovo observatooriumi peakonstruktori J. S. Streletski idee kohaselt plastmasskupli projekteerimisele ja hiljem valmistamisele. Klaasriidega armeeritud plastmass-sektsioonid liimiti sama plastmassvaiguga 5,25 m läbimõõduga sfääriliseks kupliks. Umbes 400-kilogrammine õõnes plastmasskera toetub kahemeetrise läbimõõduga kuullaagrile ja on käsitsi või elektriajamiga väga kergesti ning vaikselt pööratav. Algul metallkarkassita valmistatud kuplit osutus hiljem kasulikuks siiski toestada metallvõrudega. Eksperimentaalkuppel tõestas, et plastmass on täiesti edukalt kasutatav väikeste kuplite valmistamiseks. Hiljem kohandati eksperimentaalkuppel 47 cm reflektori jaoks ja ta moodustab nüüd uue tehnika perspektiivikust demonstreeriva kontrasti teise samasuguse teleskoobi metallkupli kõrval (joonis 63). Praegu on plastmasskuplitega varustatud viimased Zeissi



Joonis 63. Metallkupliga ja plastmasskupliga tornid Struve-nimelises observatooriumis.

tehaste instrumendid Saksa Demokraatlikust Vabariigist; neid võib leida ka üsna mitmetes USA observatooriumides. Huvitava eriliigi moodustavad raadioteleskoopide, -lokaatorite ja ultralühilaine-raadiojaamade suundantennide kattekuplid, mis esimesel pilgul hämmastavad pilu ja muude avamismehhanismide puudumisega. Neid kupleid ei avatagi — nad on raadioläbipaistvad. Nagu optiliste riistade jaoks võiks põhimõtteliselt ette kujutada terviklikku, ideaalselt läbipaistvat klaaskuplit, nii osutub plastmass raadiosagedustel tegelikult küllalt läbipaistvaks ja pöörlevad suundantennid võivad töötada täiesti liikumatutes, üleni suletud plastmasskerades.

Suuremate universaalsete teleskoopide kuppel paikneb tavaliselt eraldi seisval mitmekorruselisel tornil, millesse mahutatakse vaatlusi ja teleskoopi teenindav aparatuur ning lisaseadmed. Tornis on laboratooriumid, seadmete laod, fotopimikud, kudeespektrograafide ja elektriaparatuuri ruumid ning vaatlejate toad. Kui kuplialuse kliima reguleerimiseks ei piisa kupli ja torni passiivsest termilisest isoleerimisest, siis rakendatakse aktiivse mõjutamisena ka õhu konditsioneerimist.

Ootamatu probleem kerkib teleskoopide juhtimise automatiseerimisel üles seoses kupliga. Nagu eespool korduvalt nimetatud, monteeritakse peaaegu kõik astronoomilised vaatlusriistad statiividele ekvaatoriliselt ja suunami-

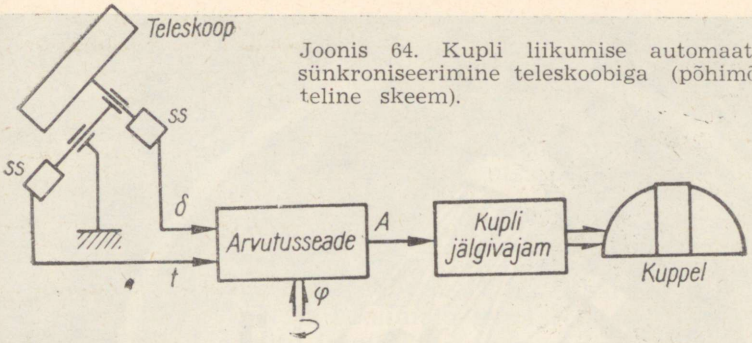
sel pööratakse neid ümber polaar- ning käändetelgede. Nende mõistete seisukohalt on kuppel monteeritud asimuudiliselt: kupli enda pööramine käib ümber vertikaaltelje, kupli pilu aga avatakse enamasti ümber mõeldava horisontaaltelje. Lihtsamal juhul avatakse pilu vaatluse eel täielikult ja vaatlemisel tuleb kuplit ennast pöörata, et pilu oleks õiges suunas (õige asimuudiga). Ilmselt ei vasta erinevates koordinaatides liikuvate kupli ja teleskoobi pöörlemised teineteisele sugugi üheselt, see tähendab, et kui näiteks tunniajalise vaatluse jooksul pööras kellamehhanism teleskoopi ümber polaartelje 15° võrra, siis kupli vajalik pöördenurk leitakse arvutustest, mille teostamiseks vajatakse veel teisigi lähteandmeid. Kupli asimuudi A sõltuvust teleskoobi tunninurgast t, käändest δ ja koha geograafilisest laiusest φ väljendab järgmine seos:

$$A = \operatorname{arc\,tan} \frac{\cos\delta \cdot \sin t}{\cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos t - \sin\delta \cdot \cos\varphi}.$$

Kui kupli pööramist tahetakse automatiseerida, siis ei saa siin läbi ilma teatud arvutusseadmeta.

Üheks võimaluseks oli maketi tegemine. Ehitati väike teleskoop ja selle kohale kupli pilu imiteeriv kaar. Makett ühendati päristeleskoobiga selsüünide kaudu ja ta asend vastas alati täpselt tegelikule teleskoobi asendile. Mudeli pikendatud toru pööras ise maketil kupli pilu õigesse kohta ja see õige asend kanti jällegi suurele kuplile selsüüni kaudu üle. (Mõistagi rakendati selsüüni vaid kupli võimsate elektrimootorite sisselülitamiseks.) Niisuguseid elektromehhaanilisi mudeleid kasutati mõned aastad tagasi mujalgi, kus tuli liikumisi ühest koordinaadistikust teise viia, insenerid kutsuvad neid mõnikord «fantoomideks». Praegu ei loeta «fantoomide» täpsust ja töökindlust enam rahuldavaks ning on olemas paremad arvutustehnilised vahendid, mis elektromehhaaniliste ja elektroonsete elementide baasil vajalikud koordinaatide teisendused puhtmatemaatiliselt ära teevad.

Kupli sünkroniseerimiseks ette nähtud arvutusseadme kompleksi koosseisu (joonis 64) peavad kuuluma pöördenurga andurid *SS* teleskoobi telgedel (näiteks selsüünid), arvutusseade, mis anduritelt saadud deklinatsiooninurga δ ja tunninurga t signaalide ning koha geograafilise laiuse

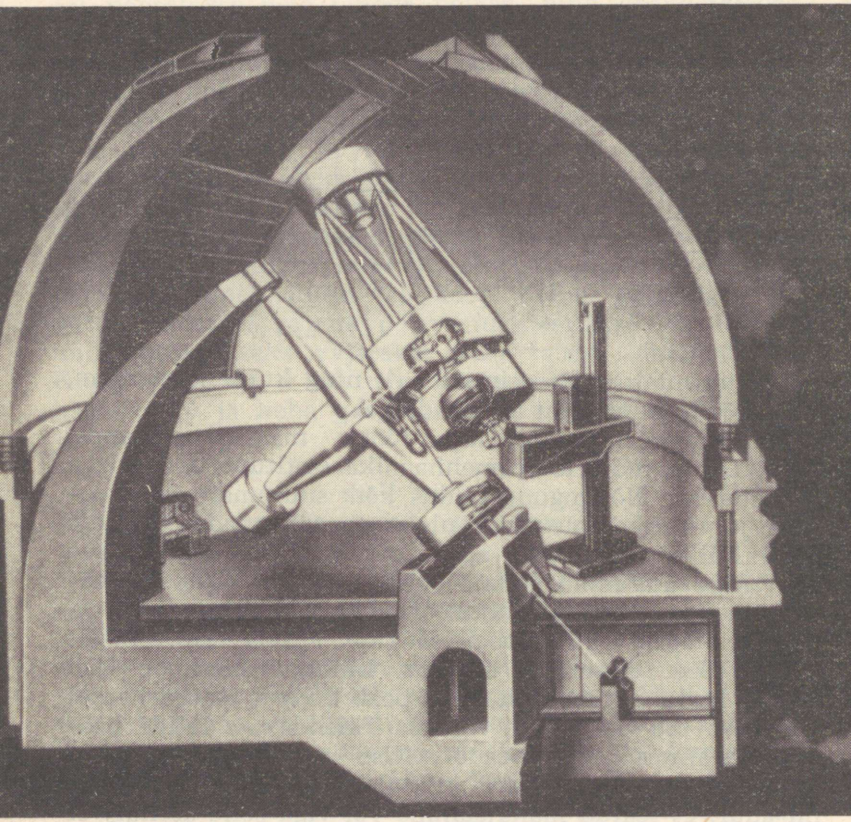


Joonis 64. Kupli liikumise automaatne sünkroniseerimine teleskoobiga (põhimõtteline skeem).

põhjal arvutab välja asimuudi *A*, ning kupli jälgivajam, mis pöörab kupli pilu asimuudile *A*.

Sünkroniseerimisautomaate töötas mitmes variandis välja Leningradi elektromehhaanika instituut ja nendega varustatakse Nõukogude Liidus kõik suuremate teleskoopide juhtimiskompleksid. Tuleb aga tähendada, et isegi need küllalt keerulised aparaadid ei suuda kupli täpse pööramise ülesannet lõpuni lahendada: ikka jääb üle teatud taevaosa, mille puhul arvutusmehhanism muutub nagu «nõutuks» ja kuppel ei tule riistale korrektselt järele. See on seniidi ümbrus. Liikugu teleskoop läbi seniidi kuitahes aeglaselt, ikka peab kuppel teatud hetkel välkkiire 180°-se pöörde tegema. Täiendavate lülide lisamisel juhtimissüsteemi saab sellise «seniidi efekti» mõju vähendada, kuid paljudel juhtudel on ka kupli pilu ise nii suur, et teatud mahajäämine või viga selle asendis ei takista vaatlusi.

Küllalt keeruliseks konstruktsiooniks kuplialuses ruumis on vaatleja tõstuktool (joonis 65). Sellelt nõutakse tavaliselt, et vaatlejale oleksid kättesaadavad peaaegu kõik punktid 15- kuni 40-meetrise läbimõõduga küllalt kõrges kuplialuses ruumis. Tuleb ju vaatlusel teleskoobi mistahes asendis küündida nii kõige kõrgemal asuva peafookuseni kui ka suhteliselt madalamal liikuvate Cassegraini ja Nasmythi fookusteni. Tõstukist peab saama juhtida kuplit ja teleskoopi — paremal juhul võiks seal olla peaaegu kogu juhtpuldi koopia. Samal ajal peab vaatleja saama ülevalt ka enda asendit muuta, platvormi tõsta või langetada, kuplialuses ruumis ringi sõita, ja seda kõike pimedas, ilma teleskoobile ette jäämata, kupli, statiivi või



Joonis 65. Kaasaegne universaalne teleskoop koos juurdekuuluvate seadmetega tornis.

muude seadmetega kokku põrkamata, toite- ning juhtimiskaableid katki tõmbamata ja neile peale sõitmata. Suurte teleskoopide tornide juhuslikes külastajais kutsub vaatleja tõstuki serva küljes oleva kokkukeritud nöörredeli nägemine keset keerukaid mehhanisme tavaliselt esile muige või huumorisähvatused, kuid on teada, et kaks soliidset teadlast ühes observatooriumis veetsid terve öö tegevusetult kümmekonna meetri kõrgusel kupli lae all, sest nende tõstuki toite-vooluvõtja oli ühenduse kaotanud.

Krimmi observatooriumi 2,5 m teleskoobi kupli külge on kinnitatud pikk vertikaalne post (joonis 25), mille küljes üles-alla ja veel kahes suunas liigutatav vaatlejaplatvorm on juhtmetega ühendatud paigalseisva aparatuuriga. Kogu püstpost liigub veel ise koos kupliga, kusjuures pole välditud kogu vaatlejaplatvormi otsasõitmine juhtimispuldi ruumile. Tautenburgi observatooriumi 2 m teleskoobi vaatlejatõstuk paikneb suurel kärul, mis rööpmeid mööda ümber teleskoobi võib sõita. Maksimaalselt väljasirutatud asendis on tõstuki gabariidid aukartustäratavad (7,5×9×5 meetrit) ja hoolimata tema võimsusest (tõstukile võib asuda mitu inimest, ta on varustatud juhtimispuldi koopiaga ja väikese pimikuga fotokassettide laadimiseks) tuleb seda lugeda kohmakaks ning kergesti rikki minevaks ehituseks. Tautenburgis valmistatigi veel teine kergem kärutõstuk, mis konstrueeriti lihtsa akumulaatoritega ja metalltorudest kaubatõstuki baasil. Teleskoopi ja kuplit juhitakse temalt 50-kanalilise raadioülekandega telejuhtimissüsteemi kaudu.

Teleskoop ja tema juurde kuuluv tehniline seadmestik täieneb nii kiiresti aparatuurihulga suurenemise ja keerulisemaks muutumise suunas, et kogu kompleksi konstrueerimine, töölerakendamine ning käigushoidmine valmistab mitmesuguste erialade ja tehniliste süsteemide läbipõimumise tõttu spetsialistidele tõsiseid raskusi. Suuremate teleskoopide tornid on täidetud sadu elektronlampe sisaldava elektroonikaaparatuuri, kümnete elektriajamite ja elektromagnetiliste mehhanismide, keerukate arvutusseadmete, kaablivõrkude ja releekappidega, rääkimata sadu optilisi detaile sisaldavaist optika-mehhaanikasõlmedest. Liites lihtsalt kõik süsteemid ja tuues nende juhtimisorganid ning indikatsiooni- ja mõõteriistad juhtpulti, saadakse kooskõlastamata aparatuuri ja juhtmestiku kakofoonia, juhtimispult ise aga upub kümnete ja sadade nuppude, lambikeste ning voltmeetrite hulga all. Analoogiliste raskuste tõttu teisteski tehnikaharudes on praegu juba välja kujunenud vahendid olukorra parandamiseks. Suurte keeruliste süsteemide loomise üldised alused ühendab endas komplekssе automatiseerimise teooria ja tehnika ehk lühidalt süsteemitehnika. On kujunenud välja ka ühtsed informatsioonisüsteemid, mis koguvad ja töötlevad andmeid nii seadmestiku juhtimise kui ka teadusliku informatsiooni osas. Kaasaegse teadusliku eksperi-

mendi (sealhulgas ka vaatluse) andmestik vajab suure hulga mõõtmiste kiiret teostamist, tulemuste esialgset läbitöötamist ja edasiandmist või registreerimist masinarvutitele sobivas vormis. See on põhiline samm eksperimenti juhtiva teadlase töö automatiseerimisel. Et tegemist on tõsiste probleemidega, see nähtub kasvõi Šveitsi ajakirjanduse teatest, mille andmeil oli USA aatomiuurimiskeskuses Oak Ridge'is juba 1946. aastal kasutusel 200 000 mitmesugust elektrimõõteriista kilpidel kogupikkusega 17 km. Raketi-telemeetriasüsteemid võivad anda aga miljoneid kahendühikuid informatsiooni sekundis. Üleminek hulgalt erinevatelt ja killustatud mõõteriistadelt tsentraalsetele informatsioonimasinatele ja -süsteemidele on möödapääsmatu ning mitmetes tehniliste teaduste ja täppisteaduste harudes see juba toimub. Võetakse kasutusele mõõtmis-informatsioonisüsteemideks nimetatavad seadmestikud, mis automaatselt mõõdavad vajalikud suurused vajalikel momentidel, töötlevad tulemusi teatud eeskirjade järgi ja juhivad eksperimendi kulgu. Resultaadid on paljude mõõtmiste koondandmed, kompleksnäitajad ja automaatjuhtimise signaalid. Mõõtmis-informatsioonisüsteemi südameks on tavaliselt elektronarvuti. See varustatakse suure hulga sisendseadmetega, mis mõõdavad, võtavad andmeid vastu ning muundavad need elektronarvutile mõistetavaks numbriliseks koodiks. Selliste sisendkanalite arv võib ulatuda sadadesse, masin peab nendega ühendust järjestikku. Teiselt poolt on mõõtmis-informatsioonisüsteemi elektronarvutil palju vahendeid kogutud ja «läbi masindatud» andmete väljastamiseks. Tulemusi võidakse trükkida paberile, joonestada graafikutena, kanda perfokaardile või perfolindile, edasi anda telegraafiliinide kaudu, aga ka lihtsalt kasutada katse juurde kuuluvate masinate või mehhanismide seisundi muutmiseks. Sellise «elektronaju» saab endale ka Struvenimelise Tartu Astrofüüsika Observatooriumi jaoks ehitatav 1,5 m peegelteleskoop. Masin «VNIIEM-3» on loodud tootmisprotsesside kompleksseks automatiseerimiseks ja andmete töötlemiseks automatiseeritud süsteemides. Arvutamiskiirus ulatub kuni 75 000 operatsioonini sekundis (meenutame, et üldtuntud universaalarvutil «Ural-2» oli see vaid 5000—6000 operatsiooni sekundis), sisemälusse saab talletada kuni 28 672 sõna (igaüks 24 kahendkohta). Magnetlintvälismälus aga mahub ühele lindirullile 2 mil-

jonit sõna. Elektronarvutit ühendab tema hoolduse alla kuuluvate objektidega 512-kanaliline sideplokk, kuhu kuulub ka masina enda kvarts-elektronkell. Informatsiooni väljastamine võib toimuda peale sideploki kaudu kulgevate juhtimissignaalide ka trükkimise ja perforeerimisena, masin võib telegraafi- ja telefoniliinide kaudu «keskustleda» teiste omataoliste või ka võõraste masinatega. Juhul kui ühe pidevalt kulgeva ülesande täitmisel tööd väheks jääb, võtab masin vahepeal ette mõne teise tegevuse (näiteks tavaliste matemaatiliste ülesannete lahendamise) ja aegajalt või häiresignaalide peale lülitub ümber esimesele ülesandele. Lühidalt öeldes on «VNIIEM-3» kaasaegne elektronarvuti, mis on maksimaalselt varustatud organitega sidepidamiseks ümbritseva maailmaga. (Puuduvad vaid kõnelemist ja lugemist võimaldavad organid!)

Mida teeb juhtiv elektronarvuti teleskoobi juures? Kõigepealt on ta enda peale võtnud teleskoobi automaatse suunamise. Juhtpuldi klaviatuuril pruugib operaatoril valida vaid taevakeha koordinaadid ning anda siis nupule vajutamisega masinale tegutsemiskorraldus. Oma sisendploki kaudu hangib masin otsekohe teleskoobi telgedele kinnitatud spetsiaalsetelt numbrilistelt nurga-anduritelt andmed, kuhu riist tegelikult on suunatud, ja nende võrdlemisel puldist nõutavaga otsustab, kuhupoole ja kui kiiresti riista pöörata. Ajamid seisatatakse alles siis, kui masin võib konstateerida, et telgedelt loetavad koordinaadid vastavad kümmekonna kaaresekundi täpsusega nõutavatele. Isegi parandid, mis on tingitud taevakehalt tulevate kiirte murdumisest atmosfääris (refraktsioonist) ja teleskoobitoru läbipaindumisest, teeb masin ära mälust võetud algandmete põhjal. Mälusse võib anda ka mitmete taevakehade koordinaadid ja siis neid lihtsalt nupule vajutamisega mistahes järjekorras puldile kutsuda ning masina kaudu teleskoobile suunamiseesmärgiks anda.

Elektronarvuti lahendab veel vahekorrad teleskoobi liikumise ja kupli pöörlemise vahel. Puldil seisvatest objekti koordinaatidest arvutatakse kupli pilu asimuut ja tavaliselt ka taevakeha seniitkaugus. Kupli asendi teatab kupliga ühendatud selsüün, mille elektriline analoogsignaal sideplokis numbrilisustatakse masina jaoks. Nagu teleskoobi puhul, nii korraldab masin ka kupli liikumist arvutustest selgunud vajaliku asimuudi ja selsüüni andmete

omavahelise võrdlemise põhjal. Teleskoobi ja kupli juhtimine pole arvuti jaoks kuigi pingeline ülesanne ja seepärast võib ta «kohakaasluse alusel» samu operatsioone teha ka teiste observatooriumi territooriumil töötavate vaatlustornide jaoks.

Niisama oluline on vaatlusandmete vastuvõtt otse teleskoobi lisaseadmeilt ja nende kiirgusvastuvõtjailt. Fotoelektrilise fotomeetria korral võib masin näiteks koostada kogu vaatlusprotokolli, alates teleskoobi ja elektrofotomeetri olukorda iseloomustavatest andmetest (koordinaadid, filtrite, diafragmade numbrid, mõõtmispiirkond jne.) ja lõpetades kellaaja, kuupäeva ning vaatleja nimega. Iseenesest mõistetavalt numbrilisustatakse fotomeetri näit ja väljendatakse mõõtmistulemus soovitavates astrofüüsikalistes ühikutes (tähesuurustes), eriprogrammi kohaselt võib masin lisaks veel tulemusi tõlgendada.

Mõnesugusteks fundamentaaluurimusteks ja konstantide määramiseks kasutatakse astromeetrias liikumatult monteeritud teleskoope, mis on suure täpsusega otse seniiti suunatud. Viimase nõude täitmiseks kuulub nende optilisse süsteemi elavhõbedal ujuv horisontaalne tasapeegel. Et seniitteleskoobi juures pole tegemist suunamisega, siis on vaatlused neil juba ammu kõigis suuremates observatooriumides täielikult automatiseeritud ja kulgevad etteantud programmi kohaselt. Programm on kantud perfo- või magnetlindile ja kõik vaatlusoperatsioonid teeb teleskoop ilma inimese juuresolekuta, kaasa arvatud isegi paviljoni luukide avamine. Hommikul tuleb võtta vaid film või plaadid teleskoobi kassetist ja trükkivalt kronograafilt lint pildistamise ajamomentidega. On loodud automaadid töö lõpetamiseks vihma ja pilvituse korral.

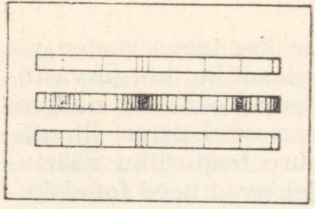
● observatooriumi laboratooriumides

Ainult erandjuhtudel sünnib uus teaduslik avastus otse vaatluse käigus. See oli võimalik möödunud aegadel, kui valitsesid visuaalsed vaatlusmeetodid ja taeval oli veel varuks otse silmaga avastatavaid üllatusi. Nüüd seatakse vaatluse ülesandeks ainult vaadeldava objekti, nähtuse või taevaala olukorra kohta käivate andmete võimalikult täpne ja objektiivne talletamine, kogu uurimine järgneb alles hiljem. Kõige levinumaks vaatlusandmete kandjaks on

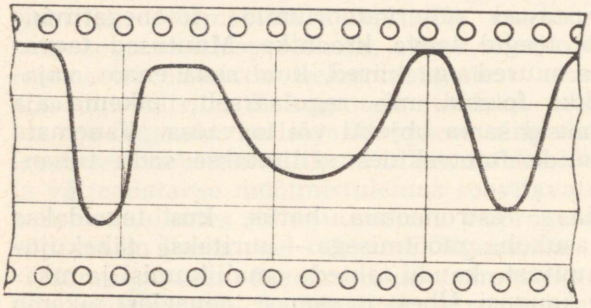
fotoplaat, millele öösel pildistatakse kas taeva vaated või ka taevakehade spektrid. Juba fotoplaadi kui kiirgusvastuvõtjaga tutvumisel märkisime tema eeliseid nähtuse objektiivsel ja küllalt täpsel registreerimisel, pärast ilmutamist kujutavad plaadid endast suure teadusliku väärtusega dokumente. Astronoomias kirjeldavad need fotodokumendid põhimõtteliselt kordumatuid sündmusi ja seepärast moodustavad observatooriumide fotonegatiivide kogud ehk fototeegid taeva kroonika. Muutused taevas pole enamikus suured ega kiired, kuid seda enam vajatakse korralikke fotosid, mis regulaarselt, pikema aja jooksul kujutaksid sama objekti või taevaosa. Vanemate observatooriumide fototeekides säilitatakse sadu tuhandeid plaate.

Astromeetrias — astronoomia harus, kus tegeldakse taevakehade asukoha mõõtmisega — uuritakse tähekujutiste asendi muutuste kaudu tähtede omaliikumisi ja määratakse nende kaugusi. Ühest ja samast taevaalast pikema vaheaja tagant tehtud fotodelt otsitakse selleks kujutiste suhtelist nihkumist, kuid et meie ajavahemikud kosmose mastaabis väga lühikestena näivad ja tähtede omaliikumised suurte kauguste tõttu väga väikesed on, siis tuleb mõõta tuhandike millimeetrite täpsusega. Muutuva asukoha või heledusega taevakehade avastamiseks kasutatakse riistu, kus saab võrrelda kaht erineval ajal pildistatud plaati. Stereokomparaatoris juhitakse mõlema foto kujutised optiliselt kokku, kusjuures liikumatute taevakehade kujutised langevad täpselt ühte, nihkunud objektid aga tunduvad plaadi ees või taga olevat. Kui otsitakse heleduse poolest muutlikke taevakehasid, siis lastakse optilise ümberlülija abil silma kord ühe, kord teise plaadi kujutis. Muutumatute heledustega kujutiste juures ei ole mingit vahet märgata, muutlikud tähed aga hakkavad vilkuma ja torkavad kohe silma. Sellist riista nimetatakse plinkkomparaatoriks. Plinkkomparaatoriga on kerge avastada ka plaatidel asukohta muutnud planeete või uusi objekte, näiteks komeete.

Spektraalvaatlustel pildistatakse spekter fotoplaadile ribana, kus langenud kiirguse intensiivsustele vastavad suuremad või väiksemad tumenemised (joonis 66, *a*). Mõlemale poole uurimisobjekti spektrist fotografeeritakse mõne võrdluskiirgusallika spekter; tihti on võrdlusspektriks raua joonterikas ja hästi tuntud spekter, mis saa-



Joonis 66. Spektri foto ja selle mõõtmisel saadud registrogramm tumenemisest.

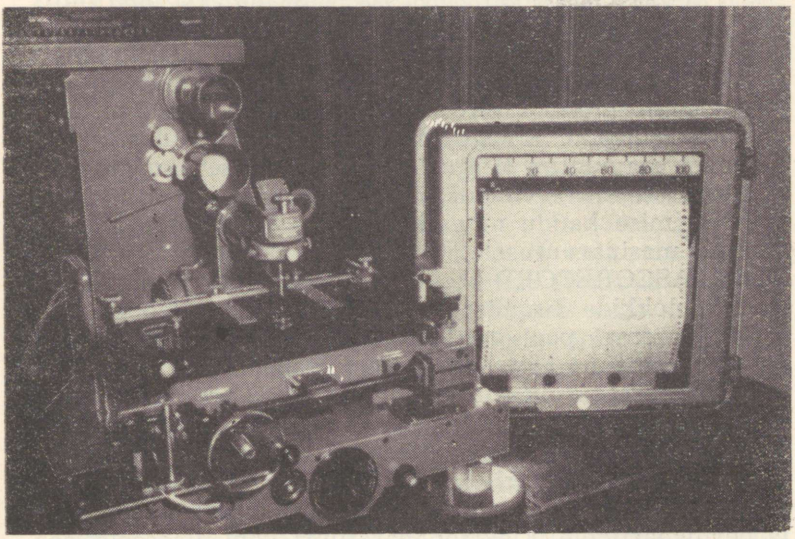


dakse raudelektroodide vahelisest kaarleegist. Toetudes võrdlusspektri joontele, saab ehitada lainepikkuste skaala ja selle kaudu määrata joonte lainepikkused uuritavas spektris. Edasi püütakse kindlaks teha, millistele elementidele need jooned kuuluvad, teiste sõnadega, ollakse jõudnud taevakeha väliskihi (atmosfääri) koostise leidmiseni. Niisugune on tavaline kvalitatiivse spektraalanalüüsi meetod, kuid astronoomias seostub see üsna vaevarikka tööga kiirgusallikate äärmiselt väikese heleduse tõttu.

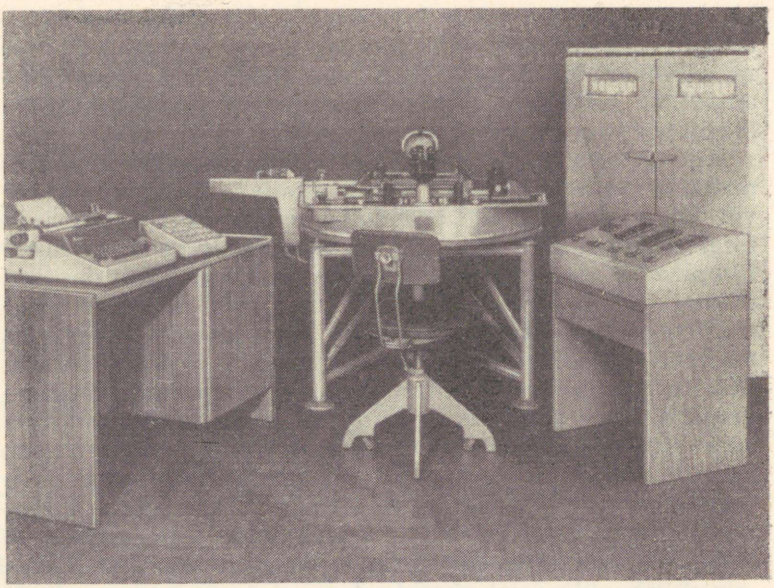
Spektri fotolt mõõdetakse tumenemised ja joonistatakse nende järgi paberile välja vastav graafik. Selleks kasutatakse mikrofotomeetrit. Mikrofotomeetris valgustatakse spektrit õige peene kiirega ning mõõdetakse fotoelektriliselt, kui palju valgust antud punktis plaadist läbi läheb. Mõõtmispunkti piki spektrit edasi nihutades saame mõõteriista näitudest sel viisil arvud spektri graafilise kuju jaoks (joonis 66, *b*). Joonisel 67 kujutatud mikrofotomeetril MF-4 nihutab spektrit aeglaselt edasi elektriajam, fotovoolu aga mõõdetakse isekirjutava mõõteriistaga. Siinkohal tuleb märkida, et otseselt saadud registrogramm vastab küll tumenemistele fotoplaadil, aga mitte fotografeeritud spektri kiirguse intensiivsusele. Plaadile langenud valgushulk ja tumenemine on omavahel seotud keerulisemalt (logaritmiliselt); automaatseks intensiivsustesse

üleviimiseks tuleb mikrofotomeeter varustada sisseehitatud arvutusseadmega. Lõplikud spektri graafikud on materjaliks ka taevakehade kvantitatiivsel keemilisel analüüsil, milles toetutakse füüsika- ja tähtede atmosfääride ehituse teooria seisukohtadele.

Astromeetriliste ja mõnikord ka astrofüüsikaliste uurimistööde praktikas tuleb taeva fotodelt määrata tähtede või teiste taevakehade asendeid, omavahelisi kaugusi ja isegi mõõtmeid. Selleks on vaja kõigepealt need suurused fotoplaadil endal kõrge täpsusega ristkoordinaatides ära mõõta, hiljem seostatakse juba tulemused ühel või teisel viisil tegelikkusega. Lihtsaimad koordinaatide mõõtmise masinad koosnesid jäigast metallkerest mikroskoobiga, mille alla vankrile asetatud plaati sai kahe mikromeeterkruviga ristsuundades nihutada. Mikromeeterkruvidelt võis lugeda parajasti mikroskoobi all asuva plaadipunkti koordinaadid kuni tuhandiku millimeetri täpsusega. Paljudes nõukogude observatooriumides kasutatakse kodumaist koordinaatide mõõtmismasinat КИМ, joonise 68 keskosas aga võib näha Zeissi tehase uuemat koordinaa-



Joonis 67. Spektrifotode mõõtmisseade Struve-nimelise observatooriumi spektroskoopia laboratooriumis.



Joonis 68. Zeissi tehase astrofotode mõõtmismasin «ASCORECORD» juhtimispuldi ja numbrilise elektronarvutiga.

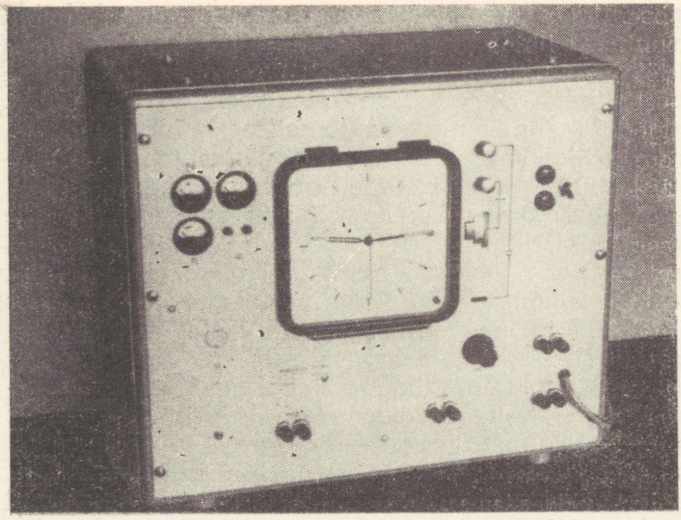
tide mõõtmismasinat «KOMESS». Viimase täpsus on alla ühe mikromeetri. Praegu ei rahulda aga teadlasi enam ainuüksi saavutatav kõrge täpsus, vaid päevakorras seisab laboratoorsete vahendite efektiivsuse tõstmine automatiseerimise kaudu ning nende väljundandmete kohandamine masinarvutusele. Kaasaegne automaatne mõõteseade «ASCORECORD» tekkis elektroonsete juhtimis- ja arvutusplokkide lisamisega «KOMESSILE». Joonisel 68 seisab paremal pool esiplaanil juhtpult, kust operaator annab masinale teostatavate mõõtmisoperatsioonide ja tulemuste ümberarvutamise programmi. Paremal tagapool seisab kapp neid juhiseid realiseeriva elektronaparatuuriga ja arvutusplokkidega, keskel — ümberehitatud «KOMESS» ja vasakul registreeriv elektrikirjutusmasin. Samas on olemas võimalused andmete salvestamiseks perfolindile ja perfokaartidele. Elektronaparatuuri kapi ülaosas seisavad suured numbrilised indikaatorid, millelt otseseks kontrolliks võib koordinaadid ära lugeda kümnendiku

mikromeetri täpsusega. Masina juures ilmnevad kõige selgemini astronoomiaobservatooriumide laboratooriumiriistade kaasaegsed arengutendentsid: see on optika-mehhaanikaseadmete ühendamine elektroonikaaparatuuriga ning tulemusena mõõtmiste automatiseerimine, resultaatide arvutuslik teisendamine ning väljastamine masinarvutitele sobivas vormis. Need on sammud, mis viivad praegu vaatlusandmete kogumiselt nendesamade andmete masintöötlemisele.

Kaasaegne astronoomiaobservatoorium ei saa läbi ilma arvutustööde mehhaniseerimiseta. Andmete töötlemiseks rakendatakse mitmesuguseid masinaid, alates aritmomeetreist ja lõpetades suurte elektronarvutitega. Vaatlustest ja eksperimentidest saadud andmete säilitamiseks ning töötlemiseks sobivad eriti perfokaardid, mis kujutavad endast head andmestiku dokumenteerimise vormi ja on edasistes arvutustes «mõistetavad» nii masinaile kui inimestele. Tartu Struve-nimelise observatooriumi arvutuskeskus ongi praegu komplekteeritud terve rea perfokaart-arvutusmasinatega.

Peale otseselt vaatlustega seotud laboratooriumitööde vajab astronoomiaobservatoorium teaduslik-tehnilist aparatuuri ning personali veel uute seadmete loomiseks elektroonikalaboratooriumides, töökodades ja aparaadiehituslikes konstrueerimisbüroodes. Tähtsal kohal seisab arusaadavalt ka fotolaboratoorium, kus peale astrofotode ilmutamise uuritakse uusi emulsioone ning katsetatakse töötlemismeetodeid ja -retsepte. Väärtuslike astroplaatide kiire vananemise vältimiseks säilitatakse neid hermeetilistes pakendites külmutuskappides.

Õiget aega ja täpseid ajamõõtmisi ei vaja mitte ainult astronoomiaobservatooriumid, vaid nad teenindavad selles osas ka riiklikku ajateenistust. Täpset aega vajatakse kõikjal ja seepärast saadavad mõned observatooriumid raadiojaamade kaudu ajasignaale kogu maailmale. Riikliku ajateenistuse raames tehakse igal aastal tuhandeid astronoomilisi õige aja määramisi; selleks konstrueeritakse uusi ja eriti täpseid vaatlusriistu, mis fotoelektriliste ning teiste lisaseadmetega varustatuna kindlustavad täpsused tuhandikes sekundites. Aja säilitamisel on kõige vanemaiks vahenditeks pendelkellad. Nõukogude Liidus F. M. Fedtšenko konstrueeritud pendelkellade käigu ebaühtlus ei ületa tuhandikku sekundit ööpäevas. Kaasajal on



Joonis 69. Väike kvartskell.

observatooriumides tavalisteks muutunud kvartskellad, mille südameks on väga stabiilselt ühel ja samal raadiosagedusel võnkuv kvartsikristall. Elektronskeemis jagatakse kvartsikristalli põhisagedus järk-järgult ikka madalamaks, kuni saadakse 1000-hertsine või 100-hertsine madalsageduslik pinge, mida võib juba kasutada sünkroonmootori toiteks kellaosutite pööramisel või ajamomendi trükkimist võimaldava kronograafi mehhanismi käitamiseks. Parimate kvartskellade täpsus ulatub tuhandikesse sekunditesse aasta kohta, nende abil saab jälgida Maa ööpäevase pöörlemise ebaühtlust. Joonisel 69 kujutatud Saksa Demokraatlikust Vabariigist pärineva väikese kvartskella täpsus on küll väiksem, kuid astrofüüsikaliste vaatluste jaoks täiesti küllaldane — tuhandikud sekundid ööpäeva kohta. Kvartskelladest veel täpsemad kellad põhinevad aine mikrosüsteemide — aatomite ja molekulide kvantomadustel. Spektrijoonte sageduslikule konstantsusele tuginevad molekulkellad on otseselt seotud looduslike konstantidega ja «käivad» fantastilisena näiva täpsusega 10^{-11}, s. t. ööpäevase veaga miljondik sekundit. Ka see pole sugugi piiriks.

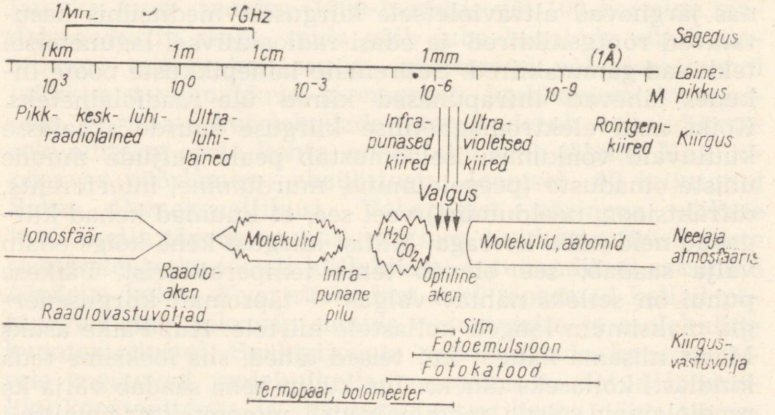
V. raadioteleskoobid

● teine aken taevasse

Me elame maailmas, mida täidavad lained. Iga keha kiirgab elektromagnetilisi võnkumisi, olgu see inimene, raamat või kauge täht. Meie silmad ei suuda kõiki neid laineid vastu võtta ja see on meie õnn, sest muidu oleksime arvatavasti kogu aeg pimestatud meid ümbritsevast kiirgusmerest. Silmale on nähtavad vaid need elektromagnetilised lained, mille pikkus langeb 0,38 ja 0,78 μm vahemikku. Nagu juba teame, saab nähtavat valgust lahutada spektraalseteks koostisosadeks — vikerkaarevärvideks, mõlemalt poolt külgneb nähtav valgus aga nähtamatute kiirgustega — infrapunase ja ultravioletsega. Kuid kõik see kokku on vaid väike osa pikast elektromagnetiliste võnkumiste spektrist. Lühemate lainepikkuste suunas järgnevad ultravioletsele kiirgusele meditsiinis kasutatavad röntgenikiired ja edasi radioaktiivsel lagunemisel tekkivad gammakiired. Suuremate lainepikkuste poole liikudes lähevad infrapunased kiired üle raadiolaineteks. Kõiki neid elektromagnetilise kiirguse suurde skaalasse kuuluvaid võnkumisi iseloomustab peale paljude muude ühiste omaduste (peegeldumine, murdumine, interferents, difraktsioon, neeldumine) veel see, et kuumad kehad kiirgavad neid kõiki korraga. Millist kiirgust keha kõige enam välja saadab, see oleneb tema temperatuurist. Päikese puhul on selleks nähtav valgus — täpsemalt kiirgusenergia maksimum langeb kollastele kiirtele. Kui Päike asuks Maast niisama kaugel kui teised tähed, siis loeksime teda kindlasti kollaseks täheks. Iga kuum keha saadab välja ka raadiolaineid. Seda raadiokiirgust nimetatakse tavaliselt soojuslikuks raadiokiirguseks, raadiojaamad seevastu saadavad välja mittesoojuslikku raadiokiirgust. Tuleb välja,

et loomulikke, soojusliku raadiokiirgusega «raadiojaamu» on maailmas võrratult rohkem kui mittesoojuslikke, ent viimased on enamikus palju tugevamad. Mittesoojuslike maapealsete allikate hulka kuuluvad peale raadio- ja televisioonisaatjate ka sädelahendused, mis raadios ja televisiooniekraanil häireid tekitavad. Maailma esimene raadiovastuvõtja oli samuti ehitatud teatavasti äikese-sädelahenduste registreerimiseks.

Niisiis võime öelda, et taevakehad on hiiglaslikud kiirgusallikad, mis saadavad välja elektromagnetilist kiirgust kõigis suundades ja kõigil lainepikkustel. Alles mõnikümmend aastat tagasi tuli meil kujutlused maailmaruumist ja selles asetsevatest kehadest üles ehitada vaid nähtavas valguses ja sellele lähedal seisvates kiirtes saadud informatsiooni alusel. See spektrilõik on aga vaid kitsas osa suurest üldisest kiirgusspektrist. Seega tugines meie maailmapilt väga napile andmestikule; tuleks toimetada vaatlusi võimalikult laias elektromagnetilise kiirguse spektri vahemikus. Siin tekib ootamatu takistus. Elame maapinnal, sadade kilomeetrite paksuse kiirgust tõkestava õhukihi katte all ja ehkki tavalises elus loeme õhku läbipaistvaks aineks, on astronoomidele hästi tuntud nähtava valguse nõrgenemine atmosfääris. Minnes aga nähtavast valgusest mööda spektrit ühele või teisele poole, tuleb kogeda ootamatut tõde — õhkkond muutub täiesti läbipaist-



Joonis 70. Elektromagnetiliste võnkumiste skaala ja Maa atmosfääri aknad.

matuks. Kogu langevast kiirgusest laseb atmosfäär maapinnani ainult valitud lainepikkuste vahemikud lõikudes, mida on hakatud akendeks kutsuma. Peale nähtava kiirguse ehk optilise akna ja kitsa infrapunase pilu selle kõrval on veel olemas teine suur aken raadiolainetele meetriste ja sentimeetriste lainepikkustega (joonis 70). Kuid sedagi akent ei kasutanud me mõnikümmend aastat tagasi üldse. Astronoomidel ei tulnud pähegi, et kaugel kõrval optilisest aknast võib olla avatud veel teine aken, mille kaudu informatsioon taevakehadelt peaaegu takistamatult meie planeedile jõuab. Ent selle piirkonna jaoks puudusid ka kiirgusvastuvõtjad, sest on ju kogu raadiovastuvõtutehnika välja kujunenud alles meie sajandil.

Kõrvalepõikena olgu tähendatud, et midagi taolist näeme praegu neutriinoastronoomias. Neutriinod on kolossaalse läbitungimisvõimega osakesed, mis takistamatult väljuvad näiteks tähtede sisemusest ja kulgevad galaktikate vahel või neid läbides ülisuurte vahemaade taha. Nii seisavadki raskused just materjalide leidmises, mis koondaksid neutriinovooge ja milles neutriinod tekitaksid registreeritava efekti — arvatakse näiteks, et 10^{23} neutriinost, mis inimkeha läbivad elu jooksul, neeldub vast ainult üks! Olemasolevate projektide kohaselt ehitatavad neutriinoteleskoobid sisaldavad detektorina tuhandeid tonne teatud keemilist ainet ja paiknevad kilomeetrite sügavusel maa sees.

Raadioaken ulatub lainepikkuste järgi 1,25 sentimeetrist ligi 30 meetrini. Lühemad lained neelatakse õhkkonnas hapniku ja veeauru molekulide poolt, pikemad peegelduvad ionosfäärilt tagasi — selle arvel kuulemegi kaugeid lühilainesaatjaid. Piirid on muutlikud: nii näiteks oleneb pikemalainelise raadiokiirguse kulgemine atmosfääris Päikese aktiivsusest ning kellaajast ja headel tingimustel ulatub raadioaken siin isegi lainepikkusteni üle 35 meetri.

Raadioaken on optilisest hulga laiem: arvuliselt ületab ta optilise akna laiuse lainepikkuste skaalas 10 miljonit korda. See suhtearv ei iseloomusta aga siiski läbilastavat informatsioonihulka. Optiline spektriosa on teatavasti üle külvatud veel kindlate «privilegeeritud» lainepikkustega — keemiliste elementide spektraaljoontega. Raadiospektris on eelistatud lainepikkusi vähem, ainsaks eriti intensiivseks jooneks on vesiniku spektrijoon 21-sentimeetrisel lainepikkusel. Seetõttu ei saa raadiospektri abil otsest

informatsiooni keemiliste elementide olemasolu ning seisundi kohta (välja arvatud nimetatud vesiniku joon).

Herbert Wellsi jutustuses «Pimedate maa» kirjeldatakse mägiorgu, mille elanikud on eranditult sündimisest saadik pimedad. Vähe sellest, ka nende esivanemate hulgas pole olnud nägijaid. Inglise fantastikakirjanik püüab oru pimedate ühiskonnaga sümboliseerida inimkonda. Jättes kõrvale küsimuse filosoofilise külje, võime käsitleda probleemi ka ainult praktilis-tehnilisest seisukohast: kas inimkond oleks nägemiseta suutnud maailma tunnetada kasvõi ligilähedaseltki nii nagu praegu? Probleemi võib veelgi kitsendada: kas inimesed oleksid tundnud valgust, värvusi ja ainult nende kaudu tunnetatavaid nähtusi? Vastus võib olla vaid üks — kahtlemata jah. Ehkki aeglasemalt, palju suuremaid raskusi ületades, kuid siiski oleks lõpuks läbitud sama tee.

Päikesekiirgust oleks inimene tunnetanud kõigepealt soojusena. Kiirte murdumisseadused võib leida üsna lihtsate vahenditega — kasutades termomeetrit. Viimane muide oleks olnud bimetall-tüüpi, kombitava osuti ja skaalaga. Edasi oleks järgnenud päikesekiirguse spektri kindlaksmääramine, muidugi ilma mingit olulist erinevust märkamata infrapunaste, nähtavate ja ultravioletsete kiirte vahel. Tõusude ja mõõnade kaudu oleks jõudnud inimene Kuu avastamiseni, edasi teleskoobitaolise riista ja termopaariga planeetide ning tähtede eraldamiseni. Võib-olla poleks pime inimkond kunagi aru saanud, et punane värvus on verel ja roheline taimedel, kuid teatud arengutasemel seisev pime füüsik oleks kahtlemata nõustunud 0,7 μm lainepikkusega elektromagnetilisi võnkumisi nimetama kokkuleppeliselt punaseks ja 0,55 μm-lisi roheliseks. Täpselt sama, mida ütleb iga nägija füüsik.

Pole raske kujutleda veel olendit, kes «näeb» mitte nähtavas valguses, vaid raadiodiapasoonis (või ka röntgenidiapasoonis või kogu ülejäänud spektri osaski). Sellele olendile säravad silmipimestavalt raadiojaamade antennid, helendavad telegraafiliinid ja elektrijuhtmed, võivad eralduda muust loodusest küttekehad ning teised soojusallikad. Niisuguse olendi seisukohalt oleme meie pimedad nagu mutid. Aga kohtudes võime meiegi uhkelt lausuda, et me ei tea, kuidas te näete raadiolaineid pikkusega 2 meetrit ja 4 sentimeetrit, kuid me teame küllalt palju selle lainepikkusega raadiokiirguse olemusest. Me oskame

teda tekitada ja vastu võtta, võime teda täpselt mõõta ja suudame tema abil isegi meile nähtavat televisioonikujutist kauge maa taha edasi anda. Me ei tunne mitte ainult seda lainepikkust, vaid üldse kogu elektromagnetiliste võnkumiste spektrit.

Bioloogilist arengut, mille tulemusena inimsilm oleks muutunud tundlikuks ultravioletsetele või infrapunastele kiirtele, on võimalik kujutleda, ehkki kindlasti oleks see keerulisem kui kuuldavate helide piirkonna laiendamine näiteks ultrahelile. Silma või mõne muu taolise organi võimet raadiolaineid vastu võtta peab lugema siiski täiesti ebareaalseks. Asi pole selles, et looduses puuduks raadiolaineid murdev aine. Näiteks parafiinläätsega võib raadiokiirgust koondada, kuigi inimorganismis on sellist läätse raske ette kujutada. Veel raskem on kujutleda raadiolainetele tundlikku võrkkesta: suurema lainepikkusega kiirguse vastuvõtuaparaat peab ise olema suurte mõõtmetega. Raadionägemiseks peaksid elusolendid olema varustatud televisiooniantennide tüüpi tundlatega!

● planeet omandab raadionägemise

1931. aastal üritas noor poola päritoluga raadioinsener Karl Jansky Belli firma uurimislaboratooriumis New Jerseys (USA) mõõta väga tundliku raadiovastuvõtjaga atmosfäärseid raadiohäireid. Suundantenni pöörates leidis ta ühe kindla suuna, kust müra 14,7-meetrisel lainepikkusel oli hulga tugevam kui mujal, pikemaajalistel vaatlustel aga ilmnes lisaks, et see müra maksimumkoht liigub taevast mööda täpselt Maa ööpäevase pöörlemise kiirusega. Siit polnud raske järeldust teha, et tegemist on mingi maavälise raadiokiirguse allikaga, mis kuuluks nagu kinnistähtede hulka. Janskyl õnnestus täpsemalt välja selgitada ka «kosmoseraadiojaama» asukoht — raadiolained tulid Amburi tähtkuju poolt. Just selles suunas aga asub meie Galaktika keskosa (tuum). Jansky kirjutas oma avastusest artikli ja see äratas tähelepanu, kuid mõne aja pärast vaibus huvi kosmose raadiokiirguse vastu. Astronoomidele tundus see väga kauge ainevallana ning ka raadiotehnilised meetodid ultralühilaine vastuvõtu alal polnud kuigi täiuslikud.

«Raadioastronoomia isa» Karl Jansky avastusest kuni laia teaduslik-tehnilise uurimissuuna väljakujunemiseni kulus aastaid. Täpsemalt öeldes, möödus ligi kümme aastat, enne kui üldse keegi uuesti süstemaatiliste taeva raadiovaatluste juurde asus. Siis hakkas kosmose raadiokiirgust uurima USA raadioamatöör Grote Reber. Mitmeks aastaks jäi ta maailma ainsaks raadioastronoomiks ja teda võib täie õigusega lugeda selle ala pioneeriks. Raadiovaatlusi toimetas ta suure entusiasmiga, nagu seda võib märgata vaid amatööride hulgas, kuid tuleb ka tunnistada, et Reberi vastuvõtuaparatuur seisis tolleaegse raadiotehnilise eksperimendi saavutuste kõrgeimal tasemel.

Oma koduõuele Illinoisi osariigis ehitas ta kõigepealt puukarkassil paraboolse reflektoriga antenni läbimõõduga 9,5 m, mida oli kerge suunata. Ühendanud antenniga tundliku raadiovastuvõtja, sai ta unikaalseid mõõtmistulemusi. Reber läks üle vastuvõtule lainepikkusel 60 cm ja hakkas taevakaardile märkima, millisest suunast kui tugevat raadiokiirgust vastuvõtjasse jõudis. Ja kohe hämmastas teda ning teisigi, kes neid vaatlusi jälgisid, see, et tugevama raadiokiirgusega kohad taevas ei langenud üldse kokku mingite nähtavate heledate taevakehade asukohtadega, välja arvatud vahest ainult Päike. 1940. aastal avaldatud töödes mõistis Reber juba hästi raadiovaatluste tähtsust ja ennustas uue astronoomiaharu sündi.

Raadiovaatluste algus meenutab mõneti optiliste taevavaatluste algust. Raadioastronoomia kui XX sajandi laps astus ainult üle paljust ebaproduktiivsest ja ebateaduslikust. Pole olemas «visuaalseid» raadiovaatlusi — sünnihetkest peale on raadioastronoomia seotud kõige kaasaegsema mõõtmisaparatuuriga. Raadioastronoomia hakkas üsna pea rahuldama elupraktika vajadusi. Töötati välja raadiosekstandid, mis raadiokiirguse järgi teevad Päikese asukoha kindlaks ka pilves ilmaga ning võimaldavad sel viisil määrata laeva või lennuki koordinaadid. Niisuguste orientiiridena püütakse kasutada ka teiste taevakehade raadiokiirgust. Küllalt suure praktilise tähtsusega on Päikese raadioteenistus, mis võimaldab seletada ja ennustada erilisi olukordi raadiosides. Nii on teada näiteks juhused, kus Inglismaa televisioonivaatajad hakkasid ootamatult kuulma Chicago politsei-raadiojaamu ja Hispaania tuletõrjekomandode teateid, laeva-raadiojaamad

aga muutuvad mõnikord nii tegevusvõimetuks, et radistid hakkavad otsima aparatuuri rikkeid — põhjused on tegelikult seotud just meie lähima taevakeha Päikesega. Päikesekiirgus määrab Maa ionosfääri seisundi ja sellega ka raadioside tingimused Maal.

Sõja alguseks 1939. aastal oli Inglismaa rannik palistatud raadiolokatsioonijaamadega. Olgugi et need olid kaasaegsetest raadiolokaatoritest palju primitiivsemad, kasutati juba sama põhiprintsiipi: taeva suunas saadeti välja võimsaid raadioimpulsse ning registreeriti tundlike vastuvõtjatega nende peegeldusi vaenlase lennukeilt. Analoogilisi vahendeid hakkas ilmuma ka sakslastel ja sõja ajal käis omavaheline «raadiovõitlus» vastase raadiolokaatorite summutamisel, segamisel ning eksiteele viimisel. Segamine pole raske, kui selleks kasutada täpselt samal lainepikkusel töötavat saatjat, mis annaks segatava raadiolokaatori operaatorile võimalikult vähem arusaadava ja kõike muud varjutava signaali. Niisuguse segajaga arvasidki inglise operaatorid tegemist olevat, kui 26. veebruaril 1942. aastal mürade tase nende jaamades tõusis ennenägematult kõrgeks. Oli selge, et mürad sisenesid antennist ning võidi ligikaudselt määrata isegi segava saatja koordinaadid. Koguti andmeid paljudest jaamadest, et välja selgitada segaja asukoht ja teha see teatavaks pommituslennuväele, kuid armee operatiiv-uurimisgrupis töötav teadlane J. S. Hey pidi tegevusvalmeid lendureid siiski veenma, et tundmatut raadiojaama ei saa likvideerida. Segajaks osutus seekord Päike ja nii said alguse J. S. Hey väljapaistvad raadioastronoomia-alased uurimused, mille tulemused avaldati alles pärast sõja lõppu. Täpsemalt oli eelkirjeldatud juhul tegemist Päikese pinna üksikute osade kõrgendatud aktiivsusega, mis vahel miljoneid kordi ületab rahuliku Päikese raadiokiirguse.

Selle huvitava küsimuse kallal töötasid taevakehade raadiokiirguse avastajad mitu aastat täielikus pimeduses. Vaevalt et perioodil 1932—1940 leidus astronoome, kes oleksid jälginud raadiotehnilisi ajakirju ja osanud ette aimata selle uue vaatlusmeetodi tulevikku. 1939. aastal alanud sõda intensiivistas kaudselt küll uurimistöid raadiolokatsiooni ja ultralühilaineside alal, kuid need andmed jäid kitsa eriteadlaste ja sõjaväelaste ringkondade käsutusse. 1946. aastal saatis nende tööde «lahtisalasta-

mist» elevus ja üllatus astronoomide hulgas. «Optilised» astronoomid ei suutnud harjuda mõttega, et oli tekkinud võimalus uurida kosmost hoopis uute meetoditega, läbi teise akna. Raadioastronoomia arengukiirus ja uudsus hämmastasid, aga teaduslikud publikatsioonid olid hoopis iselaadsed: neis sisaldus rohkem üksikasju raadioelektroonikast kui taevakehadest, vaatlustulemused ise olid katkendlikud ning mõnikord vasturääkivadki.

Teise maailmasõja lõpust möödunud kakskümmend aastat on olnud raadioastronoomia erakordse arengu aastateks. Raadiolained tõid üha uusi ja uusi andmeid ning avastusi, raadioteleskoobid tungisid selliste kaugusteni, mis tavalistele optilistele teleskoopidele jäid täiesti kättesaamatuks. Raadioastronoomia kujundas uue pildi maailmaruumist, ta sundis meid korrigeerima arvamust, et optiliste riistade abil loodud taevapilt on ainuõige. Nüüd peame juba taevakaarte saatma kommentaaridega: nii näeme seda taevaala kas nähtavas spektriosas või raadiodiapasoonis. Raadiovaatluste tekkimine lõpetas optiliste vaatluste hegemoonia Maal. Mõnedki arusaamad muutusid, aga mõnegi uue tõe kohta võis väita, et see on lausa silmanähtav ning imelik, miks sellest juba ammu aru ei saadud.

● raadioreflektorid

Raadioteleskoopideks on hakatud nimetama riistu, millega saab avastada ja mõõta kosmose raadiokiirgust. Neil on tavalistele optilistele teleskoopidele üsna lähedased põhimõttelised skeemid ja ülesanded. Optilistel teleskoopidel oli põhiosaks kas peegel või läätsobjektiiv, mis haaras uuritavalt objektilt saabuvat kiirgust ja koondas selle fookuses olevale kiirgusvastuvõtjale, raadioteleskoopidel on samaks ülesandeks kas keeruline antennistik või jälle metallpeegel, mille fookuses asub vastuvõtuantenn ise.

Pikemalainelises osas kasutatavad paljuelemendilised antennid koosnevad enamikus suurest hulgast üksikantennidest, niinimetatud poollainedipoolidest, koos täiendavate passiivsete elementidega. Iga poollainedipool on vastuvõetava raadiolaine poole lainepikkuse suurune metallvarras, seega on antenn häälestatud kindla lainepikku-

sega raadiokiirguse vastuvõtuks.* Liitantenni kõigis dipoolides indutseeritavad pinged liidetakse vastuvõtja sisendis samas faasis.

Raadioastronoomia algpäevil esikohal seisnud paljuelemendilised antennistikud, mida kasutati pikemalainelise kosmilise raadiokiirguse vastuvõtuks, loovutasid üsna varsti koha reflektorantennidele. Nende leviku tingis huvi vaatluste vastu lühematel lainepikkustel. Niisuguste raadioteleskoopide ehituses võib leida palju ühiseid jooni optiliste teleskoopidega — eks ole ju tegemist raadiovaatluste lainepikkuse lähenemisega optiliste vaatluste lainepikkusele. Siingi on reflektori põhiülesandeks võimalikult suure pinnaga koguda raadiokiirgust ning suunata fookuses asuvale vastuvõtuantennile, täpselt nagu optilises reflektorteleskoobis paraboolne peapeegel koondab valguskiired fookuses asuvale kiirgusvastuvõtjale. Suuruste vahekorra määrab lainepikkuste suhe: soovides, et raadioreflektori «optilised» omadused enam-vähem võrduksid optilise reflektori omadustega, peaksid nende mõõtmed olema samas vahekorras — mõlemate juures oleneb lahutusvõime vaid kiirguse lainepikkusest ja reflektori läbimõõdust. Niisiis, lugedes optiliste vaatluste keskseks lainepikkuseks 0,5μm ja raadiovaatlustel 50 cm, peaksid raadioreflektorid olema miljon korda suurema läbimõõduga. Et nad seda muidugi olla ei saa, siis ilmselt tuleb leppida ka väiksema lahutusvõimega.

Põhimõtteliselt kõlbakski raadiovaatlusteks suur optiline reflektor, näiteks Palomari 5 m gigant, kuid eelnimetatud lainepikkuste mastaabist tuleneb, et ta kujutaks endast väga väikest raadioteleskoopi. Teiselt poolt kehtib sama mastaap (pööratult) peegelpinna vajaliku täpsuse

---

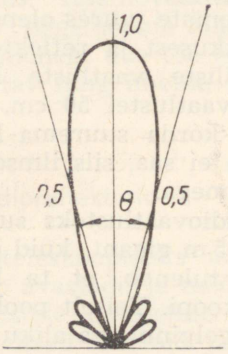
* Raadiosageduslikust kiirgusest ja sellega seotud aparatuurist rääkides kasutatakse vaheldumisi elektromagnetiliste võnkumiste lainepikkuse ja sageduse väärtusi. Siinkohal olgu kergemaks orienteerumiseks antud lihtne üleminekuvalem, mis seob lainepikkust λ meetrites ja sagedust f megahertsides:

$$\lambda_{(m)} = \frac{300}{f_{(MHz)}} \text{ ehk } f_{(MHz)} = \frac{300}{\lambda_{(m)}}.$$

Tuletame ka meelde, et ultralühilaine diapasooni piires (1 mm kuni 10 m ehk 300 000 MHz kuni 30 MHz) kannab lainepikkuste vahemik 1 kuni 10 meetrit ehk 300 kuni 30 MHz meeterlainete nimetust, laineid 10 cm kuni 1 meeter (3000 kuni 300 MHz) nimetatakse detsimeeterlaineteks ja 1 kuni 10 cm (30 000 kuni 3000 MHz) sentimeeterlaineteks.

kohta: reflektori pinna vajalik täpsus peab olema murdosa peegeldava kiirguse lainepikkusest. Tuleb välja, et optiline peegel on raadiolainete peegeldamiseks asjatult vajalikust miljon korda täpsemalt tehtud. Raadioteleskoobi antenni paraboolpeegel tuleb teha suurem ja väiksema täpsusega, näiteks metall-lehtedest või isegi metallvõrgust.

Veel erinevad raadioteleskoobid optilistest selle poolest, et raadioteleskoobi puhul koondatakse kogu raadiokiirgus ühele tundlikule elemendile paraboloidi fookuses. Informatsiooni ei registreerita mitte pildina, vaid intensiivsuse mõõtmistulemusena. Selles mõttes on raadioteleskoobi optiline analoog teleskoop fotomeetriga, mida ilma giidi abita taevasse suuname ja kõige ettejuhtuva — tähtede, fooni, udude, täheparvede heledust mõõdame. Kasutades optilise astronoomia terminoloogiat, võiks öelda, et raadioteleskoop on taeva raadiokiirguse elektrofotomeeter.



Joonis 71. Raadioteleskoobi antenni suunadiagramm.

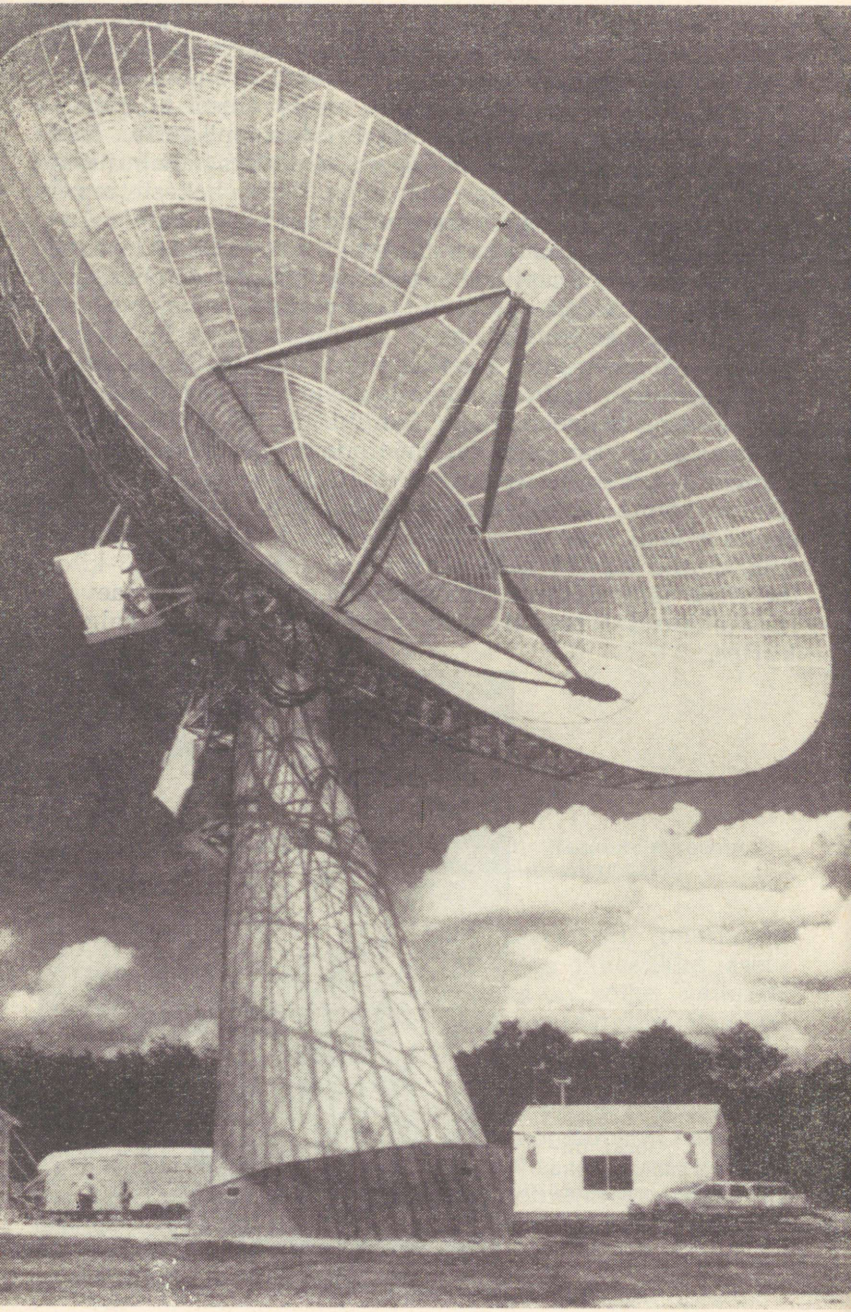
Lahutusvõime all mõistetakse teatavasti teleskoobi võimet eraldada teineteisest kaht väga lähestikku asetsevat kiirgusallikat, selle mõõduks on kõige väiksem nurkkaugus, mille all neid kehi veel eraldatakse. Raadioteleskoopide lahutusvõime määravad nende antennide suunaomadused. Antenn võtab maksimaalselt kiirgust vastu teatud kindlast suunast (peegli teljelt), selle kõrvalt tuleva kiirguse suhtes vastuvõtuomadused halvenevad. Nurk Θ (joonis 71), mis saadakse 50%-ni (maksimaalsest tundlikkusest) langenud tundlikkusega määratud suundade vahel, iseloomustab raadioteleskoobi suunatust.

Mida väiksem on see nurk, seda teravama «pilguga» on raadioteleskoop ja seda väiksema nurkkaugusega objekte ta lahutab. Joonisel 71 esitatud suunadiagrammil näeme peale põhilise diagrammilehekese veel väikesi külglehekesi, mis tekivad raadiolainete difraktsiooni tõttu. Nad on analoogilised optilise teleskoobi fookuses tähekujutist ümbritsevate difraktsioonirõngastega. Külglehekeste arvel võivad raadioteleskoopidesse tungida valesignaalid. Antenni suunatus kasvab antenni efektiivse läbimõõdu suurendamise ja lainepikkuse lühendamisega. 10-meetrise läbimõõduga peegli suunatus lainepikkusel 1 meeter on 6°, lainepikkusel 10 cm aga 0°,6 (36′).

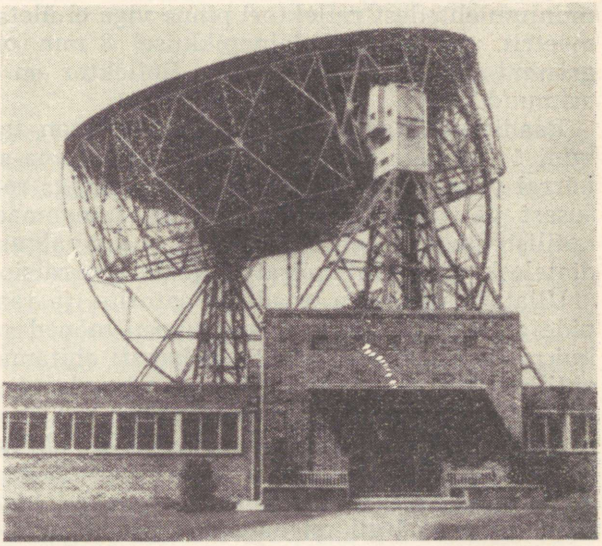
Nagu näha, kerkib teleskoopide peeglite läbimõõtude suurendamise vajadus raadioastronoomias teravamalt üles kui optilises astronoomias. Lahutusvõimed jäävad üsna madalaks, ehkki peegliläbimõõtudega jõutakse mitmekümnemeetriste kolossaalsete metallkonstruktsioonideni. Lahutusvõime näitaks nagu taevast pilti maaliva astronoomi pintsli suurust ja raadiotaeva pilt kujuneb optilise filigraantöö kõrval üsna jämedajooneliseks. Isegi 3-kilomeetrise läbimõõduga raadioteleskoop ei näeks taevast lainepikkusel 1 meeter teravamini kui inimsilm valguskiirtes.



Joonis 72. Gorki ülikooli raadiofüüsika instituudi reflektor-raadioteleskoop.



Kõige eelistatavamaks raadioteleskoopide liigiks on kahes teljes pööratavad reflektorid (joonised 72, 73, 74). Eriti vajalikud on reflektorid tähtede ja tähtedevahelise mateeria uurimisel lühematel lainepikkustel, mille puhul võrdselt olulised on nii lahutusvõime ja küündivus kui ka paindlik suunamis- ja jälgimissüsteem. Arusaadavalt on suurte reflektorite maksumus suurem kui mitmeelemendilistel meeterlainete antennidel, ent seda peaks kompenseerima nende mitmekülgsus ning pikem kasutatavus. Väga suurte paraboolantennide ehitamine on raske insener-tehniline ülesanne, sest lisaks muule peab ka neid saama suunata mistahes taevaossa. Mõnikord ollakse sunnitud viimasest loobuma, kuid muidugi pole liikumatute antennide kasutamisvõimalused sugugi nii avarad. Kümnemeetriste läbimõõtudega metallist hiiglakausse kaheteljeliselt monteerida ja ära hoida mistahes asendis nende läbipaindumine rohkem kui murdosa lainepikkuse võrra — selle



Joonis 74. Jodrell Banki observatooriumi 76 m raadioteleskoop.

◀ Joonis 73. 28 m raadioreflektor USA mereväeobservatooriumis.

tõkke taha jääb praegu seisma liikuvate antennidega raadioteleskoopide läbimõõtude suurendamine. Raadioteleskoopide konstruktorite ees seisvad põhiraskused erinevad siiski optiliste teleskoopide loojate muredest. Raadioteleskoobid on näiteks liiga suured, et neid katta, ja seepärast tõusevad esiplaanile ka sellised, esimesel pilgul vähetähtsad tegurid nagu võitlus tuule surve ning sellest tekkivate vibratsioonidega ja jäätumisega.

Reflektorite valmistamise täpsus ja monteerimise jäikus määratletakse tavaliselt lubatava veaga alla $^1/_8$ lainepikkusest nagu optilistel reflektoritelgi, kuid ka veerandi lainepikkuseni ulatuv viga pole veel väga suur. Samuti võib reflektori pind ilma erilise kahjuta sisaldada avasid läbimõõdus $^1/_4$ lainepikkusest või olla tehtud vastavast traatvõrgust, mida tihti ära kasutatakse tuule rõhu vähendamiseks.

Parima suhtelise täpsusega on NSV Liidu Teaduste Akadeemia Füüsikainstituudi 22-meetrine raadioteleskoop Serpuhhovis. Justeerimisseadmetele kinnitatud alumiiniumlehtedest reflektori pinna viga ei ületa $\pm 0{,}5$ millimeetrit, minimaalsel lainepikkusel 8 mm on suunadiagrammi laius 2 kaareminutit. Reflektor on monteeritud asimuudiliselt.

Raadioreflektorite suhteliseks avaks on tavaliselt 1 : 4 kuni 1 : 2, kõige sagedamini 1 : 2,5; suurema suhtelise ava korral pole vaja antenni väga pika mastiga reflektori õõnsusest välja viia ja paranevad ka suunaomadused. Nagu optiliste nõguspeeglite puhul, nii on ka valgusjõuliste raadioteleskoopide väli piiratud koma-aberratsiooniga.

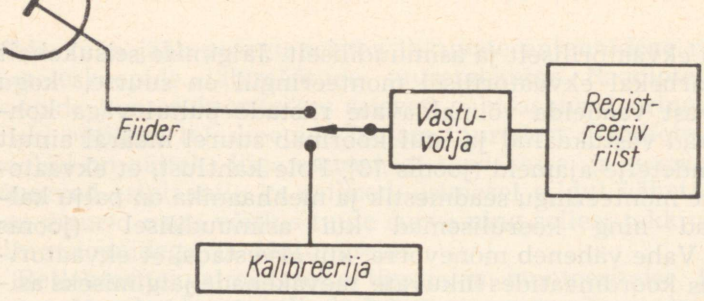
Üllatav analoogia raadiolokaatorite ja raadioteleskoopide antennide juures ilmnes uuesti mõned aastad tagasi, kui raadiokiirguse reflektoreid hakati ehitama Cassegraini optilise skeemi kohaselt. Kumer sekundaarpeegel suunab raadiokiirguse läbi suure nõgusa peapeegli keskele tehtud ava peegli taha, millega vabanetakse kõrgete antenni kandemastide püstitamisest peegli keskele ja muudetakse ka fookus eksperimentaatoreile paremini kättesaadavaks. Viimasel eesmärgil oli näiteks ette nähtud võimalus paljusid suuri peegleid peaaegu kummuli keerata, et siis antenne vahetada ja muid vajalikke seadistustöid teha.

Kõige vaieldavamaks küsimuseks reflektorite konstrueerimisel on nende monteeringu valik. Nagu optilise astronoomia riistu, nii võib ka raadioteleskoope montee-

rida ekvaatoriliselt ja asimuudiliselt. Jälgimise seisukohalt otstarbekal ekvaatorilisel monteeringul on suurte, kogu taevast vaadelda võimaldavate riistade puhul väga kohmakad vastukaalud ja tuul koormab suurel määral ainult käändetelje ajameid (joonis 73). Pole kahtlust, et ekvaatorilise monteeringu seadmestik ja mehhaanika on palju kallimad ning keerulisemad kui asimuudilisel (joonis 74). Vahe väheneb mõnevõrra, kui arvestada, et ekvaatorilistes koordinaatides liikuvate taevakehade jälgimiseks asimuudilise monteeringuga reflektoritega vajatakse koordinaatide teisendusseadet — täpset arvutusmehhanismi või elektronarvutit. Pealegi vajab ekvaatoriline monteering tähe jälgimiseks ainult ühte ühtlase kiirusega töötavat ajamit, mis riista pöörab ümber polaartelje taeva ööpäevase näiva pöörlemise kiirusega, asimuudiline monteering aga kahte ajamit (mõlemas teljes) väga suurtes piirides muudetava kiirusega. Seniidi ümbruses jääbki umbes 10-kraadise läbimõõduga taevaala asimuudiliselt monteeritud reflektoritele kättesaamatuks (jälgimisrežiimis).

● raadiokiirguse mõõtmine

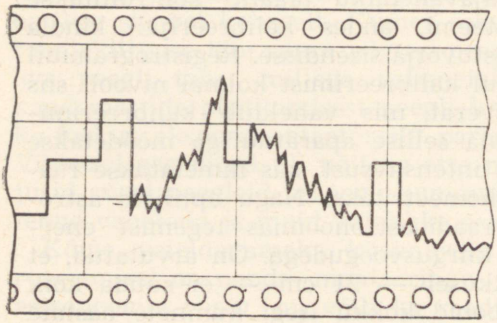
Raadioteleskoobi vastuvõtu-mõõtmisaparatuuri kõige lihtsam plokkskeem on toodud joonisel 75. Antenni poolt kogutud energia juhitakse kõrgsagedusliku ühenduskaabli (fiidri) kaudu vastuvõtjasse. Siin seda võimendatakse (vahepeal muudetakse ka sagedust) umbes 10^{12} korda (võimsuse järgi) ja siis detekteeritakse. Väljundpinge, mis vastab registreeritava raadiokiirguse sisendvõimsusele, mõõdetakse ja registreeritakse isekirjutava elektrimõõteriista abil. Teatud ajavahemiku tagant kontrollitakse vastuvõtu-mõõtmissüsteemi, andes kalibreerijalt kindla väärtusega signaali vastuvõtja sisendisse. Registrogrammil (joonis 76) näeme algul kalibreerimist kolmel nivool, siis mõõdetud signaali kõverat, mis vaheldub kalibreerimisega ühel nivool. Kuna sellise aparatuuriga mõõdetakse lihtsalt raadiokiirguse intensiivsust, siis nimetatakse raadioteleskoope ka raadiomeetriteks. Nagu optilises astronoomias, nii on ka raadioastronoomias tegemist energeetiliselt üliväikeste kiirgusvoogudega. On arvutatud, et huvitavaimal lainepikkusel — 21 cm — ei suuda kõik maailma raadioteleskoobid kokku isegi kümnete aastate



Joonis 75. Raadioteleskoobi mõõtmisaparatuuri plokkskeem.

jooksul koguda üht ergi kiirgusenergiat! Uhkusega võivad raadioastronoomid väita, et uusimad kujutlused meid ümbritsevast hiiglamõõdetega kosmilisest ruumist ja tema paljudest üksikobjektidest on loodud energiaportsjoni arvel, millest ei piisa sigareti otsast tuha maharaputamiseks!

Registrogrammi juurde kuuluvad veel lisaandmed, milledeta teadusliku väärtusega lõpptulemusi pole võimalik saada. Peale raadioteleskoopi ja vastuvõtjat ennast iseloomustavate andmete (suunatus, läbimõõt, lainepikkus jm.) tuleb vaatlused siduda taevakoordinaatide ning ajaga. Nagu kaasaegses optilises astronoomiaski, eriti elektrofotomeetrias, nii ka raadioteleskoopide puhul registreeritakse viimasel ajal vaatlusandmeid numbrilisel kujul trükkimise või perforeerimise teel. Asimuudiliste raadioteleskoopide keerulised juhtimissüsteemid loovad eeldused juhtimise ja mõõtmise automatiseerimiseks elektronarvutit sisaldava ühtse mõõtmis-informatsioonisüsteemi baasil.

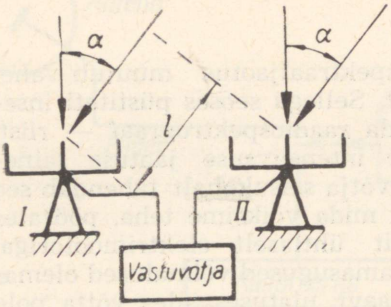


Joonis 76. Raadiokiirguse mõõtmise ja teleskoobi kalibreerimise registrogrammi näide.

Päikese raadiokiirguse spektraaljaotus muutub vahel üsna kiiresti ja ulatuslikult. Sellega seoses püstitati inseneride ette ülesanne ehitada raadiospektrograaf — riist, mis annaks raadiokiirguse intensiivsuse jaotuse lainepikkuste järgi. Raadiovastuvõtja seisukohalt tähendab see lihtsalt ümberhäälestamist, mida võiksime teha, pöörates näiteks pöördkondensaatorit ühtlaselt elektrimootoriga. Ka sentimeeterlainetel on samasugused võimalused olemas ja raadiospektrit ühe oktaavi ulatuses üles võtta pole raske. Esimene raadiospektrograaf ehitati 1950. aastal Austraalias, sellele järgnesid mitmed teised raadioobservatooriumid. Kahjuks on üsna raske luua antenne, mis oktaavilaiuses sagedusribas hästi töötaksid, ja katsel haarata raadiospektrograafiga kolme oktaavi laiust riba tuli kasutada kolme antenni kolme nn. panoraamvastuvõtjaga.

Kiirgusvastuvõtuseadmete lahutusvõime, nagu eespool selgitatud, sõltub üldiselt vaid nende mõõtmetest ja kiirguse lainepikkusest. Sel põhjusel kujunevad raadiodiapasooni antennid erakordselt suureks. Soovides saavutada silma lahutusvõimet (1′), peab antenni läbimõõt olema 3600 korda suurem vastuvõetavast lainepikkusest. On aga veel teine tee: kaks teineteisest 3600-kordse lainepikkuse kaugusele viidud antenni võivad anda samasuguse tulemuse. Taolise, raadiointerferomeetriks nimetatava seadme töötamisprintsiip on laenatud optikas tuntud Michelsoni interferomeetrilt. Esimese raadiointerferomeetri ehitasid Cambridge'is M. Ryle ja D. D. Vonberg juba 1946. aastal. See koosnes viiest traatvõrgu kohale paigutatud dipoolantennist ning temaga saadi mõõta Päikese laikude raadioläbimõõtusid.

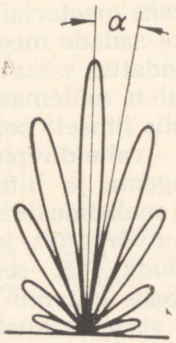
Asugu kaks meeterlainete antenni teineteisest üsna kaugel, näiteks sadade meetrite kaugusel. Mõlemad on kaablitega ühendatud sama vastuvõtjaga (joonis 77). Kui raadiolaine tuleb mõlemasse antenni korraga vertikaalselt, seniidist, siis ilmselt peavad mõlemates antennides indutseeritavad vahelduvpinged vastuvõtja sisendis faasis kokku langema ja liituma — selles suunas on antenni tundlikkus maksimaalne. Kui aga objekt on nihkunud teatud nurga α võrra (vt. joonis 77), siis võib kiirgus esimesse antenni jõuda just sellise hilinemisega l, et tekitatav pinge on teise antenni omaga vastasfaasis. Võnkumised vastuvõtja sisendis kustutavad teineteist ja järelikult on vertikaalist juba nurga α võrra erinevas suunas raadio-



Joonis 77. Raadiointerferomeetri töötamisskeem.

teleskoobi tundlikkus null. Edasisel nurga suurenemisel tekib jälle uus tundlikkuse maksimum, siis miinimum ja nii edasi. Suunadiagramm saab joonisel toodud kuju. Keskne leht on seejuures palju kitsam, kui ta oleks olnud antenne eraldi kasutades (võrrelge seda joonisega lk. 180). Lainepikkusel 1,5 meetrit ja antennidevahelisel kaugusel 450 meetrit oli interferomeetri iga lehekese nurklaius vaid 10′ (ühel antennil eraldi oleks olnud mitu kraadi). Suurteks raskusteks on muidugi lehekeste rohkearvulisus ja see, et lahutusvõime paraneb vaid antennide ühendussirge tasapinnas, ristsuunas jääb aga täiesti muutumatuks. Kirjeldatud lihtsaima interferomeetri arendustena on loodud veel palju keerulisemaid interferomeetrilisi süsteeme — mitmeantennilised ja ristikujulised interferomeetrid.

Austraalias ehitati Päikese detailseks uurimiseks 21 cm lainepikkusel töötav interferomeeter, mis koosneb kuuekümne neljast 5-meetrisest paraboolantennist. Antennid moodustavad kaks 400 meetri pikkust ristuvat sirget põhja-lõuna ja ida-lääne suundades. Saavutatud lahutusvõime



Joonis 78. Raadiointerferomeetri suunadiagramm.

40 kaaresekundit lubab juba väita, et Päikese raadiovaatluste detailsus on jõudnud silma optilise lahutusvõimeni — tõsi küll, väga suurte kulutuste ja tehniliste pingutustega. Ehitatakse aga veel suuremat paljukomponendilist antennisüsteemi raadioheliograafi nime all. Sellesse kuulub 96 paraboloidi, igaühe läbimõõt 13,5 meetrit. Need antennid asuvad 3-kilomeetrise läbimõõduga ringil ja kõiki saab elektriajamite ning automaatjuhtimisega hoida sünkroonselt Päikesele suunatuna. Oodatav lahutusvõime läheneb teatud mõõtmistel juba ühele kaaresekundile (teistel juhtudel piirdub küll ainult 100 kaaresekundiga). Seega saame niisugusel juhul kõnelda raadioteleskoopide lahutusvõime jõudmisest selliste nurksuurusteni, millest kaugemale võivad maapealsed optilised vaatlusriistad ulatuda vaid väga heades klimaatilistes tingimustes. Ainult atmosfääri häiriva mõju vältimine võib optilisi teleskoope päästa lüüasaamisest võistluses parema lahutusvõime eest. Jodrell Banki raadioobservatooriumis ongi vaadeldud taevast lahutusvõimega 0″,4 (lainepikkusel 72 cm). Ajakirjanduse andmeil kavandatakse USA-s veel nn. mammut-raadiointerferomeetri ehitamist. See koosneks sajast paraboolreflektorist, igaüks 28 m läbimõõduga. Ehituskulusid hinnatakse umbes 40 miljonile dollarile.

Interferomeetrid suurendavad küll raadiovaatluste lahutusvõimet, kuid sellest üksi ei piisa. Riista küündivuse määrab ikkagi reaalsete antennide efektiivsete pindalade summa ja nõrkade kiirgusallikate jälgimiseks vajatakse samaaegselt kõrge lahutusvõimega ka suurte pindaladega antenne.

1963. aasta paiku valmis Jodrell Banki observatooriumis raadioteleskoop, mis võib ellipsikujulise paraboolreflektoriga (mõõtmed 25×37,5 meetrit) töötada üksinda 10 cm ja 10 m vahelistel lainepikkustel, kuid ka koos suure 76 m teleskoobiga interferomeetrina lainepikkustel alla 10 cm. Antenn on monteeritud asimuudiliselt ja ta pööramiseks kasutatavate ajamite võimsus on mitukümmend hobujõudu. Selle teleskoobi juhtimissüsteemis töötab firma «Ferranti» elektronarvuti «Argus 100». «Argus»-arvutite seeria on üldse määratud juhtimisülesannete täitmiseks: üks selle «perekonna» liikmeist juhib keemiatehast, teine elektrijaama, mitmed tegelevad reaktiivmürskude suunamisega. Kõne all olevasse masinasse antakse andmed vaatlusobjekti kohta galaktilistes või ekvaatorilistes koor-

dinaatides, masin teisendab need teleskoobile kohasteks asimuudilisteks koordinaatideks ning jagab käsklused ajamitele. Suunamisel opereeritakse täpsusega 20 kaaresekundit. Elektronarvuti võtab vastu ja töötleb esialgselt vaatlustulemusi, kuid hiljem annab need üle suuremale «Atlas»-tüüpi masinale Manchesteri ülikoolis.

● raadiokiir kompab taevakehi

Raadiolokatsioonitehnika arenes Teise maailmasõja päevil kiiresti üha suuremate kauguste ületamise ja kõrgemate täpsuste saavutamise suunas. Sel perioodil tekkiski raadioinseneridel mõte üritada raadiokiirega kompida taevakehi. Loomulikult tuli esmajoones kõne alla meie lähim kaaslane Kuu. 1943. aastal tõestasid nõukogude teadlased, akadeemikud L. I. Mandelstam ja N. D. Papaleksi teoreetiliselt Kuu raadiolokatsiooni võimalikkuse. See oli esimene raadioastronoomia-alane uurimus Nõukogude Liidus. Teoks tehti Kuu raadiolokatsioon 1946. aastal peaaegu samaaegselt De Witti ja Stodola poolt USA-s ja Z. Bay poolt Ungaris. Kuu suunas teele saadetud raadiosignaali «kaja» tuli oodata umbes 2,5 sekundit, selle põhjal arvutatud kaugus langes kokku astronoomia andmetega. USA sõjaväe sidekorpus kasutas 111,5-megahertsise lokatsioonisignaali vastuvõtuks suurt, 64 dipoolist koosnevat liitantenni. Saatja hetkvõimsus oli 3 kW. Sellise aparatuuriga loodeti Kuult saada umbes 100 korda müra ületav peegeldussignaal, kuid ootus läks tõeks vaid üksikjuhtudel, aeg-ajalt aga signaal sumbus ja muutus täiesti tabamatuks. Tegemist oli efektidega Maa ionosfääris. Hiljem korraldati just nende efektide vaatlemiseks Austraalias Kuu raadiolokatsioon veel madalamal sagedusel (umbes 20 MHz), milleks kasutati ära endise ringhäälingujaama 100-kilovatist saatjat. Pikemaajalised eksperimendid tõestasid, et tegemist on ühe ionosfäärikihi poolt tekitatud ekraneerimisega, kuigi atmosfäärifüüsikale teadaolevate andmete kohaselt niisugust nähtust ei oodatud ega suudetud seletada. Niisiis jõuti raadioastronoomiliste vaatlustega geofüüsikalise avastuseni.

Kuu raadiolokatsiooni-uurimised olid tagasihoidlikust teaduslikust väärtusest hoolimata üsna suure praktilise tähtsusega. Selgus, et sideks peegeldusega Kuult on pari-

mad sagedusmodulatsiooniga sentimeeterlainesignaalid. 1958. aastal õnnestus sel teel luua ultralühilaine-raadioside New Jersey (USA) ja Bonni (SFV) vahel lainetel 108 MHz ja 144 MHz. 1959. aasta algul järgnes ühendus Kuu kaudu USA ja Hollandi vahel (lainepikkusel 2 meetrit) ning hiljem palju analoogilisi eksperimente. Praegu on ultralühilaine-kaugside peegeldusega Kuult muutunud juba jõukohaseks ka raadioamatööridele. Teiselt poolt on raadiosignaali kulgemisaja kaudu võimalik määrata Kuu pinna kaugust observatooriumist 1 km täpsusega, mis võib osutuda kasulikuks astronoomidele, geofüüsikutele ja geodeetidele.

Eksperimendil endal oli astronoomia metoodikas põhimõtteline tähtsus: jättes arvestamata eksperimendid maapinnale jõudnud meteoriitidega, oli see esimene astronoomiaeksperiment taevakeha osavõtul. Esmakordselt oli loodud kontakt maavälise kehaga.

Raadioastronoomia haruks loetav raadiolokatsiooni-astronoomia arenes aegamööda. Katsetati nii mõnegi päikesesüsteemi taevakeha lokatsiooniga, kuid paljudel juhtudel jäi saatjate võimsusest ja vastuvõtjate tundlikkusest väheks. Mõningat edu siiski saavutati. Esmajoones pakkus huvi Päikese ja Veenuse raadiokompimise katsetamine.

Paljude planeetide pöörlemisperioodi kindlaksmääramine on jõukohane isegi amatöörastronoomidele. Selleks on vaja vaid hoolsaid vaatlusi väikese teleskoobiga ja kronomeetrit aja mõõtmiseks. Ööpäeva suurus oligi juba üsna kõrge täpsusega teada kõigi planeetide kohta, välja arvatud Neptuun, Pluuto ja Veenus. Neptuun ja Pluuto asuvad väga kaugel, meie lähimat naabrit Veenust aga katab tihe pilvekiht, mis varjab kõik pinnadetailid. Veenuse pöörlemisperioodi on püütud küll korduvalt mitmesuguste kaudsete võtetega määrata, kuid usaldatavaid tulemusi siiani polnud.

Uued võimalused tekkisid alles seoses raadiolokatsiooniga. Liikuvalt kehalt peegeldunud raadiosignaal on pisut teistsuguse sagedusega kui väljasaadetud signaal ja sageduste vahe vastab keha liikumiskiirusele. Pöörlemisel aga Veenuse üks serv läheneb ja teine eemaldub meist teatud kiirusega — see peaks kajastuma ka raadiolokaatorisse tagasipeegelduvas impulsis. Alates 1958. aastast tehti üsna mitu katset Veenuse raadiolokatsiooniks, aga tulemused

polnud kuigi edukad. «Kaja» registreeriti, ent astronoomiliste eesmärkide saavutamiseks vajaliku mõõtmistehnilise täpsuseni siiski ei jõutud.

Päikese enda raadiokiirguse tõttu vajati ta raadiolokatsiooniks umbes 100 korda tugevamat signaali kui planeetide korral. Optimaalne sagedus oleks sellel signaalil 30 MHz piires. 1958. ja 1959. aastal saatsidki Stanfordi ülikooli (USA) raadiolokaatori antennid 30-sekundilisi impulsse 25,6 MHz sagedusel Päikese suunas. 15-minutilise saateseansi järel jäädi ootama — 300 miljoni kilomeetri läbimiseks kulutavad impulsid 1000 sekundit. Vastus mattus kahjuks müradesse (saatja võimsus oli vaid 40 kW), kuid kirjutati siiski üles ja anti analüüsimiseks elektronarvutisse IBM-797. Viimasel tuli kaua töötada, võrrelda üleskirjutist saatega, arvutada korrelatsioonikarakteristikuid jne. Alles järgmisel aastal võidi öelda, et tõenäoliselt peegeldus signaal 1,7 Päikese nähtava raadiuse kauguselt, mis oli kooskõlas ka arvutustega. Niisiis «nägi» raadiolokaator taevas 1,7 korda suuremat Päikest. Hiljem Massachusettsi tehnoloogiainstituudis spetsiaalselt ehitatud Päikese-raadiolokaatori antennistik sisaldas 1528 dipooli 3,6 ha suurusel maa-alal ja saatja andis 38 MHz-l keskmist võimsust 500 kW.

1961. aasta aprillis viidi Nõukogude Liidus NSV Liidu TA Raadiotehnika ja Elektroonika Instituudi juhtimisel läbi ka Veenuse raadiolokatsioon, millest esialgsed teated avaldati ajakirjanduses sama aasta maikuul. Põhjalik andmete läbitöötamine ja tulemuste analüüs kestis kauem, mistõttu lõplikud resultaadid publitseeriti eriajakirjades hiljem. Eksperimendi põhiliseks ülesandeks oli astronoomilise pikkusühiku (kaugus Päike-Maa) täpsustamine, Veenuse pöörlemisperioodi hindamine ja andmete saamine Veenuse pinna kohta. Siinkohal tuleb märkida, et kuni viimase ajani oli astronoomiline ühik ja seega kõik tema abil päikesesüsteemis määratud kaugused antud küllalt suure veaga — nagu nüüd selgus, 10^{-3} ehk 0,1 % suurusjärgus. Eriti lubamatu on selline madal täpsus planeetidevaheliste kosmoselaevade juhtimisel. Veenuse pöörlemisperioodi hinnati mitut moodi — vahemikus 24 tundi kuni 225 ööpäeva.

Veenuse raadiolokatsiooniks valitud ajal oli kaugus Maa-Veenus minimaalne (nn. alumine ühendus) ja moodustas umbes 45 miljonit kilomeetrit ehk 120 korda roh-

kem kui kaugus Kuuni. Raadiolokaatori saatevõimsuse tihedus umbes 700 megahertsil oli 250 miljonit vatti ruuminurga ühikusse (steradiaani). Kogu Veenuse pinnale langes sel juhul 15 vatti. Saadet teostati 5-minutiliste seanssidena, mille järel antenn lülitati vastuvõtja külge. Magnetofonilindile salvestatud signaali analüüsiti hiljem mürafoonist väiksemate signaalide uurimiseks määratud spetsiaalse analüsaatoriga.

Peegeldunud signaali täpsel uurimisel lahutati ta kõigepealt kaheks komponendiks: kitsas- ja lairibaliseks, laiustega vastavalt umbes 4 Hz ja 400 Hz. Kitsasribalise signaali põhjal leiti, et Veenuse peegeldamiskoefitsient on umbes 8%, võrreldes juhuga, kui Veenuse asemel oleks olnud niisama suur hästi juhtiv sile sfäär.

Astronoomilise ühiku arvväärtus täpsustati planeetide kiiruste kaudu, mis, väljendatuna astronoomilistes ühikutes sekundis, on teada küllalt kõrge täpsusega. Vaatlustes seoti aga Veenuse liikumiskiirus signaalile tekitatava Doppleri efektiga. Arvutuste tulemusena saadi astronoomilise ühiku väärtuseks 149 599 280 km. Otsene arvutuslik ruutkeskmine viga jäi seejuures 300 km piiridesse, kuid sellele lisandusid veel oletatavad süstemaatilised vead — eksperimendi kordamine 1962. ja 1964. a. andiski lõpptulemuseks 149 598 000 ± 400 km. Heites võrdlemiseks siinkohal pilgu tagasi astronoomilise ühiku varasematele määramiskatsetele, tuleb märkida, et kõik vaatluste põhjal tehtud arvutused andsid tulemused (149,4 kuni 149,55 miljonit km), mis ligikaudu vastasid rahvusvahelise astronoomiaunioon poolt 1896. aastal Pariisis kokkuleppeliselt aluseks võetud väärtusele, kusjuures õige väärtus 149,598 miljonit km ei jäänud ühelgi juhul ka veaga määratud piiridesse. Aastail 1958—1959 teostati Lincolni laboratooriumis USA-s ja Jodrell Bankis Inglismaal astronoomilise ühiku raadiolokatsioonilised mõõtmised, kuid mõlemal juhul osutusid tulemused veelgi ekslikumateks, erinedes ülalmainitust enam kui 100 000 km võrra. Alles 1961. aastal Jodrell Banki, Lincolni laboratooriumi ja Kalifornia ülikooli poolt korratud katsed andsid tulemustena samuti ca 149,59 miljonit kilomeetrit. Üldse paranes astronoomilise ühiku määramistäpsus raadiolokatsioonikatsetega tuhat korda.

Lairibalise signaalikomponendi päritolu selgitamisel jäi üle vaid oletada, et ta tekkimine on tingitud peegeldumi-

sest pöörlevalt Veenuselt. Oletades, et Veenuse pinna peegelduslikud omadused ei erine Kuu omadest, saadi kitsas- ja lairibalise komponendi võrdlemise alusel pöörlemisperioodiks kindlasti üle 100 ööpäeva, eksperimendi kordamisel 1964. a. õnnestus seda täpsustada väärtuseni 230 ± 25 ööpäeva. Samal aastal said USA teadlased tulemuseks 247 ± 5, 1966. a. aga veel täpsemalt $242{,}6 \pm 0{,}6$ ööpäeva. Veenuse pöörlemine on suunatud vastupidiselt tiirlemisele ümber Päikese, pöörlemisperiood on aga väga lähedane tiirlemisperioodile (225 päeva).

1962. aasta novembrikuus viisid nõukogude raadiofüüsikud ja -astronoomid Veenuse raadiolokatsiooni kõrval esmakordselt inimkonna ajaloos läbi ka raadioside peegeldusega Veenuselt. Maalt saadeti telegraafikoodis signaalid Veenusele ning naasnud signaalid püüti uuesti vastuvõtjaga kinni — sõnad läbisid planeetidevahelises ruumis ligi 85 000 kilomeetrini ulatuva teepikkuse.

Marsi raadiolokatsioon korraldati NSV Liidus ja USA-s 1963. aastal. USA raadiolokaatori saatja võimsus oli 100 kilovatti, Marsi pinnale langes umbes 1 vatt ja tagasi vastuvõtjasse jõudis 10^{-21} vatti. Peegeldunud signaali tuli oodata 11 minutit. Antenni läbimõõt oli 28 meetrit ning töötati sagedusel 2388 MHz, antenni Marsile suunamiseks ja planeedi jälgimiseks töötas elektronarvuti, seda kontrollis saateantenniga ühisel statiivil seisev televisiooniteleskoop, mille kujutist juhtimiskeskuses vaadeldi. Üldjoontes võib Marsi raadiopeegeldusvõimet lugeda Kuust paremaks, kuid Veenusest halvemaks. Raadiokiirega on planeet Maalt juba kombitud ka Merkuuri ja Jupiteri, viimasel ajal kasutatakse raadiolokatsiooni juba planeetide pinnal valitsevate tingimuste uurimiseks.

Igasuguses suuruses meteoore langeb Maale ööpäevas kokku küllalt palju — umbes 10 miljardit, kuid enamikus on nad väga väikesed ja kaaluvad kokku vaid ühe tonni. Teatud aastaaegadel võib meteooride sagedus tõusta kümne- ja isegi sajakordseks nn. meteoorivoolude arvel, mis kestavad mõnest tunnist kuni mõne päevani. Meteoori lendamisel 80 ... 120 km kõrgusel ionosfääris põrkab ta kokku õhumolekulidega ja kuumeneb. Kuumenedes aga eralduvad meteoori pinnalt aatomid, mis pommitavad lähedal seisvaid õhumolekule. Eraldub soojust, toimub aatomite ergastamine ja ionisatsioon. Ergastatud aatomid võivad kiirata valguskvante ning moodustavad sel viisil me-

teoori nähtava jälje. Ionisatsioonijälge saab aga avastada raadiomeetoditega, näiteks raadiolokaatoriga. Tuleb välja, et isegi siis, kui paljud väikesed meteoorid nähtavat valgusjälge üldse ei jäta, on tundlike raadiolokaatorite abil nende ionisatsioonijälg siiski märgatav. Silmaga võib tavaliselt näha paari-kolme meteoori tunnis, raadiolokaatoriga aga loendada sadu. Kaasaegsed raadiolokaatorid on nii tundlikud, et neile on kättesaadavad 16-nda tähesuurusega meteoorid, need on peaaegu 10 000 korda väiksema heledusega kui kõige nõrgemad silmaga nähtavad tähed.

Süstemaatilised meteooride raadiovaatlused algasid 1946. aastal. Ööl vastu 10. oktoobrit lõikas Maa järjekordselt Giacobini-Zinneri komeedi orbiiti: ta kohtus drakoniididega — meteoorivooluga Draakoni tähtkujust. 1933. aastal oli seda sündmust saatnud väga tugev tähesadu; 1946. aastal oli oodata jälle erakordselt intensiivset drakoniidide voolu, kuid kahjuks langes see heleda kuuvalgusega ööle. Raadiolokaatoreid kuuvalgus ei seganud. Nõukogude teadlased S. J. Levin ja P. O. Tšetšik registreerisid sel ööl raadiokaja väga paljudelt meteooridelt, mis enamikus oleksid muidu jäänud märkamatuks. Sellest ajast peale kuuluvad järjekindlad meteooride raadiovaatlused paljude observatooriumide programmidesse. Nähtamatuid «langevaid tähti» kompimast ei keela raadiolokaatoreid ei päikesevalgus, udu ega vihm. Ilma nende abita poleks me võib-olla kunagi teada saanud, et mai- ja juulikuus langevad neist taevaaladest, kus asub Päike, igal aastal Maale rikkalikud tähesajud. On avastatud kümneid päevaseid meteoorivoolusid. Ammu tuntud meteoorivoolude kohta aga oleme saanud täpsemaid andmeid orbiidi, neisse kuuluvate kehade arvu ja muu kohta. Kõigel sellel on suur tähtsus ka atmosfäärifüüsikas, tulemusi kasutatakse lennuasjanduses, raketitehnikas ja kosmonautikas. Meteooride raadiolokatsioonivaatlused viisid muide raadioinsenerid huvitavale lahendusele ultralühilaine-kaugside alal. Kui raadiolokaatori signaal kulges ionisatsioonijäljeni ja sealt tagasi peegeldus, miks ei peaks siis seda signaali saama vastu võtta ka kusagil mujal?

Esimene meteoorne sidesüsteem loodi 1953. aastal Kanadas. Seda nimetati süsteemiks «Janet» (antiikrooma kahenäolise jumala Januse nime järgi). Teineteisest 1050 km kaugusel asuvad jaamad olid varustatud identse aparatuuriga. Saatjad kiirgasid pidevalt ruumi kandevlainet

30 . . . 50 MHz vahel valitud ja umbes 1 MHz võrra erinevatel sagedustel. Meteoori jälje ilmumisel võttis vastuvõtja vastu kõigepealt kandevsageduse ja kui selle tase ületas teatud miinimumi, avas juhtimisploki kaudu informatsioonile tee salvestist saatjasse. Täpselt samuti hakkas tööle ka teine jaam. Kui signaal vastuvõtjas langes allapoole teatud miinimumtaset (meteoori jälg kustus), katkestas juhtimissüsteem kohe ka informatsiooni üleandmise saatjasse. Arvestades, et meteooride jälgi ilmub küllalt tihti, võis üldine informatsiooni sisenemine ja väljumine toimuda peaaegu ühtlase keskmise kiirusega ning salvestusseade täitis ainult omamoodi puhvri osa. Üks raadiojaam sisaldas ligi 300 elektronlampi ning tarbis võimsust 1,7 kW, saatja võimsus oli 750 W.

Meteoorseid ultralühilaine-sideliine ehitati USA-s hiljem veel suuremate kauguste ületamiseks ning praegu pole nad sugugi haruldased. Nii kasvas meteooride raadiovaatlustest välja konkreetne rakenduslik sidemeetod ja tuleb imetleda teravmeelset teaduslik-tehnilist ideed, mis näivalt kasutu ja tühise meteooride põlemise praktiliselt ära kasutas.

● raadioastronoomia gigandid

Üks esimesi suuri ja kaua aega maailma suurimaks olnud raadioteleskoop asub Jodrell Banki raadioobservatooriumis Inglismaal. Observatooriumi direktoriks ja suure teleskoobi loojaks on tuntud ning suure rahvusvahelise autoriteediga teadlane Bernard Lovell. Riista konstrueeriti ja ehitati kokku umbes 7 aastat. Algul orienteeruti minimaalsele lainepikkusele üks meeter ja kavatseti valmistada peegeldav pind jämedast traatvõrgust, kuid 1951. aastal avastatud vesiniku spektri raadiojoon 21 cm lainepikkusel tõi ootamatult kaasa vajaduse korrektiivide järele, mis faktiliselt kujunes reflektori ümberprojekteerimiseks. Lõplikult tehti 76 m läbimõõduga ja suhtelise avaga 1:4 hiiglasuur nõguspeegel terasplekist, kusjuures 23-meetrise raadiusega keskosas on pinna täpsus ± 25 mm. Vastavalt loetakse ka kogu antenni suunadiagrammi laiuseks 27′ (lugedes minimaalseks lainepikkuseks pool meetrit) ja keskosal 15′ (lainepikkusel kuni 21 sentimeetrini).

Teleskoop monteeriti asimuudiliselt (joonis 74). Tema pööramiseks ümber vertikaaltelje on sajameetrise läbimõõduga ringikujulisel kahepaarilisel rööbasteel 12 vankrit, millel diametraalselt kõrguvad kaks 50-meetrist terastorni. Vankrite süsteem ja terastornid on ühendatud ringi keskpunkti läbivate ja seal asimutaalteljes kinnitatud metallkonstruktsioonidega. Üleval tornide vahel, tornidele toetuvatel pooltelgedel, asub reflektor ise.

Kuna peale puhta raadioastronoomia oli teleskoop ette nähtud ka raadiolokatsiooni-astronoomia ja raadiosideeksperimentide jaoks, siis varustati ta laiades piirides reguleeritava kiirusega elektriajamitega. Asimuudis pööratakse riista nelja rööbasteevankriga, kõrguses — tornide juures asuva kahe suure hammassektori abil. Jälgimise täpsus on 12′.

Antennipeegel on kokku keevitatud umbes 7000-st 2 mm paksusest terasplekist plaadist. Seest on ta valgeks värvitud. 1959. aasta suvel jätkus viiekümnele maalrile tööd mitmeks päevaks — tuli ju üle võõbata peaaegu poolehektariline pind. Pinda pole võimalik enam justeerida. Kuna oli seatud tingimuseks, et reflektorit võib pöörata peaaegu kummuli (nii et antennimasti tipp puudutaks maad), siis ümbritseti peegel veel tugeva terasvööga. Kiirgusvastuvõtuelement ise kinnitub keskse masti otsa ja teda saab reflektori kummuliasendis kergesti vahetada. Vastuvõtuaparatuur võib asuda kolmes kohas: väikeses peegli külge riputatud kabiinis, monteeringutornides ja 150 meetri kaugusel olevas juhtimiskeskuses. Viimases paikneb teleskoobi keskjuhtimispult ja analoogarvuti ekvaatoriliste koordinaatide teisendamiseks asimuudilisteks ja galaktiliste koordinaatide teisendamiseks ekvaatorilisteks.

Reflektor ise kaalub 700 t, kogu teleskoop aga umbes 2000 t. Kuni 15 m/s kiirusega tuul ei sega töötamist, üldse aga kannatab riist välja kuni 45 m/s ulatuva kiirusega tuult.

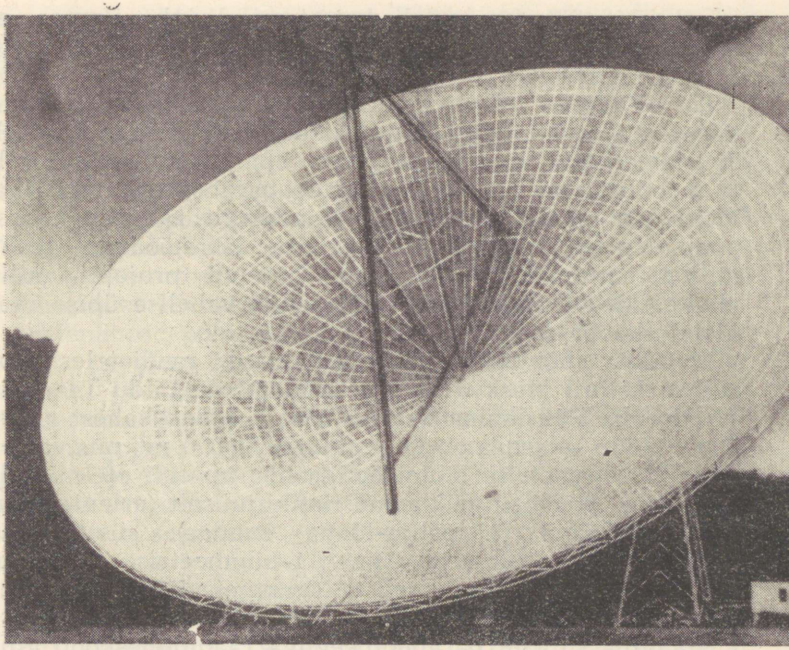
Jodrell Banki raadiokiirguse gigantsilma ehitamine läks mõnede hinnangute kohaselt maksma umbes 5 miljonit rubla. Kümnetes talle pühendatud artiklites ja astronoomiaraamatuis väideti, et vaevalt lähemal ajal julgetakse asuda suuremate instrumentide loomisele. Jodrell Banki hiiglateleskoop on osutanud raadioastronoomia arengule hindamatuid teeneid, olles universaalse instrumendina

rakendatud kõikvõimalike vaatluste ja eksperimentide läbiviimiseks. Tööprogrammi on kuulunud ka atmosfääri-füüsika- ja raadiolevi-alased vaatlused ning tehiskaaslaste ja kosmoselaevade jälgimine-juhtimine.

Jodrell Banki raadioteleskoobi läbimõõdu ületas 1962. aastal USA Green Banki raadioobservatooriumi uus hiiglariist. Selle paraboolantennipeegli läbimõõt oli viidud saja meetrini. Teleskoop projekteeriti ja ehitati kahe aastaga ning läks maksma 850 000 dollarit. Nii suurt riista ei julgenud insenerid enam ehitada kahes teljes pööratavana, vaid piirduti ainult antenni kallutamisvõimalusega ümber horisontaaltelje, mis on orienteeritud ida-lääne suunas (joonis 79). Praktiliselt toetub suur traatvõrgust nõguspeegel armatuuriga kahele ligi 30 meetri kõrgusele tornile ja täiendavalt nende vahelt kaarekujulise metallkonstruktsiooniga veel maapinnale. Et suunamisvõimalus on ainult piki meridiaani, ja sedagi mitte horisondini, siis tuleb oodata vaadeldava objekti ilmumist meridiaani kohale (kulminatsiooni). Ühelgi juhul ei saa objekti jälgida või teda üle ühe korra ööpäevas vaadelda. Mõnemillimeetriste silmadega alumiiniumvõrgust paraboloidi täpsus on paari sentimeetri ümber, fookus asub pinnast 43 meetri kõrgusel. Fookuseni on kahel harkis terasmastil tõstetud antenn-kiirgusvastuvõtja ise, maapinnast ulatub see ühes asendis 75 meetri kõrgusele. Kokku kaalub teleskoobi liikuv osa 500 tonni.

Piiratud võimalustega riista juhtimine (kättesaadava taevaosa mõttes) on püütud muuta võimalikult paindlikuks ja täpseks. Juhtimiskeskusest saab teda sujuvalt pöörata kahe kiirusega, peegli asend on teada 10 kaaresekundi täpsusega. Antenni suunadiagrammi laius on 750 MHz sagedusel 18′,5 ja 1400 MHz sagedusel 10 kaareminutit.

Green Banki suure raadioteleskoobi vaatlusprogrammi kuuluvad meie Galaktika ning galaktikaväliste objektide uurimine vesiniku raadiospektrijoonel 21 cm (1420 MHz), kus on vajalikud nii suur vastuvõtu-efektiivsus kui ka kõrge lahutusvõime. Umbes 10-kaareminutilise lahutusvõimega saab Linnuteest «joonistada» juba üsna detailse raadiopildi. Vesiniku täpsema jaotumise määramine aga tõotab uusi väärtuslikke andmeid galaktikate dünaamika uurimise alal. Väga huvitav on jälgida samal lainepikkusel kuumade tähtede atmosfääre.



Joonis 79. Green Banki observatooriumi 100 m raadioteleskoop.

Mõõdetud on ka Veenuse raadiokiirgust. Selle järgi määratud pinnatemperatuur lainepikkustel 21 ja 40 cm (600° K) erines mõnevõrra teistest mõõtmistest lühematel lainepikkustel. Saadi ka Veenuse raadiokiirguse spekter. Regulaarselt on vaadeldud Jupiteri ja isegi sellest 100 korda nõrgema raadioheledusega Saturni.

Armeenia TA raadiofüüsika ja elektroonika uurimisinstituudis on loodud veel suurema, originaalse skeemiga raadioteleskoobi projekt. Kahesajameetrise läbimõõduga sfääriline peapeegel on monteeritud liikumatult, kuid kaheksameetrise läbimõõduga sekundaarpeegli liigutamisega saab vastuvõtu suunda viia peegli teljest kuni 55° võrra kõrvale. Peapeegli efektiivne läbimõõt väheneb sellisel suunamisviisil umbes 60 meetrini. Reflektor koostatakse üksikutest metallplaatidest, mis mägedevahelises orus kinnitatakse betoonplaatidele, suunamine ja jälgimine automatiseeritakse. Selle omapärase hiigla-raadio-

teleskoobi töötava mudeli katsetamisel juba ilmnes, et mudel ise on üks maailma paremaid millimeeterlainete raadioteleskoope.

Ka Pulkovo observatooriumis ehitati juba aastaid tagasi huvitavalt lahendatud raadioreflektor. See koosneb 90 elemendist, mis paiknevad maapinnal kaarekujuliselt ja moodustavad 3×130 m suuruse paraboolse pinna riba. Mõni aeg tagasi aga arutati Hamburgis rahvusvahelisel nõupidamisel isegi 20-kilomeetrise läbimõõduga (kahe miljoni ruutmeetrise pindalaga) antenni projekti, mille nõukogude teadlased koostasid rahvusvahelise ühise raadioteleskoobi jaoks.

Maailma võimsamaid meeterlainete raadioteleskoope ehitati hiljuti Moskva lähedal Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia Füüsikainstituudile. See koosneb kahest ribast 1000×40 m — seega on kogupindala 80 000 m^2, mis vastab umbes 320-meetrise läbimõõduga nõguspeegli efektiivsele pindalale. Et ribad paiknevad ristikujuliselt (orienteeritutena ida-lääne ja põhja-lõuna suunas), siis vastab selle teleskoobi lahutusvõime 1-kilomeetrise reflektori omale. Arusaadavalt on riista suunamisvõimalused üsna piiratud.

Maailma suurim paraboolpeegliga raadioteleskoop asub praegu Arecibos Puertoriikos. Seda võiks iseloomustada kui suureks reflektoriks muudetud orgu. Peegli läbimõõt on 305 meetrit. Peenesilmaline terasvõrk ripub oru põhja kinnitatud püstpostide vahel, kõrgudes maapinnast mõnes kohas üle kümne meetri, mõnes kohas aga vaid kümmekond sentimeetrit (joonis 80). (Et mitte rikkuda paarikolme sentimeetri täpsuselt hoidetrossidega väljajusteeritud nõguspinda, tuleb remontijail muide peeglit mööda kõndida veesuuskadel.) Oru servale püstitatud kolme terastorni vahele (kõrgustega 80 meetrit ja üle 120 meetri) tõmmatud trossidel ripub peegli kohal 525-tonnine platvorm, kuhu kinnitub koondatud raadiokiirguse vastuvõtuantenn. Et peegel on sfääriline, siis nagu optilistes riistadeski, kannatab «raadiokujutis» sfäärilise aberratsiooni all. Tuletades meelde, et sfääriline aberratsioon avaldus peegli erinevate tsoonide fookuste erinevas asendis piki optilist telge, on selge, et vastuvõtuantenn tuli mööda peegli telge lihtsalt pikem teha — antenn ripubki platvormilt alla 32 meetri pikkuselt. Antennipeeglit ei saa igasse taevaossa suunata, kuid mõned võimalused on ka

siin ette nähtud. Juba taeva ööpäevase näiva liikumise tõttu käib teleskoobi kohalt seniidist läbi teatud taevasfääri joon, seda laiendatakse vastuvõtuantenni liigutamisega peegli teljelt kuni 20° võrra mõlemale poole. Seega muutub kättesaadavaks 40° laiune riba taevasfääril ning sama nurga ulatuses võib riistaga seniiti läbivaid taevakehasid ka jälgida.

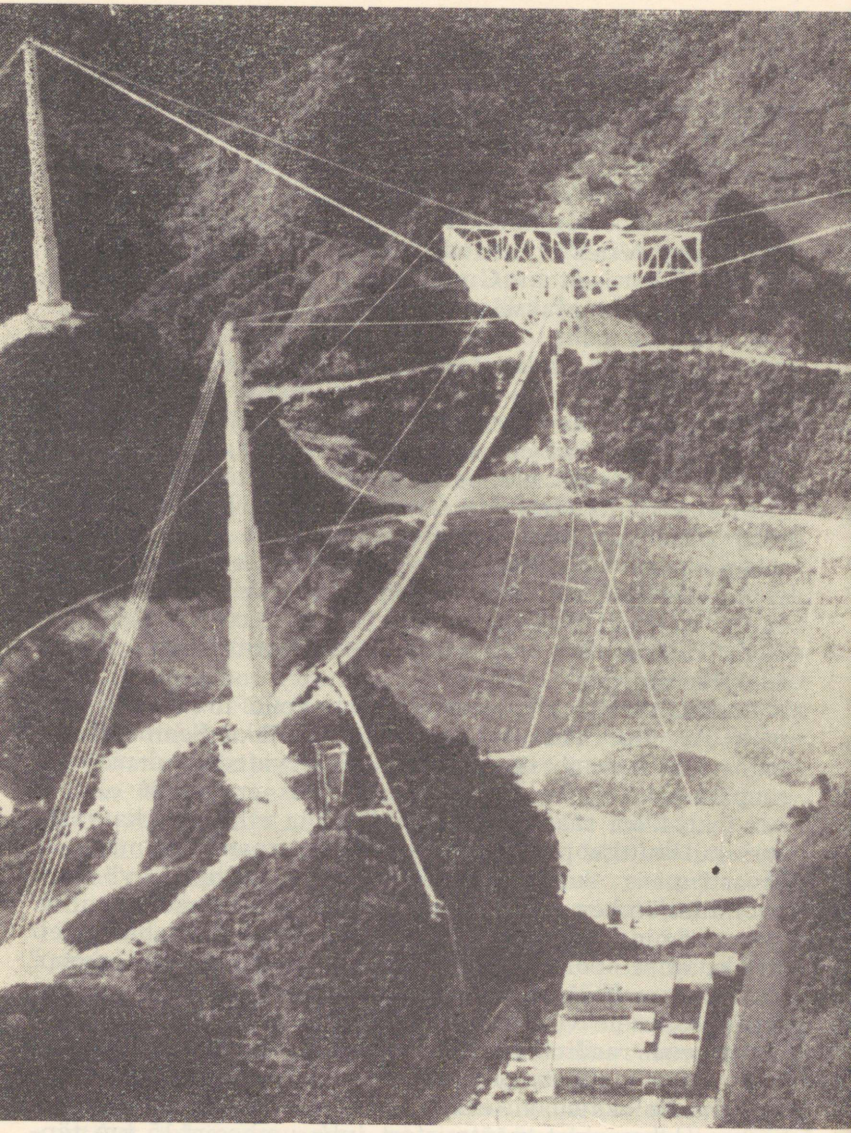
Arecibo superhiiglane on 16 korda võimsam omaaegsest 76 m hiiglareflektorist Jodrell Banki observatooriumis ja ületab 10-kordselt ka Green Banki 100 m teleskoobi. Ta maksumust hinnatakse umbes 8 miljonile dollarile.

Ettenähtud põhi-töösageduseks on 430 MHz, kuid nagu kõiki peegliga raadioteleskoope saab seda vastuvõtuantenni ja vastuvõtja vahetamisega üsna lihtsalt ümber häälestada. Kindlasti tehakse vaatlusi ka 1420 MHz (21 cm vesinikujoone) sagedusel. Tuleb märkida, et Arecibo teleskoobi antenni suunadiagrammi laius on 430 MHz sagedusel niisama suur kui Green Banki 100 m teleskoobil 1420 MHz sagedusel — 10 kaareminutit. Sama antenni rakendatakse vajaduse korral raadiolokatsiooniks. Saatja annab 430 MHz sagedusel antenni impulsid, mille võimsus on 2,5 miljonit vatti. See energia kiiratakse 10′ läbimõõduga ruuminurka antenni kohal. Teine saatja töötab 40 MHz sagedusel.

Raadiolokatsioonivaatlused ongi saanud üheks põhilisemaks Arecibo raadioreflektori kasutusalaks. Sealne observatoorium kannab ise ionosfääri-observatooriumi nime ja seepärast on instrumendi programmis eraldatud oluline osa ionosfääri raadiolokatsioonile. Siia alla loeti ka vaatlusi kurikuulsa projekti «West Ford» raamides, mis teatavasti seisis suure hulga peente metallnõelte viimises orbiidile ümber Maa ja mida hoolimata kogu maailma astronoomide vastuseisust siiski tehti. Siinkohal tuleb lisada, et see pole ainuke juhus, kus toda hiiglateleskoopi kasutatakse USA sõjaväe- või äriringkondi huvitavate, kuid teadusele võõraste ürituste juures.

Esimene raadiokontakt Merkuuriga saadi sellel riistal 1964. aasta aprillis, planeeritud olid ka Veenuse ja Jupiteri raadiolokatsiooni-eksperimendid. Planeetide kaugused saadakse neist mõõtmistest juba umbes ±15 km täpsusega, mis üsna pea nähtavasti paraneb ±5 kilomeetrini.

Täiesti jõukohased on ka muud liiki vaatlused, nagu planeetide pöörlemisperioodide kindlakstegemine. Kuu



Joonis 80. 305 m raadioteleskoop Arecibos.



pinna detailsem uurimine, Päikese vaatlemine jm. Alustatakse Kuu raadiokaardistamist. Teatud võtetega saab Arecibo raadioteleskoobi-lokaatori lahutusvõimet viia veel kõrgemaks kui suunadiagrammi laius 10′. Kosmiliste objektide raadiokiirguse vastuvõtul võib kiirgusallika asukoha kindlaks teha isegi kuni 15-kaaresekundilise täpsusega. Seniste raadioastronoomias saadud vaatlustulemuste põhjal võis ette näha, et Arecibo teleskoobile on kättesaadavad võib-olla 25 000 kosmose raadioobjekti, praegu töötataksegi nende mõõtmisel ning kaardistamisel.

Tabel 7

Maailma suurimaid raadioreflektoreid

Läbimõõt m	Asukoht	Valmimise aasta	Monteering
305	Arecibo, Puertoriiko	1963	Liikumatu
200	Bürakan, Armeenia NSV	Projekteeritakse	Liikumatu
100	Green Bank, USA	1962	Meridiaanne
76	Jodrell Bank, Inglismaa	1957	Asimuudiline
70	Sidney, Austraalia	1961	Asimuudiline
66	Manchester, Inglismaa	1949	Liikumatu
46*	Green Bank, USA	1965	Ekvaatoriline

* Maailma suurim ekvaatorilise monteeringuga raadioteleskoop.

raadiotaevas

Raadioteleskoope võime kujutleda võluprillidena, mis teevad taeva nähtavaks uues spektriosas — raadiokiirguses. Kujutleme, et oleme kaotanud nägemisvõime nähtavates kiirtes ja loome nüüd uue taevapildi äkki nähtavaks saanud raadiokiirguses. Säragu päike või katku taevast pilved — astronoomid ei pruugi sugugi vaatlustest loobuda, sest tähistaevas oleks ikkagi niisama selge ja ere kui kõige selgemal ööl. Tähed on nähtavad, Päike aga muutub tuhmiks ebamääraste piirjoontega kettaks. «Tõlkides» raadionägemise muljed värvuste keelde, võiksime öelda, et

Päikese helesinine ketas on ümbritsetud helepunase krooniga, mis laiub temast mõnekraadisele nurkkaugusele.

Rohkem hämmastab Linnutee. See on oma tavalisel kohal, ent palju heledam kui varem. Piirid on ähmased ja üldse ei koosne ta enam paljude kaugete tähtede helendustest, vaid on suur punakat valgust kiirgav gaasipilv. Eraldatavad on vaid üksikud veel eredamad punased raadiotähed. Nagu pärlikee kulgeb mööda Linnutee keskjoont rida helesiniseid pilvi. Asjatult otsiksime Suurt Vankrit, Orioni või teisi tuntud tähtkujusid. Alles uue taeva hoolas võrdlemine vanade taevakaartidega näitab, et mõned varem tuntud mitte kõige heledamad taevaobjektid on tõesti ka raadiodiapasoonis nähtavaks jäänud. Päikese kiirgus on nii nõrk, et Kuu paistab rohkem tänu iseenda raadiokiirgusele, planeedid on vaevu nähtavad. Ainult Jupiteril esinevad aeg-ajalt punased sähvatused.

Raadioteleskoobid rikastasid sõjajärgseist aastaist peale kosmose raadioobjektide nimekirja üha uute avastustega. Et algul olid lahutusvõimed äärmiselt madalad, siis arvati, et tegemist on punktikujuliste kiirgusallikatega, nagu optilises astronoomias seda on tähed. Üsna mitme aasta jooksul kasutatigi raadioobjektide nimena sõna raadiotäht. Objektide kasvav üldarv, mis praegu ulatub juba 100 000-ni, tegi võimalikuks (ja ka vajalikuks) nende kataloogidesse ning taevakaardile kandmise, samuti klassifitseerimise. Mitmes observatooriumis ongi koostatud raadiotaeva kaardid, mis väliselt sarnanevad tähekaartidega. Suuri, lausa ületamatuid raskusi aga tekitas raadioobjektide identifitseerimine optilise astronoomia taevapildi objektidega. Juba 1946. aastal leiti raadioteleskoopidega Luige tähtkujust võimas raadiokiirguse allikas *Cygnus A*, kõige heledam «raadiotäht» taevas. Nagu selgus, pidi see asuma väljaspool Galaktikat ja vaid 5 m teleskoobi abiga õnnestus R. Minkowskil ja W. Baadel hulk aega hiljem teda identifitseerida umbes 700 miljoni valgusaasta kaugusel asetseva kaksikgalaktikaga. Nagu edasised Jodrell Banki suure raadioteleskoobiga ja Palomari 5 m optilise teleskoobiga ühiselt ettevõetud uurimised näitasid, on selline kahestumine raadiogalaktikaile üsna tüüpiline. Baade ja Minkowski foto lubas teha järelduse, et kui kahe galaktika tuumad on nii lähestikku, siis võib neid lugeda põrkuvaiks. Baade ja Minkowski vedasid selle üllatava oletuse tõepärasuse peale omavahel pudeli viski peale kihla,

siis fotografeeriti spekter, mis sisaldas palju tugevasti ergutatud gaaside emissioonijooni, ja sellega sündis kihlveost hiljem üldtuntuks saanud põrkavate galaktikate hüpotees. Praegu on juba teada, et raadiogalaktikate tsentrites on toimunud võimsad plahvatused ja galaktika näiv kahestumine tuleneb magnetvälja mõjust.

Raadiotähtede mõiste selle esialgses tähenduses kadus raadioastronoomiast üsna kiiresti. Praegu on identifitseeritud juba umbes paarsada raadiokiirguse allikat. Aegamööda juurdusid uued mõisted: raadiogalaktikad ja raadioudukogud. Viimaste all mõistetakse raadiokiirgust väljasaatvaid gaasudusid. Selle arvele langeb üsna suur osa meie Galaktika raadiokiirgusest üldse ja eriti niinimetatud raadiokiirguse galaktilisest foonist. 1963. aastal jõuti raadioobjekte optilises kiirguses uurides järeldusele, et 5 seni galaktiliseks objektiks loetud «tähte» on tegelikult võimsad galaktikavälised raadioobjektid, mis on optiliselt umbes sada korda heledamad kõige heledamatest galaktikatest, kuid asuvad väga kaugel, mõned isegi kaugemal kui ükski seni teadaolev objekt. Cambridge'i raadioobjektide kataloogis kannavad nad nimesid 3C 48, 3C 147, 3C 196, 3C 273 ja 3C 286. Objekti 3C 286 punanihe on 85% ja objektil 3C 196 üle 125%. Praegu tuntakse juba umbes 40 taolist objekti.

Raadiotaeva «täht» number kolm, mis asub Amburi tähtkujus, on arvatavasti võimsaim raadiokiirguse allikas meie Galaktikas. 1947. aastal määras Sidney raadiofüüsika observatooriumi astronoom John Bolton, et tegemist on Krabi udukogule kuuluva kiirgusega. Kunagi astronoomide hulgas «komeediküti» nime all tuntud entusiast prantslane Charles Messier võttis 1758. aastal ette suure töö — ta koostas taevas nähtavate komeeditaoliste, kuid tegelikult mitte sugugi komeetideks osutuvate taevakehade nimekirja. Autor taotles vaid komeetide küttimist segavate valekomeetide eraldamist, kuid nimekirjast sai väärtuslik iseseisev teaduslik töö: täheparvede ja udukogude Messier' kataloog. Selles seisab Krabi udukogu esimesel kohal ja teda märgitakse tähisega M 1 (joonis 81). Võrreldes omavahel 20—30-aastase ajavahemiku tagant tehtud fotosid, on avastatud, et Krabi udu laieneb kõigisse suundadesse kiirusega umbes 1000 kilomeetrit sekundis. Teades udukogu nähtavaid mõõtmeid ja tema paisumiskiirust, pole raske arvutada, et 900 aastat tagasi pidi kogu



Joonis 81. Krabi udukogu M1, pildistatud 5 m teleskoobiga.

udusse kuuluv mateeria olema koos väga väikeses ruumiosas. Kas pole siin tegemist mingi plahvatusega, mis toimus 900 aasta eest? Hakati lehitsema muistsete hiina astronoomide üleskirjutusi. Taeva jälgimist peeti Hiinas vanasti riiklikuks ülesandeks, mille eest astronoomid vastutasid imperaatori ees, ning kusagil pole minevikus nii hoolsasti kõiki taevanähtusi üles tähendatud. Hiina ja Jaapani kroonikad tõendavad üksmeelselt, et 1054. aastal, seega üle 900 aasta tagasi, ilmus Amburi tähtkujusse «täht-külaline», mis mõnda aega säras taevas heleduselt kolmanda taevakehana Päikese ja Kuu järel. Külaline lahkus umbes poole aasta pärast — tuhmus ning kadus viimaks täiesti. Nüüd teame, et täht ei saabunud ega lahkunud, vaid plahvatas. See oli hiiglaslik tähekatastroof, kus ta supernoovana lõi äkki võrratult heledamalt särama, «põles ära» ja muutus paisuvaks helendavaks gaasipilveks

ning väikeseks kuumaks täheks selle sees. Raske on ette kujutada plahvatuse mastaape: eraldub energiat umbes 10^{50} ergi, heleduselt ületavad supernoovad Päikese miljardeid kordi. Ehkki supernoovasid süttib galaktikates keskmiselt iga mõnekümne aasta tagant, pole viimase mõnesaja aasta jooksul teada supernoovade süttimist meie Galaktikas. Raadiovaatluste seisukohalt on Krabi udu äärmiselt huvitav objekt, kuid ei saa jätta rõhutamata erinevate ajastute teadmiste ja vaatlustulemuste ühendumist eelkirjeldatud supernoovade jäänuste kui raadioobjektide identifitseerimisel. Nõukogude juhtivaid raadioastronoomia spetsialiste Jossif Šklovski kirjutab: «... uusima teaduse, raadioastronoomia edusammud, mis toetuvad raadiofüüsika ja astrofüüsika «ülimoodsatele» saavutustele ja meetoditele, osutuvad seotuks Hiina muistsete astronoomide kirjutatud kroonikate tekstidega. Nende inimeste töö elustus aastatuhandete pärast ja läks hinnalise aardena kahekümnenda sajandi keskpaiga teaduse fondi.»

VI. atmosfääriväline astronoomia

● õhuookeani põhjast pinnale

Maad ümbritseb tuhandete kilomeetrite kõrgusele ulatuv tohutu gaasikiht, mida nimetatakse atmosfääriks. Õhkkonnal on tohutu tähtsus kõige elava jaoks Maal. Atmosfäärita valitseks surmavaikus, ei eksisteeriks jõgesid, järvi ega ookeane, päeval oleks kohutav kuumus, öösel äärmiselt külm. Peale temperatuuri reguleeriva ja organismide hapnikuga varustamise funktsiooni on atmosfäär veel usaldatav «soomuskate», mis kaitseb elusrakke võimsate suure energiaga osakeste kosmiliste voogude eest. Kahjuks peavad seda katet läbima ka kiired, mis toovad astronoomilist informatsiooni, ja tulemusena ahenevad maapealsete astronoomiliste vaatluste piirid väga tugevasti. Kättesaadav on vaid osa taevakehade üldisest kiirgusspektrist — nagu raadioastronoomiaga seoses nägime, on maapinnalt kosmosesse avatud vaid kaks-kolm kitsast spektraalakent: optiline aken, raadioaken ja infrapunane pilu (vt. joonis 70, lk. 172). Kuid nendeski lõikudes halvendab õhkkond vaatlustingimusi oma liikumise, muutlikkuse ja meteoroloogiliste nähtustega. Piltlikult öeldes teevad astronoomid vaatlusi õhuookeani põhjast ja eriti kannatavad häirete all vaatlused nähtavates kiirtes. Nii ei saavutagi suured, kõrgekvaliteedilised ja kallihinnalised vaatlusriistad peaaegu kunagi oma teoreetilist lahutusvõimet: tähekujutise läbimõõdu määrab atmosfäär, mis tekitab laialivalgunud turbulentsketta. 5 m teleskoobiga peaksime teoreetiliselt lahutama Kuu pinnal 35—40 meetrilisi detaile, tegelikult aga näeme vaid poolekilomeetriste mõõtmetega moodustisi.

Päikesevalgus ja teiste maiste ning taevaste valgusallikate kiirgus tekitab helendava fooni, mis piirab teleskoo-

pide küündivust öösel ega võimalda teha vaatlusi päeval. Lisaks kitsendavad vaatluste teostamisaega — mõnikord aga mõjutavad ka tulemusi — veel ilmastikunähtused, nagu udu, pilved, sademed. Täpsete vaatluste sooritamisel püütakse arvestada atmosfääri mõju, tundma õppida ja registreerida muutumist, rakendada mitmesuguseid kompensatsioone-korrektsioone, aga lihtsalt juhuslikultki tabada soodsaid tingimusi. Üldist halba olukorda parandab see kõik suhteliselt tühisel määral, õhkkonna olemasolust tingitud põhilisi moonutusi pole võimalik kaotada ühegi maapealse vahendiga. Tuleb aga lisada, et peale atmosfääri kitsendab maiste teleskoopide võimsuse suurendamist veel raskusjõud, mis takistab ülisuurte teleskoopide ehitamist. Pealegi on Maa pinnas ülitäpsete positsioonimõõtmiste jaoks üsna ebastabiilne. Kõigest eelnevast on lihtne jõuda järeldusele: teleskoobid tuleb viia väljapoole Maa atmosfääri põhimassi. Kosmoses on saavutatavad ka kaalutus ja asendi suur stabiilsus.

Atmosfäärivälistе vaatluste toimetamisel võidakse vaatlusriistade ja vaatlejate kandmiseks kasutada üsna mitmesuguseid baase: õhupalle, kõrgemate atmosfäärikihtide sondrakette, Maa tehiskaaslasi, Päikese tehiskaaslase tüüpi kosmoserakette ning teistel taevakehadel maanduvaid või mittemaanduvaid kosmoseaparaate. Iga baasi tüüp määrab kindla maksimaalse kõrguse või kauguse ja tehniliste võimaluste ning konstruktiivsete tingimuste kaudu vaatluste astrofüüsikalised iseärasused. Juba ammu on taevast püütud õhupallidelt vaadelda, kuid atmosfäärivälistе vaatluste baaside hulka saab neid lugeda siiski alles viimastel aastakümnetel, kui õhupallide maksimaalne tõusukõrgus (lagi) hakkas ulatuma üle 30 kilomeetri. Ning siiski ei piisa õhupallide lagikõrgusest (umbes 35 km) kõige huvitavamate astrofüüsikaliste vaatluste tegemiseks, sest 1% õhumassist, mis jääb veel läbimata, neelab küllalt suure osa ultravioletsest kiirgusest. Kõrgemale saab aparatuuri tõsta ülemiste atmosfäärikihtide sondrakettidega, mis küünivad paarisaja kilomeetrini, kuid nende üldiseks puuduseks on rasked tingimused aparatuuri (näiteks teleskoobi) suunamisel kindlale objektile ja väga lühike vaatlusaeg. Rohkem lubavad baasidena Maa tehiskaaslased, millele kaasaegse tehnika taseme juures võib asetada keskmise suurusega teleskoobi, kindlustades selle stabiilse asendi ja tähtedele suunamise. Orbitaalsete astronoomia-

observatooriumide all mõistetaksegi Maa orbiidile viidud orienteeritud tehiskaaslasi ühe või mitme teleskoobiga. Kui muidu on atmosfäärivälised vaatlused väga suurel määral seotud raketitehniliste tingimustega, siis orbitaalseid observatooriume kandvad tehiskaaslased luuakse eeskätt astronoomiliste vaatluste nõuete kohaselt ning ka aparatuur sarnaneb mõnel määral kõrgelt automatiseeritud maapealsete vaatluste tehniliste vahenditega. Stabiliseeritud ja orienteeritud platvorme astronoomiariistade paigutamiseks nimetatakse astrostaatideks, astrostaatide põhiosaks on maapealsete teleskoopide automaatsete fotoelektriliste giidide sarnased seadmed (astrogiidid). Maa tehiskaaslastest veelgi kaugemale kosmosesse tungivaid baasrakette püütakse esialgu kasutada vaid üksikülesannete täitmiseks: lähemate taevakehade pildistamine ligidalt või televisiooniülekanne, proovide toomine atmosfäärist jne. Tuleb rõhutada, et sellistel juhtudel läheb praktiline astronoomia passiivselt vaatluslikult positsioonilt üle aktiivsetele eksperimentidele. Taevakehadele minnakse sõna otseses mõttes lähedale, neile maandatakse automaatselt tegutsevaid, hiljem aga juba kindlasti ka mehitatud uurimisjaamu.

1946. aastat, millal esmakordselt tehti astronoomilisi vaatlusi väljaspool Maa atmosfääri, võrreldakse astronoomia ajaloos tähtsuselt aastatega 1609 ja 1931. 1609. aastal avas Galilei oma teleskoobiga optilise astronoomia ajastu, 1931. aastal alustas Karl Jansky raadioastronoomia võidukäiku, aga 1946. aastal tõusis USA-s White Sandsi polügoonilt spektrograafiga varustatud saksa trofeerakett A-4 (V-2) Maa atmosfääri kõrgematesse kihtidesse, et uurida Päikese ultravioletset kiirgust. Järgnesid kõrgemate atmosfäärikihtide sondrakettide lennud nii USA-s («Aerobee»-seeria) kui ka Nõukogude Liidus (meteoroloogilised ja geofüüsikalised raketid). Viiekümnendail aastail valmistati ette ja realiseeriti esimesed tõsiselt arvestatavate tulemustega astronoomilised vaatlused õhupallidelt.

Alates 1957. aastast, millal orbiidile viidi esimene nõukogude tehiskaaslane, on astronoomid tõsise huviga jälginud kiiret progressi sel alal ja alustanud varakult ettevalmistusi orbitaalobservatooriumide loomiseks. Juba 1958. aastal esitasid Davis, Whipple ja Whitney (Smithsoni astrofüüsikaobservatoorium ja Harvardi ülikool, USA) 20 cm orbitaalteleskoobi üsna konkreetse ja realiseeritava

ideekavandi, milles püstitatud astrofüüsikalisi ülesandeid ja tehnilisi nõudeid ning tingimusi kasutati praktiliselt ära Ameerika Ühendriikides konstrueeritud ja valmistatud observatooriumi OAO S-18 juures. 1959. aastal tehti nõukogude automaatjaama «Luna 3» abil erakordselt huvitav vaatlus, mille tulemusena saadi foto Kuu tundmatust tagaküljest. 1962. aastal viidi USA-st Maa orbiidile esimene orbitaalne päikeseobservatoorium OSO ja 1964.—65. aastal lõpetati orbitaalse astronoomiaobservatooriumi OAO ehitamine. Märkimata ei saa jätta veel üha detailsemat Kuu uurimist, mida viimastel aastatel on toimetatud otse Kuule suunatud, Kuu orbiidile viidud ja Kuule pehmelt laskunud paljude «Ranger»-, «Luna»-, «Lunar Orbiter»- ja «Surveyor»-tüüpi kosmoserakettide-automaatjaamade pardalt.

Atmosfäärivälised vaatlused on praegu seotud veel küllalt suurte tehniliste raskustega ning kulukad. Seepärast tulevad kõne alla vaid erakordselt tähtsad ja maapealsete vahenditega lahendamatud probleemid. Õhupallivaatlusi tehakse kõrge lahutusvõimega fotode saamiseks taevakehadest (Päike, Kuu, planeedid, täheparved ning gaasudud) ja infrapunastes kiirtes mõõtmisteks ning pildistamisteks. Suuremad astrofüüsikaliste uurimiste perspektiivid avanevad siiski tehiskaaslaste kasutamisel, seda eriti vaatlustega maapinnalt täiesti kättesaamatutes spektrilõikudes.

Optiline ja raadioaken kokku lasevad Maal oleva astronoomini vaid umbes 20 oktaavi elektromagnetilise kiirguse spektrist, väljaspool atmosfääri võidakse aga põhimõtteliselt registreerida kiirgust veel täiendavalt umbes 40 oktaavi piirides. Selle suure, seni täiesti kättesaamatu spektriosa uurimine laiendab kahtlemata oluliselt inimese teadmisi universumist.

Kiirgusenergia jaotus lainepikkuste järgi, ehk nagu öeldakse, energia jaotus spektris sõltub eelkõige kiirgava keha pinna temperatuurist. Päikese pealiskihtide temperatuur on 6000 kraadi ja enamik ta kiirgusest langeb nähtavasse spektrisse. Kuid leidub kuumemaid tähti pinnatemperatuuriga 25 000 kraadi ja isegi 100 000 kraadi — nende kiirgusest langeb suurem osa spektri ultravioletsesse ossa. Külmadel tähtedel (3000—4000 kraadi) langeb, vastupidi, suur osa energiast infrapunasesse spektriossa. Seega tuli igasuguseid järeldusi nende tähtede atmosfää-

ride kohta seni teha vaid väiksema tähtsusega (nähtava) kiirguse põhjal. Tegeliku energia jaotumise mõõtmine tähtede spektrites võimaldab täpsustada juba nende spektraalklassifikatsiooni, aga kontrollida ka seni arvutuslikele mudelitele toetuvaid ettekujutusi nende atmosfääridest. Lõplik selgus puudub reas teisteski küsimustes, nagu tähtedevaheline aine ja selle läbipaistvus, galaktikate kiirguse ultravioletsed ja infrapunased osad jne. Pole võimatu uute, optilistele vaatlustele tundmatute objektide avastamine. Seega formuleerub atmosfäärivälise astronoomia ees raadioastronoomia algpäevadega analoogiline ülesanne: taevapildi või -kaardi koostamine uutes spektripiirkondades. Vaatluste algastmel on see hädavajalik — mõnelgi lainepikkusel puudub ettekujutus, kuidas taevas väljaspool atmosfääri välja näeb; kas täiesti «must» (kui näiteks kiirgus neeldub difuusses aines täielikult), väga heleda fooniga (hajuskiirguse arvel) või paljude objektide-kiirgusallikatega, mis ei tarvitse ühte langeda maapealse optilise astronoomia ega raadioastronoomia taevakaartidele märgitud objektidega. Näiteks kaheldi hiljuti, kas röntgenikiirtes suudetakse registreerida mingeid objekte, kuid juba esimestel lihtsatel mõõtmistel avastati umbes 10-kraadise nurkläbimõõduga pehme röntgenikiirguse allikas Galaktika tsentri suunas ja täheldati ka foonist erinevat intensiivsust raadioastronoomia objektide *Cassiopeia A* ja *Cygni A* suunas. Praegu tuntakse taevas üsna mitut röntgeniobjekti.

Teistsugust liiki vaatlusülesandeks on üksikobjektide, peamiselt tähtede ja udude spektrite saamine uutes spektripiirkondades. Valitud objektide ehituse ja neil toimuvate protsesside kohta üksikasjalisemat materjali saades võib tähe-astrofüüsika teha uusi tõsiseid edusamme. Ka siin andsid juba esimesed tähtede ultravioletse kiirguse intensiivsuse mõõtmiskatsed senistest teoreetilistest ettekujutustest nii lahkuminevaid tulemusi, et nende õigsus kahtluse alla seati.

Tõenäoliselt saabub üsna pea aeg, kus teleskoop orbitaalobservatooriumil töötab oma teoreetilise lahutusvõimega. Sellega avanevad astronoomiavaatluste ees uued perspektiivid, mis ei piirdu ainult nurkade mõõtmistäpsuse paranemise ja kujutiste detailsuse tõusmisega. Üks olulisemaid tulemusi sel korral oleks küündivuse suurenemine. Maal ehitatakse üha suuremaid ja kallihinnali-

semaid teleskoope küündivuse suurendamiseks ühe või paari tähesuuruse võrra, kosmoses aga tähendab tähekujutise läbimõõdu vähenemine näiteks ühelt kaaresekundilt kümnendikule juba võitu küündivuses viis tähesuurust — väheneb ju pindala, millele tähe kiirgus fookuses on koondatud.

● õhupallil tähtedele lähemale

Maa atmosfääri segav ja piirav mõju vaatlustele oli selge juba ammu ning astronoomid olid huvitatud igast võimalusest õhuookeani põhjast veidigi kõrgemale tõusta. Ehitatakse observatooriume kõrgmägedesse, kuid vaevalt tasuvad nii tagasihoidlikud kõrgused jõupingutusi, mis tuleb teha teaduslike uurimiskeskuste rajamiseks ja teleskoopide ülesseadmiseks sellistes kohtades. Olulisemad on siin klimaatilised tingimused, mis mägedes samuti enamikus paremateks osutuvad.

Tunduvalt suuremaid kõrgusi võib vallutada õhupallidega. Esimesed katsed tehti siin lihtsalt atmosfääri uurimiseks, 100 aastat pärast Montgolfieride lendu võttis aga kuulus vene teadlane D. I. Mendelejev ette Päikese krooni uurimise varjutuse ajal õhupallilt. Ta tõusis 1887. aastal 3350 m kõrgusele, kuid vaatlusi õnnestus teha vaid 1 . . . 1,5 km kõrgusel, kus läbimata oli veel 91% . . . 86% õhumassist (lennu tipp-punktis jäi pea kohale 72% õhumassist). Vaatlused olid visuaalsed, ilma mingisuguste riistadeta. Vahemärkusena olgu öeldud, et atmosfäär arvatakse ulatuvat 1000—1500 kilomeetri kõrgusele ja juba ülemistes kihtides neelab ning hajutab ta näiteks ultravioletseid kiiri. Turbulents ja konvektsioon mõjutavad aga kujutist vaid umbes 10—15 kilomeetri kõrguseni.

Käesoleva sajandi kolmekümnendail aastail hoogustus piloteeritavate stratostaatide ehitamine. Aastail 1931—1932 tõusis Šveitsi füüsik A. Piccard 16 km kõrgusele, 1933 saavutasid nõukogude stratonaudid G. A. Prokofjev, E. K. Birnbaum ja K. D. Godunov stratostaadil «CCCP-1» kõrguse 19 km, aga 30. novembril 1934 A. B. Vassenko, P. F. Fedossejenko ja J. D. Ussõskin stratostaadil «Osoaviahim 1» 22 km. 1935. aastal vallutasid A. W. Stevens ja O. Anderson 22 066 m. Viimastel juhtudel jäi läbimata veel vaid 5% õhkkonnast, oldi jõutud juba stratosfääri,

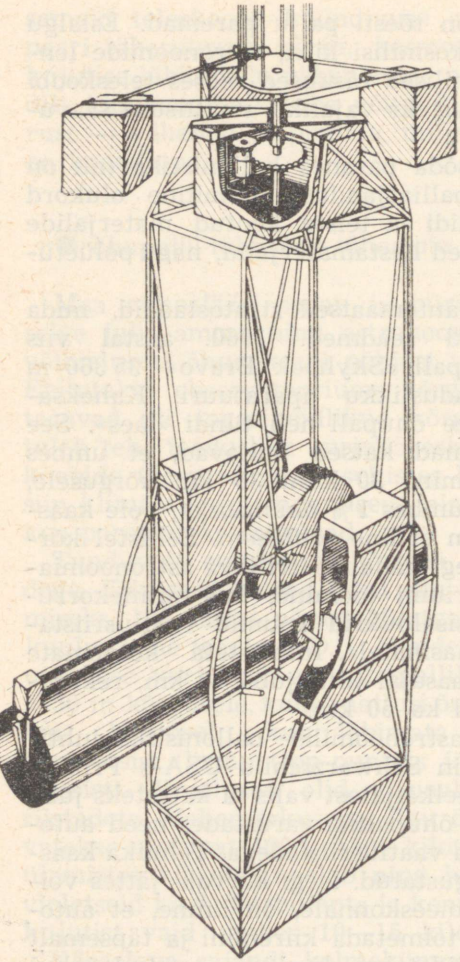
kus vaatlustingimused on tõesti palju paremad. Esialgu mõõdeti küll peamiselt kosmilisi kiiri, astronoomide lendude ees seisid veel tehnilised raskused seoses teleskoobi kaasavõtmise ning vaatlusteks vajaliku stabiilsuse saavutamisega.

Pärast Teist maailmasõda paranes ballonistika (nii on hakatud nimetama õhupalliasjandust) tehniline olukord veelgi. Kummeeritud siidi ja teiste kootud materjalide asemele ilmusid plastilised kestamaterjalid, nagu polüetüleen ja mailar.

Kaasajal on levinud automaatsed stratostaadid, mida juhivad autopiloteerivad seadmed. 1960. aastal viis 283 200 m^3 mahuga õhupall «Skyhook Bravo» 35 360 m kõrgusele 1310 kg teaduslikku aparatuuri. Kaheksatunnilisest lennust oli see õhupall neli tundi «laes». See ja paljud teised hilisemad katsed näitavad, et umbes 1,5-tonnise koorma tõstmine 30 kuni 35 km kõrgusele, kus ülespoole jääb vaid umbes 1% õhumassist, pole kaasaegses ballonistikas enam eriline probleem. Sellistel kõrgustel tuleb kõne alla isegi nädalaid triiviva astronoomia-meteoroloogiaobservatooriumi loomine, kus mitmekorruselises rippuvas majas sisalduksid ruumid vaatlusriistadele, meeskonnale ja masinatele. Inimesteta kergemate õhupallide lagi ületab kaasajal tihti juba 40 km, rekordkõrgusena on saavutatud ka 50 km.

Viimastel aastatel on astronoomilise ballonistika juhtivaks jõuks saanud Martin Schwarzschild USA-s Princetoni ülikoolis. Erinevalt eelkäijatest valis ta katseteks juba algusest peale ekipaažita õhupallid, varustades need automaat- ja kaugjuhtimisega vaatlusriistadega. Tehnika kaasaegsel tasemel on see õigustatud. Isegi kõrvale jättes võimalikud ohud õhupalli meeskonnale, on ilmne, et automaatika suudab vaatlusi toimetada kiiremini ja täpsemalt kui inimene. Pealegi võidetakse kaalus — antud juhul võime seega rääkida inimese asendamisest samu funktsioone paremini täitva ja vähem kaaluva automaadi poolt.

Esimesed lennud valmistasid Martin ja Barbara Schwarzschild ette viiekümnendate aastate keskpaiku. 40-meetrise läbimõõduga õhupalli materjaliks valiti tugevdatud polüetüleen. Õhupalli all rippus langevari raamitaolises monteeringus teleskoobiga, mida elektrimootorite abil sai ümber horisontaal- ja vertikaaltelje pöörata (joonis 82). Mootorite juhtimiseks töötati välja spetsiaalne



Joonis 82. «Stratoscope'i» teleskoop ja aparatuur.

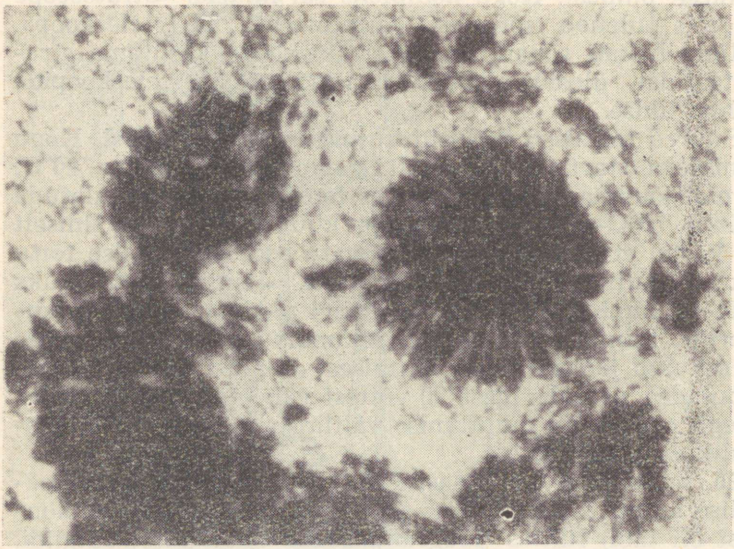
automaatgiid, mis suunas teleskoobi objektile — selleks oli ette nähtud kõigepealt Päike —, ja hoidis riista samas sihis paigal pildistamiseks küllaldase täpsusega. Teleskoobi ehitas firma «Perkin-Elmer» ja ta kujutas endast 2,5 meetri pikkust toru, mille ühes otsas paiknes 30 cm läbimõõduga paraboolpeegel, teises aga 35 mm kinokaamera. Täiendava läätsedesüsteemiga pikendati kogu objektiivi ekvivalentne fookuskaugus 70 meetrini, sel juhul mahtus filmikaadrile 90×60 tuhandekilomeetrine osa

Päikese pinnast. Kogu kompleks sai nimeks «Stratoscope I», mis tuleneb sõnadest «stratostaat» ja «teleskoop». Hiljem hakati sõnaühendit «stratoskoop» kasutama stratostaatidel ülestõstetavate astronoomiliste teleskoopide kohta üldse.

Suured raskused tekkisid kujutise fokuseerimisel. Kogu kompleks startis maapinnalt (temperatuur umbes 20°C) ja pidi jõudma stratosfääri, kus temperatuur võib ulatuda miinus 50°C-ni, aparatuuri aga kuumutab Päike. Ilmselt oli karta, et detailide ettenägematu soojuspaisumise tõttu osutub kujutis filmil ebateravaks. Jäi üle ainult üks abinõu: filmimise käigus objektiivi pidevalt ümber fokuseerida. Filmides üks kaader sekundis ja objektiivi umbes 20 sekundi jooksul ühest äärmisest asendist ühtlaselt teise nihutades, osutuks igast 20 võttest vähemalt üks teravaks. Peegli enda kuju muutumise vältimiseks isoleeriti ta soojuslikult penoplastiga.

25. septembril 1957. aastal algas esimene lend Minneapolise lennuväljalt. Umbes 25 km kõrgusel (96% õhkkonnast oli läbi) lülitas programmseade sisse automaatgiidi, teleskoop suundus Päikesele ning pärast väikest pausi temperatuuri ühtlustamiseks algas filmimine. Filmimise lõpetamisel eraldas lõhkelaeng langevarju õhupallist ning teleskoop maandus 270 km kaugusel stardikohast. Aparatuur oli töötanud rahuldavalt ja 300 meetrist eksponeeritud filmist (8000 kaadrit) saadi kümmekond suurepäraselt õnnestunud Päikese pinna fotot. Teine lend lisas veel umbes niisama palju materjali.

Teine katsete seeria korraldati täiustatud aparatuuriga 11. juulil ja 17. augustil 1959. aastal; rakendustelevisiooni vahendusel võidi nüüd maapealses juhtimiskeskuses jälgida teleskoobi vaateväljas olevat ala, fokuseerida ja raadio teel teleskoopi huvitavamatele Päikese pinna osadele suunata. 17. augustil saadud 400 ülesvõtet olid kõigi aegade parimad fotod Päikese laikudest (joonis 83). Pole üleliigne märkida, et kuna maapinnalt fotografeerimisel kaotavad fotod atmosfäärihäirete tõttu detailsuse, siis loeti seni parimateks Päikese pinnast 1885. aastal tehtud fotosid; ilmselt saadi need tänu juhuslikult valitsenud üliheadele tingimustele. Schwarzschildide fotod sisaldasid uusi andmeid Päikese pinna granulatsiooni kohta. Tehniliselt olid teise seeria katsed eeskujulikud näited edukast vaatluste toimetamisest meeskonnata õhupallilt: grupp astronoome



Joonis 83. «Stratoscope I» abil pildistatud Päikese pind laiguga, mis kutsus Maal esile tugeva magnetilise tormi.

ja insenere jälgis maapealses juhtimiskeskuses televisiooni teel ülekantavat teleskoobi vaatevälja ning võis telejuhtimissüsteemi kaudu riista mistahes Päikese osa fotografeerimisele suunata. Vaevalt oleks õhupallis viibiv vaatleja samu ülesandeid nii edukalt täita suutnud. Nelja lennuga saadi mitusada head fotot, mis lisasid vaatlusmaterjali täheatmosfääride teooria täpsustamiseks.

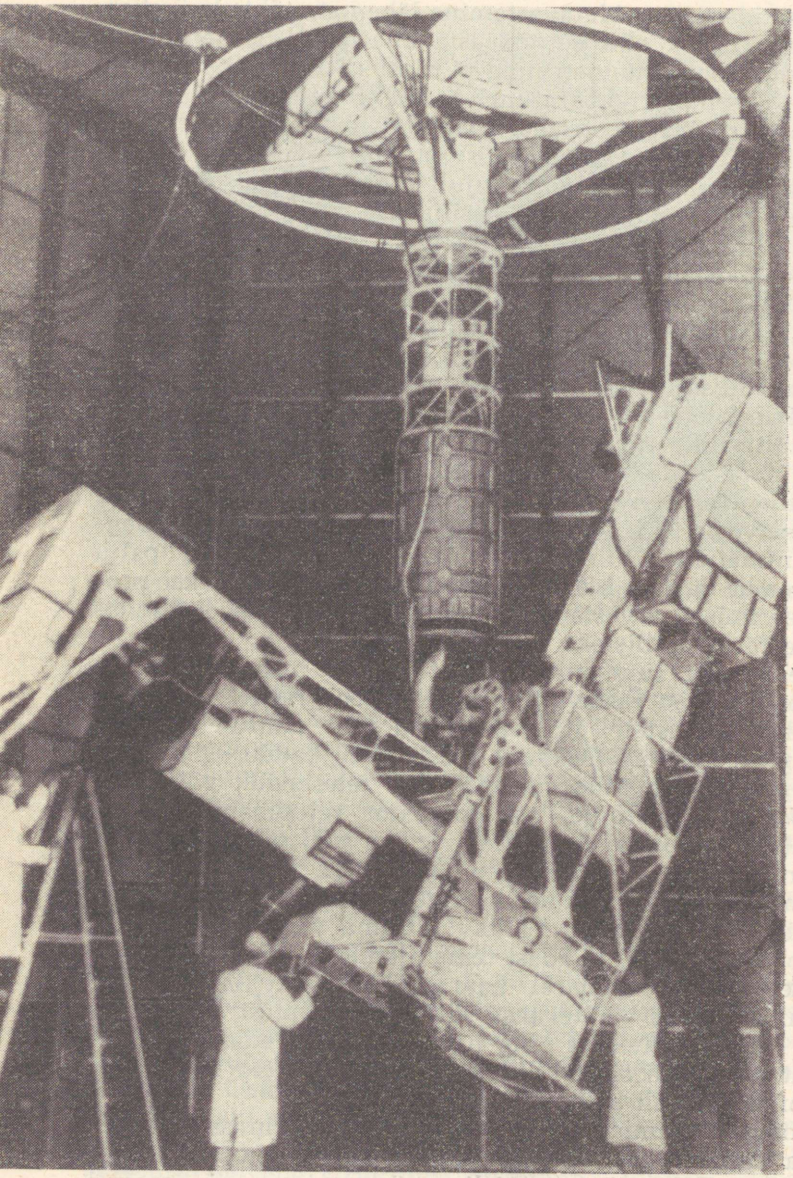
Üheks õhupalli-astronoomia tehniliseks suursaavutuseks oli M. Schwarzchildi juhtimisel loodud 90 cm teleskoobiga stratostaat-observatoorium «Stratoscope II». Kui talle eelnenud «Stratoscope I» oli mitu korda edukalt õhku tõusnud, sai Princetoni ülikooli uurimisgrupile selgeks, et uus vaatlustehnika suund on lapsekingadest välja kasvanud ja õhupalliga üles tõstetud teleskoobile võib anda lahendada üsnagi tõsiseid ülesandeid. «Stratoscope II» kavandati algul mitmekesiste ülesannete täitmiseks planeetide uurimisel kõrge lahutusvõimega fotografeerimise teel (Veenuse pilvede struktuuri uurimine, Jupiteri «punase laigu» pildistamine, Pluuto optilise läbimõõdu määramine,

planeetidesüsteemide avastamine lähemate tähtede ümber, Saturni rõnga ehituse täpsustamine jne.). Hiljem seda kontseptsiooni muudeti ning piirduti «Stratoscope II» esimese eksemplari aparatuuri loomisel vaid Marsi infrapunase spektromeetriaga. Teleskoobi valmistas firma «Perkin-Elmer», koos kiirgusvastuvõtjate ja muu aparatuuriga meenutas see väliskujult L-tähte (joonis 84). Peapeegel valati Corningi klaasifirmas sulatatud kvartsist ($D = 91$ cm, 1 : 4), optilises skeemis pikendas sekundaarpeegel fookust suhtelise avani 1 : 33.

Maapinnale anti kujutis edasi kahe televisioonikaameraga. Üks neist oli monteeritud eraldi, objektiiv paralleelselt teleskoobi optilise teljega, ja andis edasi kujutise 10-kraadilisest väljast, teine saatekaamera kandis üle põhiteleskoobi kujutise vaatevälja läbimõõduga 10 kaareminutit. Selle keskelt aga oli umbes 2 mm läbimõõduga osa (Marsi enda kujutis) suunatud spektromeetrisse. Mõõtmistulemused anti edasi raadiotelemeetriasüsteemi kaudu, aga salvestati ka numbrilisel kujul pardal asuvasse magnetlintmälusse. Viimane võimaldas hiljem saada palju suuremat täpsust kui otseülekanne. Kogu kompleksi projekteerimisel arvestati, et korduseksemplarid kohandatakse fotograafilisteks vaatlusteks.

Teleskoobi suunamine pidi toimuma maapealsest komandopunktist vastavalt operaatori poolt raadio teel antavatele käsklustele. Kõigepealt oli ette nähtud magnetkompassi kujutise ülekanne televisiooni kaudu — jälgides kompassi ja juhtides raadio teel teleskoobi pööramist ümber asimutaaltelje, sai operaator teleskoobi suunata objektile (Marsile) nii täpselt, et see pidi sattuma televisioonikaamera 10-kraadilisse vaatevälja. Siis muidugi ei valmista raskusi suuna korrigeerimine taeva kujutiste järgi, kuni objekt on nähtav kitsama vaateväljaga televisioonikaameras, ja edasi tema ajamine välja keskel asuvasse «auku». Seejärel haarasid fotoelektrilised giidid kinni objektist või teistest väljas nähtavatest heledamatest kui 9^m tähtedest ning hoidsid suunda edaspidi automaatselt. Võidi sisse lülida kiirgusvastuvõtjad ning magnetofon signaali salvestamiseks.

Fotografeerimise korral on nõuded gideerimissüsteemile üsna ranged: et loodetakse umbes $0'',1$ lahutusvõimega fotod saada isegi tunniajalise säritusajaga, siis peavad giidid selle aja jooksul hoidma teleskoopi paigal $\pm 0'',02$



Joonis 84. «Stratoscope II» aparatuur.

täpsusega. Peegli pinna kuju tohib ettenähtust erineda vaid 0,000 002 5 mm võrra. Marsi spektri mõõtmisel polnud selliste nõuete täitmine veel nii kohustuslik.

Fokuseerimist ei saadud teha televisioonikujutise järgi maapealsest juhtimiskeskusest, sest televisioonipildi lahutusvõime oli selleks liiga väike. Fokuseeriv sekundaarpeegel pidi heade piltide saamiseks seisma õigel kaugusel ±8 μm täpsusega. Sellest probleemist aitas üle teravmeelne automaatne teravustamissüsteem, mis kasutas ära tähtede kujutised automaatgiidides. Kui tähed muutuvad seal ebateravateks, laialivalgunud laigukesteks, siis eraldatakse gideerimissignaalidest kohe üks osa, mis sekundaarpeegli asendit seni muudab, kuni tähed on jälle teravad punktikesed.

Üldkujult L-tähte meenutava teleskoobi «harude» pikkused olid 7,5 meetrit ja 5,7 meetrit, kaal 3 tonni. Ta ühendati õhupalliga erilise võnkumisi tasandava liigendiga, pööramine ümber vertikaaltelje aga toimus väga väikese hõõrdumisega, sest laagri osas kogu teleskoop nagu ujus 1,5-millimeetrisel elavhõbedakihil. Üldse kaalus aparatuur 6 tonni. Ka õhupalli ehitus erines senisest. Loobuti polüetüleenkestast ja asendati see kergema ning tugevama mailarfoolioga, õhupall ise aga kujundati kaksikballoonina. See pidi konstruktorite arvates lihtsustama starti, eriti tuulise ilmaga. Täitegaasiks jäi ikka heelium.

«Stratoscope II» startis 1. märtsi hilisõhtul 1963. aastal 200 miili juhtimiskeskusest pealttuule suunas. Juhtimiskeskuses kogunesid insenerid ja teadlased registreerimis- ja juhtimispultide ümber. Oma 70 võimaliku käsuga ja mitmekesise üleantava informatsiooniga oli «Stratoscope II» sisuliselt teaduslikku eksperimenti teostav robot. Robot käitus öö jooksul üldiselt korrektselt, kui mitte arvestada mõningaid väiksemaid ebatäpsusi ja avastatud puudusi, mis lihtsalt olid kahe silma vahele jäänud. Marsi infrapunase kiirguse registreerimine ja spektrofotomeetria kulges normaalselt. Üllatus tuli alles hommikul, kui naasmiskäskluse täitmise asemel valis robot «vabasurma». Kavandatud oli nimelt stratostaadi ja aparatuuri maandamine heeliumi järkjärgulise väljalaskmisega ballooni ülaosas asuva klapi kaudu. Klapi juhtimiseks tuli telemeetriasüsteemis kasutada avamis- ja sulgemiskäsklust. Antigi käsklus klapi avamise kohta, oodati veidi, jälgides stratostaadi langemist, ning kui kiirus läks liiga suureks,

otsustati klapp mõneks ajaks sulgeda. Ootamatult selgus, et rikke tõttu ei järgnenud sellele mingit reaktsiooni, heelium voolas edasi balloonist välja ja kogu kompleks langes üha kasvava kiirusega. Igasugused katsed klappi sulgeda jäidki tagajärjetuks, stratostaat aga hakkas langemise asemel lausa kukkuma. Näis, et paljudeks lendudeks mõeldud kahe miljoni dollarine aparatuur on päästmatult kadunud. Õnneks oli aga siiski mõeldud avariile ja nagu iga korraliku lennumasina piloot, nii oli ka ballonistika-robot varustatud langevarjuga. Teleskoop eraldati balloonist, avati langevari; maandumine ei toimunud küll nii sujuvalt nagu õhupalliga, kuid siiski õnnelikult. Võis arvata, et seadmestiku remont ja ettevalmistamine järgmiseks lennuks ei lähe maksma üle 10% kogumaksumusest.

Lennu üheks ülesandeks oligi aparatuuri iseseisva ja telemeetrilise juhtimisega töötamise praktiline kontroll, mis pidi välja selgitama antud projekti puudused ning kasutamisvõimalused järgmiste teaduslike vaatlusülesannete täitmise seisukohalt. Esimese lennu jooksul tuli mitu ootamatut sündmust, mis küll siiski tõsisemate tagajärgedeta õnnestus likvideerida. Üheks neist oli muuseas arvestatust kiirem õhupalli triivimine; loodeti, et vaatluse ajal ei eemaldu stratostaat juhtimiskeskusest enam kui paarisaja kilomeetri kaugusele, antud juhul aga sundis lendu ettenähtust varem lõpetama asjaolu, et pall oli triivinud juba lubatust palju kaugemale ja võis karta side katkemist. 24 km kõrgusel seisis pall umbes 12 tundi.

Marsi kujutis lasti langeda spektromeetrisse, milles bolomeetrite abil mõõdeti (skaneeriti) spektrit vahemikus 1 μm kuni 7 μm. Lainepikkuse väärtus igal hetkel anti edasi numbrilisustajaga 0,01 μm täpsusega. Kogu spektri ülemõõtmist sai teha kas 2 või 20 minutiga. Kiirgusvastuvõtjaid-bolomeetreid jahutati vedela heeliumiga kuni 1,8°K. Pardal salvestatud mõõtmistulemuste täpsus oli 1%, telemeetriliselt Maale ülekantud signaalidel aga langes see 5%-ni.

Tulemused näitasid, et mõõtmisaparatuur töötas hästi ja saadud andmeid võib lugeda täiesti usaldusväärseks, andsid aga ka materjali Marsi kohta käivate kujutluste täpsustamiseks. Osutus isegi, et peale selle omavad vaatlustulemused laiemat astrofüüsikalist tähtsust, sest veeauru neeldumisjoonte kohta käivad täpsed andmed paljudes teiste taevakehadega seotud arvutustes seni just puu-

dusid. Teistkordselt startis «Stratoscope II» 26/27. novembri öösel 1964. Spektromeetriga teleskoop viibis umbes 12 tundi 25 km kõrgusel ja võttis selle aja jooksul üles kümmekonna taevakeha (Jupiter, Kuu, *a Tauri*, *a Orionis* jt.) infrapunased spektrid. Seekord oli põhiliseks astrofüüsikaliseks ülesandeks veeauru hulga määramine jahedate hiidtähtede atmosfääris. Selgesti äratuntavad veeauru spektrijooned avastati Betelgeuse ja R Leonise spektritest. See, et Marsi atmosfääris süsihappegaasi leidub ja suuremal hulgal kui Maa õhkkonnas, oli küll teada, kuid seda kinnitasid ka «Stratoscope II» andmed. Huvitavam oli veeauru olemasolu väljaselgitamine, mida Maalt meie oma atmosfääris sisalduva veeauru rohkuse tõttu polnud võimalik täpselt määrata.

Viimastel aastatel on startinud kümneid õhupalle mitmesuguste astronoomiainstrumentidega ja on täiesti ilmne, et seda tüüpi üritused jätkuvad. See, et nad on raketivaatlustest odavamad ning võimaldavad pikaajalist rahulikku vaatlemist ja juhtimist, tingib nende püsiva koha taevakehade uurimisel nähtavates ja infrapunastes kiirtes. Objektidena tulevad esmajoones kõne alla teised lähemad ja suuremad planeedid (Veenus, Saturn, Jupiter). Jupiteri lühem pöörlemisperiood (umbes 10 tundi) teeb võimalikuks kogu planeedi pinda ühe vaatlusööga «üle vaadata», Marsi korral polnud see mõeldav — pöörlemisperiood ulatub üle 24 tunni. Täiesti usutavad on ka tähtede ja udude infrapunase kiirguse mõõtmised või fotografeerimine õhupallilt. Kättesaamatuks jääb siiski mõlema objektidegrupi lühemalaineline (ultravioletne) spektriosa.

● raketiastronoomia

Õhupallidelt teostatud vaatlused on maapealsete ja atmosfääriväliste vahepealsed. Läbitakse küll suurem osa Maad ümbritsevast õhumassist, kuid kõigist raskustest sellega siiski veel ei vabaneta. Tuleb isegi nentida, et kaasaegset astrofüüsikat peaaegu kõige enam huvitav kättesaadava spektriosa laiendamine ultravioletse ja veelgi lühemalainelise kiirguse suunas pole võimalik. Stratoskoobid on ja jäävad efektiivseiks infrapunases, aga võib-olla veelgi pikemalainelises kiirguses ning üldisteks astronoomilisteks vaatlusteks kõrge lahutusvõime, tume-

dama fooni ja hea optilise läbipaistvuse tingimustes. Raketitehnikaga seotud vahendeist eraldab neid suhteline lihtsus ja odavus, aparatuuri korduva kasutamise võimalus ja väiksemad tehnilised raskused.

Kaasajal on raketitehnika atmosfäärivälisteks astronoomilisteks vaatlusteks siiski täiesti kasutatav. Sõjajärgsetel aastatel intensiivistus nii Nõukogude Liidus kui ka USA-s rakettide üleslaskmine, algul geofüüsikaliste, üsna kiiresti aga ka astronoomilist laadi uurimiste huvides. Kohe sõja lõpul alustati USA-s atmosfääri kõrgemate kihtide uurimist trofeerakettidega A-4 (V-2). 1946. aastal aga paigutas üks Richard Tousey poolt juhitav teadlaste ja inseneride grupp seda tüüpi raketile spektrograafi Päikese ultravioletse kiirguse registreerimiseks.

Mais 1949 tõusis nõukogude uurimisrakett teadusliku aparatuuriga 110 km kõrgusele. Sellest aastast muutus kõrgemate atmosfäärikihtide uurimine geofüüsikaliste ja meteoroloogiliste rakettidega meil regulaarseks. Esimesed raketid võtsid kaasa 120—130 kg teaduslikku aparatuuri, kuid raketitehnika arenedes see kaal kasvas, rakettidele hakati paigutama üha mitmekesisemaid vaatlus- ja mõõtmisvahendeid. 1958. aasta veebruaris lasti NSV Liidu Euroopa-osa keskmistelt laiustelt üles üheastmeline geofüüsikaline rakett, mis jõudis tolle rakettideklassi rekordkõrguseni — 473 km. See oli suurim maailmas saavutatud uurimisraketi tõusukõrgus. Rekordiks oli ka kasuliku koormise kaal 1,5 tonni. Eriti hoogustusid raketiuurimised rahvusvahelisel geofüüsika aastal, mille jooksul Nõukogude Liidust startis edukalt 125 mitmesugust teadusliku eesmärgiga raketti.

Nõukogude raketi-spektrograafidega uuriti näiteks Päikese spektrit lainepikkuste vahemikus 0,1 ... 0,3 μm. Üks minut pärast raketi starti avati riista kate ja automaatgiid orienteeris spektrograafi pilu Päikesele. Difraktsioonivõre tekitatud spekter fotografeeriti ja seejärel riist suleti ning ta jäi ootama käsklust järgmiseks registreerimistsükliks. Iga spektrifoto algul ja lõpul pildistati ka spektrograafis asuvat kella. Mitmel katsel on Päikese kauget ultravioletset kiirgust mõõtnud Krimmi observatooriumi teadlased V. K. Prokofjev ja A. V. Bruns, kes töötasid välja skaneeriva spektromeetri Päikese ultravioletse kiirguse registreerimiseks (0,17 ... 0,2 μm). Nimetatud riistas töötas kiirgusvastuvõtjana avatud fotoelektronkordisti, mis

kujutab endast tavalist fotoelektronkordistit ilma klaasballoonita. On ju klaaskest määratud vaid selleks, et fotokatood ja kordistavad elektroodid asuksid vaakuumis, kosmoses on see aga nagunii kindlustatud. Alates 1960. aastast on teadlane S. L. Mandelstam korduvalt mõõtnud Päikese kiirgust isegi röntgenikiirte diapasoonis.

1955. aastal konstrueerisid T. A. Chubb ja H. Friedman tundliku ultravioletse kiirguse kvantide loendaja. See varustati kaltsiumfluoriidist aknakesega, mis laseb läbi ainult 0,1225 μm suurema lainepikkusega kiirgust, loendaja kambris olev täitegaas reageerib aga ainult 0,135 μm väiksemale lainepikkusele. Seega mõõdab niisugune loendaja ultravioletset kiirgust teravalt piiriteldud vahemikus 0,1225 μm kuni 0,135 μm. Sellest ajast alates on taolised ultravioletse kiirguse loendajad põhilisteks kiirgusvastuvõtjateks mainitud lainepikkustel; seejuures akna materjali ja täitegaasi varieerimisega saab nende tundlikkuse piirkonda nihutada.

Tähtede kauge ultravioletse kiirguse mõõtmiseni jõuti 1955. aastal. «Aerobee»-rakettidega tõsteti USA-s üles fotomeetrid ultravioletse kiirguse kvantide loendajatega ja saadi üsna huvitavaid, kuid astrofüüsikaliselt mitte just kergesti analüüsitavaid tulemusi. Rohkem kasu oleks saadud kas või heledaimate tähtede ultravioletse spektriosa täpsemast mõõtmisest, spektromeetriast.

1960. aastaks jõutigi Rochesteri ülikoolis (USA) raketispektromeetrite ehitamiseni paraboolsete peapeeglite baasil ($D = 23$ cm, 1 : 1,5). Dispergeerivateks elementideks olid võred, kiirgusvastuvõtjaina rakendati fotoelektronkordisteid. Spektromeetrid lasti raketiga «Aerobee 150A» üles 22. novembril 1960. Nad jõudsid 172 km kõrguseni ja skaneerisid seal pöörlemise ning pretsessiooniga taevast. Et määrata, kuhu spektromeetrid teatud hetkel olid suunatud, kasutati veel raskusjõu suunda teatavat andurit ja nähtavas spektriosas töötavat elektrofotomeetrit. Juba varem olid elektronarvutisse viidud ka 20 heledama tähe fotomeetria andmed ning koordinaadid. Esimene lend tõi mõõtmissignaalid üldse 30 tähelt. Seitsme tähe kohta käivad tulemused olid mõõtmistehniliselt väga head, kaheksalt järgmiselt saadi ka veel üht-teist kasulikku, kuid ülejäänute osas tuli konstateerida ainult avastamist. T. P. Stecheri ja J. E. Milligani poolt tehtud andmestiku astrofüüsikalise interpretatsiooni katses tähendatakse, et

vaatluste kooskõla teatud spektriklassi tähtede atmosfääride seniste teoreetiliste mudelitega oli üldiselt rahuldav, alla 0,24 μm ilmnesid aga teravad lahkuminekud kuumade tähtede atmosfääride senisest teooriast. Avastati veel virmaliste intensiivne kiirgus ultraviolettpiirkonnas. Katseid korrati samasuguste ning hiljem täiuslikumate ultraviolett-spektromeetritega; praeguseks on saadud sadade tähtede ultraviolett-spektreid 0,1 nm-ni ulatuva lahutusvõimega.

1962. aastal tõusis USA-s White Sandsi raketipolügoonilt «Aerobee»-rakett Geigeri loendajatega röntgenikiirguse mõõtmiseks. Eksperimendi teostajad leidsid, et meie Galaktika tsenter on tugeva röntgenikiirguse allikaks. 1963. aastal avastati sama tüüpi raketi pardalt tundlikumate vastuvõtjatega tehtud mõõtmistel Skorpioni tähtkujust röntgeniallikas, mille intensiivsus võrdus umbes rahulikult Päikeselt saabuva röntgenikiirgusega. Ligikaudu 8 korda nõrgemini kiirgas endine supernoova Krabi udukogus. Kahe «Aerobee» lennuga 1964. aastal avastasid parema tundlikkuse ja hea nurklahutusvõimega teleskoobid veel ligi kümmekond röntgeniallikat. Avastati ka Kepleri supernoova röntgenikiirgus; üldse kaldutakse õigeks lugema hüpoteesi, et röntgeniallikad tekivad supernoovade plahvatusel.

● tehiskaaslased-observatooriumid

Suurejoonelised atmosfäärivälise astronoomia viljelemise võimalused avasid tehiskaaslased. Raketivaatluste lühiajalisus ja instrumentide suunamisraskused ei lasknud sellel muidu sobival meetodil astrofüüsika huvisid piisaval määral rahuldada ja üsna pea pärast teatud kandejõuga tehiskaaslaste ilmumist hakkas astronoomide huvi raketiaparatuuri vastu langema. Tehiskaaslaste pardalt toimetatavates teaduslikes vaatlustes toimus üleminek geofüüsikalistelt mõõtmisaparaatidelt astronoomilistele aegamööda, samuti nagu on raske piire tõmmata Maa atmosfääri ülakihtide uurimise ning Maa-lähedase kosmilise ruumi uurimise vahel. Alates 1957. aastast, millal Nõukogude Liidust viidi orbiidile esimene tehiskaaslane maailmas, on kõik nõukogude sputnikud olnud varustatud paljude mõõteseadmetega, mis on rikastanud geofüüsi-

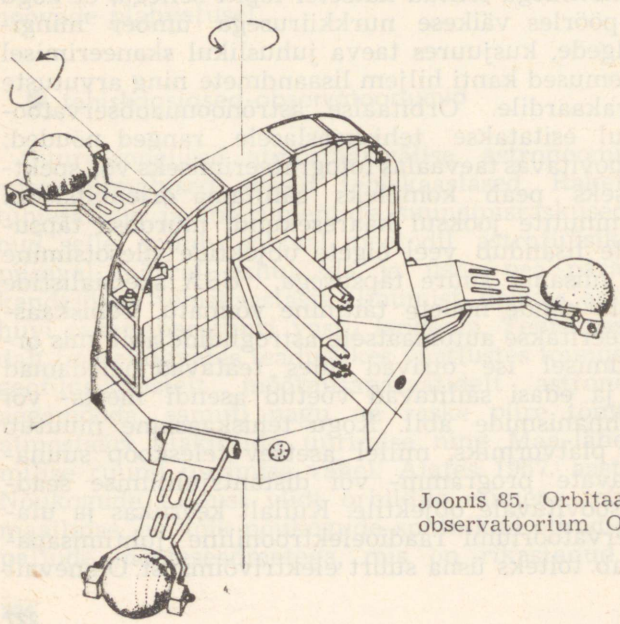
kat, astronoomiat ja teisigi loodusteadusi uute faktiliste andmetega. Suhteliselt väikeste kandejõudude ja orienteerimatuse tõttu jäid tehiskaaslased mõnede esimeste arenguaastate jooksul siiski vaid kosmosesse viidud laboratooriumideks ega tõusnud maapealsete astronoomiliste vaatlusbaaside tasemele.

Mis iseloomustab kaasaegseid tehiskaaslasi kui astronoomiliste vaatluste baase? Kõigepealt tuleb konstateerida, et kandejõu seisukohast pole teleskoobi ja tema lisandite orbiidile viimine raketitehnikale eriline probleem — tehiskaaslaste kaal on järjest kasvanud ja ulatub juba mitme tonnini. Ameerika raketispetsialisti E. Sängeri ühes artiklis näidati, et tõstejõu erimaksumus (hinna ja kaalu suhe) väheneb pidevalt. Selle suurusjärguks loeti paarikolme aasta eest 1000 dollarit kilogrammi kohta, kuid mõne aasta jooksul on oodata langemist ühe suurusjärgu võrra, see tähendab kuni 100 dollarini kilogrammi kohta. Suhteliselt raskemaks osutub observatooriumi orienteerimine ja stabiliseerimine, sest teleskoobi suunamiseks uuritavatele objektidele on vajalik teatava aluse või statiivi telgede asendi küllalt täpne fikseerimine kinnistähtede suhtes (muutmine astrostaadiks). Paljudel tehiskaaslaste ja rakettidega tehtud katsetel lepiti sellega, et kogu kompleks pöörles väikese nurkkiirusega ümber mingisuguste telgede, kusjuures taeva juhuslikul skaneerimisel saadud tulemused kanti hiljem lisaandmete ning arvutuste abiga taevakaardile. Orbitaalse astronoomiaobservatooriumi puhul esitatakse tehiskaaslasele ranged nõuded: mistahes soovitavas taevaalas fotografeerimiseks või spektrite saamiseks peab kompleks säilitama orientatsiooni kümnete minutite jooksul kaaresekundi murdosa täpsusega, sellele lisandub veel õigete objektide ülesotsimine vähemalt niisama suure täpsusega. USA spetsialistide arvates pole nende nõuete täitmine võimatu. Tehiskaaslane orienteeritakse automaatsete astrogiidide abil, mis orbiidile jõudmisel ise otsivad üles teatavad heledamad juhttähed ja edasi säilitavad võetud asendi inerts- või reaktiivmehhanismide abil. Kogu tehiskaaslane muutub stabiilseks platvormiks, millel asetsev teleskoop suunatakse teatavate programm- või distantsjuhtimise seadmete abil soovitavale objektile. Küllalt keerukas ja ulatuslik observatooriumi raadioelektrooniline juhtimisaparatuur vajab toiteks üsna suurt elektrivõimsust. Olenevalt

vaatlusülesannetest võib see ulatuda sadadest vattidest kuni ühe kilovatini, mida kuivpatareid või akumulaatorid muidugi kuudeks ja aastateks ei suuda kindlustada. Seepärast toetutakse põhiliselt elektrienergia tootmisele tehiskaaslase pardal mingisuguste muundite või generaatorite abil. Praegu kasutatakse selleks peamiselt päikesepatareisid. Tulevikus võivad tuumaenergeetilised seadmed kanda ka mitmekilovatiseid toitevõimsusi.

Huvitav on märkida, et fotoelementide kasutamist päikesekiirguse elektrienergiaks muutmisel kaugema tuleviku kosmotehnikas ennustati kõigepealt Frank Riley 1952. aastal ilmunud fantastikajutustuses, juba mõne aasta pärast aga hakatigi niisuguseid seadmeid tööstuslikult tootma. Fantastika võib mõndagi leiutist õigesti ette näha, kuid eksib tavaliselt aja määramisel — kannab selle liiga kaugesse tulevikku.

Orbitaalne geofüüsikaobservatoorium OGO 1 startis 4. septembril 1964. Ta viidi väga piklikule orbiidile (apogee ligi 170 000 km, perigee üle 300 km), kus ühe täistiiru tegemiseks ümber Maa kulub 64 tundi. Seda tüüpi tehiskaaslaste seeria üldprogrammi oli kogunenud teadlastelt enam kui 50 ettepanekut, poole tonni raskune OGO 1



Joonis 85. Orbitaalne päikeseobservatoorium OSO.

püüdis neist lahendada 20. Sidesüsteemi kaudu sai talle anda 254 erinevat käsklust, pardal oli võimalik salvestada 86 miljonit kahendühikut informatsiooni ja anda seda edasi Maale kiirusega 84 000 kahendühikut sekundis. Juba üleslaskmise ajast pärinevad viperused tehiskaaslase orienteerimises tõid kaasa nii teadusliku aparatuuri vale asendi kui ka päikesepatareide väheefektiivse tegutsemise. Vajaka jäi toitevõimsusest. Mingil moel õnnestus hiljem siiski päikesepatareisid Maalt saadetud käsklusega pöörata ning OGO 1 elustus. Vastuvõtujaamad said jälle informatsiooni observatooriumi pardal olevailt geofüüsikalistelt mõõteseadmetelt.

Orbitaalne päikeseobservatoorium OSO 2 (joonis 85) startis Kennedy neemelt 3. veebruaril 1965 pärast ligi aastast stardi edasilükkamist rikete pärast. Ta jõudis üsna ringikujulisele orbiidile, mille kõrgus on ligikaudu 630 km, kaldenurk ekvaatori suhtes 33 kraadi ja periood 97 minutit. Peale Päikese ultravioletse kiirguse (30 ... 140 nm) spektromeetria, Päikese röntgenikiirguse (0,2 ... 6 nm) mõõtmise, kosmiliste kiirte ning gammakiirte intensiivsuse määramise ja muude taoliste ülesannete täitmise asus observatooriumil ka aparatuur spektraalülevaate loomiseks taevast ultravioletses kiirguses kahe spektromeetriga, mis mõõdavad umbes 0,5×1-kraadiliselt taevaalalt saabuva kiirguse spektrit vahemikus 90 kuni 200 nm ja 180 kuni 380 nm. See oli sissejuhatus üksikute tähtede ultravioletse kiirguse eelseisvaks mõõtmiseks suurematelt orbitaalobservatooriumidelt.

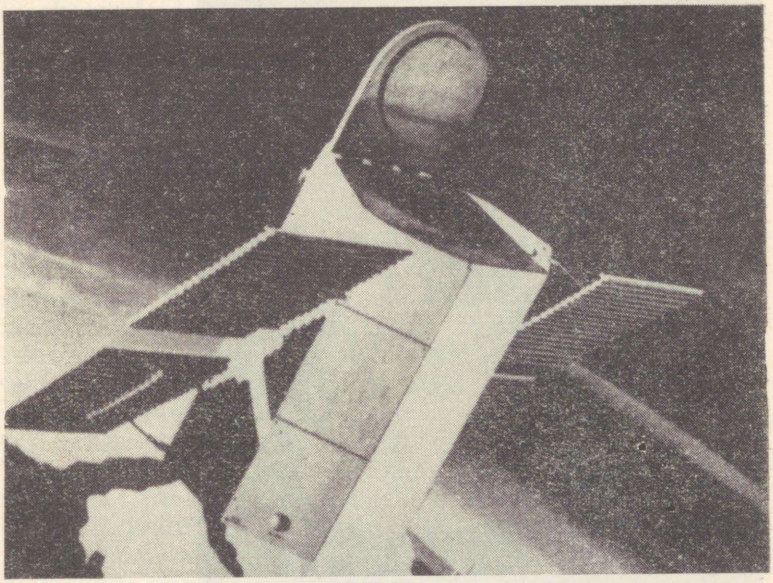
Orbitaalse astronoomiaobservatooriumi OAO S-18 esimese eksemplari üleslaskmine kavandati Ameerika Ühendriikides aastaile 1964—1965. Observatoorium oli ette nähtud kahe astrofüüsikalise vaatlusprogrammi täitmiseks: üks nendest koostati Smithsoni astrofüüsikaobservatooriumis F. Whipple'i juhtimisel ja nägi ette katse luua taevaatlas kolmes ultravioletses spektrilõigus, teine programm valmistati ette Wisconsini ülikoolis A. Code'i juhtimisel ja selle eesmärgiks oli üksikute tähtede ning udude fotomeetriline uurimine. Perspektiivselt on Goddardi kosmonautikakeskuses, Princetoni ülikoolis ja mujal juba alustatud ka programmide koostamist OAO S-18 järgmistele eksemplaridele.

«Celoscope'i» nime all tuntuks saanud aparatuurikompleks taevaatlase koostamiseks koosneb neljast 30-

sentimeetrisest peegelteleskoobist, iga teleskoobi fookuses asetseb spetsiaalne televisiooni-saatetoru uvikon. Filtritega eraldatakse esimesele teleskoobile spektrilõik 110—160 nm, teisele 160—220 nm, kolmandale 220—300 nm, neljas aga töötab piluta spektrograafina piirkonnas 110—220 nm. Kogu tehiskaaslane on orienteeritud tähtede suhtes ja säilitab 6 astrogiidi abil oma asendi 45 minuti vältel 0,1 kaaresekundi täpsusega. Maapealsete käsklustega saab teda suunata järjest uutele taevaaladele, mis võimaldab nimetatud kolmes ultravioletses piirkonnas pikema aja jooksul kaardistada kogu taeva. Lisaks vastuvõtujaamas fotografeeritava televisioonikujutise otsesele ülekandmisele muudetakse vaadeldavate objektide heledustele ja spektritele vastavad signaalid tehiskaaslase pardal numbriliseks koodiks, kantakse telemeetrilise side abil üle ning trükitakse maapealses vastuvõtujaamas kataloogina koos objektide (tähtede, udude) koordinaatidega; fotometreerimise täpsus on $0^m,1$ ja asendi määramise täpsus 30 kaaresekundit. Teleskoobid suunatakse uuele taevaalale alles pärast eelmise kindlat registreerimist. Et saatetorude tundlikkus ulatub kümnenda tähesuuruseni, siis loodetakse umbes aastaga registreerida ligi 100 000 tähe mõõtmisandmed.

Wisconsini ülikooli programmi täitvasse aparatuuri kuulub mitu fotomeetrilist ja spektromeetrilist süsteemi, mille abil uuritakse detailsemalt tähtede kiirgusenergiate jaotust ja difuussete udude emissioonijooni 300—800 nm piirkonnas. Wisconsini ülikooli teadlasi huvitasid ka mõnesaja tähe ja udukogu spektrid kaugest ultravioletsest kiirgusest nähtava spektrini. Selleks on orbitaalobservatooriumile monteeritud kaks skaneerivat spektromeetrit (100...200 nm ja 200...400 nm). Avaldatud andmete kohaselt paigutatakse OAO S-18 esimesele eksemplarile nende ülesannete täitmiseks veel üks 40 cm ja neli 20 cm teleskoopi. Suurem teleskoop ($D=40$ cm, 1:2) on määratud udude mõõtmiseks fotomeetriga, väiksemad riistad mõõdavad tähti. Mõõtmistulemused salvestatakse OAO pardal asetsevas mälus, mille maht on 100 000 kahendühikut, ja antakse Maale edasi teatavate ajavahemike tagant toimuvail sideseanssidel («Celoscope»-aparatuuri juhtimine ning signaalide edasiandmine toimub vahetult vaatluste teostamise ajal).

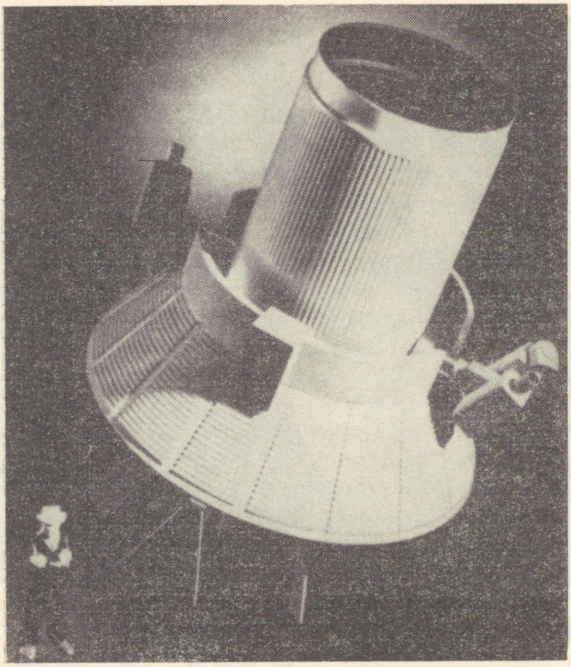
Üldkonstruktsioonilt kujutab OAO S-18 endast 3



Joonis 86. Orbitaalse astronoomiaobservatooriumi OAO üldvaade (projekt).

meetri kõrgust kaheksatahulist prismat, mille ristlõike diagonaali pikkus on 2 meetrit (joonis 86). Observatooriumi kogukaal on 1500 kg, millest teaduslikule aparatuurile langeb 450 kg. Toiteenergiat saab orbitaalne astronoomiaobservatoorium päikesepatareidelt koguvõimsusega 500 kuni 900 vatti ja pardal olevatest akumulaatoritest. Orbiidi ettenähtud kõrgus peaks olema umbes 900 km, kaldenurk ekvaatori suhtes 32 kraadi. 1966. aasta algul lennutatigi üks OAO eksemplare (eelkirjeldatust küll veidi erineva aparatuuriga) orbiidile, kuid rikete tõttu vaatluste toimetamiseni ei jõutud. OSO- ja OGO-tüüpi observatooriume on õnnestunult startinud juba mitmeid.

Atmosfääriväliste vaatlustega ja orbitaalobservatooriumide loomisega tegeldakse nii teoreetiliselt kui ka praktiliselt paljudes maailma observatooriumides. Mõni aeg tagasi fantastilistena tundunud projektid on juba realiseerimisel ja koostatakse uusi ning veelgi julgemaid. OAO S-18 üldkonstruktsiooni korrates kavatsetakse orbii-



Joonis 87. Kitt Peaki observatooriumis projekteeritav 50-tollise läbimõõduga orbitaalne teleskoop (eskiis).

dile viia veel mitu observatooriumi, mis on varustatud kuni ühemeetrise läbimõõduga teleskoopidega. Kitt Peaki observatooriumis koostatakse 50-tollise (127 cm) orbitaalteleskoobi projekti: võimalik, et see teleskoop lastakse 24-tunnilise tiirlemisperioodiga orbiidile ning jääb seega alati enam-vähem sama geograafilise punkti (juhtimis- ja mõõtmiskeskuse) kohale (joonis 87). Varustatuna infrapunase, nähtava ja ultravioletse kiirguse fotomeetrite, spektromeetrite, bolomeetrite ja fotokaameraga, on ta määratud tähtedevahelise aine, galaktikate ja üksikute tähtede struktuuri uurimiseks. On leitud lahendusi röntgeni- ja gammakiirteteleskoopide loomiseks, esitatakse ka kuni kümnemeetrise läbimõõduga optiliste orbitaalteleskoopide ja kolmesajameetriste raadioteleskoopide

ideekavandeid. Täiesti põhjendatult võib loota, et juba lähemate aastate jooksul rikastavad «õhuookeani» põhjast pinnale tõstetud teleskoobid astronoomiateadust paljude uute väärtuslike vaatlusandmetega.

● taevakehadele saab minna ligidale

Orbitaalobservatooriumide kõrval saab kaasaegsete ja seda enam tuleviku raketitehniliste vahenditega astronoomilisi vaatlusi (nüüdsest alates ka eksperimente) veel sügavamale maailmaruumi viia. Täiesti reaalne on kosmoserakettide saatmine orbiitidele ümber lähimate taevakehade (Kuu, Päike, planeedid). Analoogilisteks ülesanneteks võib rakendada ka nimetatud taevakehadele langevaid sondrakette, mis pehme maandumise korral muutuvad kohapeale saadetud automaatseteks vaatlusjaamadeks. Täiesti reaalseks astronoomiaobservatooriumi baasiks saab niisugusel juhul Kuu, kus oleksid täidetud peaaegu kõik atmosfäärivälistе vaatluste eelistingimused.

Astronoomiaeksperimentide eelkäijaks oli kahtlemata nõukogude esimese kosmoseraketi («Luna 1») pardalt tekitatud tehiskomeet, mis oli määratud raketi vaatlemise hõlbustamiseks. Hiiglasuurt, 600-kilomeetrise läbimõõduga naatriumipilve nähti Veevalaja tähtkujus 5—6 minuti kestel. Tema maksimaalne heledus oli umbes 4—5 tähesuurust. Vaatamata tugevale pilvitusele õnnestus mõnes observatooriumis siiski komeeti fotografeerida.

4. oktoobril 1959 startis Nõukogude Liidust kolmas kosmoserakett, mille pardal oli automaatjaam «Luna 3». See oli varustatud mitmesuguse teadusliku aparatuuriga, raadiotehniliste seadmetega, orienteerimissüsteemiga, pardaaparatuuri juhtimisseadmetega, toitealli-katega ja soojusrežiimi automaatregulaatoritega. Raketi pardal asus ka foto-televisiooniaparatuur Kuu tagakülje fotografeerimiseks ja kujutise edasiandmiseks Maale. 7. oktoobril lülitati kaamerad sisse, kaugus Kuu pinnani oli sel ajal 65 200 km. Kaks kõrvuti paiknenud automaatkaamerat ($F = 20$ cm ja $F = 50$ cm) pildistasid Maalt saadud käskluste kohaselt. Film ilmutati jaama pardal ja anti televisiooni kaudu edasi siis, kui jaam oli uuesti lähenenud Maale. Televisioonisüsteemis valgustati ilmutatud filmi elektronkiiretoru ekraanilt ühtlaselt liikuva punktiga (nagu seda näeme ostsilloskoopide ekraanidel). Val-

guspunkt skaneeris aeglaselt edasi keritavat filmi rida rea järel, teisel pool filmi aga mõõdeti fotoelektronkordistiga, kui palju valgust filmist läbi tuli. Fotoelektronkordisti väljundvool vastas seega filmil oleva pildi tumenemisele (järjestikku ridadeks laotatud kujul). See signaal võimendati ning anti raadio teel edasi Maale. Üleandmise kiirust tuli aeglustada, et kitsamas sagedusribas mürad ei mõjutaks signaali nii tugevasti (saatja üldisest kiirgusvõimsusest langes maapinna ruutmeetrile vähem kui miljardik miljardikust). Maal kirjutati rida rea järel saabuv kujutis jälle õiges korras üles ning saadi lõpuks pildid seni nähtamatust Kuu tagaküljest. Fotode hoolika analüüsi tulemusena leidsid astronoomid palju pinnamoodustisi, nagu neid merede ja mägede nime all tunneme Kuu esiküljel. Nad said nimed ning nüüd oli juba võimalik koostada ka Kuu tagakülje kaart. Järelejäänud «valge laigu» likvideerimiseks pildistati vastavaid alasid veel nõukogude kosmoseraketi «Zond 3» pardalt 20. juulil 1965. aastal. Edasi jätkus üldine kaardistamine Kuud ümbritsevale orbiidile viidud automaatjaamadelt «Luna 12» ja «Lunar Orbiter» saadud detailsete piltide baasil. Nüüd on astronoomide käsutuses küllaldaselt andmeid nn. merede ja mäeahelike jaotumise kohta kogu Kuu pinna ulatuses.

Kosmoseraketilt «Mariner 2» mõõdeti 1962. aastal lähedalt Veenuse raadiokiirgust kahel lainepikkusel — 19 mm ja 13,5 mm. Varasemad raadiovaatlused Maalt olid neil lainepikkustel andnud mitmeti tõlgendatavaid ja halvas kooskõlas olevaid tulemusi, mistõttu Veenuse atmosfääri kohta koostati üsna erinevaid arvutuslikke mudeleid. Mõnede oletuste kohaselt oli Veenuse pind kuiv ja kuum, teised andsid üsna Maale lähedased tingimused. Veenuse raadiokiirguse mõõtmine kohale saadetud kosmoseraketi pardalt umbes poolemeetrise läbimõõduga raadioteleskoobi abil pidi tooma selguse Veenuse atmosfääri probleemi. «Mariner 2» täitis ülesannet püüdlikult ja saatis Maale 65 miljonit kahendühikut informatsiooni. Olles Veenuse lähedal, liigutas ta elektrimootoriga oma antenni edasitagasi ja skaneeris sel viisil planeedi pinda. Mõõtmistulemused numbrilisustati raketi pardal ja teatati siis juhtimiskeskusse Maal: neist saadi lihtsate arvutustega temperatuurid üle 300° C. Näis, et Veenusel leidub küll kõrgeid mägesid, kuid veeauru olemasolu atmosfääris jäi

kahtlaseks. Niisiis on Veenuse pind suhteliselt väga kuum, kuiv ja Maa elanikele ning nendetaolistele mitte just sobiv.

«Mariner 2» lennu andmete põhjal täpsustati ka Veenuse massi. Nüüd võime öelda, et see on 0,81485 Maa massist sajandiku protsendi täpsusega. Püüti ka Veenuse magnetvälja mõõta ning saadi üsna väike arv — näib, et Veenuse magnetväli oli enam kui kümme korda nõrgem Maa omast. 1965. aasta lõpul lähetati Nõukogude Liidust Veenust uurima kosmoseaparaadid «Venera 2» ja «Venera 3», järgmise aasta algul möödus esimene neist 24 000 km kaugusel Veenusest, teine aga viis vimpli Nõukogude Liidu vapiga Veenusele.

1962. aastal tegid nõukogude teadlased esimese katse saata kosmoserakett Marsile. «Mars 1», mis startis 1. novembril 1962, andis edasi üsna palju väärtuslikke andmeid oma lennu esimesel poolel, kuid umbes 106 miljoni kilomeetri kaugusel Maast katkes raadioside.

1964. aasta novembris jõudis järjekordselt kätte aeg marsirakettide väljasaatmiseks, mis pidid pärale jõudma vastasseisu ajal 1965. aastal. 5. novembril ja 28. novembril startisidki USA-st «Mariner 3» ja «Mariner 4», 30. novembril Nõukogude Liidust «Zond 2». Kõik nad alustasid reisi Marsi poole, varsti aga langes «Mariner 3» reast välja rikete tõttu toitesüsteemis. «Mariner 4» televisioonikaamerad salvestasid kohtumisel Marsiga 14. juulil 1965 paarkümmend pilti sellest punasest planeedist magnetlindile, kust neid pärast möödumist aegamööda Maale edasi anti. Kuna foto sisaldas umbes 250 000 kahendühikut informatsiooni ja edasiandmise kiiruseks oli valitud vaid umbes 8 kahendühikut sekundis, tuli «Mariner 4» raadiosaatjal iga kujutist anda edasi üle 8 tunni. Selgesti eraldatavate kanalite olemasolu need fotod küll ei tõendanud, kuid sisaldasid muid väga huvitavaid andmeid Marsi kohta. Fotode kvaliteet on 20—30 korda parem kui seni täiuslikemate maapealsete riistadega saaduil; võib eraldada umbes 3 km läbimõõduga detaile.

Ka meile lähima taevakeha Kuu esikülje pinna detailsemat uurimist piirasid seni Maa atmosfääri poolt tekitatavad häired. Raketitehnika vahendid aga lubavad nüüd kaamerad Maa atmosfäärist välja viia ning nendega Kuule läheneda kasvõi «kuundumiseni» välja.

USA-s selleks loodud kosmoserakette «Ranger» saatis

kahjuks üsna kaua ebaõnn. Üks «Rangerite» perekonna liikmeist («Ranger 6») jõudis isegi õnnelikult ettenähtud orbiidile ja lähenes Kuule, kuid kuuelt televisioonikaameralt ei jõudnud Maale ühtki pilti. 2. veebruaril 1964 jälgiti Licki observatooriumist, kuidas kallihinnaline kosmoseuurimise aparaat kasutult Kuu pinnale langes. Kuu esikülje pildistamise lähedaselt vahemaalt tegi teoks alles «Ranger 7». Ta alustas televisioonikaameratega Kuu kujutise ülekannet 2000 kilomeetri kauguselt, ja suundudes otse Kuule, jätkas seda pidevalt kuni mõnekilomeetrise kõrguseni. Edasi ei pidanud aparatuur enam vastu ja kohe järgnes dramaatiline lõpp Pilvede mere kohal Kuu pinnal. See oli 31. juulil 1964. Veerand tundi televisiooniülekannet «Ranger 7»-lt rikastas astronoomiat 4000 fotoga Kuust, mis olid tehtud senistest sada, tuhat ja enam korda väiksemalt kauguselt. Viimastel piltidel võib eraldada pinnamoodustisi laiusega üks meeter ja sügavuse või kõrgusega 30 sentimeetrit. Rahvusvaheliselt tuntud Kuu eriteadlane G. P. Kuiper kinnitas, et «Rangeri» piltidel on näha tuhat korda väiksemad detailid kui parimatel Maalt tehtud fotodel.

«Ranger 7» viidi orbiidile «Atlas-Agena B» raketikomplekti poolt ja ta kaalus umbes 365 kg. Kaameraid oli pardal kokku 6 ja nad kandsid üle vaateväljad 25°, 8°,4, 6°,3 ja 2°,1. Vastuvõtuks kasutati 28 m paraboolantenniga raadioteleskoopi, pildid televiisoriekraanilt filmiti. Järgnenud «Ranger 8» ja «Ranger 9» andsid Maale edasi veel kokku ligi 12 000 fotot Kuust. «Ranger 9» startis 21. märtsil 1965, alustas televisioonisaadet umbes 25 000 kilomeetri kaugusel Kuust ja lõpetas vähem kui kilomeetri kaugusel, kukkudes Alfonsi kraatri lähedale. Osa edasiantud televisioonisaatest transleeriti USA-s tavalise vaatelevi-saatena.

1965. aastal Nõukogude Liidust Kuu suunas lähetatud kosmiliste automaatjaamade «Luna 5», «Luna 6», «Luna 7» ja «Luna 8» ülesandeks oli juba ette valmistada aparatuuri pehmet maandamist Kuu pinnale. 31. jaanuaril 1966. aastal startinud nõukogude automaatjaam «Luna 9» laskuski 3. veebruaril pehmelt Kuu pinnale ja hakkas sealt raadio teel Maale andma fotosid ning muud väärtuslikku informatsiooni. Pöörleva televisioonikaameraga saadud ringpanoraamil võis eraldada jaama läheduses isegi millimeetriste mõõtmetega pinnaelemente. Korrapealt purustati hüpotees paksust pehmest tolmu-

kihist, mida varem arvati Kuu pinda katvat — automaatjaam ei vajunud üldse pinnasesse. «Luna 10», mis järgmisena Kuu suunas välja saadeti, muudeti Kuu tehiskaaslaseks, ta hakkas tiirlema ümber Kuu mõnesaja kuni tuhande kilomeetri kõrgusel. Ka sellelt automaatjaamalt tehti teaduslikke vaatlusi — Kuu pinna infrapunase ja gammakiirguse mõõtmisi, magnetvälja tugevuse määramist jms.

Suurepäraseid vaateid Kuu pinnast andsid Maale edasi ka USA automaatjaam «Surveyor 1» (laskus pehmelt Kuule 2. juunil 1966) ja nõukogude automaatjaam «Luna 13» (laskus pehmelt Kuule 26. dets. 1966).

Astronoomilised uurimised, mis on seotud inimese aktiivse kosmilise tegevusega, põimuvad läbi kõige aktuaalsemate kaasaegsete teaduslike ja tehniliste probleemidega. Nii nagu astronoomia teenindab inimkonna väljumist kosmosesse teadmistega «maailmaruumi-geograafia» alalt, nii peavad paljud loodusteaduste ja tehnikaharud abistama nüüd praktilist astronoomiat nende teadmiste kogumisel. Astronoomia, mis kunagi sai arenemistõuke praktilise elu vajadustest, peamiselt orienteerumise ja aja arvestamise osas, vahepeal aga oli kaotamas otsest rakenduslikku tähtsust ja sidet inimühiskonna vajadustega, on jälle kerkinud inimkonna praeguse ja lähema tuleviku tegevusega kõige tihedamalt seotud teaduste hulka. Nõukogude astronautika eriteadlane L. I. Sedov kirjutab: «Astronoomia, füüsika ja bioloogia edasised edusammud on lähemal ajal ilmselt tihedasti seotud selliste kõige tähtsamate tehnikaharude arenguga, milledes kasutatakse raadioelektroonikat, arvutus- ja juhtimismasinaid, uusi materjale; töötatakse välja uusi elektrimootoreid ja -generaatoreid, uusi aatomienergia kasutamise meetodeid. Lühidalt, kultuuri edasine progress ja kosmoseuurimine — need on ühtse ahela lülid.»

sisukord

Sissejuhatus 5

I Teleskoobi ajalugu 9
Astronoomia kiviaeg 9
Teleskoobi leiutamine 12
Teleskoobiehituse pioneerid 17
Esimesed peegelteleskoobid 22
Fraunhoferi objektiividest hiiglarefraktoriteni 27

II Teleskoopide ehitus 37
Peegelteleskoobi optiline süsteem 37
Teleskoopide optiline võimsus 42
Teleskoobi konstruktsioon 47
Palomari hiiglane 56
Euroopa suurim tehissilm 66
Bernhard Schmidt ja tema kaamera 72
Maksutovi süsteem ja metallpeeglid 82
Teleskoobid eriülesanneteks 87

III Kiirgusvastuvõtjad 95
Silm ja optika 95
Fotograafia astronoomias 100
Fotokatood loendab valguskvante 107
Kujutiste võimendid 114
Elektronfotograafia 121
Taevakehad televiisoriekraanil 125

IV Teleskoobi abiseadmed 134
Optilisest kujutisest arvuliste andmeteni 134
Spektrograafid 137
Teleskoobi juhtimispult 149
Tornimehhanismid ja elektronarvuti 155
Observatooriumi laboratooriumides 164

V Raadioteleskoobid 171
Teine aken taevasse 171
Planeet omandab raadionägemise 175

Raadioreflektorid 178
Raadiokiirguse mõõtmine 185
Raadiokiir kompab taevakehi 190
Raadioastronoomia gigandid 196
Raadiotaevas 204

VI Atmosfääriväline astronoomia 209
Õhuookeani põhjast pinnale 209
Õhupallil tähtedele lähemale 214
Raketiastronoomia 223
Tehiskaaslased-observatooriumid 226
Taevakehadele saab minna ligidale 233

Уно Кустасович Вейсманн
ЗВЕЗДЫ И ТЕХНИКА
На эстонском языке
Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.
Оформление Л. Круусмаа
Toimetaja H. Heinoja. Kunstiline toimetaja A. Säde. Tehniline toimetaja A. Linkvist. Korrektorid V. Leibak ja H. Kahar.
Laduda antud 11. XI 1966. Trükkida antud 13. XII 1967. Paber 54/84/16. Trükipaber nr. 1 — Ligatne Paberivabrik — Läti NSV. Trükipoognaid 15. Tingtrükipoognaid 12,6. Arvestuspoognaid 12,97. Trükiarv 5000. MB-10910. Tellimise nr. 3122. Trükikoda «Ühiselu», Tallinn, Pikk t. 40/42. Hind 56 kop.

A
28930
7.12.94

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00449216 3