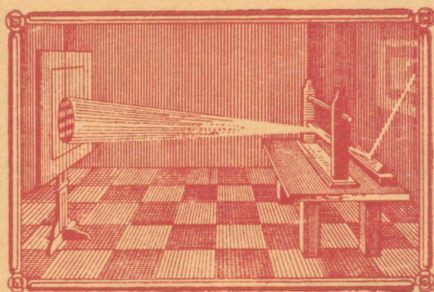


POPULAARTEADUSLIK
SARI

S. VAVILOV

SILM JA
PÄIKE



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

A-16558E

S. I. VAVILOV

SILM JA PÄIKE

(VALGUSEST, PÄIKESEST JA NÄGEMISEST)



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

TALLINN 1954

Originaali tiitel:

С. И. Вавилов

Глаз и солнце

(О свете, солнце и зрении)

Издание пятое,
дополненное и исправленное
Издательство Академии наук СССР
Москва 1950 Ленинград

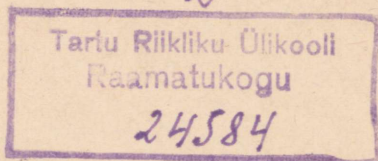
Tõlkinud R. Toming

*NSV Liidu Ministrite Nõukogu määrusega
määrati*

S. I. VAVILOVILE

*teaduslike tööde «Valguse mikrostruktuur»
ja «Silm ja Päike» eest 1952. a. Stalini
esimese järgu preemia*

2



SISSEJUHATUS

Wär nicht das Auge sonnenhaft
Wie könnten wir das Licht erblicken?¹

Goethe

Silma ja Päikese kõrvutamine on niisama vana kui inim-sugu ise. Selle kõrvutamise allikaks ei ole teadus. Teaduse kõrval, samaaegselt uue loodusteaduse poolt avastatud ja seletatud nähtuste pildiga, jätkab ka meie ajal eksisteerimist lapse ja loodusinimese kujutluste maailm ning last ja loodusinimest teadlikult või ebateadlikult matkivate poetide maailm. Sellesse maailma tasub mõnikord pilku heita kui ühte teaduslike hüpoteeside võimalikest allikatest. See maailm on imeline ja muinasjutuline, temas ehitatakse loodusnähtuste vahele julgelt seoste sildu, mille olemasolust teadusel mõnikord veel aimugi ei ole. Kord aimatakse nende seoste olemasolu õigesti, kord on nad täiesti ekslikud ja otse absurdsed, kuid nad väärivad alati tähelepanu, sest need eksitused aitavad tihti mõista tõde. See tõttu on ka silma ja Päikese vahelise seose küsimusele algul õpetlik läheneda lapse, loodusinimese ja poeedi kujutluste seisukohalt lähtudes.

Peitust mängides otsustab laps end sageli peita kõige ootamatul viisil: ta suleb silmad või katab need kätega, olles veendunud, et nüüd teda keegi ei näe — tema jaoks on nägemine identne valgusega.

Muide, veel hämmastavam on nägemise ja valguse sellise instinktiivse segiajamise säilimine täiskasvanutel. Fotograafid, s. o. praktilises optikas teataval määral kogemusi omavad inimesed, tabavad end tihti sellelt, et sulevad silmad, kui plaatide kassetitesse asetamisel või ilmutamisel on tarvis hoolikalt jälgida, et pimedasse tuppa ei pää-

¹ Kui päikseline poleks silm,
kuis saaksime siis valgust näha?

seks valgust. Kui tähelepanelikult kuulame seda, kuidas me räägime, kui jälgime omaenda sõnu, siis leiame ka siin kohe samasuguse fantastilise optika jälgi. Inimesed ütlevad, seda ise tähele panemata: «silmad hakkasid särama», «päike vaatas välja», «tähed vaatavad alla».

Poetidel on taevakehadele nägemisvõime omistamine ja, vastupidi, silmadele valgusallikate omaduste andmine kõige tavalisemaks, võiks öelda vältimatuks võtteks:

Tähed külmad,
just nagu süüdistavad silmad
nüüd vaat'vad pilkamisi neid.

Ta silmad sätendavad.
Puškin

Me kahekesi tähti vaatasime
ja nemad meid.
Fet

Taevakeha visuaalseks tajumiseks vältimatult vajalikke tunnuseid — kiiri — võrreldakse ripsmetega:

Hiiulgavad tähtede kullased ripsmed.
Fet

Suurel hulgal selliseid näiteid võib vaevata leida pea-aegu iga endisaegse või kaasaegse poeedi loomingust.

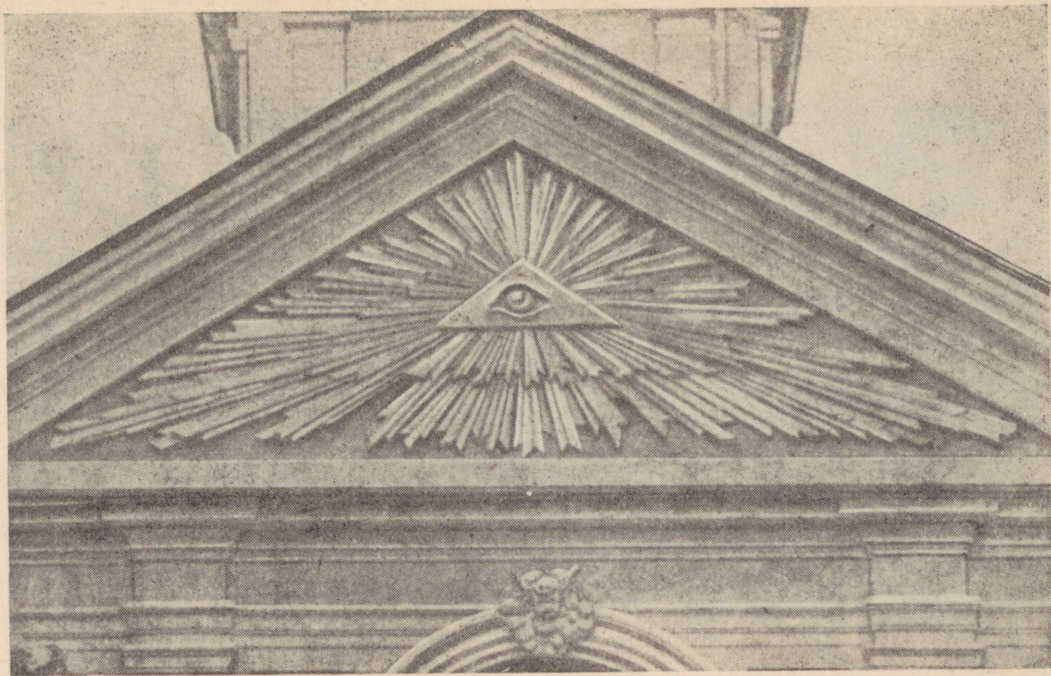
Lahutamatu ning keeruka seose olemasolu silma ja Päikese vahel eeldatakse egiptuse müütides, kujutistes ja hümnides.

Kui kaunid on Amon-Re mõlemad silmad,

öeldakse ühes teebai hümnis, kusjuures jumala silmade all mõistetakse päikest ja kuud. Nägemise ja valguse mõistete keerukast omavahelisest põimumisest annavad tunnistust teised read sellest samast hümnist:

Said inimesed nägijaiks,
kui esmakordselt sätendama hakkas sinu parem silm
ja vasak öisest pimedusest võitu sai.

«Kõikenägeva silma» muistsel religioosel sümbolil on kiirtest ümbritsetud silma kuju (joon. 1). Silm kiirgab ja näeb siin samaaegselt. Ühte vormi on valatud silm ja Päike, nägemine ja valgus.



Joon. 1. «Kõikenägeva silma» skulptuuriline kujutis lütseumikiriku frontoonil Puškinis.

Niisugune on teaduse-eelse, mitteteadusliku optika põhiline ja seejuures ebateadlik «tees»; selle kõrval leidub ka teine.

Me räägime alatasa, et valgus «lõikab», «torkab», «tungib läbi», «voolab». Sõna «valgusvoog» on võetud tarvitusele isegi teaduses ja tehnikas. Poetidel on valguse võrdlemine vedelikuga vältimatuks võtteks:

Vaaraode sõõrmeisse voolab tema kiirte kuld.
Ka mind saavad päevast päeva kastma sinu kiired.

Egiptuse hümnid

Jälle janus silmadega
elustavat valgust joon.
...Välguna purskub valguskiir.

Tjuttšev

Ja päike kuldsest pihust
mind oma vihmaga piserdab.

Jessenin

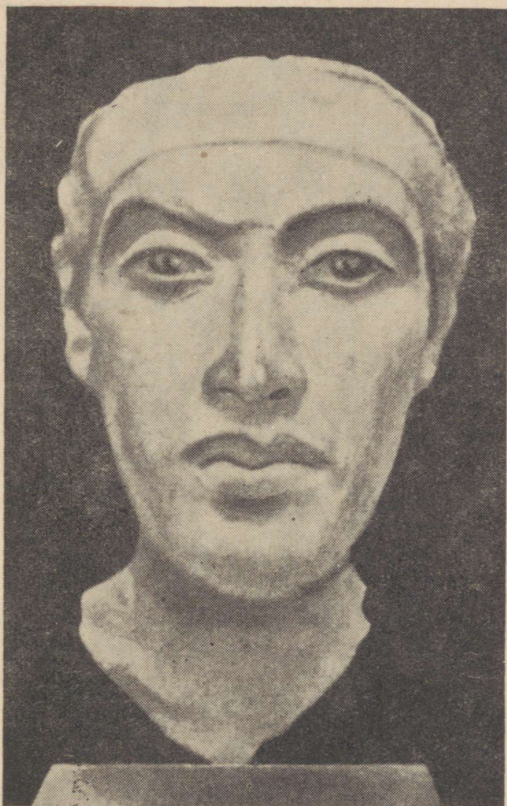
Selline kujutus valgusest kui millestki kehalisest omandab mõnikord terava kuju. Amenhotep IV ajast (aastast 1350 e. m. a.) pärinevatel egiptuse reljeefidel lõpevad päikesekettast — Atonist — väljuvad kiired sõrmedega (joon. 2).

Ka meie instinktiivsetes liigutustes ilmneb mõnikord primitiivsel kujul samasugune valgusele kehalisuse omistamine. M. Gorki jutustab oma mälestustes: «Ma nägin, kuidas A. Tšehhov püüdis oma aias istudes kübaraga päikesekiirt ja proovis seda täiesti edutult koos kübaraga pähe panna.» Kübaraga valguse püüdmine on vaevalt vähem veider kui Atoni päikesekiirtest käed.

Valguse püsiv võrdlemine liikuva kehaga või vedelikuga laste, loodusinimeste ja meie endi instinktiivsetes mõttekujudes annab selget tunnistust nende kujutluste ebateadlikust materialismist. Uhtlasi ei ole kahtlust, et valguse ja nägemise samastamise põhjuseks on välismaailma ja omaenda aistingute primitiivne segiajamine. Lapse ja loodusinimese puhul on see segiajamine veel väga tugev ja ta jääb «väljalülitatud teadvuse» tingimustes teataval määral püsima ka täiskasvanutel ning kultuurinimestel. Tõelise materialistliku teaduse võit seisiski eelkõige välismaailma selges lahutamises subjektiivsetest elamustest.

Teadvus muidugi astub omal ajal vältimatult vahele

ning purustab lapseliku ja poeetilise «optika» keerukad kujundid. Laps hakkab järk-järgult üha selgepiirilisemat vahet tegema oma aistingute ja välismaailma vahel, uni eraldub teravalt tegelikkusest, meelepetted reaalsusest.



Amenhotep IV, tõelise Päikese kultuse rajaja muistses Egiptuses (aastal 1370 e. m. a.).

Puškin teadis kahtlemata, et silmad ei «sätenda». Fetile oli endastmõistetavalt teada, et tähed ei «vaata», Tšehovit ei olnud tarvis veenda, et päikesekiirt on võimatu püüda.

Ja siiski on lapse kujutluste maailm poeedile seniaiani jäänud veetlevaks, kõige pildirikkamaks, mõttelendu kõige



Joon. 2. Amenhotep IV ajast pärinev tõelise Päikese kummardamist kujutav egiptuse reljeef El-Amarnast.

kergemini tabavaks. Seetõttu jääb «laste ja poetide optika» poeesiasse ja igapäevasesse ellu arvatavasti veel kauaks püsima. Ta elab kõrvuti teadvuse ja teadusega, nendega meie ajal segunemata, kuid pole kahtlust, et minevikus on ta ka teadusele teatavat mõju avaldanud.

Selles suhtes on eriti õpetlik valgust käsitleva teaduse ajalugu. See ajalugu algab katsest «laste ja poetide optikat» üle kanda teadliku, järjekindlalt arendatava teaduse valdkonda. Mainitud optika mõlemad «põhiteesid», s. o. väited nägemise ja valguse samasuse ning valguse kehalisuse kohta, olid valguseõpetuse aluseks muistses Kreekas ja säilisid mitmesugusel kujul peaaegu XVII sajandini m. a. j.

Platoni kuulsas loodusteaduslikus dialoogis «Timaios» jutustatakse näiteks: «Organitest löid jumalad eelkõige valgust kiirgavad silmad, mis pandi külge niisuguse kavatsusega: nende mõtte järgi pidi tekkima keha, millel poleks olnud tule põletavaid omadusi, vaid mis oleks tekitanud igale päevale omast mahedat tuld. Ja jumalad tegid nii, et päevavalgusega suguluses olev tuli, mis asub meie sees, voolab puhastatuna välja läbi silmade, mida jumalad tihedaks muutsid, eriti keskelt, et nad kinni peaksid tule kõige jämedamad osad ja laseksid seda läbi ainult puhtal kujul. Ja kui päevavalgus ümbritseb nägemisvoolu, siis sarnane, minnes välja sarnase juurde, ühineb sellega ja moodustab silmaterade poolt otsesuunas seoses sugulaslikuga ühtse keha. — ükskõik kus seestpoolt langev satub sellele, mis tuleb talle vastu väljast. Ja niipea kui kõik sarnane koos on jõudnud sarnasesse olekusse, siis, kas ta ise puudutab midagi või miski puudutab teda, levitab ta nende esemete toimet läbi kogu keha, hingeni ja tekitab selle tunde, mida me nimetame nägemiseks. Kui aga sugulaslik tuli ööseks lahkub, siis see (s. o. silmade tuli) jääb üksi, sest mittesarnase juurde minnes ta ise muutub ja kustub, enam mitte ühinedes lähedaloleva õhuga, sest selles ei ole tuld.» Päikese tormilisele tulele vastab Platonil seega silmade mahe tuli, päikese loojumisele — laugude sulgumine ööseks.

Damianus Larissast (IV sajand m. a. j.) püüdis järgmisel viisil kaitsta silmadest lähtuvate nägemiskiirte teooriat. See, et meie silmad, erinevalt teistest meeheelunditest, ei ole õõnsa kujuga ja et nad seetõttu ei ole kohandatud millegi tajumiseks, vaid on kerakujulised, tõestab Damianuse

arvates, et kiired lähtuvad meist. Selle kohta, et need kiired on valguskiired, annavad tunnistust silmadest sähviavad välgud. Ööloomade silmad isegi helendavad öösel.

Vanaaja suured matemaatikud Eukleides, Ptolemaios ja teised löid silmadest lähtuvate nägemiskiirte õpetuse alusel teooria valguse peegeldumise kohta tasapinnalistelt ja sfäärilistelt peeglitelt, pannes sellega aluse geomeetrilisele optikale, mis on oma tähtsuse säilitanud ka meie jaoks.

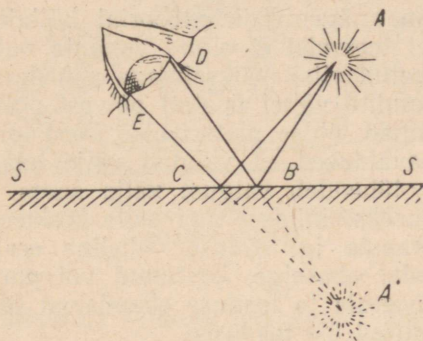
On loomulik, et tekib küsimus, kuidas kreeka teaduse oma aja kohta hämmastavalt kõrge tase geomeetria, astronoomia, mehaanika ja teiste teadusharude alal on kooskõlas tänapäeva inimesele ilmselt absurdse näiva nägemiskiirte-teooriaga, mille esitajateks olid needsamad Eukleides ja Ptolemaios, kelle tööd geomeetria ja astronoomia valdkonnas on surematud.

Meie arusaamatus seletub ajaloolise perspektiivi unustamisega. Peamiseks ning ühtlasi raskeimaks ülesandeks, mis seisis vanaaja optikute ees, oli esemete kujutiste olemuse selgitamine. Tol ajal tunti kujutisi ainult omaenda silma kaasabil toimuva nägemisprotsessi alusel ning jooniste ja maalide järgi. Muid vahendeid ei olnud — veel ei tuntud lihtsat *camera obscura*'t (pimekambrit) ega aimatud, et läätsede ja nõguspeeglite abil on esemetest võimalik kujutisi saada mistahes pindadel. Ühtlasi ei tundnud vanaaja teadlased ka silma ehitust ja neile oli teadmata fakt, et silmaläätse kaasabil tekivad kujutised silma võrkkestal.

Sellistel asjaoludel oli nägemine — ümbritsevate esemete kujutiste tekkimine inimajus — äärmiselt mõistatuslik. Selle mõistatuse lihtsaimaks lahenduseks näiski vanaaja teadlastele olevat just kujutus nägemiskiirtest kui mingitest inimesest lähtuvatest katsesarvedest.

Asetame end kujutluses vanaaja optiku olukorda ja vaatleme ülesannet valguspunkti A kujutise saamisest tasapeegli SS abil (joon. 3). Vanaaja teadlased tundsid valguse levimise sirgjoonelisust ja peegeldumisseadust. Kui nad oleksid eeldanud, nagu seda praegu teeme meie, et valgus lähtub punktist A , siis oleksid nad valguse levimise sirgjoonelisust ja peegeldumisseadust kasutades tõmmanud kiired ABD ja ACE . Nad oleksid leidnud, et kiired satuvad silma punktides D ja E . Kiirte edasine saatus aga oleks neile jäänud teadmatuks ja kujutise tekkimine peeglis punktis A' arusaamatuks, seda enam, et kiired ei

koondu silmale lähenedes, vaid hajuvad, nagu on näha jooniselt. Selles vanaaja teadlasele näiliselt ülepääsmatus raskuses tuli talle appi lapse ja metsinimese primitiivsetest mõttekujudest laenatud kujutlus nägemiskiirtest. Tõepoolest, eeldagem, et kujutist moodustavad kiired ei suundu valgusallikast silma, vaid vastupidi, ja et silm mingil viisil tajub temast väljunud nägemiskiirte esialgset suunda. Vaadeldaval juhul, kus on tegemist peegeldumisega tasapeeglist (vt. joon. 3), peegelduvad need kiired nagu valguskiiredki peegli punktides *C* ja *B*



Joon. 3. Valguspunkti peegeldumise vaatlemine.

ning koonduvad «adlikas» punktis *A*. Silmast väljunud kiirte esialgne suund «signaliseeritakse», nagu oletasid vanaaja teadlased, mingil viisil ajju ja tekib mulje, et kiirte kohtumine ei toimunud pärast peegeldumist, vaid kujutletavas punktis *A'*, kus lõikuvad silmast algselt väljunud kiirte pikendused. Niisuguse arutluse eelis seisab selles, et ei ole üldse tarvis teada, mis toimub valgusega silma sees. Piisab mainitud oletusest, et silm annab mingil viisil ajule teada nägemiskiirte esialgse suuna. Näiline kujutis tekib ajus. Kogu oma kentsakusele vaatamata oli nägemiskiirte-õpetus omal ajal kahtlemata kasulik ja progressiivne, sest ta võimaldas luua õige teooria kujutiste saamise kohta peeglite abil. Seetõttu püsis see õpetus väga kaua. Veel XVII sajandi alguses kasutas seda mõnikord Galilei.

Antiikajal seati nägemiskiirte-teooriale vastu ainult Epi-

kurose ja Lucretiuse veel fantastilisem kujutus esemete igas suunas lendavatest ja silma sattuvatest «jäljenditest». Valgust välja saatvatest ja valgustatud kehadest eraldusid Epikurose arvates vahetpidamata üliõhukesed kelmed, mis täpselt säilitasid keha reljeefi ja iseärasused. Silma sattudes need täiesti välja kujunenud äratõmbed määrasidki vanaaja atomistide arvates seal tekkiva nägemiskujutise. See vaade nii-öelda «päästis olukorra», kuid ta oli täiesti kvalitatiivne ning Eukleidese ja Ptolemaiiose kvantitatiivset geometrilist optikat tuleb sellega võrreldes muidugi täiuslikumaks pidada.

Me peatusime nägemiskiirte-teoorial küllalt kaua selle näitamiseks, et tegemist ei olnud vanaaja optikute ränga veaga, vaid teatud viisil väikseimaga pahedest.

Paljude sajandite vältel õpetati põlvest põlve, et Päike ja silm on vennad, ühtse materiaalse, kord tormilise, kord maheda tule avaldused, et valgust välja saata tähendab näha ja näha tähendab valgust välja saata. Maad peeti maailma keskuseks, inimest aga selle keskuse keskuseks. Poetilise fantaasia ja teaduse vaheline eraldusjoon oli paljudel juhtudel ebaselge, kustunud või puudus hoopis. Püüdes luua poesia ja teaduse ebapüsivat ühtsust, kanti poetilised oletused üle teadusse.

Juhtus aga ka vastupidist: müütide ja religioonide valdkonda tungisid teadvus ja objektiivse teaduse algmed. Muistse Egiptuse religiooniks oli päikese kummardamine. Päikese ja Maa, valguse ja silma võrreldamatus väljendus siin jumala ja inimese vahekorranä. Seda jumalat kujutati kord pistrikuna, kord pistriku peaga ja päikesekettaga inimesena, kes sõidab paadis mööda taevaookeani (joon. 4):

Amon-Re, jumalik pistrik,
sätendava sulerüüga,
kes tiibu lehvitades ringe teeb taevas —

nii kujutatakse Päikest muistses teebai hümnis.

XIV sajandil e. m. a. aga toimus egiptlaste maailma-vaates tähelepanuväärne murrang. Võib arvata, et uued voolud tekkisid eelkõige egiptuse õpetatud astronoomide vaatluste ja mõtiskluste tulemusena. Ajaloos pole siiski säilinud nende astronoomide nimed. Kivisse raiutud ametlikud hieroglüüfid seostavad pöörde egiptlaste vaadetes päikesele muidugi vaarao nimega. Nii sai egiptuse Kopernikuks vaarao Amenhotep IV, kelle valitsemisajal

rajati uus kultus — mitte enam pistriku ja skarabeuse, vaid reaalse, tõelise Päikese, nähtava päikeseketta ja tema kiirte kummardamine. Vaarao muutis oma nime (Amen-hotep — Amoni lemmik), võttes nimeks Ehnaton — Atonile, päikesekettale meelepärane. Mälestusmärkidel (vt. joon. 2) hakati jumalat kujutama lihtsalt kiirtest ümbritsetud kettana. Uue jumala ainsateks avaldumisviisideks olid valgus ja elu. Atonile pühendatud hümnidest kadus endine kirevus, hiilgus ja Päikese sümbolite keerukus ning



Joon. 4. Egiptuse kujutis Päikesest kui jumalast paadis.

neis hakati ülistama Päikese heategusid inimesele ja kõigele elavale:

Sa elav ja elanud algusest ju,
oo, Aton, kuis särad taevavõlvil kaunitl.
Kui idast hommikul sa tõused,
siis oma iluga täidad kõik maad, mis taeva all.
Suur oled sa, kirgas, hiilgav, kõikidele maadele paistad.
Haaravad kiired sul emmates maid
ja kõike, mis loonud sa neil —

lauldakse Päikesele pühendatud suure hünni alguses lihtsalt ja arusaadavalt. Päikese tähtsus Maale muutus selgeks ja reaalseks, ning näib, nagu ei oleks enam saanud juttu olla silma ja Päikese võrdõiguslikkusest. Tõelise Päikese kultus kadus aga Egiptusest koos Ehnatoniga, ning pidi mööduma aastatuhandeid, enne kui tekkis teadus, mis oli vaba inimese aistingute ja instinktide meelevallast, teadus, milles inimene täielikult loobus oma kujutletavast, talle religiooni ja antiikaja teaduse poolt omistatud eesõigustatud kohast universumis. Inimene hakkas end pidama üheks loodusnähtustest, üheks maakera eluslooduse pikaajalise arenemise tulemuseks.

Muistne oletus silma ja Päikese suguluse kohta on siiski säilinud tänapäeva loodusteaduses, kuigi põhiliselt muutunud kujul. Meie aja teadus on avastanud tõelise seose silma ja Päikese vahel, seose, mis täielikult erineb sellest, millest mõtlesid vanaaja teadlased, ning sellest, millest räägivad lapsed ja poeedid. Sellele seosele ongi pühendatud käesolev raamat.

Kuid teadusest hoolimata ja teaduse kõrval räägivad poeedid, nagu seda teeme meie kõik, arvatavasti veel kaua sätendavatest silmadest ja meid silmitsevatest tähtedest, nagu me neli sajandit pärast Kopernikut ikka veel kõneleme päikesetõusust ja -loojangust.

VALGUS

Milleks on füüsikas ja keemias tehtud nii palju katseid, milleks on vajalikud nii suurte meeste tööd ja elukardetavad uurimised? Kas ainult selleks, et olles kogunud korrapäratusse kuhja suure hulga mitmesuguseid asju ja aineid, silmitseda neid ja imetleda nende arvukust, mõtlejata nende paigutamisele ja kordaseadmisele.

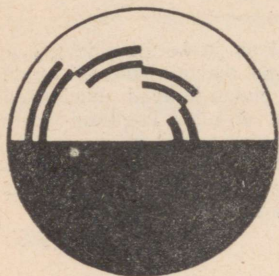
Lomonossov

Päike asub Maast umbes 150 miljoni kilomeetri kaugusel; sellele kaugusele lendamine võrdub 4000-kordse ümber maakera sõitmisega. Mida siis kujutab endast valgus, mis kannab sellest kaugusest vahetpidamata meie silma sõnumeid Päikesest ja, eelkõige, kuidas eristada valgust kõigest muust, mis meid ümbritseb, missugused on tema tunnused? Kuni XVII sajandini vastati nii: valgus on see, mida silm näeb, ta on nägemisaistingute põhjus. See tunnus aga ilmselt ei rahulda. Kui täielikus pimeduses sõrmega kergelt vajutada silmamuna ninapoolsele osale, siis ilmuvad nähtavale keerukad heledad ringid. Kui ka siin nägemisaistingu põhjust nimetada valguseks, tuleks tagasi pöörduda «nägemiskiirte» teooria juurde, millest oli juttu eelmistel lehekülgedel. Iga põhjust, mis kutsub esile nägemistunde, ei saa nimetada valguseks. Teisest küljest tuleb esitada ka järgmine küsimus: kas igasugune valgus on nähtav? Pole kahtlust, et ei ole, et eksisteerib lõpmatu hulk mitmesuguseid nähtusi, mida me peame nimetama valgusnähtusteks, kuigi me ei saa neid näha. Selles veendume varsti.

Niisiis pörkasime juba valguseõpetuse käsitlemist alustades tõsisele raskusele: me ei tea veel, mis on selle õpetuse objektiks. Et sellest ummikust välja pääseda, vaatleme algul veidi lähemalt oma nägemismuljeid.

Nägemiskujutistel on kaks põhilist omadust — hele-

dus ja värvus, mis on igale nägijale silmanähtavad (selle sõna otseses mõttes) ega vaja edasisi selgitusi.¹ Ka heledus ja värvus on aga väga suhtelised ja subjektiivsed. Kuu ei ole päeval eristatav pilvest, kuna öösel tõuseb ta Päikese asendaja, «Amon-Re teise silma» aujärjetele. Tähed, mis ei ole päeval nähtavad, näivad sügisel kuuta öise taeva foonil ebatavaliselt heledatena.



Joon. 5. Benghami kettas.

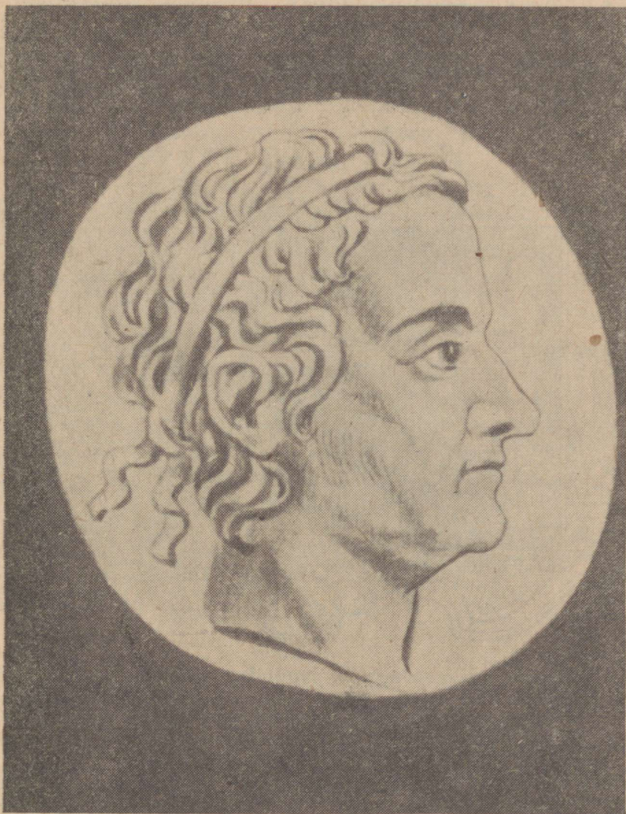
läiketu musta värviga. Ketta sama pinna teisele poolele kleebitakse või maalitakse kaarekujulised mustad ribad, nagu on näha jooniselt 5 (Benghami kettas). Kui selline kettas heledas valguses, näiteks päikesevalguses, pöörlema panna (teda vurrina käest lahti lastes), siis ilmuvad kettale oodatud hallide kontsentriliste ringide asemel teatud kiiruse juures värvilised ringid, mis on, tõi küll, vähekiillastatud ja tumedad. Seega tekivad musta ja valge segunemisel teatud tingimustel värvilised kujutused.

Me jõuame mittelohutavale järeldusele, et valguse mõiste määramisel ei saa toetuda lihtsalt nägemisaistingutele. Just seepärast olidki valguseõpetuses tema rohkem kui 2000-aastase olemasolu jooksul selged ainult kiirte geometrilised omadused. Kõik ülejäänud, mis lähtus subjektiivsetest nägemismuljetest, jäi sajanditeks ja aastatuhandeteks mõistatuslikuks, ähmaseks ning määramatuks.

Alles XVII sajandil viis optika sellest ummikust välja

¹ Tähelepanelikumal vaatlemisel tuleb esile veel kolmas omadus, mida nimetatakse küllastatuseks. Me näeme näiteks kõrvuti kaht ühesuguse heledusega punast pinda, kuid väidame, et ühe värvus on puhas, küllastatud, teise oma valkjajas, nagu oleks ta valge värviga lahjendatud. «Valge» lisand ongi küllastamatuse mõõduks.

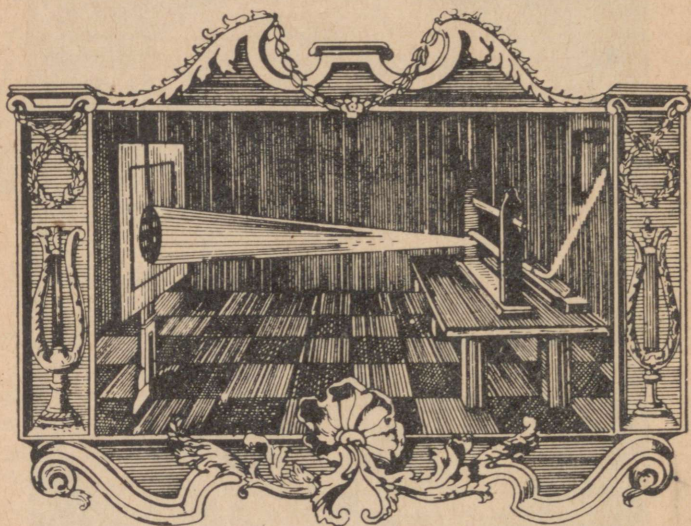
Isaac Newton, kellel lõpuks õnnestus heleduse ja värvuse subjektiivseid aistinguid väljendada mõõdus, arvus ja füüsikaseaduse objektiivses keeles. 1665. aastal hakkas Newton katsetama päikesevalgusega. Nendes katsetes lan-



Isaac Newton (1643—1727) (Stackley joonistus natuurist).

ges klaasprismale läbi aknaluugis oleva ümmarguse ava kimp päikesekiiri. Kiired murdusid prismas ja ekraanile tekkis pikergune kujutis, milles värvid vaheldusid vikerkaare taoliselt. Niisuguse vikerkaare — spektri — tekki- mine valguse läbiminekul prismast oli tuntud juba ammu enne Newtonit ja seda seletati mingisuguse mõjuga, mida

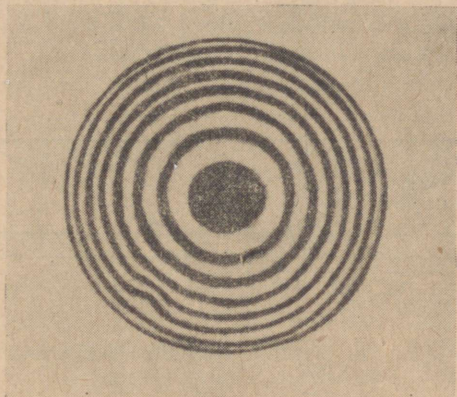
klaas valgusele avaldab, muutes tema värvust. Newton järeldas oma katsetest, et see ei ole õige. Valge valgus on (Newtoni arvates) keerukas mehaaniline segu arvutult mitmekesistest kiirtest, mis klaasis erineval määral murduvad. Prisma ei muuda valget valgust, vaid lahutab selle lihtsateks koostisosadeks, millede segamisel saab uuesti taastada esialgse valge värvuse (joon. 6). Kui eraldada prisma vikerkaaretaolisest lehvikust üks lihtkiir, näiteks punane, ja juhtida see teisele prismale, siis uut



Joon. 6. Seade päikesevalguse lagundamiseks prisma abil Peterburi Teaduste Akadeemia muuseumi pimekambris XVIII sajandi esimesel poolel (akadeemik Krafft'i joonise järgi).

lahutumist ei toimu, millest võib järeldada, et esimesel lahutamisel eraldati prisma abil tõepoolest midagi püsivat. Selle püsiva lihtvärvuse värvilisus iseendast aga ei räägi meile veel midagi valguse loomusest — ta on endiselt subjektiivne ja suhteline. Segades näiteks punase lihtvärvuse rohelisega, saame kollase, mis sarnaneb ühega päikese spektri lihtkiirtest; segades rohelise violetsega, saame sinise, jne. Silm ei ole seejuures suuteline eraldama lihtvalgust lihtvalgusest ja selleks on tarvis prisma või üldse valgust r u u m i l i s e l t lihtvärvusteks lahutavat spektraal-aparaati.

Just see lihtvärvuste ruumiline jaotumine, mitte aga nende erinev värvilisus, andiski Newtoni kättesse valguse esimese objektiivse ja kvantitatiivse tunnuse, mis vastab tema subjektiivsele värvilisusele. Nagu näitas Newton, on lihtvärvuste ruumilise jaotumise põhjuseks nende erinev võime prisma murduda. Murdumisvõimet saab seostada teatava täiesti kindla arvuga — murdumisnäitajaga. Seega õnnestus Newtonil valguseõpetust subjektiivsete muljete määramatusest ja segadusest lõpuks välja viia sirgele ja kindlale matemaatilisele teele.

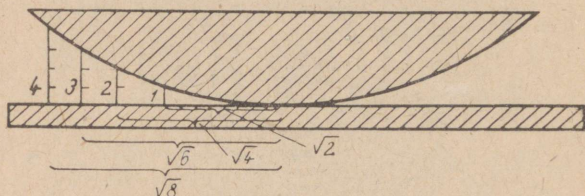


Joon. 7. Newtoni rõngad.

Pärast Newtonit tõid edasised uurimised valguse murdumise kohta mitmesugustes kehaes esile fakti, et see murdumine oleneb suurel määral aineest, millest on valmistatud prisma. Tavalistes klaas- ja kvartsprismades nagu vikerkaare puhulgi murduvad sinised kiired rohkem kui punased, kuid kui valmistada väga õhuke prisma mõnest tahkest värvainest (näiteks fuksiinist), siis võib saada täiesti ebaharilikke spektreid, kus punased kiired on murdunud rohkem kui sinised. Murdumisnäitaja osutus seega keerukaks tunnuseks, mis sõltub üheaegselt nii valguse kui ka aine omadustest.

Newton avastas aga veel lihtkiirte teise hämmastava omaduse, mis võimaldab neid kiiri kvantitatiivselt määrata täiesti sõltumatult aine loomusest. Kui klaasplaadile asetada väga väikese kumerusega prilliklaas, siis tekib valge

valgusega valgustamisel läätse ja klaasi kokkupuutepunkti ümber rida kontsentrilisi vikerkaaretaolisi rõngaid. Valge valguse asemel proovis Newton läätse ja klaasi valgustada lihtkiirtega, mis olid saadud päikesevalguse lagundamisel prisma abil. Seejuures ilmnis veel hämmastavam pilt. Kui valgustamiseks kasutatakse näiteks punast valgust, siis ilmuvad läätse ja klaasi kokkupuutepunkti ümber arvukad korrapärased kontsentrilised, vaheldumisi punased ja mustad rõngad (joon. 7). Mida kaugemal need rõngad keskmisest tumedast laigust asuvad, seda tihedamalt on nad üksteise suhtes paigutatud. Mõõtes ära tumedate ringide raadiused, leidis Newton, et need raadiused suhtuvad üksteisesse nagu ruutjuured paarisarvulistest täisarvudest, s. o. nagu $\sqrt{2} : \sqrt{4} : \sqrt{6} : \sqrt{8}$.



Joon. 8. Newtoni rõngaste tekkimine.

Kui alumine klaasplaat eemaldada ja lääts asetada valgust mitte peegeldavale pinnale, siis rõngad kaovad. Rõngaste ilmumise vajalikuks tingimuseks on järelikult, nagu selgitas Newton, kitsas vahe läätse ja klaasi vahel (joon. 8). Pole raske geomeetriselt tõestada, et selle vahe laiused, mis vastavad heledate ja tumedate rõngaste asukohtadele, suhtuvad üksteisesse nagu järjestikused täisarvud. Esimesele rõngale vastab kõige kitsam vahe, kuna ülejäänud rõngastele vastavad vahe laiused on esimesest täisarv kordi suuremad. Kui läätse ja klaasi valgustada erinevate lihtkiirtega, siis muutub rõngaste laius: punaste kiirte puhul on rõngad kõige laiemad, violetsete kiirte puhul kõige kitsamad. Iga lihtvärvust iseloomustab esimesele rõngale vastava vahe teatav laius. Missuguseid läätsi me ka ei kasutaks, missugusest materjalist me neid ka ei valmistaks, ikka jääb see laius ühe ja sama värvuse jaoks konstantseks. Ta muutub ainult sel juhtumil, kui vahe läätse ja klaasi vahel täidetakse õhu asemel mingi vede-

likuga. Rõngaste laius sõltub seejuures vedeliku murdmisnäitajast.

Need Newtoni lihtsad, väga kergesti korratavad katsed läätsega (nad on lihtsamad isegi katsetest prismaga) on oma tulemustelt täiesti hämmastavad. Tõepoolest — eelkõige näitavad nad meile mingi korrapärase perioodilisuse esinemist valgusvoos. Niisama üllatav on see, et me nii peegeldunud kui ka läbiva valguse puhul näeme tumedaid, s. o. valgustamata rõngaid, kuigi langevad kiired valgustavad kogu läätse pinda ühtlaselt.

Nende nähtuste seletamise juurde pöördume hiljem tagasi. Praegu on meil tähtis konstateerida, et Newtoni rõngaste saamise katse alusel võib iga lihtvärvuse seostada läätse ja klaasi vahe laiusega, mis vastab esimesele tumedale rõngale. Järelikult saab lihtvärvust kvantitatiivselt määrata murdmisnäitaja asemel selle esimesele tumedale rõngale vastava vahe laiuse kaudu (vt. joon. 8), mille me, esialgu kokkuleppeliselt, nimetame valguse lainepikkuseks, tähistades teda kreeka tähega λ . Nagu esimesena näitas Newton, on nähtava valguse lainepikkused äärmiselt väikesed ja neid väljendatakse tavaliselt erilistes ühikutes — millimikronites ($m\mu$); millimikron võrdub miljondiku millimeetriga. Newtoni mõõtmiste põhjal vastab näiteks päikesevalguse spektri rohelise ja sinise osa piiril asuvale värvusele lainepikkus $\lambda = 492 m\mu$. Äärmise punase värvuse lainepikkus on ligikaudu 700 $m\mu$, äärmise violetse oma 400 $m\mu$.

Kasulik on püüda lahti mõtestada Newtoni katsete äärmiselt sügavat tähendust. Valgusnähtuste tujukas ja subjektiivne valdkond, mis aastatuhandete jooksul oli teadlaste korraloomispüüu eest kõrvale libisenud, avas järsku oma objektiivse olemuse ning allus nüüdsest peale täielikult täpsele teaduslikule analüüsile.

Sel ajal kui Newton tegeles spektrivärvuste ja rõngastega, määras astronoom Römer 1675. aastal astronoomiliste vaatluste alusel esimesena valguse kiiruse, leides suuruse, mis (tänapäeva parandustega) võrdub ligikaudu 300 000 kilomeetriga sekundis. Päikeselt Maani jõudmiseks kulub valgusel umbes 8 minutit. Vanaaja optikud järeldasid nägemiskiirte-õpetusele toetudes ja arvates, nagu liiguks valgus silmadest taevakeha poole, et valguse kiirus peab olema erakordselt suur. Me võime silmad ükskõik kui kiiresti avada ja me näeme kohe kõige kaugemat

tähte. 300 000 kilomeetrit sekundis on teo kiirus selle nägemiskiirte näiliku kiirusega võrreldes. Kui nägemiskiirte kiirus oleks nii väike, siis näeksime Päikest alles 8 minutit pärast silmade avamist.

Pärast Römerit on valguse kiirust mitmesuguste astronoomiliste ja maapealsete meetoditega mõõdetud paljusid kordi. Käesoleval ajal on see kiirus teada väga suure täpsusega. Ruumis, kus puudub aine, võrdub see 299 776 kilomeetriga sekundis. Seejuures on esimese viie numbriga õigus garanteeritud ja ainult viimane, kuues number ei ole usaldusväärset teada. Tähtis on märkida, et tühjas ruumis ei sõltu valguse kiirus lainepikkusest, olles ühesugune nii punaste kui ka siniste kiirte jaoks. Väga suure täpsusega tõestab seda fakt, et kaugete tähtede varjutuste puhul, kui näiteks üks kaksiktähtedest satub teise varju, ei toimu tähe värvuses mingit märgatavat muutust. Kui erinevate lihtvärvuste kiirused kasvõi minimaalseltki erineksid, siis peaks niisuguse varjutuse puhul tingimata järsult muutuma tähe värvus.

Vastupidi — kui valgus levib aines, näiteks vees või klaasis, siis sõltub tema kiirus lainepikkusest, mis just põhjustabki seda, et prisma lagundab valguse spektriks. Täevas vikerkaart vaadeldes veendume oma silmaga, et eri värvusega kiirte levimiskiirus veepiiskades on erinev. Seda kiirust saab määrata, jagades valguse kiiruse tühjuses vastava keskkonna murdumisnäitajaga. Murdumisnäitaja ise võrdub suhtega valguse kiirus tühjuses jagatud antud värvusega valguse kiirusega aines.

Kui jagame valguse kiiruse lainepikkusega, siis saame teada valguskiire poolt sekundis läbi tehtavate muutuste arvu, s. o. niinimetatud valguse sageduse. Tähistame sageduse tähega ν , valguse kiiruse tähega c ja lainepikkuse tähega λ . Siis

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Nähtava valguse sagedus on tohutu, võrdues näiteks kollase valguse puhul, mille lainepikkus on 600 $m\mu$, poole miljoni miljardi korruga sekundis!

Märgime üht väga tähtsat asjaolu. Valguse kiirus on pöördvõrdeline keskkonna murdumisnäitajaga, nagu me rääkisime. Teisest küljest, nagu sellest oli juba juttu New-

toni katsete kirjeldamisel, sõltub ka lainepikkus λ keskonnast, milles valgus levib, ning Newtoni rõngad tõmbuvad koomale, kui õhk läätse ja klaasi vahel asendada veega. Lainepikkus nagu valguse kiiruski on pöördvõrdeline keskkonna murdumisnäitajaga. Valguse kiiruse ja tema lainepikkuse suhe, s. o. sagedus ν , ei sõltu järelikult aimest, nagu on näha toodud valemist. See on niisiis väga tähtsaks kvantitatiivseks iseloomustuseks valgusele endale, eriti tema omadusele, mis vastab värvilisusele.

Kiiruse ja sagedusega ei ole valgus siiski veel täielikult määratud. Subjektiivsete muljete põhjal teame, et väga suurtes piirides võib kõikuda valguse heledus. Piisab jaaniussi vilkuva valguse ja otsese päikesevalguse kõrvutamist, et mõista, kui tohutul määral võivad heledused üksteisest erineda.

Missugune siis on valguse heleduse füüsikaline mõte? Sellele küsimusele suutis teadus õigesti vastata alles siis, kui sai selgeks energia mõiste. Pole kahtlust, et valgus kannab endaga alati energiat, mis ilmneb toimes, mida valgus avaldab — soojenemises, keemilistes muutustes jne. Üldse võime valguse olemasolust teada saada ainult tema toime järgi, s. o. selle tagajärjel, et ta kannab endaga energiat. Heleduse aisting ongi tihedas seoses valguskiirte energiaga. Lihtsa monokromaatilise (ühevärvilise) kiire heledus on seda suurem, mida suurem on valguse poolt üle kantav energia.

Silm on muide valguse energia küsimuses väga halb kohtunik. Õistes tingimustes näib isegi jaaniussi hiilgus pimestavana, kuna päeval talub silm otsest päikesevalgust. Kui teiselt poolt võrrelda erineva värvusega kiiri, siis selgub, et näiteks suurema energiaga punane kiir näib vähem heledana kui tunduvalt väiksema energiaga roheline kiir. Valguse energia ja heleduse mõisted on järelikult omavahel seoses, kuid on samal ajal sügavalt erinevad. Nii-suguse määramatuse tõttu kasutab meie aja optik valguse energia mõõtmisel objektiivseid füüsikalisi energia mõõtmise meetodeid.

Teeme väikese kokkuvõtte. Olles vabanenud subjektiivsete valgusaistingute meelevaldsusest ja keerukusest, võime esitatud katsete ja mõõtmiste alusel nüüd väita, et valgus on energia kandja, mis levib tähtedevahelises ruumis kiirusega umbes 300 000 kilomeetrit sekundis ja evib perioodilisi omadusi. Proovime lugeda valguseks kõike, mida

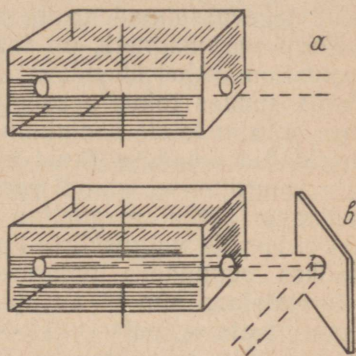
see definitsioon haarab, sõltumatult sellest, kas ta kutsub esile nägemismuljeid või mitte. Hiljem näeme, et definitsiooni tuleb sisse viia täiendusi ja reservatsioonid, kuid ajutiselt peatume sellel.

Tõepoolest — XIX sajandi esimestest aastatest alates tuli füüsikutel optika valdkonda sisse lülitada üha uusi laialdasi «nähtamatute kiirte» piirkondi, millede arvukuses täielikult tuhmus nähtava spektri piirkond. Newtoni päikesespekter suundub nii oma punase kui ka sinise otsaga pimedusse. Kas selles pimeduses peitub midagi või mitte? Silm ei näe seal praktiliselt midagi.

1800. aastal teostas Herschel väga lihtsa katse. Ta paigutas Päikese spektri punase ääre taha pimedusse mustaks värvitud otsaga termomeetri. Osutus, et termomeeter soojeneb seal tunduval määral, s. o. selles piirkonnas eksisteerivad kiired, mis on silmale nähtamatud, kuid kutsuvad esile soojenemist. Need kiired nimetati infrapunaste kiirteks; õnnestus määrata nende kiirte lainepikkus ja tõestada, et nad levivad tavalise valguse kiirusega ja vastavad järelikult igas suhtes valguse mõiste füüsikalisele definitsioonile. Infrapunaste kiirte piirkond ulatub väga kaugele. Käesoleval ajal on õnnestunud avastada infrapunaseid kiiri lainepikkusega umbes 0,3 mm. Infrapunased kiired täidavad järelikult vahemikku nähtava punase valguse piirist, mille lainepikkus on 750 m μ , kuni (vähemalt) lainepikkuseni 300 000 m μ . Kuid siingi ei ole spektri piir. Need elektrilised lained, mida saadavad välja raadiojaamad, levivad samuti kiirusega 300 000 kilomeetrit sekundis ja on perioodilised; seega tuleb ka neid vaadelda kui valguslaineid. Niisuguseid kunstlikke elektrilisi laineid võib saada kõige erinevates pikkustes — kümnetest kilomeetritest millimeetri murdosadeni.

Spektri punaselt piirilt võib seega vahetult suunduda raadiolainete praktiliselt lõpmatusse valdkonda. Mis toimub aga spektri violetse piiri taga? Siin, vähemalt tavaliste valgusallikate puhul, termomeeter märgatavalt ei soojene, kuid kui paigutada siia fotoplaat, siis see tumeneb ilmutamisel. Sel viisil avalduvad nähtamatud ultravioletsed kiired. Neid saab avastada ka teiste meetoditega. Paljud kehad hakkavad nende kiirte toimel kiirgama nähtavat valgust (luminesents), muutuvad elektrijuhtideks või hakkavad välja saatma elektrone (fotoelekter). Ultravioletsete kiirte piirkonnaks loetakse tavaliselt piirkonda

nähtava spektri violetsest piirist (mis on muide küllalt määramatu — umbes $400 \text{ m}\mu$) kuni kaugele lühikeste lainete valdkonda — vähemalt $10 \text{ m}\mu$ -ni. Sellega spekter muuseas ei lõpe: edasi tulevad kiired, mis avastati möödunud sajandi lõpul Röntgeni poolt ja evivad, nagu me nüüd teame, kõiki valguskiirte omadusi. Nad mõjuvad nagu ultravioletsed kiiredki fotoplaadile, tekitavad nähtavat luminesentsi ja avaldavad elektrilist toimet. Röntgenikiirtele vastavad (sõltuvalt nende saamise praktilistest meetoditest) lainepikkused umbes $10\text{--}0,1 \text{ m}\mu$. Ka see ei ole aga veel valguse spektri piiriks. Röntgenikiirtele järgnevad veel lühema lainepikkusega kiired, niinimetatud gammakiired, mida saadavad välja radium ja teised radioaktiivsed ained. Gammaikiirtele mingisugust piiri määrata pole alust. Tuntakse gammakiiri lainepikkusega alla $0,001 \text{ m}\mu$.



Joon. 9. Valguse polarisatsioon peegeldumisel.

Võib öelda, et looduses eksisteerib valguskiiri kõikide võimalike lainepikkustega, alates (praktiliselt) lõpmatult suurtest ja lõpetades (samuti praktiliselt) lõpmatult väikestega. Nähtavate kiirte kaduväike lõik ($400\text{--}700 \text{ m}\mu$) upub sellesse mitmekesisusse.

Valgusel on ka teisi tähelepanuväärseid omadusi, millest me seni ei ole veel kõnelnud. Viime läbi järgmise katse (joon. 9, a). Valame klaas anumasse näiteks tilga piima lisamisega kergelt häguseks muudetud vett ja suuname anumasse otsese päikesekiirte kimbu. Niisuguses hägustatud vees on kiirtekimbu jälg selgesti näha valguse hajutamise tõttu osakeste poolt. Esimesel pilgul näib endastmõistetavana, et valgus peab igas suunas hajuma ühte viisi, sõltumata sellest, kas me vaatame kiirtekimbu jäljele ülalt või küljelt. Otsese (harilike) päikesekiirte puhul on see tõepoolest nii.

Nüüd teeme teise katse. Juhime otsese kiirtekimbu algul umbes 54° -se nurga all klaasile (kiired on risti joonise tasapinnaga) ja alles seejärel anumasse hägustatud veega

(joon. 9, b). Kiirtekimbu jälge anumas igast küljest tähelepanelikult silmitsedes märkame hämmastavat nähtust: küljelt vaadates on valguse hajumine väga suur (suhteliselt intensiivne hele riba), ülalt vaadates aga ei esine peaaegu mingit hajumist ja kiirtekimbu jälg vees ei ole nähtav. Peegeldunud valgus on saanud uue, väga kummalise omaduse: üles ja alla ta toimet ei avalda, tehes seda ainult külgsuundades. Kiirtekimbu läbilõikes kerkivad esile eelistatud tegevussuunad, tekib polarisatsioon.

Nagu varbmagnetis on toime maksimum suunatud piki poolusi omavahel ühendavat joont, kuna selle joonega risti olevas suunas toime peaaegu puudub, nii on ka siin valguse suurim toime koondunud horisontaalsuunda. Valguse kirjeldatud omaduse (kuid keerukamal juhul — kiirte nn. kaksikmurdumisel islandi paos) nimetas esimesena Newton analoogia põhjal magnetiga valguse polarisatsiooniks. Harilik valguskiirte kimp kujutab endast kõigis võimalikes suundades polariseeritud kiirte segu, mistõttu polarisatsioon siin ei avaldu. Klaasilt peegelduvad esmajoones teatava polarisatsiooniga kiired ja polarisatsioon saab seetõttu märgatavaks. Polariseerimisvõime on omane mitte ainult nähtavatele kiirtele, vaid üldse kõikidele kiirtele, mida me nimetame valguskiirteks, alates raadiokiirtest ja lõpetades gammakiirtega.

Enamikul inimestest ei eralda silm polariseeritud valgust polariseerimatust. Umbes 25—30 protsenti inimestest aga omavad seda eraldamisvõimet, kuigi neil enestel sellest peaaegu kunagi aimugi ei ole. Polariseeritud valgust kiirgavat pinda vaadeldes võivad need inimesed märgata vaatevälja keskel nõrka sidrunkollast triipu, mis näib kergelt paindunud viljapeade-kimbuna. Kui valguse polarisatsioonitasapind pöördub, siis pöördub silmas samaaegselt ka nimetatud triip. Päikese mõningate asendite puhul taevas osutub taeva helendus, mille põhjuseks on päikesekiirte hajumine atmosfääris, tugevasti polariseerituks ja mainitud võimet omav inimene näeb siis taeva foonil nõrka kollast, viljavihuga sarnanevat triipu.

Haruldaseks näiteks suure kirjaniku teravast tähelepanuvõimest võivad olla L. N. Tolstoi «Noorusest» pärinevad read, kus ta, nähtavasti üldse aimamata selle nähtuse füüsikalist mõtet, kirjeldab täieliku selgusega kollast polarisatsioonilainiku taeva foonil, tehes seda 1855. aastal, ajal, kus see nähtus oli ka teadusemaailmas tuntud ainult

vähestele (seda kirjeldas esimesena Haidinger 1846. aastal).¹ «Nooruse» XXXII peatükist võib lugeda järgmisi ridu: «... Jätan ma tahtimatult lugemise, vaatan rõdu lahtisest uksest paistvaid kõrgete kaskede rippuvaid käharaid oksid, millele heidab juba õhtust varju, puhast taevast, millesse, kui üksisilmi vaatad, tekib otsekui tolmune, kollakas laik, mis jälle kaob.»

Soovitame väga lugejal oma silmi kontrollida ja püüda märgata taeval kollast polarisatsioonitriipu. Sel teel võivad vähemalt mõned lugejatest veenduda, et nende silmadel on omadus, millest neil varem aimugi ei olnud. Vaatlust on parem teostada valguses, mis on peegeldunud klaasplaadilt, mille tagakülg on mustaks värvitud. Lange- ja peegeldumisnurga teatava väärtuse puhul polariseerib selline plaat valgust küllalt tunduval määral.

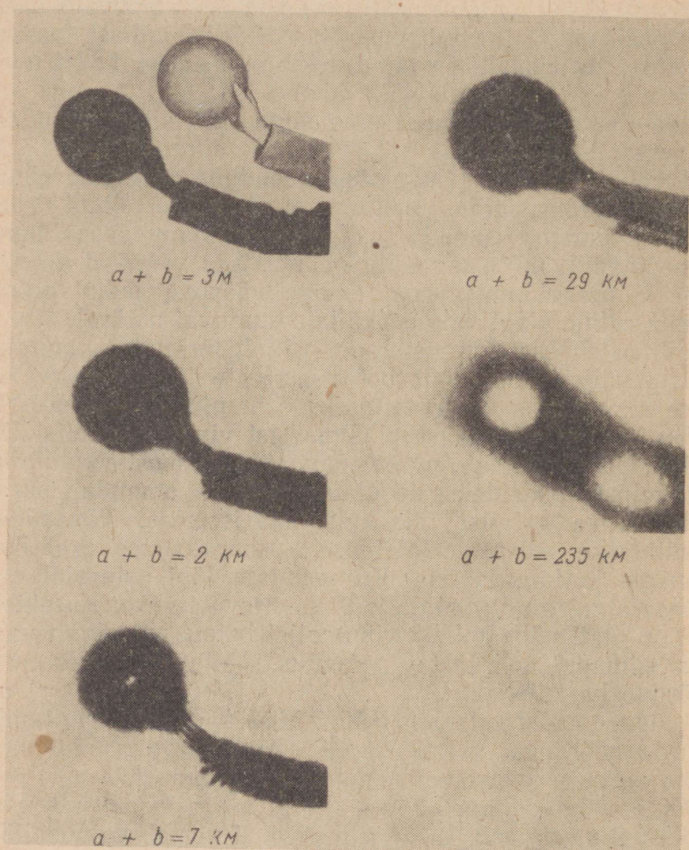
Viimastel aastakümnetel on leitud meetodeid kuitahes suurte valgust täielikult polariseerivate läbipaistvate kelmete massiliseks valmistamiseks. Üht niisuguste «polaroidide» liiki valmistatakse plastmassist vinüülalkoholist lähtudes. Ühes suunas pingule tõmmatud õhukest vinüülalkoholi-kelmet töödeldakse joodiauruga ja ta omandab pärast seda võime valgust täielikult polariseerida. Tänapäeval kasutatakse polaroidide laialdaselt laboratoorses praktikas, tehnikas ja fotograafias. Kui vaadata läbi polaroidi mistahes valgustatud pinnale, näiteks taevale või majaseinale, siis on alati näha kollast vihutaolist triipu, kui ainult vaatleja silmadel on vastav omadus. Polaroidi pööramisel pöördub ka triip.

Valguse polarisatsiooni füüsikalise olemuse selgitamise juurde pöördume varsti tagasi, praegu aga asume vaatlema valguse teist tähelepanuväärset omadust.

Ühtses keskkonnas liigub valgus sirgjooneliselt ning väike tõke valgusallika ja silma vahel varjab valgusallika. Juba antiikrahvad rajasid sel alusel harmoonilise teadus-haru — geomeetrilise optika. See ei ole siiski alati õige. Vaadake endast 20—40 meetri kaugusel põlevale heledale lambile kahe sõrme vahelt, mis on küllalt tihedasti teineteise vastu surutud, nii et nende vahele on jäänud väga kitsas pilu. Läbi niisuguse pilu näete helendava punkti asemel piluga risti olevat pikka riba. See riba koosneb

¹ Vt. B. I. Piliptšuki lühiartiklit «О юношеской наблюдательности Л. Н. Толстого». «Природа», 1945, nr. 2, lk. 92.

keskel asuvast heledast punktist ning külgmistest vaheldumisi tumedatest ja vikerkaarevärvilistest triipudest — spektritest. Valguse levimise sirgjoonelisusest ei saa nii-



Joon. 10. Valguse difraktsioon dääbipaistmatust esemest möödumisel (V. K. Arkadjevi katse).

sugustes tingimustes juttugi olla. See nähtus oli inimestele tuttav muidugi juba esiajaloolisel ajal; niisugused kõrvalekalldumised valguse sirgjoonelisusest tulevad ripsmete olemasolu tõttu esile igasugusel silmade pilutamisel, mis on eriti hästi teada lastele. Esimesena aga juhtis sel-

lele nähtusele ja tema tähtsusele tähelepanu alles XVII sajandil Grimaldi.

Joonisel 10 on V. K. Arkadjevi katsete põhjal esitatud viis fotot taldrikut hoidva käe varjust. Esimene foto (ülal vasakul) on tehtud järgmistel tingimustel: kaugus a valguspunkti ja käe vahel oli umbes 2 m, kaugus b käe ja ekraani vahel, millel tekkis vari, umbes 1 m. Teise foto puhul valiti $a + b$ väärtuseks 2 km, kolmanda puhul 7 km, neljanda puhul 29 km, viienda puhul 235 km. Kui esimesel fotol on vari täiesti selgepiiriline, siis järgmistel omandab ta järk-järgult väga kummalise ilme: taldriku varju keskele tekib selgepiiriline hele laik, kuna käe vari muutub kirjuks tumedatest ja heledatest vöötidest; valguse levimise rangest sirgjoonelisusest ei saa siin seega juttugi olla. Geomeetria seaduste järgi peaksid väikesest valgusallikast väljuvad sirgjoonelised kiired andma niisugusel kaugusel laitmatult korrapärase varju.

Kitsaid pilusid läbides ja väikestest esemetest möödudes valgus järelikult paindub nende taha. Grimaldi nimetas selle nähtuse difraktsiooniks. Newton uuris seda vastavalt oma harjumusele hoolikalt ja tegi kindlaks, et difraktsioon ei sõltu vähimalgi määral sellest, missugusest materjalist on valmistatud pilu seinad või ese, mille taha valgus paindub, vastates järelikult valguse enda põhilisele omadusele.

Hiljem tõestati, et difraktsioonile alluvad kogu spektri ulatuses kõik kiired alates raadiolainetest ja lõpetades röntgenikiirtega. Mida väiksem on lainepikkus, seda kitsamad peavad olema pilud ja esemed, millede kaasabil muutuvad märgatavaks kõrvalekaldumised sirgjoonelisusest ja difraktsioon.

Me vaatlesime valguse mõningaid tähtsamaid katseliselt avastatud omadusi: perioodilisust, kiirust, polarisatsiooni ja difraktsiooni. Kõik need omadused koos sisendavad ühendavat mõtet valgusest kui lainevoost, milles võnked toimuvad risti laine levimise suunaga. Hoidume siiski esialgu sellistest üldistustest, lükates nende tegemise edasi lõpliku tutvumiseni valguse kõigi põhiomadustega, sest tuntakse veel teisi valguse omadusi, milledest me seni pole midagi rääkinud.

Valgus lähtub alati aimest, tekib aines ja neeldudes kaob ainesse. Valguse kohtumist ainega saadab alati nende vastastikune toime. Ühelt poolt — aine peegeldab, murrab ja

neelab valgust ning võib pöörata tema polarisatsioonitasa-
pinda. Aine hakkab valgusele toimet avaldama juba kau-
gusest. Päikesest miljonite kilomeetrite kauguselt möödu-
vad tähekiired kalduvad oma teelt märgatavalt kõrvale,
nagu tõmbudes Päikese poole, ja selle tagajärjel näivad
meile tähed taevavõlvil paigalt nihutatutena. Teiselt poolt
mõjub valgus ainet kohates sellele mitmesugusel viisil.
Valgus avaldab ainele rõhku, kuigi see rõhk on suuruselt
äärmiselt tühine. Valgus võib aines esile kutsuda keemilisi
muutusi (fotoplaat, taimeleht, päevitus jne.). Valguse toi-
mel võivad ainest välja paiskuda aatomite koostisosad —
elektronid. Aine võib valguse mõjul ise helendama hakata
(valguse hajumine, fluorestsents, fosforestsents). Lõpuks:
neeldudes valgus soojendab ainet.

Üsna käesoleva sajandi algul tegi M. Planck tähendus-
rikka avastuse. Selgus, et valgus saab neelduda ja kiir-
guda ainult täiesti kindlate energia-annustena, mis nime-
tati kvantideks.

Vaatleme valguse keemilise toime juhtu. Oletame, et
meie ees on mingi õhukeses kihis värvitud pind — paberi-
leht või riidekangas. Päikesevalguse toimel see pind aja
jooksul luitub. Värv koosneb kangas ühtlaselt jaotunud üli-
väikestest osakestest — molekulidest. Kõik molekulid on
ühesugused, igaühele neist langeks nagu ühtlane valgus,
kuid kangas luitub järkjärguliselt, s. o. algul laguneb üks
molekul, seejärel teine. Kui valgus langeb ühtlaselt ja
molekulid on ühesugused, siis võiks oodata, et kõik mole-
kulid kas laguneksid kohe, või ei laguneks ükski molekul,
või toimuks lagunemine korraga, plahvatuse taoliselt, mõni
aeg pärast seda, kui kõik molekulid on neelanud piisaval
hulgal energiat. Tegelikult kulgeb protsess väga aeglaselt
ja järkjärguliselt. Kuidas seda seletada? Jääb üle oletada,
et molekulid kas ei ole ühesugused või ei ole langeva val-
guse front ühtlane: ühtedesse punktidesse on energia koon-
dunud, kuna teistes punktides energiat pole. Ei ole alust
kahelda molekulide identsuses. Viimase poolt räägib kogu
keemia-alane praktika. Me jõuame järeldusele, et näiliselt
homogeense valgusvoo front ei ole tegelikult homogeenne.
Tema energia on koondunud teatavatesse tsentritesse, mis
on ruumiliselt üksteisest eraldatud.

Uurides valguse igasuguseid toimeid, mitte ainult tema
keemilisi mõjusid, jõudsid füüsikud üldisele järeldusele:
valgus avaldab oma toimet alati nii, nagu saaksid aine-

osakesed teda neelata ja kiirata ainult tervete kvantidena. Valguskvanti hakati nimetama ka fotoniks.

Kui valgustamiseks kasutatakse homogeenset lihtvalgust, sagedusega ν korda sekundis, siis on kvandi suurus $h\nu$, kus h on väga väike, alati konstantne suurus ($6,62 \cdot 10^{-27}$, s. o. 6,62, mis on jagatud arvuga, milles ühele järgneb 27 nulli). Sellest vaatekohast lähtudes saab kanga järkjärguline luitumine täiesti mõistetavaks. Valgusvoo energia ei ole jaotatud kõikjale ühtlaselt ja pidevalt, vaid on koonduvat üksikutesse tsentritesse — kvantidesse. Lagunevad ainult need aine molekulid, mida oma teel kohtasid lendavad valguskvandid. Mõnel juhul võib arutleda järgmiselt. Kui aine on teatava aja vältel neelanud energia E , siis saadakse lagunenud molekulide arv selle energia jagamisel kvandi energiaga:

$$N = \frac{E}{h\nu}.$$

Valguse poolt esile kutsutud keemilise lagunemise lihtsatel juhtudel kinnitavad katsed hästi seda järeldust. Valguse toime katkendlikkus, kvandilisus, avaldub kõiges: aine soojenemises, valguse elektrilistes toimetes, fluorestsentsis jne. Eriti tähelepanuväärne on see, et väga nõrkade valgusvoogude puhul märkab ka inimsilm valgusenergia katkendlikkust. Selle juurde pöördume tagasi käesoleva raamatu viimases peatükis.

Raadiokiirtel on sagedus ν suhteliselt väga väike, mistõttu ka kvant $h\nu$ on kaduvväike; sel juhtumil on äärmiselt raske tabada toimete katkendlikku loomust. Väga suure sagedusega röntgenikiirtel seevastu on kvandid suured ning siin on valguse kvandiline toime eriti ilmne ja selge.

Valguse põhiliste omaduste nimestikule lisandus meil seega uus ülitähtis omadus, mida on raske ühte viia valguse teiste, varem tundma õpitud omadustega. Kuigi me pole veel ammendavalt käsitletud kõiki tänapäeval teada olevaid valguse põhiomadusi, siirdume siiski katsele selgitada valguse füüsikalist olemust, sest see kergendab teataval määral nähtuste mõistmist ja meelespidamist.

Juba ammu on tekkinud ja kadunud mitmesuguseid oletusi valguse loomuse kohta. Paljud neist olid täiesti alusetud, sest otsustati, õieti öelda, teadmata mille üle: nähtuse üle, mille omadused olid varjatud; valgus aeti segi nägemisega; tulemusena tekkisid veidradsed teooriad näge-

miskiirtest, milledest oli juttu sissejuhatuses. Esines muu-
seas aga ka oletusi, mis olid küllalt lähedased nüüdsetele
teoreetilistele vaadetele.

Valgus kannab tohutu kaugel olevalt Päikeselt Maale
energiat. Seda teadsid või õigemini aimasid ka antiik-
rahvad.

Kuidas saab energiat kaugusse üle kanda? Viise selleks
ei ole kuigi palju. Kõige lihtsam on energiat ühest kohast
teise transportida koos ainega. Lask kujutab endast püssi-
rohu purustava energia ülekandmist laskuri asukohast
märgi juurde, kusjuures energia ülekandjaks on lendav
kuul. Energiat võib koos ainega üle kanda ka pideva voo-
luna, laviinina, kuid see on põhiliselt seesama. Nii ühel
kui teisel juhul aine rändab koos energiaga. Leidub aga
ka teine viis. Tuule poolt tekitatud merelaine kandub
kaugusse ja annab lõpuks «murdudes» oma energia ära.
Kui laineid tähelepanelikult silmitseda, siis on kerge mär-
gata, et laine kandub edasi, kuid vesi ei lähe temaga
kaasa, vaid ainult õõtsub ühel kohal üles-alla. Energia
antakse kihilt kihile üle aine edasiliikumiseta. Täpselt
samuti levib õhus helienergia. Helilaine ei ole tuul, vaid
õhukihtide järjestikune võnkumine. «Kui pillikeeltest,»
arutleb Lomonossov oma töös «Valguse päritolust», «nii
kiiresti eemale voolaks õhk, kui seda teeb hääl, s. o. roh-
kem kui 1000 jalga sekundis, siis nihkuksid sellise muusika
mõjul isegi mäed oma kohtadelt.» Energia ülekandmiseks
kaugusse lainete abil on tarvis vahepealset keskkonda,
meie näidetes vett ja õhku; õhuta ruumis heli ei levi. Teisi
energia ülekandmise viise me ei tunne. Tähendab, Päike-
selt Maale energiat kandev valgus peab endast kujutama
osakeste voogu, lainete süsteemi mingis keskkonnas või
korruga nii üht kui teist. Taolisi vaateid esines mitmesugu-
sel kujul ka vanaaja teadlastel. Katsed ühtselt seostada
valguse kõiki mitmekesiseid omadusi viisid nende vaadete
paratamatule taaselustumisele uues füüsikas.

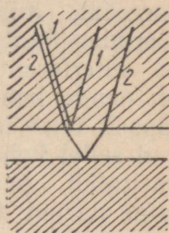
Newton püüdis spekulatiivset usaldusväärsega, oletusi
faktidega mitte segi ajada, kuid oma teoste eri osades
pöördus ta paljusid kordi tagasi valguse loomuse küsimuse
juurde, kaldudes seejuures voolamisteooria poole. Tema
peamiseks argumendiks laineteooria vastu oli ainelise
keskkonna — «eetri» — puudumine maailmaruumis. Tõe-
poolest, planeedid liiguvad täiesti regulaarselt, kohtamata
end ümbritsevas ruumis mingit takistust või hõõrdumist,

ja järelikult pole alust eeldada, et Päikese ja planeetide vahel esineb aineeline keskkond, mis on vajalik lainete levimiseks. Nagu heli lakkab eksisteerimast anumas, millest õhk on välja pumbatud, nii ka taevakehade võnked ei saa muutuda «tühja» maailmaruumi laineteks. Newton pidas tõenäolisemaks oletust, et valgus on üliväikeste aineosakeste voog.

Perioodilisust saab Newtoni arvates seletada näiteks sellega, et osakesed pöörlevad. Osakese — korpuskli — poolt ühe pöörde vältel läbitud vahemaa ongi «lainepikkus». Polarisatsiooni pidas Newton ainult tahkete osakeste omaduseks, nähes tema olemasolus valguse puhul tõestust selle kohta, et valgus koosneb tahketest osakestest. Tõkete taha paindumist, difraktsiooni, püüdis Newton käsitleda kui eemaletõukavat või külgetõmbavat toimet, mida aine valgusele avaldab.

Just Newtoni eksperimentaalses parandis endas aga peitus tõsine raskus tema mehaanilise valguseosakeste-teooria jaoks. Pöördume tagasi katse juurde Newtoni rõngastega (lk. 20). Pole kahtlust, et need rõngad tekivad läätse ja klaasi vahemikku piiravalt ülemiselt ja alumiselt pinnalt peegeldunud kahe kiire vastastikuse toime, nende kohtumise (interferentsi) tulemusena. Vaatleme kaht sellist kiirt (joon. 11).

Kiir 1 peegeldub esimeselt pinnalt, andes peegeldunud kiire 1; kiir 2, mis murdub esimesest pinnast läbi minnes, peegeldub teiselt pinnalt ja satub uuesti läätse. Niisugused kohtuvad, «interfereeruvad» kiired annavadki vastastikku teineteisele mõju avaldades püsiva pildi Newtoni rõngastest. Kujutleme nüüd Newtoni eeskujul, et kiired 1 ja 2 on valgusallikast korrapäratult välja lendavate valgusosakeste teed. Mõlemad osakesed on teineteisest täiesti sõltumatud. Kui kasutame väga nõrka valgustust, siis peame lõpuks saavutama olukorra, kus tõenäosus, et osakesed liiguvad samaaegselt mööda teid 1 ja 2, muutub kaduvväikeseks. Kui Newtonil oli õigus, siis peaksid rõngad niisugusel korral kaduma: osakestel ei ole millelegi toimet avaldada, neil ei ole millegagi interfereeruda. Katse rõngastega õnnestub aga ühesuguse resultaadiga kui tahes



Joon. 11. Kiirte käik Newtoni katses interferentsirõngastega.

väikeste intensiivsuste puhul. Võib näiteks valida nii nõrga valgustuse, et Newtoni rõngaste fotografeerimiseks kulub mitu päeva, kuid rõngad tekivad sellest hoolimata niisama selgetena kui heleda valgustuse puhulgi.

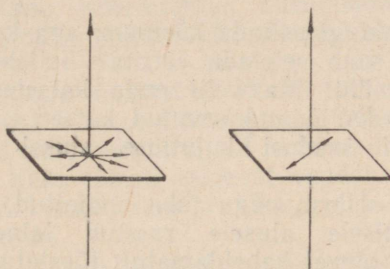
Pidi mööduma 150 aastat, enne kui tõestati, et katsed rõngastega ja teised analoogilised interferentsinähtused on igasuguste raskusteta seletatavad, kui ainult oletada, et valgus kujutab endast laineliikumist. Tõepoolest — laine levib valguspunktist igasse külge ja kõik tema lõigud kannavad endaga igasuguse intensiivsuse puhul teatavat energiat, mistõttu kiired 1 ja 2 võivad alati interfereeruda. Peale selle ennustab laineteooria täiesti täpselt ka interferentsi resultaati: kui kiirte 1 ja 2 käiguvahe on nende kohtumisel selline, et ühe laine nõgu satub täpselt teise laine harja kohale, siis lained nagu kustutavad sellel kohal teineteist ja tekib tume rõngas, kuna vastupidi naaberlõigus, kus ühte langevad mõlema laine harjad, toimub vastastikune tugevdamine, s. o. tekib hele rõngas.

Samasuguse eduga seletas uus laineteooria kõiki difraktsiooni peensusi, ennustades fakte, mis leidsid alati laitmatut katselist kinnitust. Ka valguse polarisatsioonile andis laineteooria selge tõlgenduse. Polariseerimisnähtus osutab sellele, et valguslained on ristlained, s. o. võnked toimuvad risti kiire suunaga täpselt samuti nagu veelainetes tiigi pinnal. Polariseerimata kiirtes toimuvad võnked mistahes suundades kiire ümber (joon. 12), polariseeritud kiirtes ainult ühes suunas.

Laineteooria saavutas XIX sajandi esimesel poolel Newtoni voolamisteooria üle võidu oma ennustuste laitmatu kvalitatiivse ja kvantitatiivse täpsuse tõttu. Kuivõrd püsiv aga oli see võit? Meenutame, et Newtonil oli peamiseks argumendiks laineteooria vastu mehaanilise keskkonna — eetri — puudumine planeetidevahelises ruumis. Kas Young ja Fresnel lükkasid selle argumendi ümber? Ei, neile näisid just valguse laineomadused tõestusena eetri olemasolule. Kogu XIX sajandi vältel püüdsid füüsikud asjatult leida otseseid tõendeid eetri eksisteerimise kohta. Eriti saatuslikeks said eetrile katsed, mis käsitlesid valguse levimist liikuvates kehades. Kui eksisteerib liikumatu mehaaniline keskkond, milles levivad valguslained, siis peab näiteks Maa aastast liikumist ümber Päikese saatma omalaadne «eetrituul», mis avaldab mõju optilistele näh-

tustele. Katseliselt sellist «tuult» ei avastatud. Järelikult eetrit kas ei ole olemas, või ta evib täiesti erilisi, mitte mehaanilisi omadusi.

Sellele vaatamata leidis valguse laineteooria täiesti ootamatut toetust elektriliste ja magnetiliste nähtuste valdkonnast. Katseliselt tõestati, et elektrilised ja magnetilised häired levivad valguse kiirusega, kusjuures elektriliste ja magnetiliste olekute omavaheline seos on selline, et mõningatel tingimustel peavad levima elektromagnetilised lained. Need lained, mille olemasolu oli teoreetiliselt ennustanud Maxwell, avastas katseliselt H. Hertz. A. S. Popov leidis esimesena meetodi elektromagnetiliste lainete muut-



Joon. 12. Polariseerimata ja polariseeritud valguse võnked.

miseks võimsaks suurtele kaugustele signaaliseerimise vahendiks, pannes sellega aluse raadiole. P. N. Lebedev ja teised uurijad tõestasid, et elektromagnetilistel lainetel esinesid kõik valguse tol ajal teada olevad tunnused — nad peegeldusid, murdusid, polariseerusid ja allusid difraktsioonile. Sel viisil avastati veel üks uus valguse omadus — ta osutus elektromagnetiliseks nähtuseks. See andis seletuse valguse ja aine vastastikusele toimele. Nagu me praegu hästi teame, on aine ehitatud elektriliselt laetud osakestest — positiivsetest tuumadest ja negatiivsetest elektronidest, mis asuvad aatomite perifeeriatel. Nende osakeste igasugune liikumine peab tekitama elektromagnetilisi lained, s. o. valgust. Vastupidi: aatomitele ja molekulidele langedes panevad elektromagnetilised lained laetud osakesi võnkuma, kusjuures lainete energia hajub ja neeldub.

Pöördume nüüd tagasi eetriga seotud raskuste juurde. Valguslainete mehaanilisele teorialle on eeter täiesti möödapääsematu: keskkonnata, eetrita ei saa mehaanilised lained üldse eksisteerida, nagu ei saa olla heli õhuta või mõne teise keskkonnata. Sellest ajast alates aga, kui tõestati, et valguslained on elektromagnetilised lained, muutus olukord järsult. Sõltumatult sellest, kas eeter on olemas või mitte, teame otsese ja hästi tuntud katsete põhjal, et laetud kehade ümber eksisteerib elektriväli. Kui laeng hakkab liikuma, siis levivad ruumis elektromagnetismi seaduste järgi tingimata elektromagnetilised lained. Nad peavad eksisteerima, sest eksisteerib elektriväli.

Võidakse muidugi esitada küsimus: aga kas elektrivälja enda olemust saab seletada eetrita? Sellele on võimalik vastata ainult üht: Maxwelli enda katsetest alates on seni tagajärjetuks jäänud arvutud katsed tuletada elektri ja magnetismi seadusi kujutluse alusel mehaanilisest eetrist.

Sõltumatult sellest, nagu juba mainitud, näis valguse elektromagnetilisele alusele rajatud laineteooria XIX sajandi lõpuks olevat kaheldamatult tõestatud, kuna Newtoni vastuväide eetri puudumise kohta kaotas oma tähtsuse, niipea kui sai selgeks, et valguslained ei ole mehaanilised lained.

Laineteooria pühitses võitu, mis näis lõplikuna. Optikas oli kõik «korda seatud». See võit osutus aga väga lühiajaliseks. Ei olnud veel möödunud viit aastatki raadio leiutamisest, kui selgusid valguse toime kvantseadused (lk. 30), mis ei olnud mõistetavad laineteooria seisukohast lähtudes. Kuidas saab energia neelduda tervete annustena, kui teda toovad kohale pidevad lained? Sellest ajast on möödunud mitukümmend aastat, kuid teadmatus on jäänud endiseks; laineteooria ei suuda sellele küsimusele vastata ka praegu.

Laineteooria oli valguse toime kvantseaduste ees abitu. See ebamugav olukord oli selline, et tuleb uuesti meenutada Lomonossovit, kes voolamisteooria aadressil ütles: «Ebamugavus elab sageli võimatuse naabruses.»

Teisest küljest omandas just «võimatu» voolamisteooria uuesti väljavaateid tunnustamisele. Tal ei ole raskusi eetriga: valguse korpusklid lendavad tühjuses, neile ei ole eetrit tarvis. Ka kvantseadused on Newtoni vaadetega

täielikus kooskõlas. Molekulid neelavad valgust tervete kvantidena, sest nende juurde lendavad kas terved korpusklid või mitte midagi; seetõttu ei lagune valguse mõjul toimivate keemiliste muutuste puhul korruga kõik molekulid, vaid ainult need, mida on tabanud kvandid — korpusklid. Lainete intensiivsust vähendades vähendame nende võnkumise hoogu, pinget, kuna korpusklite voogu nõrgendades jätame iga korpuskli toime endiseks, vähendades ainult korpusklite arvu. Valguse toime kvantseadused tähendavad voolamisteoorias ainult seda, et valgus levib tervete kvantidena — korpusklitena.

Samal ajal aga ei suutnud taas elustunud voolamisteooria endiselt seletada interferentsi, difraktsiooni ja valguse teisi omadusi, mille puhul kõik raskused automaatselt ületab laineteooria.

Optikas tekkinud olukord oli täiesti talumatu ja füüsikaline oli igati põhjust korrata Lomonossovi nukrat fraasi, mis on ära toodud selle peatüki algul ja mis puudutab just valgusteooriat. Kaks täiesti erinevat vaadet valguse loomusele valitsesid kumbki oma valdkonnas ja jäid jõuetuks naabervaldkonnas.

Võimalus selle raskuse ületamiseks välgatas ootamatust suunast. Meenutame, kuidas me jõudsime järeldusele, et võimalikud on ainult kaks kujutlust valguse loomuse kohta. Me toetusime harilikele igapäevastele tähelepanekutele, mis näitavad, et energia mehaaniline ülekandmine toimub ainult kahel viisil: osakeste abil või lainete abil. Mõeldav on muidugi ka nende mõlema kombinatsioon, kuid nende võimalustega ongi ammendatud kõik, mida läheb korda «kujutleda» ja «mõista».

Klassikaline mehaanika, mis nagu optikagi on rajatud Newtoni poolt, kujutab endast meie igapäevaste kogemuste matemaatilist üldistust ning temast tuletatud järeldused energia kaugusse ülekandmise võimalike viiside osas ei erine sugugi meie lihtsatest järeldustest. Nõnda nimetatud «klassikalist füüsikat» iseloomustab veendumus, et Newtoni seaduste näol on leitud täielik tõde, milles on võimatu kahelda. Selle veendumuse alusel tekkis «mehhanistlik» loodusteadus, mis püüab kõiki loodusnähtusi seletada omavahel mingite jõududega seotud ning Newtoni seadustele alluvate osakeste liikumisega.

Veendumusele nende seaduste eksimatuses pani aluse esiteks nende mõistetavus, nende täielik vastavus

meie tavalistele mitteteaduslikele kujutlustele, ja teiseks klassikalise mehaanika tohtu e d u kõikides loodusteaduse ja tehnika valdkondades. Seejuures ei olnud need argumentid Newtoni seaduste kasuks kaugeltki laitmatud. «Mõistetavaks» nimetame seda, mis vastab meie harjumustele. Me võrdleme näiteks lendavat aatomit lendava kuuliga, selgitades endale pilti aatomist tavalisema pildi abil kuulist. Igaühele on aga selge, et tegelikult on kuul aatomist määratult keerukam ja meie «selgitus» viib lihtsamalt keerukamale, kuid tavalisemale. Ühe või teise seaduse ja nähtuse «mõistetavus» ei kindlusta veel nende tõelist lihtsust ja usaldatavust. Teisest küljest — inimene areneb ajalooliselt, tema oskused muutuvad ning see, mis oli varem mõistetamatu, saab järk-järgult silmanähtavaks. Meie tavalised kujutlused vastavad paljus nähtuste tegelikule käigule ja arenedes jõuab inimene üha lähemale tõe mõistmisele, kuid öelda, et meie kujutlused langevad täielikult ühte absoluutse tõega, tähendaks eitada teist vaieldamatut tõe inimese arenemise kohta. Lühemalt väljendudes — veendumus looduse mehhanistlikkuses ning Newtoni seaduste kõigutamatuses toetub põhiliselt «harjumuse» väga kõikuvale alusmüürile.

Ülepääsmatutena näivaid sisemisi vastuolusid avastati XIX ja XX sajandi vahetusel mitte ainult valgusnähtustes, vaid ka aine omadustes. Osutus, et kehade massid sõltuvad nende kiirustest; tuli revideerida isegi ruumi ja aja mõisteid. Leidus füüsikuid ja filosoofe, kes ruttasid kõnelema materia «dematerialisatsioonist», sellest, et «materia kaob, jäävad ainult võrrandid». Järjekindlalt rakendatav mehhanistlik, metafüüsiline materialism andis raskuste ja vastuoludega kokku põrgates mõningatele teadlastele põhjust oma seisukohtade muutmiseks vastupidisteks ning avalikuks või maskeeritud üleminekuks idealismi ja müstisismi uttu. Seda soodustas oma lõpule läheneva kapitalistliku maailma kogu sotsiaalne olukord; idealismi udu oli üheks suitsukatetest, mis pidi eesrindliku inimkonna eest varjama kapitalistlikus ühiskonnas valitsevat vägivalda ja pettust ning selle ühiskonna ebapüsivust.

Metafüüsilise materialismi, mille kehastusena püüti kujutada «klassikalist füüsikat», ja tema poolt sünnitatud uue füüsikalise idealismi ületas aga dialektilise materialismi maailmavaade — Marxi, Engelsi, Lenini ja Stalini õpetus. Uue füüsika sügava analüüsi dialektilise materia-

listmi positsioonidelt lähtudes andis V. I. Lenin oma geniaalses raamatus «Materialism ja empiriokrititsism», mis ilmus 1909. aastal.

Looduse uurimise dialektilise meetodi põhilised iseärasused seisavad selles, et loodust vaadeldakse seostatud, ühtse tervikuna, mis on pidevas liikumises ja muutumises. «Iga nähtuse igas looduse valdkonnas võib muuta mõtte-tuseks, kui vaadelda seda ümbritsevate tingimustega seos-tamata, neist lahus.»¹ kirjutab J. V. Stalin oma süntee-sivas töös «Dialektilisest ja ajaloolisest materialismist». «Vastupidiselt metafüüsikale,» ütleb J. V. Stalin, «lähtub dialektika sellest, et looduse esemeile ja nähtustele on omased sisevastuolud, sest neil kõigil on oma eitav ja jaatav külg, oma minevik ja tulevik, oma iganev ja arenev.»²

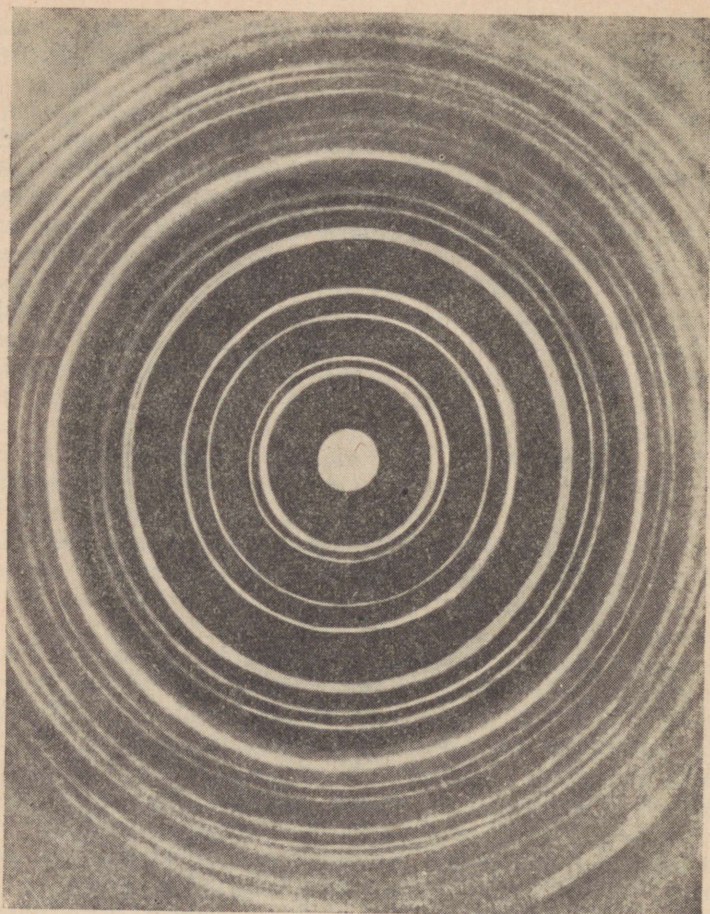
V. I. Lenin näitas oma raamatus «Materialism ja empiriokrititsism», et metafüüsiline, mehhanistlik õpetus mateeriast tuleb asendada materia kui objektiivse reaalsuse avara, elava, dialektilise mõistega. Sellesse materia mõistesse peab mahtuma looduse mistahes omadus kõigi oma vastuolude ja keerukustega, kui ta ainult on tege-likkuses olemas.

Sellest vaatekohast lähtudes on optika arenemise tule-musena ilmnenu «ülepääsmatu» vastuolu valguse laineliste ja korpuskulaarsete omaduste vahel looduse dialek-tika, vastandite reaalse ühtsuse uueks väljenduseks. Klas-sikalise füüsika lihtsustatud mehhanistlikud kujutlused pidevatest lainetest ja katkendlikest osakekestest, mis näili-selt teineteist välja lülitavad, eksisteerivad tegelikes loo-dusnähtustes üheaegselt. See meie jaoks ebaharilik ja ise-endale vastu rääkiv ühtsus annab tunnistust ainult meie mehhanistliku maailmapildi puudulikkusest ja primitiivsusest. Tegelik maailma materia on lõpmatult keerukam lihtsustatud metafüüsilistest kujutlustest, mis meil on tek-kinud harjumuse ja pikaajaliste igapäevaste kogemuste mõjul.

Teaduse arenemiskäik on kinnitanud selle õigsust. Klas-sikalise mehaanika edusammud, mis olid seotud katse-tehnika erakordse õitsenguga, viisid teda lõpuks jõuetu-sele ja abitusele uute faktide ees.

¹ ÜK(b)P ajalugu. Lühikursus. Tallinn, 1952, lk. 96.

² Samas, lk. 99.



Joon. 13. Elektronide difraktsioon väga õhukese hõbedakihi läbimisel.

Eksisteeriv materiaalne maailm — liikuv materia — avaldub meile kahes põhilises vormis — aine ja valgusena. Järk-järgult tugevnes veendumus, et aine kogu oma mitmekesisuses on ehitatud negatiivselt laetud elektronidest, positiivselt laetud prootonitest ja laengut mitte kandvatest neutronitest. Aine näis seetõttu mõistatavamana kui valgus, millel üheaegselt ilmnesis nii lai-

nete kui ka osakeste omadused. Kui valguse lahutamatuks omaduseks peeti tema liikumist ja mõte «liikumatus valgusest» näis absurdseks, siis «paigalseisva ainega» leppis mehhanistlik füüsika täiesti. Laine ei ole mõeldav liikumiseks. Kui füüsik räägibki «seisvatest lainetest», siis mõtleb ta sellega kahe teineteisele vastu liikuva laine liitumise resultaat. Üksikult võetud osakest seevastu võib kujutleda täiesti liikumatuks, kuigi selline materia vorm, millelt on võetud liikumine, s. o. tema lahutamatu omadus, kujutab endast dialektilise maailmavaate seisukohalt puhtast abstraktsiooni. See on tõepoolest nii, nagu näitasid uued, täiesti ootamatud ja hämmastavad katsed. Esimest korda umbes veerand sajandit tagasi teostatud katsedel avastati, et väikesi tõkkeid ja avasid kohates kutsuvad elektronide, prootonite või molekulide voog esile niisama selgeid difraktsiooninähtusi kui valguski, s. o. ta evib neidsamu põhilisi lainelisi omadusi.

Joonisel 13 on toodud näide difraktsioonipildist, mis on saadud elektronide läbimineks väga õhukesest, mikroskoopilistest kristallikestest koosnevast hõbedakihist. Difraktsioon on siin niisama selge kui valguse puhul ja annab niisama veenvat tunnistust elektronide, s. o. aine lainelisest loomusest.

Tänapäeval on nende «ainelainete» pikkust suure täpsusega mõõdetud ning leitud, et see pikkus on h/mv . Siin on h seesama konstantne suurus, millega me kohtusime juba valguse omaduste puhul (lk. 31), m osakese mass ja v tema kiirus.

Võib oletada, et lainetele vastavad mitte ainult elementaarosakesed — elektronid, aatomid ja molekulid; on alust väita, et mistahes iseseisvat ainekogumit, on see siis inimene, trammivagun või Päike, iseloomustab tema massile ja kiirusele vastav laine v .

Täppisloodusteaduse kogu ajaloos on raske leida teist avastust, mis oleks olnud nii ettenägev ning nii järsult lahku lõõnud meie harilikest kujutlustest.

Mehaanikaga juhtus sama mis optikagagi. Vana valguseõpetus pidas valgusvoogu sirgjoonelisel levivate kiirte vihuks, kuid difraktsiooninähtused viisid mõttele, et valgus kujutab endast laineliikumist, mis sel juhul, kui tema teel puuduvad väikesed tõkked ja avad, käitub tõepoolest kiirtekimbuna. Näiliku geomeetrilise kiirteoptika taga peitus laineoptika. Newtoni mehaanika oli «kiirte-

mehaanika», kuid tänapäeva avastused on näidanud, et tema taga peitub üldisem «lainemehaanika».

«Ainelaineid» ei tule muuseas samastada valguslainetega. Me nägime, et valguslained on oma loomuselt elektromagnetilised lained, mida ei saa öelda ainelainete kohta. Viimased ühtivad orgaaniliselt ainega, selle osakesetega, samal ajal kui valguslained kiirguvad, lahkuvad ainest ja evivad hoopis teistsuguseid omadusi.

Samuti ekslik on mõelda, et osakeste teooria on asendunud õigema laineteooriaga. See, et eksisteerivad materiaosakesed — aatomid ja elektronid aines ning kvandid valgusvoos, — on niisama kindel kui see, et on olemas ainelained ja valguslained. On tehtud katseid kujutada materiat osakeste ja lainete mehaanilise kombinatsioonina, kusjuures lained peaksid selles skeemis etendama ainult tüürimeeste või pilootide osa, kes suunavad lainete levimise seaduste järgi osakesi sinna, kuhu tarvis. Esimesel pilgul näib võimalikuna ka vastupidine mehhanistlik oletus, et laineid tekitatakse osakeste poolt eetris samuti, nagu nad tekivad laeva ahtri taga. Oma järeldustes on need oletused siiski täielikult tegelikkusest irdunud.

Väga levinud on arvamus, et üht tüüpi katsetes (näiteks katse Newtoni rõngastega) käitub valgus täielikult laine-liikumisenä, kuna teist tüüpi katsetes (näiteks värvitud kanga luitumine) avaldab ta end teisel määral osakeste voona. See on siiski ekslik. Kui Newtoni katse läbi viia äärmiselt nõrga valgusega, siis avaneb teatavatel tingimustel võimalus vaadelda heledate rõngaste heleduse statistilist korrapäratut kõikumist, mis tõendab, et valguse energia on ka selle tüüpiliselt lainelise nähtuse puhul koondunud üksikutesse footonitesse. Teisest küljest — kui valgustada värvitud kangast läbi kitsaste avade, siis ilmnevad tema luitumisel difraktsiooninähtused.

Materiaal, s. o. ainel ja valgusel on üheaegselt nii lainete kui ka osakeste omadused, kuid tervikuna ei kujuta ta endast ei laineid, osakesi ega nende mõlema segu. Meie mehaanilised mõisted ei ole suutelised reaalsust täielikult haarama, sest selleks ei piisa näitlikke kujutluspilte.

Formaalne matemaatiline valgusetooria, kuigi ta pole päris täiuslik, on tänapäeval loodud ning haarab peaaegu kogu tuntud nähtuste ringi, kuid see teooria jääb

siiski äärmiselt abstraktseks ja «mõistetamatuks» (näitlike kujutluspiltide puudumise mõttes).

Nüüd on kohane tagasi pöörduda raskuse juurde, millega meil oli tegemist käesoleva peatüki algul. Lugeja ei ole tõenäoliselt unustanud, et me pörkasime kokku selgusetusega valguseõpetuse objekti enda määramisel. Kas see küsimus on tänapäeval lahendatud? Printsipiaalselt jah. Järk-järgult on kindlaks tehtud valguse objektiivsed põhiomadused, mis eristavad teda teistest materiaaliikidest. Eristatavate tunnuste praktiline kasutamine, eriti nende tunnuste kompleksi puhul, on aga käesoleva ajani mõnikord raskustega seotud.

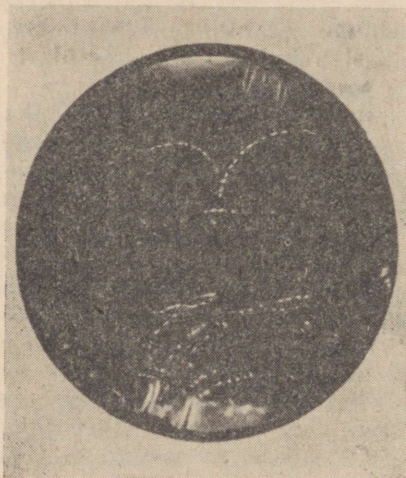
Möödunud sajandi lõpul ei suutnud füüsikud kaua otsusele jõuda katoodekiirte suhtes — kas nende puhul on tegemist aine või valgusega? Küsimus lahenes, kui eksperimentaalselt tõestati, et katoodekiired kannavad negatiivset elektrilaengut. Pikka aega kaheldi ka röntgenikiirte valguslikus loomuses. Alles pärast röntgenikiirte difraktsiooni avastamist 1913. aastal nõustusid füüsikud lõplikult, et on tegemist valgusnähtusega. Muide, kui täpne olla, siis tuli seda järeldust kontrollida pärast laetud osakeste — elektronide ja prootonite — ning isegi laengut mitte kandvate osakeste — neutronite — difraktsiooni avastamist. Röntgenikiirte valguslikku olemust tõestab laitmatult alles mitmesuguste, ilmselt nende kiirte elektromagnetilisele loomusele viitavate nähtuste kompleks.

Mõne aastakümne jooksul on uuriiad järsult muutnud oma arvamust nõndanimetatud kosmiliste kiirte loomuse kohta. Need maailmaruumist tulevad kiired langevad vahetpidamata igast küljest Maale ja omavad hiiglasuurt läbitungimisvõimet. Kaks aastakümnet tagasi peeti kindlaks tehtuks, et kosmilised kiired koosnevad põhiliselt valguskiirtest, mille lainepikkus on äärmiselt väike — keskmiselt väiksem kui raadiumi gammakiirtel. Hiljem aga tõestati, et kosmilised kiired kalduvad maa magnetvälja mõjul kõrvale ja koosnevad järelikult elektrilaengut kandvatest osakestest. Algul oletati seoses sellega, et primaarsed kosmilised kiired koosnevad elektronidest. Viimasel ajal läbi viidud uurimised, eriti nõukogude füüsikute poolt ülemistes atmosfäärikihtides teostatud katsed, on aga kaheldamatult tõestanud, et primaarsete kosmilise kiirte põhiosa koosneb positiivselt laetud prootonitest. Märgime, et kos-

milised kiired levivad tohutu kiirusega, mis praktiliselt ühtib valguse kiirusega.

Toodud näidetest ilmneb selgesti, kui suurte praktiliste raskustega on üksikjuhtudel seotud ühe või teise nähtuse valgusliku loomuse kaheldamatu kindlakstegemine.

Reaalne materia on oma erinevates avaldustes — nendeks avaldusteks on aine ja valgus — ammendamatu ning see tema sisu ammendamatus ilmneb teadusliku uurimise



Joon. 14. Paari elektron-positron tekkimine valguslikust gamma-kvandist. Magnetiväljas on positron kaldunud vasakule (ülal), elektron paremale (A. V. Groševi ja I. M. Franki foto).

süvenemisega üha suuremal määral. Vastandades valgust ainele, vaatamata nende paljudele sarnastele omadustele (lainete ja osakeste omadused, kvantseadused), pidasime seni valgust ja ainet põhiliselt erisugusteks, teineteisest umbes samuti erinevateks, nagu viiuliheli erineb viulist või raadiolaine saatejaamast. Ligikaudu kakskümmend aastat tagasi aga tehti valguseõpetuse valdkonnas veel üks hämmastav avastus.

Oma formaalse matemaatilise valgusetooria alusel, mida me äsja mainisime, jõudis Dirac teoreetilisele järele-

dusele, et teatavatel tingimustel peab valgus muunduma aineks ja vastupidi. Aatomituuma tugevas elektriväljas võivad valguskavandid, mille lainepikkus ei ületa ligikaudu $0,001 \text{ m}\mu$, Dirac'i arvates laguneda kaheks vastasmärgiliselt laetud osakeseks — elektroniks ja positroniks. See väga üllatav teoreetiline ennustus leidis siiski täielikku katselist kinnitust. Valguse muundumist aineks tõestati eksperimentaalselt. Joonisel 14 näeme fotot sellest hämmastavast protsessist. Sedaliiki fotode valmistamise võimalus põhineb sellel, et veeauruga üleküllastatud õhku läbides jätavad kiiresti lendavad laetud osakesed endast jälje, mis koosneb kondenseerunud vee piisakestest. Vastasmärgiliselt laetud osakesed — elektron ja positron — läbivad tugeva magnetvälja, mistõttu nende teed kõverduvad vastupidistes suundades.

Nagu on näha fotolt, etendub meie silmade ees valgusliku gammakiire kergeste aineosakeste paariks muundumise imetusväärne vaatepilt. Siin toimub tegelikkuses midagi, mis teatud määral meenutab meloodia muinasjutulist muutumist viiuliks!

Selle nähtuse seletamiseks ei ole teadusel seni veel midagi peale Dirac'i formaalse ja selles mõttes meid ilmselt mitte rahuldava teooria. Igal juhul on ilmnenu, et valguse ja aine vahel eksisteerib ülitihed seos, mille olemasolu varem ei aimatud. Inimene on looduse alistanud veel ühest küljest.

Me alustasime värvuse ja heleduse subjektiivsetest nägemisaistingutest ning, jälgides samm-sammult optika arenemise ajalugu, jõudsime seejärel keeruka olukorrani, milles tänapäeval viibib objektiivne valguseõpetus. Lugeja ei ole arvatavasti rahul sellega, kuidas lõpeb jutustus saatusest, mis on osaks saanud valguse loomust käsitlevate vaadete arengule. Mõistatus jääb lahendamata selle sõna tavalises mõttes ja on muutunud veel keerukamaks, kui see näis Newtoni ja Lomonossovi ajal. Selline aga on tõelise teaduse iga valdkonna saatus. Mida lähemale me tõele jõuame, seda rohkem ilmneb tema keerukus ja seda selgemaks saab tema ammendamatus. Teaduse lakkamatul ja võidukal, kuid mitte kunagi täieliku võiduga lõppeval võitlusel tõe eest on siiski oma vaieldamatu õigustus. Teel valguse loomuse mõistmisele on inimene omandanud mik-

roskoobid, teleskoobid, kaugusemõõtjad, raadio, röntgenikiired; valguse uurimine on kaasa aidanud aatomituumade energia alustamisele. Tõde otsides avardab inimene piirilt valdkonda, kus ta on valitsejaks looduse üle. Ja kas see polegi teaduse tõeliseks ülesandeks? Me oleme veendunud, et valguse, tema loomuse ja olemuse uurimise ajalugu pole veel kaugelki lõpul; pole kahtlust, et teadust ootavad selles valdkonnas uued avastused ja et me jõuame lähemale tõe, kuna tehnika rikastub uute vahenditega.

Valguse uurimise ajalugu on illustatsiooniks J. V. Stalini tarkadele sõnadele:

«Vastupidiselt idealismile, mis eitab maailma ja tema seaduspärasuste tunnetamise võimalust, ei usu meie teadmiste usaldusväärset, ei tunnusta objektiivset tõe, ja arvab, et maailm on täis «asju iseeneses», mida teadus kunagi ei suuda tunnetada, lähtub marksistlik filosoofiline materialism sellest, et maailm ja tema seaduspärasused on täiesti tunnetatavad, et meie teadmised looduse seadustest, mis on kontrollitud kogemuste ja praktika rajal, on usaldusväärsed teadmised, millel on objektiivsete tõdede tähendus, et maailmas ei ole tunnetamatuid asju, vaid on ainult veel tunnetamata asjad, mis avastatakse ja tunnetatakse teaduse ja praktika jõududega.»¹

¹ ÜK(b)P ajalugu. Lühikursus. Tallinn, 1952, lk. 102.

PÄIKE

Kõige keskpunktis asub Päike. Ja kes leiakski tolele küünlale selles ülikaunis jumalakojas teise või parema koha kui see, kust ta saab kõike võrdselt valgustada. Mitte asjata ei nimeta teda seetõttu ühed maailma küünlaks, teised Mõistuseks, kolmandad Valitsejaks, Trismegistos — nähtavaks jumalaks, Sofoklese Elektra — kõikenägevaks, Niisiis, nagu kuningatroonil istudes valitseb Päike end ümbritsevate tähtede perekonda.

M. Kopernik

Kozma Prutkovil leidub järgmine mõttetera: «Kui sinult küsitakse: kumb on kasulikum, kas päike või kuu? — siis vasta: kuu. Päike ju paistab päeval, kui on ilma temagi valge, kuu aga paistab öösel.» Ükski lugejatest muidugi ei lase end selle teravmeelsuse mõttetusega eksitusse viia. Päeval on valge seepärast, et paistab päike, ning öösel annab kuu valgust seetõttu, et kusagil paistab seesama päike ja kuu peegeldab tema kiiri maakerale. Varjates end mütsisirmiga või päevavarjuga otseste päikesekiirte eest, ei takista me Päikest valgustamast õhku, pilvi, põlde ja kõike, mis meid ümbritseb. Päike võib olla varjatud pilvega, kuid tema kiired, mida õhk hajutab, valgustavad endiselt Maad. Kui aga Maa ja Päikesega vahele, küllalt suurele kaugusele Maast, satub mingi suur läbi- paistmatu ese, siis võib see otseseid päikesekiiri takistada Maa atmosfääri pääsemast ja valgus kaob. Nii see ongi päikesearvatuste ajal, kui Maa, Kuu ja Päike asetsevad ühel sirgel. Joonis 15 selgitab asja olemust.

Inimeseni jõudva valguse (mõtleme nii nähtavaid kui ka nähtamatuid kiiri) päritolu võib olla kolmesugune. Maale langevad otsesed päikesekiired, mida me püüame näha võimalikult harvemini. Meie silmade teljed on tavaliselt suunatud horisontaalselt ning päike seisab



M. Kopernik (1473—1543).

nende ees ainult tõusmisel ja loojumisel. Päeval satuvad meie silmadesse vahetpidamata hajunud päikesekiired. Taevasina tekkimise põhjuseks on päikesekiirte hajutamine õhu molekulide poolt. Kui hajutavad osakesed on väga väikesed, siis hajuvad kõige rohkem väikeste lainepikkustega kiired (nähtavas spektris sinised ja violetsed kiired). Teisiti on lugu siis, kui osakesed on suured — sel juhul hajuvad küllalt tugevasti ka pikemad lained. Selles on väga kerge veenduda paberossi suitsetades. Paberossi süüdatud otsast väljuv suits on sinine, tagumisest otsast väl-

juv suits aga valge. Seda seletatakse sellega, et tubaka-kihti läbides suitsuosakesed liituvad omavahel ning suurenevad seetõttu. Täpselt samuti on suurtest veepiiskadest koosnevate pilvede poolt hajutatud valgus valge, kuna selge taevast on sinine. Kui Maal puuduks atmosfäär, siis näeksime Päikest täiesti mustas taevast.

Olles 20—22 kilomeetri kõrgusel Maa kohal, nägid vaatlejad stratostaadi gondlist just niisugust peaaegu musta taevast, kuigi paistis päike.



Joon. 15. Päikesevarjutuse skeem.

Ehapuna, põldude ja metsade roheline, lume valgedus, kuupaiste — kõik see kujutab endast peegeldunud või hajunud päikesevalgust.

Peale otsese ja hajunud päikesevalguse aga jõuavad meieni ka päikesest sõltumatud kiired. Iga soojendatud keha kiirgab valgust. Kui soojendus on väga tugev, siis on selles valguses palju nähtavaid kiiri; kui soojendus on tühine, siis väljuvad kehast nähtamatud infrapunased kiired, mida on võimalik avastada nende soojusliku toime põhjal. Meie ümber on kõik soojendatud. Kui me nimetamegi ühtesid kehasid soojadeks, teisi külmadeks, siis teeme seda ainult tingimisi, võrreldes nende temperatuure oma keha temperatuuriga. Keha täielikult

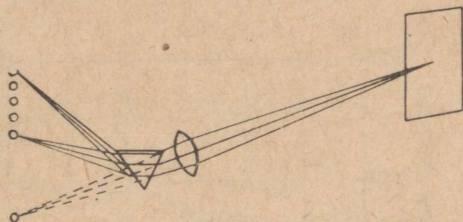
jahutada tähendab peatada osakeste liikumine temas. See on võimalik ainult ligikaudu -273°C juures (temperatuuri absoluutne nullpunkt). Maakeral aga on kõik soe ning saadab seetõttu välja nähtavaid või nähtamatuid kiiri; kiiri saadab välja ka inimene ise ning kiiri saadavad välja tema silmad. Selles mõttes oli vanaaja teadlastel õigus, kui nad omistasid silmadele «maheda sisemise tule». Nende silma sisemiste kiirte energia on selline, et kui silm tajuks neid nii, nagu näiteks rohelisi kiiri, siis saadaks teda päeval ja ööl ligikaudu 5 miljoni künula tugevune helendus (vrd. lk 108).

Meile saadavad nähtavaid kiiri tähed — kauged päikesed, udukogud; mõnikord sähvivad taevavõlvil välgud või süttivad kummalised virmalised. Suvises rohus hiilgavad jaaniussid, metsas aga pehkinud puutükid. Välgud kiirgavad koos nähtava valgusega elektromagnetilisi laineid; ka selge ilmaga on raadiovastuvõtjast kuulda kummalist räginat, mis segab vastuvõttu — tegemist on atmosfäärsete elektromagnetiliste lahendustega. Neid lahendusi vaadeldes jõudiski A. S. Popov raadio leiutamiseni. Viimastel aastatel on kaheldamatult selgunud, et ka Päike ja tähed saadavad välja raadiolaineid. Teise maailmasõja ajal takistas Päikese ja teiste taevakehade radiokiirgus ajuti oluliselt raadiolokatsiooni häireteta tööd. Maakeras toimub mõningate aatomite aeglane lagunemine, radioaktiivne protsess, millega peale muu kaasneb väga väikese laine-pikkusega valguslik gammakiirgus.

Peale selle valguse, mis jõuab inimeseni Maal ja universumis toimuvate looduslike protsesside tulemusena, kasutab inimene enda poolt vajaduse järgi loodud kunstlikest valgusallikatest saadavat valgust. Ta põletab puitu, petrooleumi ja künulaid ning kasutab elektri-hõõglampe, milledes metallniite kuumutatakse elektrivoolu abil. Uutes täiuslikumates luminescentslampides kutsub elektrivool algul elavhõbeda-aurus esile lahenduse, millega kaasneb ultravioletne kiirgus. Ultravioletsed kiired neelatakse seejärel lumineseeriva segu poolt, millega on kaetud klaasitoru sisesein, ning muunduvad nähtavaks valguseks. Iga raadiojaam on omalaadne valgusallikas, mis saadab välja väga pikalainelist kiirgust. Teaduslikeks ja meditsiinilisteks otstarveteks konstrueeritakse röntgenitorusid, mis kiirgavad kergesti inimkeha läbivat nähtamatut valgust.

Nii üksikult kui koos võetutena aga on kõikide nende

valgusallikate energiad hoopis tühised Päikese kiirgus-energiaga võrreldes. Tuleb meeles pidada, et lampi kasutades ning raadiojaama või röntgenitoru töötada lastes kasutame lõppkokkuvõttes ära tühise osa Päikese energiast, mis on taimede poolt kogutud söesse, naftasse ja puidusse. Tuule, koskede ja jugade ning veehoidlate energiat kasutades rakendame jälle päikesevalguse energiat, mis tekitab tuult ja tõstab üles vett. Seetõttu on selge, et ükski kunstlik valgusallikas ei suuda kiiratava energia üldhulga suhtes võistelda Päikesega.

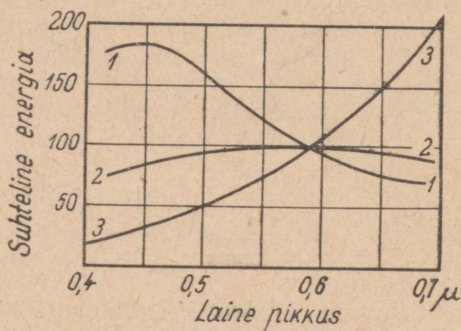


Joon. 16. Spektroskoobi skeem (Newtoni joonis).

Põhjus, mis sunnib inimest kasutama Päikese kõrval omaenda tagasihoidlikke kunstlikke valgusallikaid mitte ainult öösel, vaid ka päeval, «istuma päeval tule valgel», peitub selles, et paljudel juhtudel on tähtis mitte ainult valgusenergia hulk, vaid ka tema põhiomadus — spektraalne koostis.

Me teame, et esimesena kasutas valguse spektraalse koostise ülitähtsat mõistet Newton. Newtoni katse päikesevalguse lagundamisega prisma abil sai prototüübiks kõiki-tele mitmekesistele spektroskoopidele, mida kasutati ja kasutatakse teaduses. Newtoni enda joonise järgi valmistatud jooniselt 16 on selgesti näha Newtoni lihtsaima spektroskoobi idee. Valgus langeb kitsale pilule, mille taha on paigutatud lääts, nii et pilu asub peaaegu läätses fookuses. Läätses suundub valgusvoog prisma, murdub seal ja satub seejärel «lõpatusse» fikseeritud pikksilma, mille okulaaris on näha spektroskoobi pilu kujutis igaühes nendest värvustest, millest koosneb uuri-tav liitvalgus. Kui pilu oleks väga lai, siis kattuksid kujutised üksteisega, spekter oleks ebapuhas ning värvused temas oleksid mõnevõrra segatud.

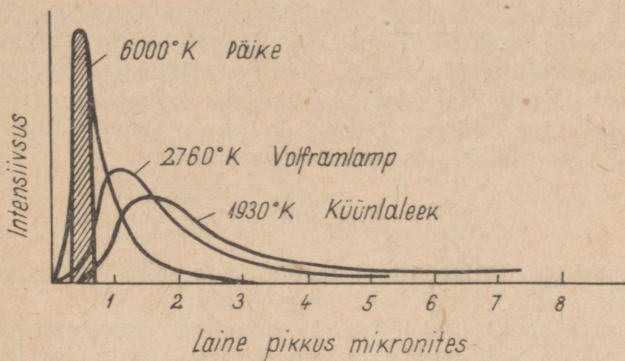
Kui asetame spektroskoobi pilu ette petrooleumi- või elektrilambi, siis näeme pikksilmas värvuste pidevat vaheldumist punasest violetseni. Silma asemele võib paigutada fotoplaadi; siis ilmneb spektri violetse otsa taga lühike ultravioletne jätk. Ei silm ega ka fotoplaad aga ei ole suutelised otsustama energia jaotuse üle spektris — neil on omad kitsad erilise tundlikkuse piirkonnad ning naaberpiirkondadele ei reageeri nad peaaegu üldse. Silm on eriti tundlik spektri rohelse osa suhtes, harilik fotoplaad sinise ja violetse osa suhtes. Energia üle otsustamiseks



Joon. 17. Energia jaotus erinevate valgusallikate spektrites.

on kõige parem kasutada soojuseadet, milles igasugused kiired täielikult neelduvad, muundudes soojuseks (termoelement). Õnnetuseks on sellistel seadmetel isegi kõige hoolikama valmistamise korral silmaga ja fotoplaadiga võrreldes äärmiselt väike tundlikkus. Joonisel 17 on toodud sel viisil mõõdetud energia jaotus mõningate valgusallikate kohta. Horisontaalteljele on paigutatud lainepikkused mikronites (meenutame, et $0,4\mu$ vastab nähtava spektri violetsele äärele, $0,7\mu$ punasele äärele). Vertikaalteljele on kantud energia suhtelistes ühikutes, nii et iga valgusallika puhul on lainepikkusele $0,59\mu$ vastav energia tinglikult loetud võrdseks 100-ga. Kõver 2 annab energia jaotuse Päikese spektri nähtavas osas, kõver 1 taeva sinises värvuses; me näeme, et hajumise tõttu on energia maksimum nihkunud spektri sinisesse ossa. Kõver 3 annab energia jaotuse elektrilambis.

Kui mitmesuguseid tahkeid aineid, näiteks metalle, kuumutada ühe ja sama kõrge temperatuurini, siis ilmneb, et nad erinevad teatud määral üksteisest energia jaotuse poolest. Erinevuse põhjuseks on kuumutatud kehade pindade erinev peegeldamisvõime. Kui pind teha täiesti mustaks, s. o. selliseks, et ta täielikult neelab kõik kiired ega peegelda midagi, siis on energia jaotus ühel ja samal temperatuuril iga keha jaoks ühesugune.



Joon. 18. Energia jaotus musta keha kiirguse spektris erinevatel temperatuuridel.

Soojendatud kehas muundub molekulide liikumine valguseks ja vastupidi — molekulid neelavad valgust. Igal antud temperatuuril kujuneb välja valguse neeldumise ja kiirgumise tasakaal.

Valgust käsitlevas peatükis jõudsime järeldusele, et valguse kiirgumine ja neeldumine ei saa toimuda teisiti kui tervete kvantidena $h\nu$. Vaadeldes kiirgumise ja neeldumise tasakaalu täiesti musta pinnaga kehas ning võttes arvesse mõlema protsessi kvandilist loomust, on võimalik küllalt kergesti ja täiesti täpselt tuletada seadust energia jaotuse kohta musta keha poolt välja saadetasavas valguses. Ajalooliselt toimus selle ülesande lahendamine just vastupidiselt. Otsides õiget ja katsetele vastavat spektraalseadust musta keha kiirguse jaoks, veendus M. Planck esimesena, et seda seadust ei saa tuletada teisiti kui eeldades, et valguse kiirgumine ja neeldumine on oma loomuselt kvandilised. Sel teel toimuski looduse kvantseaduste tagajärjekas avastamine.

Joonisel 18 on kujutatud «musta kiirguse» seadus mõningate temperatuuride jaoks. Joonise horisontaalteljele on kantud valguslainete pikkused mikronites ($1\mu = 1000\text{ m}\mu$), vertikaalteljele intensiivsus ehk energia suhtelistes ühikutes. Viirutatud pindala tähistab nähtava spektri piirkonda. Jooniselt on näha, et temperatuuri tõusmisel nihkub spektraalkõvera maksimum lühemate lainete suunas. See vastab kuumutatava metalli punase hõõgumise aeglasele üleminekule valgeks hõõgumiseks, mis on tuntud juba igivanast ajast. Teoreetilist seadust energia jaotumise kohta musta keha spektris kinnitavad katsed kogu käesoleval ajal saavutatava täpsusega. Sellest seadusest järeldub, et spektraalkõvera maksimumile vastava lainepikkuse korrutis absoluutse temperatuuriga T (s. o. temperatuur Celsiuse järgi $+273^\circ$) on konstantne suurus:

$$\lambda_{\max} T = K = 2897,18 \frac{\text{mikron}}{\text{kraad}}.$$

Suurust λ_{\max} (mikronites) teades saab selle valemi põhjal määrata spektri järgi keha temperatuuri.

Valguse spektraalset jaotust asusime vaatlema seoses küsimusega päikesevalguse omadustest. Päike on kahtlemata hõõguv keha ja seetõttu peab tema spekter olema lähedane Maal meie lampidest ja küünaldest tekkivatele spektritele. Halvas spektroskoobis, mille pilu on lai, näib Päikese spekter tõepoolest pidevana. Umbkaudselt mõõtes energia jaotust selles spektris, saadakse kõver, mis sarnaneb ühega musta kiirguse kõveratest (joon. 18). Selle kõvera kuju ning tema maksimumi asendi järgi saab ligikaudselt arvutada Päikese pinna temperatuuri, kui ainult eeldada, et Päike sarnaneb musta pinnaga hõõguva kehaga. Arvutuse tulemuseks on umbes 6000° . Täpsema arvu kindlakstegemisel on vähe mõtet, sest päikeseketta eri piirkondade temperatuur on erinev.

Valguse kvaliteedi eristamise suhtes jääb meie silm palju maha ka kõige halvemast spektroskoobist. Seetõttu piisab toodud ligikaudsetest arvudest, kui järgnevas peatükis tuleb võrrelda päikesevalguse ja silma omadusi.

Füüsik ja astronoom kasutavad Päikest uurides teleskoope ja kaasaegseid spektroskoope ning rakendavad silma asemel pidevalt fotograafiat. Neile avanevad päikesevalguse ja selle jaotumise kohta Päikesel niisugused üksikasjad, mis palja silma eest jäävad täiesti varjatuks.

1802. aastal märkas Wollaston Päikese spektri omadust, mida Newton millegipärast ei olnud tähele pannud. Spekter osutus kirjuks peenikestest tumedatest joontest. Hiljem uuris neid tumedaid kuristikke Päikese spektri heledal foonil üksikasjaliselt Fraunhofer, mistõttu neid nimetatakse fraunhoferi joonteks. Tabelis 1 on toodud peamised fraunhoferi jooned nähtava spektri jaoks. Neid kasutatakse sageli Päikese spektri ühe või teise piirkonna osutamiseks. Nad jäävad alati oma kohtadele ja on Päikese spektri loomulikeks tähisteks. Tabeli teises veerus on antud lainepikkused millimikronites, kolmandas veerus spektri selle piirkonna värvus, kuhu antud joon kuulub.

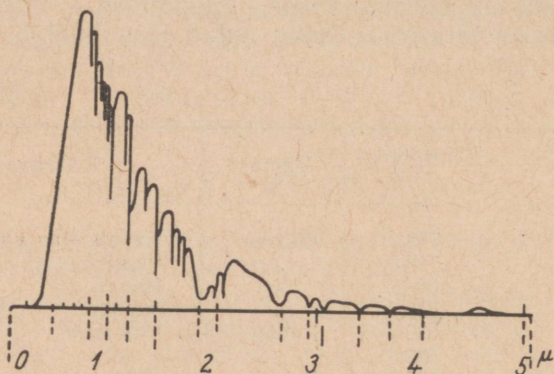
Tabel 1

Joon	Lainepikkus $m\mu$	Värvus	Allikas
A	759,4	Punane	Hapnik Maa atmosfääris
a	718,5	"	Veeaur " "
B	686,7	"	Hapnik " "
C	656,3	"	Vesinik Päikesel
D ₁	589,6	Kollane	Naatrium
D ₂	589,0	"	"
E	527,0	Roheline	Kaltsium
b ₁	518,4	"	Magneesium
b ₂	517,3	"	"
b ₄	516,8	"	"
F	486,1	Sinine	Vesinik
g	430,8	Violetne	Kaltsium
H	396,9	"	"
K	393,4	"	"

Me rääkisime eespool, et halvas spektroskoobis näib Päikese spekter pidevana ning energia jaotusköver korrapärase ja sujuvana. Jaotuskövera üksikasjaline uurimine näitab, et ta on nii nähtavas kui ka nähtamatus piirkonnas üleni täis sälke (joon. 19). Need sälgud on fraunhoferi joonte jäljed. Ultravioletses osas katkeb Päikese spekter küllalt järsku, kusjuures tema piir kõigub vastavalt erinevatele päeva- ja aastaegadele. Praktiliselt ei jõua Päikeselt meieni kiiri lainepikkusega alla 290 $m\mu$. Lühemad lained neelab osoon, mida leidub ülemistes atmosfäärikhihtides maksimumiga umbes 30 km kõrgusel.

Kuidas selétada mõnede värvuste puudumist Päikese

spektris? Viime värvitusse piirituse- või gaasileeki keedusoola. Leek muutub erekollaseks; kui seda leeki vaadelda spektroskoobiga (heaga), siis ei ole pidevat spektrit peaaegu üldse näha, on näha ainult kaks teineteise kõrval olevat kollast joont, mille lainepikkused langevad täpselt ühte fraunhoferi joonte D_1 ja D_2 lainepikkustega. Ühtelangeamise täpsus on nii suur, et see ei saa olla juhuslik. Erinevus seisab selles, et leegi puhul tekivad helendavad jooned tumedal foonil, Päikese puhul aga vastupidiselt mustad jooned spektri heledal foonil.



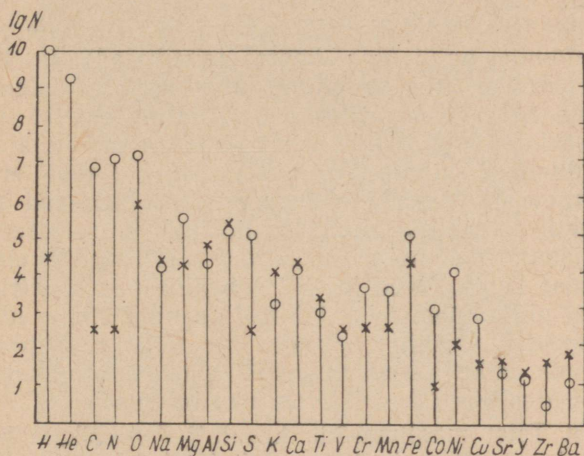
Joon. 19. Energia jaotus Päikese spektris.

Keedusool laguneb leegis klooriks ja naatriumiks; helendab naatrium. On loomulik oletada, et Päikese spektri mustade D-joonte tekitajaks on samuti naatriumiaur. Tõepoolest, kui näiteks hõõglambi poolt tekitatud pideva spektri teele paigutada metallise naatriumi auruga täidetud anum või keedusoolaga värvitud gaasileek, siis nõrgenevad need spektri piirkonnad, mis vastavad D-joontele; me saame pideva spektri foonil kunstlikult fraunhoferi jooni. Järelikult on naatriumiaur suuteline D-jooni nii neelama kui ka kiirgama; ettevaatuse mõttes tuleb öelda, et naatriumiaurus on tohtu enamik aatomeid võimelised valgust neelama. Pärast D-joonte valguse kvantide neelamist aga muutuvad aatomid «ergutatuks» ega neela enam kiirgust, vaid vastupidi — annavad omandatud energia mõne aja pärast valgusena ära. Teiste sõnadega: hõõguvas keedusoola-aurus leidub nii normaalseid, neelavaid kui ka ergu-

tatud, juba neelanud ning seejärel helendavaid naatriumi-aatomeid.

Iga elemendi aurus saab ühel või teisel viisil ergutada üksikutest peenikestest spektrijoontest koosnevat helendust. Nende joonte arv võib olla väga suur. See viitab aatomi «ergutatud» olekute mitmekesisusele.

Osutus, et atomaarsed joonspektrid, nagu musta keha pidev spektergi, alluvad kvantseadustele. See tähendab eriti seda, et nendes tuleb esile sama kvantkonstant h . Teisest küljest väljendavad joonspektrid aatomite sise-



Joon. 20. Mitmesuguste keemiliste elementide aatomite keskmise suhtelise arvu võrdlus Päikese pinnal ja Maa kooses.

ehitust. Järelikult allub aatomite ehitus nagu valguski kvantseadustele. Kvantseadused ilmnevad ka molekulide spektrites ja ehituses. Väga hõrendatud gaasilises olekus kiirgavad molekulid «ribaspektreid». Spektraalseadmete abil saab ribasid lahutada suureks hulgaks väga peenikes-teks joonteks. Nende joonte paigutus vastab küllalt lihtsa-tele kvantseadustele. Me veendume veel kord, et valgusel ja ainel on ülitähtsaid ühiseid, sugulaslikke jooni.

Pöördume tagasi joonspektrite juurde. Igal elemendil on niisiis omad optilised tunnused — spektrijooned, millede paigutust saab täpselt mõõta ning mida on raske teistega segi ajada. Maal asudes saab spektrite kaudu uurida Päi-

kese ja teiste taevakehade keemiat. Päikese tuuma pidavat spektrit läbi lastes jätavad Päikese atmosfääris olevate elementide aurud sellele spektrile fraunhoferi joonte näol oma jäljed. Tabelis 1 on viimases veerus näidatud, missugustele elementidele need jooned vastavad.

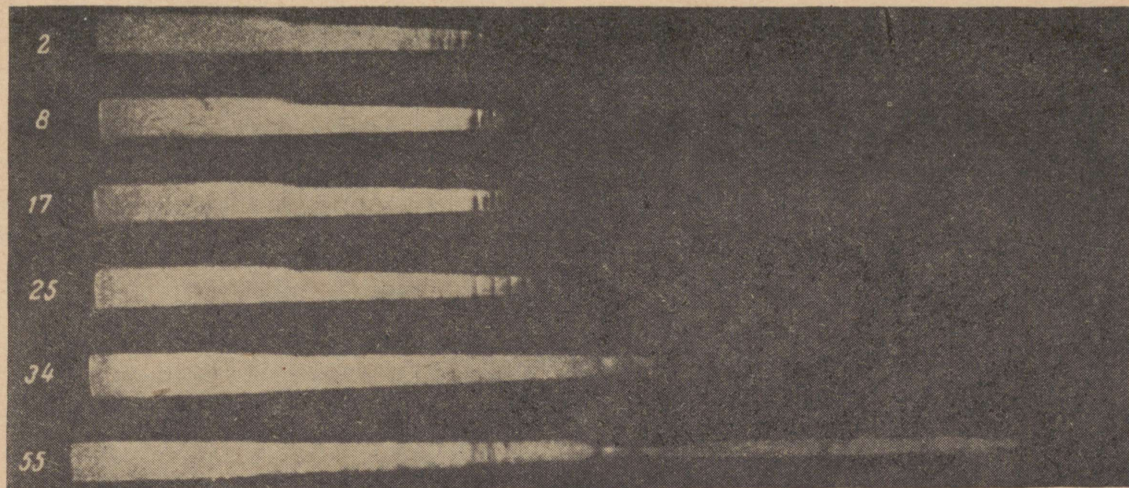
Osa jooni tekib päikesevalguse neeldumise tõttu Maa atmosfääris, mis on samuti tabelis märgitud. Suurem osa Maal leiduvatest keemilistest elementidest on avastatud ka Päikese atmosfääris. Ei ole leitud peamiselt selliseid raskeid elemente, nagu kuld, elavhõbe, tallium, vismut, raadium jm.

Joonisel 20 võrreldakse mitmesuguste keemiliste elementide aatomite hulki Maa kooses (ristikesed) ja Päikese pinnal (sõõrikesed). Vasakule on paigutatud elementide suhteliste hullkade logaritmid, mis tähendab, et näiteks arv 5 vastab 10^5 aatomile. Me näeme, et mõningate aatomite suhtelised hulgid Maa ja Päikese pinnal erinevad väga tugevasti. Vastupidi: peaaegu ühte langevad sellised elemendid, nagu naatrium, räni, kaltsium, strontsium. Spektrijoonte puudumine ei saa veel olla tõendiks elemendi puudumise kohta. Need jooned võivad asuda spektri ultravioletses piirkonnas, mis ei jõua Maani. Päikese ultravioletset spektrit varjab maapealse vaatlaja eest peamiselt osoon, mis paikneb Maa atmosfääris ja on koondunud eelkõige stratosfääri 20—30 kilomeetri kõrgusele.

Pärast Teist maailmasõda kasutati Ameerika Ühendriikides Saksamaalt trofeedena saadud rakette «V-2» Päikese spektri fotografeerimiseks sellistelt kõrgustelt, kus osoonikiht on juba seljataha jäänud. Joonisel 21 on esitatud Päikese spektri fotod, mis on raketilt automaatselt tehtud erinevatelt kõrgustelt. Kõrgused (kilomeetrites) on paigutatud vasakule. Me näeme, et alates kõrgusest 25 kilomeetrit hakkab spekter ultravioletses suunas pikinema. 34 kilomeetri kõrguselt pildistatud spekter ulatub ligikaudu 280 millimikronini, kus ta siiski küllalt järsult katkeb. Edasisel tõusmisel kuni 55 kilomeetrini kerkib esile uus laialdane spektripiirkond, mis künib umbes 240 millimikronini. Tume riba 280 $m\mu$ juures jääb siiski püsima. See riba vastab magneesiumiauru neeldumisele.

Päikesel on leitud mitte ainult aatomeid, vaid ka lihtsaimaid molekule, nagu näiteks OH, CN, CaH, H₂ jne.

Päikese mõõtmed on tohutud: tema läbimõõt on umbes 1 400 000 kilomeetrit, s. o. 110 korda suurem Maa läbi-



Joon. 21. Raketilt erinevatel kõrgustel fotografeeritud päikesespekter.

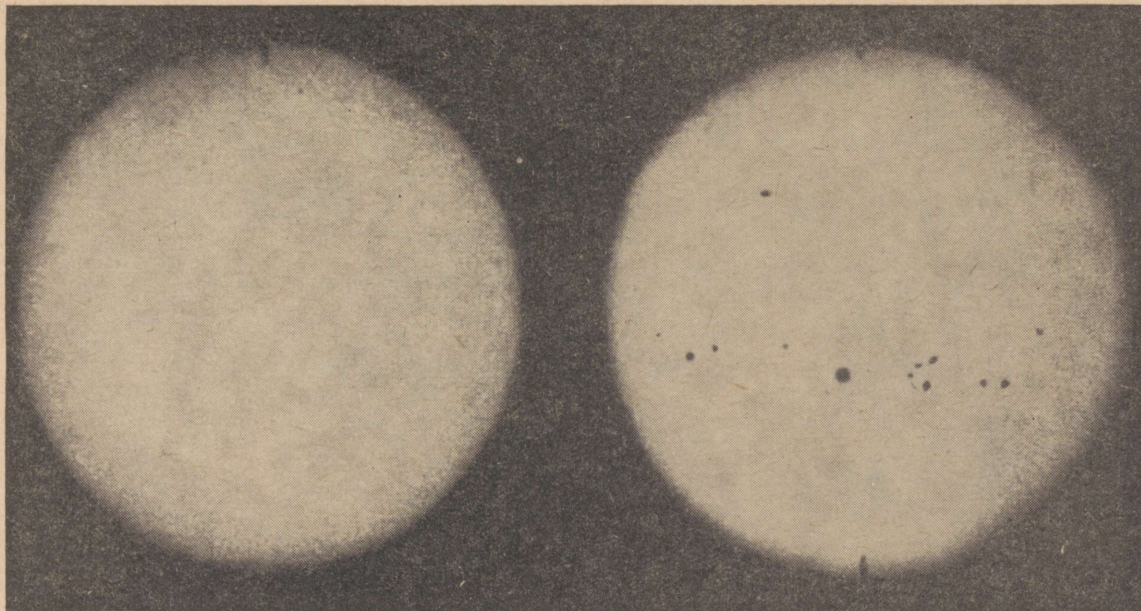
mõõdust ja ruumala 1 305 000 korda suurem Maa ruumalast. Maa on aga tunduvalt tihedam: Päikese keskmine tihe-
dus vee suhtes on 1,406, Maa oma seevastu 5,6. Aine
üldhulk on Päikesel 330 420 korda suurem kui Maal. Kui
väljendada Päikese ainehulka tonnides, siis saadakse
vähemõistetav arv $2 \cdot 10^{27}$ (s. o. kahele tuleb lisada
27 nulli); kui Päike kaotaks igas sekundis miljard tonni
ainet, siis vajaks ta 30 miljardit aastat, et poole võrra
«kõhneneda»!

Seda hiiglaslikku ainekuhjumit tunneme ainult pinnalt.
Päikese siseelu on meile tundmatu ning selle kohta saab
ainult oletusi teha. Päikese pind ei ole kaugeltki ühtlane:
kui me räägime päikesevalguse energia jaotusest, selle
temperatuurist, siis mõtleme alati ligikaudset keskmist
suurust. Ka Päikese nähtava teekonnaga mööda taevast
kaasneb energia jaotuse näilik muutumine tema spektris.
Tõusul ja loojangul näib Päike punasena, sest tema kiired
peavad siis läbima paksema atmosfäärikihi kui seniidis
olles.

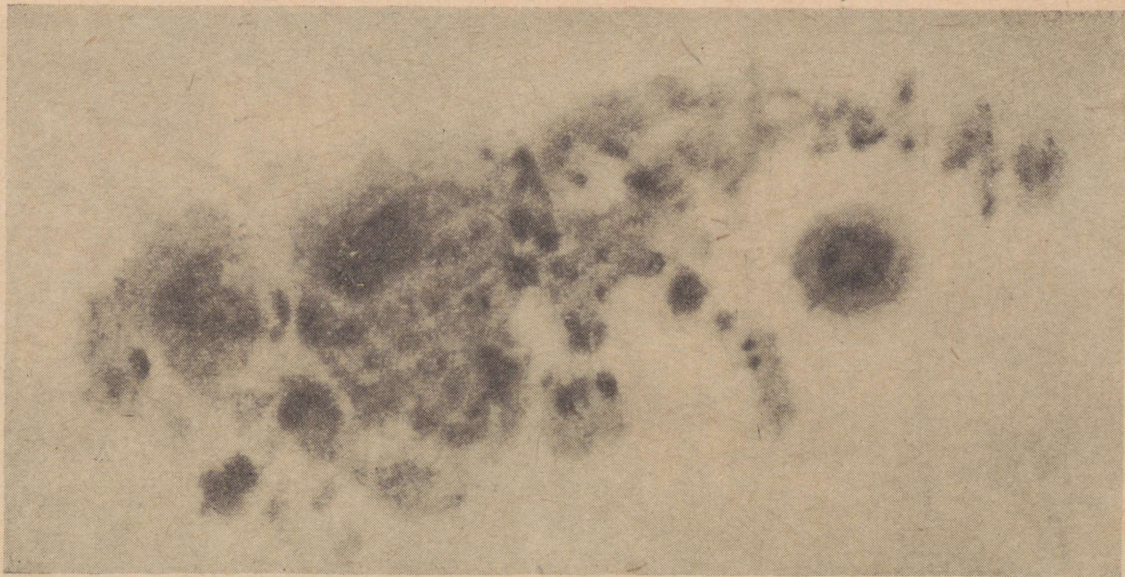
Päikese pinnal, eriti tema ekvaatori piirkonnas, leidub
alati laike (joon. 22). Laigud on mõnikord nii suured, et
neid on läbi tahmase klaasi kerge näha palja silmaga.
Hiina kroonikates on säilinud ülestähendus Päikese laikude
vaatlemise kohta palja silmaga juba 28. aastal e. m. a.
1858. aastal nähti päikesekestal laiku, mille pikkus oli
230 000 kilomeetrit, s. o. 18 korda suurem Maa diameet-
rist. Laik haaras 1/36 Päikese üldisest nähtavast pinnast.
Laikude kuju on mitmesugune; laigu keskel asub tume
tuum, mida ümbritseb heledam ääris (joon. 23).

Spektroskoopiline uurimine näitab, et laikude piirkonnas
leidub peamiselt vesinikku ja kaltsiumiauru. Laikude
ümber pöörlevad hiiglaslikud keerised, tsüklonid, mille
tekitajateks on mõnikord elektriliselt laetud osakeste voo-
lud. Tekkivate elektrivooludega kaasnevad tohutud magnet-
väljad, mis põhjustavad spektrijoonte muutumist (lõhes-
tumist). Need spektraalsed muutused võimaldavadki avas-
tada keeriseid Päikesel.

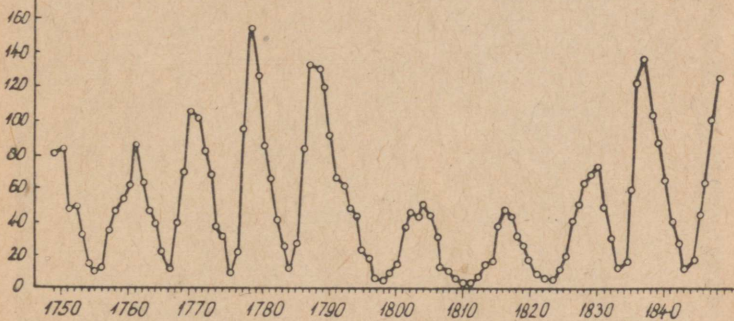
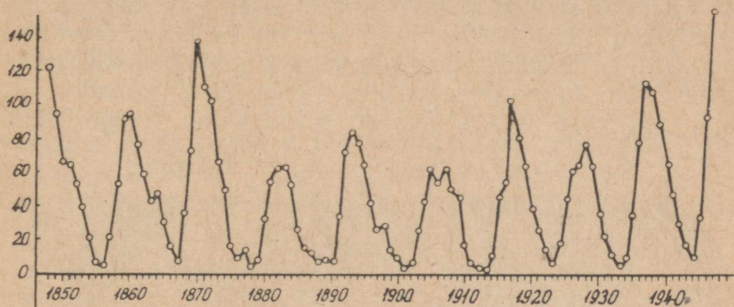
Päikese laikude arv muutub perioodiliselt: perioodi pik-
kus on umbes 11 aastat. Joonisel 24 on toodud kõver, mis
tõestab seda perioodilisust. Horisontaalteljele on kantud
aastad, vertikaalteljele laikude suhtelised arvud. Kõver
haarab väga suurt, peaaegu kahe sajandi pikkust perioodi,
ajavahemikku 1749—1947. Perioodilisus väljendub täieliku



Joon. 22. Päikeseketas laikude miinimumiga (vasakul) ja maksimumiga.



Joon. 23. Rühm Päikese laike.



Joon. 24. Päikese laikude üheteistkümneaastane periood.



Joon. 25. Päikese laikude perioodilisus ning laikude ja Maa magnetiliste tormide arvu (ülemine kõver) paralleelsus.

silmanähtavusega. Meie ees on kaheldamatu, Maa elu suhtes väga tähtis Päikese tegevuse seadus. Joonisel 25 on korratud sellest samast kõverast osa, mis haarab ajavahemikku 1836—1926, kuid siin on ta kõrvutatud Maa magnetiliste tormide kõveraga samast ajavahemikust. Ülemine kõver kujutab magnetilisi torme Maal samadel aastatel. Kõverate paralleelsus on silmanähtav. Seega leidub

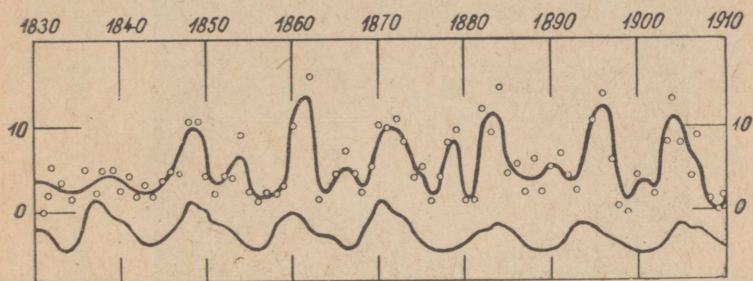


Joon. 26. Männitüve läbilõige, mis näitab, et aastaringide laius muutub üheteistkümneaastase perioodiga.

Päikesel ja Maal peale gravitatsiooni ja valguse veel teisi vahendajaid. Nüüd on teada, et Päikeselt suunduvad vahetpidamata Maale negatiivselt laetud osakeste — elektronide — voolud. Maa magnetpoolused kallutavad neid elektrilisi voole polaarpiirkondades kõrvale ja nad tekitavad Maa magnetismis muutusi, mida näitab joonis 25. Teisest küljest — Maa atmosfääri ülemistesse hõrendatud kihtidesse tungides panevad kiiresti lendavad elektronid seal olevad gaasid helendama. Sellega seletatakse virmalisi. Virmaliste esinemises polaarpiirkondades ilmneb samasu-

gune perioodilisus nagu Päikese laikudes ja Maa magnetilistes tormides.

Muutused Päikese laikude arvus mõjutavad oluliselt ilmastiku vaheldumist ning järelkult ka taimestikku ja kõike elavat maakeral. Joonisel 26 esitatud fotolt, mis kujutab männitüve läbilõiget, on näha, et aastaringide laius muutub ilmse üheteistkümneaastase perioodiga, mis vastab Päikese laikude perioodilisusele. Joonisel 27 võrreldakse Päikese laikude kõverat aastatest 1830—1910 puude kasvu keskmise kõveraga mõningates Euroopa maa-

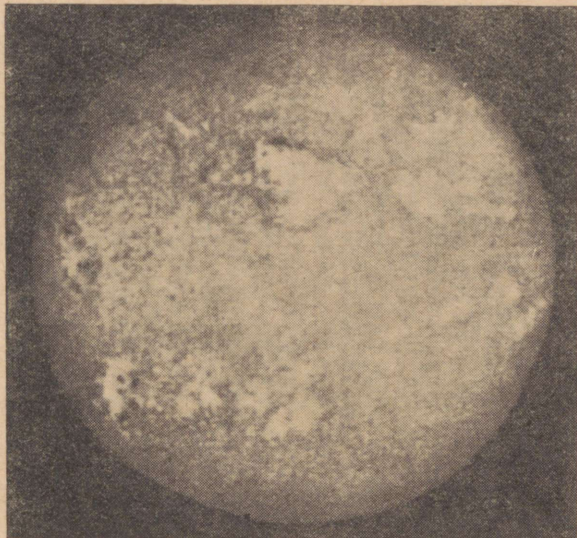


Joon. 27. Päikese laikude kõvera võrdlus puude kasvu keskmise kõveraga mõningates Euroopa maades.

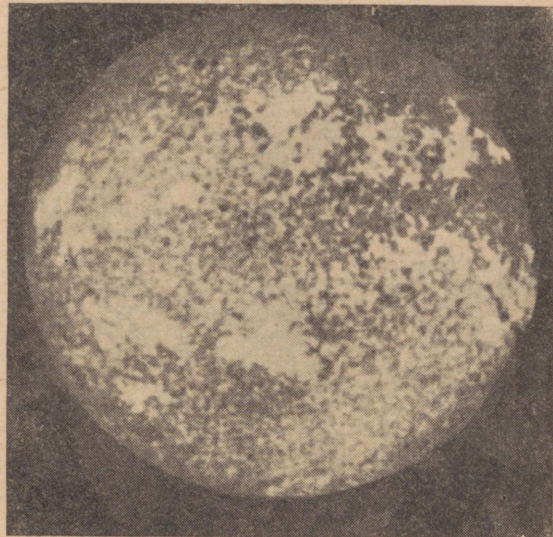
des. Ka siin on paralleelsus täiesti ilmne, kuigi pildi muudab keerukamaks teiste, Päikese laikudest mitte sõltuvate tegurite toime. Seega pole kahtlust, et Päikese laikud on tähtsaks maakera pinna elu mõjutavaks teguriks.

Tavalistes tingimustes näeme ainult Päikese väliskihti, mida nimetatakse fotosfääriks. Sel kihil on teraline, granulaarne ehitus, mis ilmneb eriti selgesti siis, kui päikesekestast fotografeerida mingi üksiku spektrijoone, näiteks vesiniku või kaltsiumi joone monokromaatilises valguses (joon. 28). Need mitmesuguse kujuga ning mitmesuguste mõõtmetega graanulid vastavad ilmselt fotosfääris hõljuvatele auru- ja gaasipilvedele. Kui mäetipult vaadata alla pilvedele (joon. 29), siis võib näha samasugust teralisust. Fotosfääri üksikud kohad helendavad eriti tugevasti; need on nõndanimetatud fakilid, milles kõige tugevamad on kaltsiumi jooned.

Täielike päikesevarjutuste ajal on Päikese väliskihti võimalik vaadelda üksikasjaliselt — me näeme teda nagu



A



B

Joon. 28. Päikese spektrogramm, mis on valmistatud kaltsiumi (*A*) ja vesiniku (*B*) joonte valguses.

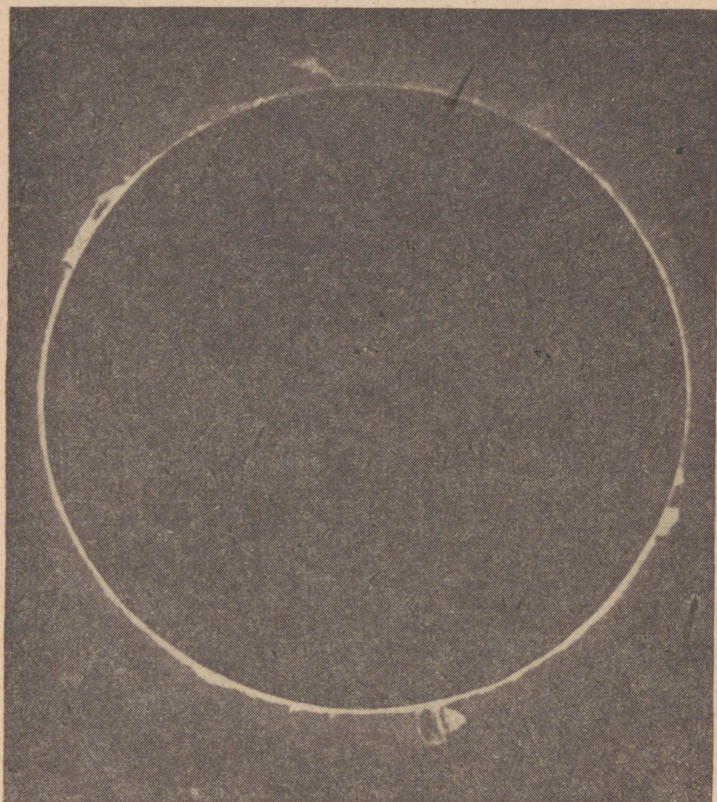
ristlõikes (joon. 30). Fotosfääri ümbritseb õhuke punase värvusega kiht, nõndanimetatud kromosfäär, millesse fotosfäärist tungivad fakiid. Kromosfääri paksus on umbes 10 000 kilomeetrit. Temast purskavad välja tohutud helendava gaasi fontäänid, nõndanimetatud protuberantsid, millede kõrgus küünib mõnikord sadade tuhandete kilomeetriteni. Esineb peamiselt kaht tüüpi protuberantse — pilve-



Joon. 29. Vaade pilvedele kõrge mäe tipust.

taolisi ja plahvatuslikke. Esimestes nagu kromosfääris endaski helendab esmajoones vesinik, kuna teistes avalduvad vesiniku joonte kõrval tugevasti ka metalliaurude jooned. Viimasel ajal on astronoomid enda käsutusse saanud uusi mugavaid meetodeid protuberantside vaatlemiseks mitte ainult varjutuste puhul, vaid ükskõik millal. Päikeseketast teleskoobis hoolikalt üleni tumeda kettaga varjates, laitmatuid läätsi (hajutavate mullide ja rikete puudumise mõttes) tarvitades ning peale selle häid, ainult kitsast spektriosa läbi laskvaid valgusefiltreid kasutades saab

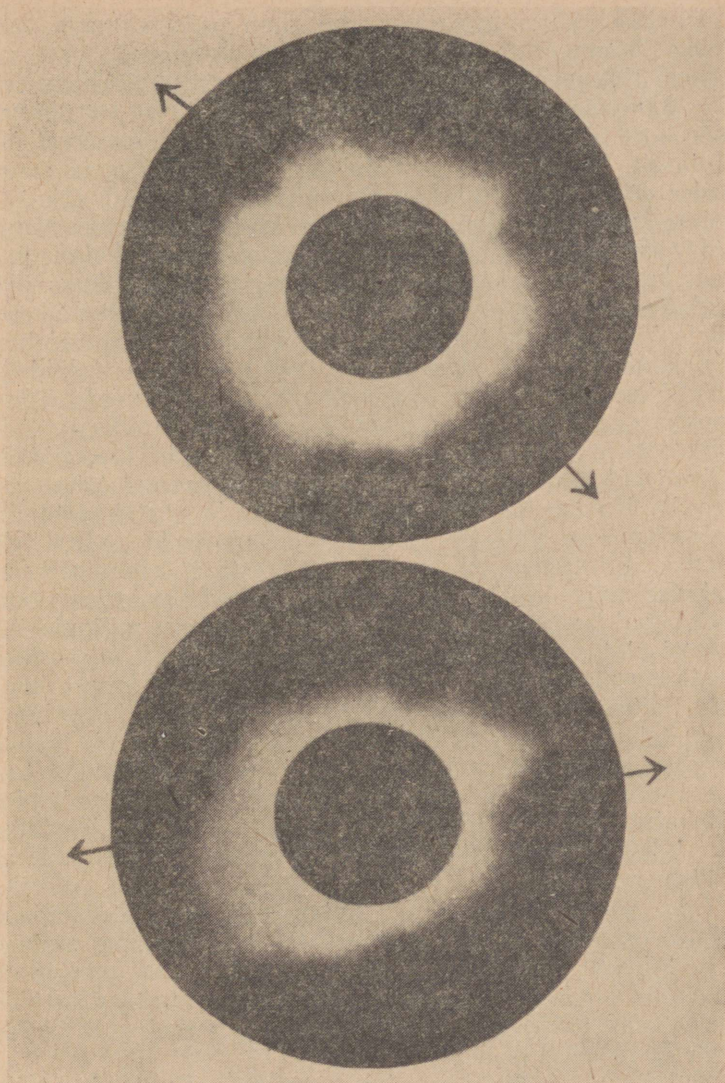
Päikese protuberantse vaadelda sõltumatult varjutusest. Viimase aastakümne jooksul on Nõukogude Liidus ja välismaal peale selle välja töötatud väga täiuslikke valgusefiltreid, mis eraldavad praktiliselt ainult ühe kitsa spektri-



Joon. 30. Päikese kromosfäär ja protuberantsid.

joone. Kõige selle tulemusena on täiesti võimalikuks saanud protuberantside kinematograafiline pildistamine, mis toob esile Päikesel toimuvate plahvatuste selliseid iseärasusi, mis varem jäid täiesti varjatuks.

Fotosfääri ja kromosfääri vahel asub väga õhuke nn. ümberpöörav kiht, milles nähtavasti tekivadki peamised fraunhoferi jooned.



Joon. 31. Täieliku päikesevarjutuse ajal 1937. aasta septembris tehtud fotod Päikese kroonist. Fotografeerimine toimus läbi polaroidi selle kahes vastastikku risti olevas asendis, mis on fotodel märgitud. Fotode erinevusest järeldub, et krooni valgus on polariseeritud.

Täielike päikesevarjutuste ajal saab palja silmaga vaa-
delda hämmastavat nähtust, nõndanimetatud krooni
(joon. 31), mis ulatub Päikese servast miljonite kilomeet-
rite kaugusele. Kroonil on tegelikult kiirjas struktuur.
Mõnikord ümbritsevad kiired päikesekestast enam-vähem
ühtlaselt, kuna teistel juhtudel on kroon teatavates suun-
dades eriti välja venitatud. Krooni läbilõikes saab eristada
kolme spektrit. Kõige selgem on krooni sisemise rõnga
pidev spekter. Selles spektris puuduvad fraunhoferi joo-
ned; krooni selle osa loomus on seni mõistatuslikuks jää-
nud. Tema tekkimise põhjuseks peetakse tavaliselt päikese-
kiirte hajumist elektronide atmosfääris. Niisuguse seletuse
järjekindel lõpuni arendamine ning kõikide faktidega
kooskõlastamine ei ole aga seni siiski õnnestunud. Teine
spekter on samuti pidev, kuid fraunhoferi joontega; teda
omistatakse fotosfääri peegeldunud valgusele (peegeldada
võivad külmemad ja Päikesest kaugemal olevad tolmuosa-
kesed). Kolmas spekter on joonspekter ja vastab aatomite
helendamisele. Võib arvata, et selle kolmanda spektri tek-
kimise põhjuseks on aurude fluorestseerimine päikese-
valguse mõjul, millele viitavad selle spektri polarisatsiooni
mõningad iseärasused. Seega on Päike mitme miljoni kilo-
meetri ulatuses ümbritsetud hõrendatud ainega, mis esineb
osalt aurudena, osalt tolmana. Need aurud ja tolm võivad
olla Päikesest eemaldunud elektriliste jõudude ja valguse
rõhu toimel. Paljus on Päikese kroon muide veel jäänud
arusaamatuks nähtuseks. Ei ole näiteks võimatu, et tea-
tavat osa krooni helendusest põhjustab kiirte omalaadne
«isehajumine» intensiivsete valgusvoogude lõikumise taga-
järjel Päikese lähedal. Kaasaegne valguseteooria arvestab
sellise protsessi võimalikkust.

Oma põgusa ja äärmiselt lihtsustatud ülevaate Päikese
pinnal esinevatest optilistest nähtustest lõpetame andme-
tega Päikese poolt kiiratava energia kohta. See energia on
jaotunud üle kogu spektri nii selle nähtamatus kui ka näh-
tavas osas. Nähtavale piirkonnale langeb seejuures umbes
40% kogu energiast.

Kujutleme, et Maal puudub atmosfäär. Tuginedes tege-
likult maakera pinnale langevate päikesekiirte energia
otsestele mõõtmistele ja arvesse võttes atmosfääri mõju,
võib arvestada, et päikesekiirte püstloodsel langemisel
saaks atmosfäärita maakera pind energiat minutis kesk-
miselt 2 ehk sekundis 0,033 kalorit ruutsentimeetri kohta.

Teades seda arvu, nõndanimetatud solaarkonstanti, on kerge arvutada Päikese poolt sekundis kiiratava energia üldhulka. Selleks piisab loomuliku oletuse tegemisest, et Päike kiirgab igas suunas ühtlaselt, 150 miljoni kilomeetrise (Päikese ja Maa vaheline kaugus) raadiusega kera pindala arvutamisest ja saadud, ruutsentimeetrites väljendatud pindala korrutamisest solaarkonstandiga, s. o. 0,033 kaloriga. Sellise arvutuse teostamisel saadakse tulemuseks ligikaudu 10^{26} kalorit sekundis (s. o. arv, milles ühele järgneb 26 nulli). See arv kui niisugune on vähe näitlik ja ka kalori mõiste ise on küllalt abstraktne. Seetõttu on kasulik läbi viia järgmine ümberarvutus.

Tänapäeva füüsika on kindlaks teinud, et energia on alati ekvivalentne massiga. Esimeseks ja tähtsaimaks viiteks sellele seosele oli fakt, et valgus avaldab kehadele rõhku, mille avastas ja mida esimesena mõõtis P. N. Lebedev. Täpsete ja erakordselt raskete katsetega tõestas Lebedev, et langedes mustaks värvitud plaadile, mis teda täielikult neelab, rõhub valgus seda plaati tungiga E/c . E on siin ühes sekundis neelatava valguse energia, c — valguse kiirus. Kui plaat ei ole must, vaid vastupidi — peeglitauoline, valgust täielikult peegeldav, siis on rõhk temale kaks korda suurem. Oma paljusid aastaid kestnud katsetega näitas Lebedev veel, et valgus avaldab rõhku mitte ainult tahketele kehadele, vaid ka gaasidele. See asjaolu omandas kaasaegse valgusnähtuste-teooria jaoks esmajärgulise tähtsuse.

Mehaanika seadustest järeldub, et igasuguse rõhku avaldava voolu (veevoolu, valgusvoo) peatamiseks tuleb teda «tasakaalustada» tungiga, mis võrdub massi m ja kiiren-duse $\Delta v/\Delta t$ korrutisega (Δv — kiiruse muutus, Δt — aeg, mille kestel see muutus toimub). Teisiti väljendades:

$$\frac{E}{c} = m \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Meie juhul võrdub kiiruse muutus Δv valguse kiirusest c 0-ni c -ga ja see muutus toimub ühe sekundi vältel, s. o. $\Delta t = 1$. Seetõttu

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Saadud valem määrab valguse massi m , mis on ekvivalentne tema energiaga E . See äärmiselt tähtis võrrand on

siin esitatud kujul saadud mehaanika seaduste rakendamise tulemusena Lebedevi optilistele mõõtmistele ning näib esimesel pilgul olevat rakendatav ainult piiratud alal — valguse puhul. Seda, et võrrand

$$mc^2 = E$$

on universaalne ja peab olema õige mistahes energia-liikide jaoks, näitas esimesena Einstein. Uue füüsika, eriti aatomifüüsika ja tuumafüüsika arenemisega leiab Einsteini järeldus üha suuremat ja laialdasemat katselist kinnitust ning käesoleval ajal tuleb teda vaadelda kui üht tähtsaimat teaduslikku teesi.

Saadud valemit kasutades arvutame Päikese poolt sekundis kiiratava energia ümber massile. Eespool leitud arv 10^{26} kalorit osutub ekvivalentseks umbes 5 miljoni tonniga sekundis. See iseendast tohutu mass on Päikese jaoks tühine. Varem (lk. 60) nägime, et sekundis miljard tonni ainet ära andes väheneks Päike massilt kahekordselt alles 30 miljardi aasta kestel; järelikult võib ta sekundis 5 miljonit tonni ainet ära andes poole võrra «kõhneneda» alles 6000 miljardi aasta jooksul.

Täpselt samuti saab massile ümber arvutada kogu Maa poolt sekundis saadava energia. Selleks tuleb mees pidada, et samaaegselt on valgustatud ainult pool maakera, ja peale selle seda, et solaarkonstant vastab perpendikulaarsetele kiirtele. Ümberarvutuse tulemusena saadakse hoopis tagasihoidlik ja kergesti meelde jääv arv — umbes 2 kilogrammi sekundis.

Nendel ümberarvutustel, mis muudavad mõnevõrra tajutavaks Päikese poolt kiiratava energia, on ühtlasi sügav printsiipiaalne tähendus. Meid hämmastab Päikese mass ja tema praktiliselt ammendamatu energia. Kuidas kogunevad Päikese massiga sarnanevad massid ja kus peitub nende poolt vahetpidamata kiiratava energia allikas? Masse sunnib päikesetsentrite ümber kogunema tõenäoliselt gravitatsioonituge. Päikese mass on aga nähtavasti peaaegu piiriline — leidub ainekühjumeid, mis massilt ületavad Päikese korda kümme, kuid massi edasist suuremist astronoomid ei tunne. Kuidas seletada niisuguse piiri olemasolu?

Masside kogunemisel gravitatsioonituge mõjul tekivad taevakehade sisemuses hiiglaslikud rõhud ja tohutud, kümnete miljonite kraadideni küündivad temperatuurid.

Tähe sisemus, mis on kuumenenud mitte ainult valge hõõgumiseni, vaid röntgenikiirguseni (Plancki seaduse järgi, lk. 54), saadab välja äärmiselt suuri kiirgusenergia hulki. See sisemine valgus rõhub tähtede masse seestpoolt välja-poolle. Gravitatsioonitungile avaldab seega vastumõju valguse rõhk. See vastumõju ei saa muidugi ületada teda esile kutsuvat gravitatsioonitungi. Valguse rõhule lisandub aga tähe pöörlemisega kaasnev tsentrifugaaltung. Kui valguse rõhu ja tsentrifugaaltungi summa saab võrdseks gravitatsioonitungiga, siis peab taevakeha massi edasine kasvamine lakkama. Teoreetiline arvutus on näidanud, et Päikese massi suurusjärku omavad massid peavad maailmaruumis tõepoolest olema piirilisteks. Niisugune on astrofüüsika osaline vastus küsimusele Päikese massi päritolust.

Kuid millega asendub Päikese poolt kiirguse näol kaotatav energia? Omal ajal oletati, et vajalikku kompensatsiooni on suuteline andma Päikesele langevate meteoroidide vool, mis aastas massilt vastab umbes ühele sajandikule maakerast. Osutati isegi sellele, et Päikese läbimõõdu kahanemist 75 meetri võrra aastas peab saatma sellise soojushulga tekkimine, mis on täiesti võrdväärne kiirguse kaudu äraantava energiaga. Sel viisil saaks seletada Päikese eksisteerimist tema tänapäevasel kujul äärmisel juhul 100 miljoni aasta kestel. See ajavahemik on aga tühine: geoloogia ja astrofüüsika nõuavad Päikeselt vähemalt kümneid miljardeid aastaid kestnud olemasolu, mida mainitud oletused ei suuda seletada.

Päikese ja tähtede kiirguse allikaid tuleb otsida hoopis mujalt — uue füüsika poolt avastatud energiavarudest. Energia ja massi vaheline seos, millest me äsja rääkisime, viitab kõige üldisemal kujul sellele, et igasugust massikogumit võib vaadelda kui energia ekvivalenti. Iga gramm massi kujutab endast tohutut energiahulka, mille suurust saab arvutada, korrutades massi valguse kiiruse ruuduga. Üks gramm massi osutub võrdseks 20 000 miljardi kaloriga. Sellise energiahulga saamiseks tuleks ära põletada 20 000 tonni sütt.

Me alustasime juttu söest kui lihtsast näitest soojusenergia allikate kohta. Kasulik on selle näite üle veidi sügavamalt järele mõelda. Söetükk kujutab endast inertset massi, mis mehaanika vaatekohast lähtudes vähe erineb kivist. Söetükk lebas sadu tuhandeid aastaid inertsena,

kuni ta lõpuks sattus inimese kätte, kes oskas temas peituvat varjatud energia hapnikus põletamise teel muuta kättesaadavaks energiavormiks — soojusenergiaks. See avastus oli inimkonna ajaloos väga tähtsaks sündmuseks, tähendades, nagu me nüüd teame, söe varjatud keemilise energia vabastamist. Tänapäeva inimestel aga tuli olla tunnustajateks teisele äärmiselt tähtsale sündmusele — aatomienergia vallutamise algusele. Tõsi küll, praegu kasutavad kapitalistlikud riigid seda avastust imperialistliku ähvardusena rahule, kuid uue ühiskonna, eesrindliku inimkonna kättes saab aatomienergia vallutamine omal ajal kahtlemata uue tehnika tähtsaimaks etapiks, mis võimaldab lahendada seni lahendamatu majanduslikke ülesandeid. Vastavates protsessides vabanev aatomituumade energia on määratult suurem söe põlemise energiast, kuid mõlemal juhul on põhiliselt tegemist ühe ja samaga — aines varjatult esineva energia kasutamisega tema kättesaadavas vormis.

Missugusel teel siis saab massiga ekvivalentne varjatud energia muunduda kättesaadavateks energiavormideks — valgus- või soojusenergiaks? Tänapäeva füüsika kujutluste vaatekohalt võib osutada kolmele sellisele teele. Esimeseks teeks on aineosakeste, näiteks prootonite täielik valguseks muutumine. Eelmises peatükis (lk. 45) rääkisime valguse aineks muutumise protsessist, valguskvandi üleminekust elektroniks ja positroniks. Võimalik on aga ka vastassuunaline protsess. Selle protsessi tõenäosus on tavalistes tingimustes erakordselt väike, kuid Päikese sisemuses, kus aine tihedus on kolossaalne, rõhk tohutu suur ja temperatuur mõõdetav miljonite kraadidega, võivad taolised protsessid toimuda palju sagedamini. Nende protsesside tulemusena avaldub kaduvate osakeste kogu mass valgusenergiana. Küllalt sageli esinevate eksituste vältimiseks on siin oluline märkida, et mass ei kao, ei muutu energiaks, nagu mõnikord räägitakse, vaid jääb püsima tekkivate footonite massina; tegemist on ainult energia ekvivalentse muundumisega kättesaamatust vormist täiesti kättesaadavaks — valgusenergiaks.

Massiga ekvivalentse varjatud energia kättesaadavaks energiaks ülemineku teine tee seisab aatomituumade lagunemises. Ammu tuntud näiteks selle kohta on raadiumi-aatomi tuuma lagunemine. See looduslik protsess toimub aga erakordselt harva ega saa olla tunduvate energia-

hulkade allikaks. Ülitähtsaks sammuks edasi aatomituuma lagunemise energiaallikana kasutamise küsimuses oli fakti avastamine, et uraaniaatomi isotoop, mille aatomkaal on 235 ja mida tavalises uraanis sisaldub 0,7 protsenti, laguneb aeglaste neutronite toimel. Antud protsessi peamine eelis seisab selles, et tal on ahelprotsessi iseloom. Tuuma lagunemisel tekivad uuesti neutronid, mis omakorda kutsuvad esile tuumade lagunemist jne. Tekib lagunevate tuumade ahel, kusjuures selle ahela iga lüluga kaasneb tunduva energiakoguse eraldumine. Sellel nähtusel põhineb kogu tänapäevane aatomienergia vabastamise tehnika. Päikese jaoks ei oma see protsess nähtavasti tähtsust, sest vastavalt väga usutavatele teoreetilistele kujutlustele ei leidu Päikese sisemuses uraani ega teiste raskete aatomite tuumi.

On aga veel olemas massiga lahutamatu seotud varjatud energia kättesaadavaks energiaks muundumise kolmas tee, mis on vastupidine teisele teele ja seisneb mitte aatomituumade lagunemises, vaid nende keerukamaks muutumises, sünteesis. See on jammu teada aatomkaalude võrdlemisest. Vesiniku aatomkaal näiteks on 1,0080, heeliumi aatomkaal 4,003. Heeliumiaatom peab aga olema ehitatud neljast vesinikuaatomist: $4 \times 1,0080 = 4,032$. Võrreldes seda suurust heeliumi aatomkaaluga, saame tunduva erinevuse: $4,032 - 4,003 = 0,029$. Selle erinevuse olemasolu ainsaks seletuseks on, et heeliumi tuuma moodustumisel vesiniku tuumadest (prootonitest) läheb kaduma tunduv mass, mis muutub kiirgusenergiaks või mõneks teiseks energiavormiks. See energia on tohutu: ühe grammi vesiniku heeliumiks muundumisel peab eralduma 5 miljonit korda rohkem energiat kui ühe grammi vesiniku veeks põlemisel kaheksas grammis hapnikus.

On küllalt kaalukaid põhjendeid oletamiseks, et just see protsess, mille tulemusena vesiniku tuumadest (prootonitest) moodustuvad heeliumi tuumad, ongi Päikese energetika aluseks. Kiirendaja, «katalüsaatori» osa etendab seejuures tõenäoliselt süsiniku tuum. Milline on tegelikult protsess, mis viib aatomituumade seotud energia kiirgusenergiaks muundumisele Päikese sisemuses, on küsimus, mida ei saa siiski veel pidada lõplikult lahendatuks; selge on ainult nii palju, et selleks on mitmeid võimalusi. Pole kahtlust, et meie poolt Maal saadav päikesevalgus on paljude miljardite aastate jooksul Päikese sisemuses aato-

mienergiat vabastanud ja vabastava tohutu «masina» töö tulemuseks.

Oma maapealsetes laboratooriumides ei suuda me saavutada neid tohutuid rõhke ja temperatuure, mis peavad valitsema Päikese sisemuses. Kindlalt võib väita üht: kiirgamisega peab kaasnema Päikese massi vähenemine. Päike nii-öelda põletab iseennast, kuid seda mitte tavalises keemilises mõttes, mille puhul põlemisproduktid jäävad kasutuks inertseks massiks; siin läheb mass maailmaruumi aktiivse energiavormina — valguskiirgusena. Nagu me nägime, võrdub kaks liitrit vett massilt valgusega, mida kogu Maa saab Päikeselt ühes sekundis, kuid me teame hästi, et kahest kilogrammist valgusest elab kogu Maa, kuna kaks liitrit vett on märgatamatuks «pisiasjaks».

Päikesekiired kannavad endaga Päikese massi. Valgus pole Päikese kehatu saadik, vaid Päike ise, osa temast, mis lendab meieni energieetilises mõttes täiuslikul, avatud kujul — valgusena.

SILM

Silm võlgneb oma olemasolu eest tänu valgusele. Loomade ükskõiksetest meeleeelunditest tekitab valgus endaga sarnaneva elundi; nii tekib silm valguse mõjul ja valguse jaoks, et sisemine valgus saaks kohutada välisega.

Goethe

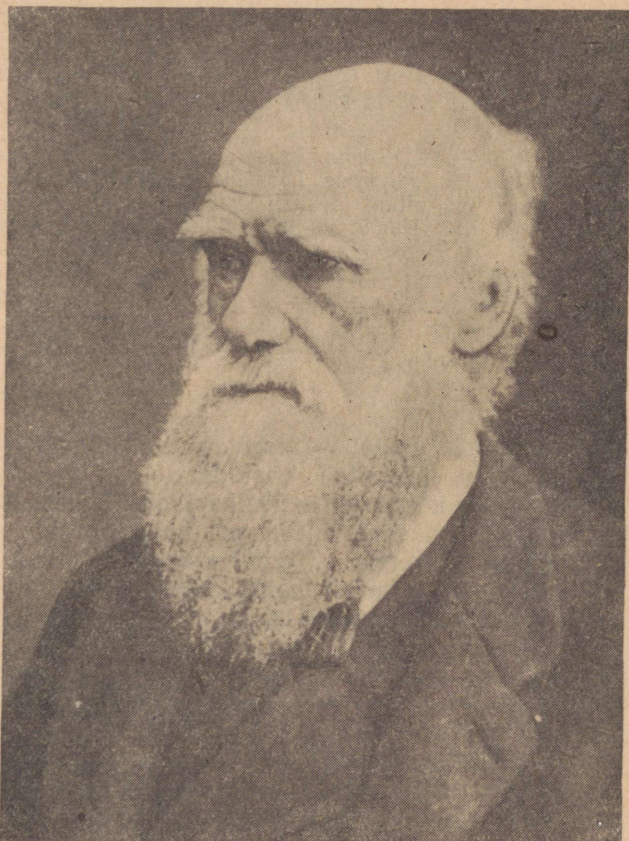
On sinu kiirtest ju igal olendil saanud silm.

Väike hümn Atonile

Elusolendil ei ole usaldusväärsemat ja kindlamat kaitsjat kui silm. Näha tähendab eristada sõpra ja vaenlast ning ümbruskonda kõigis tema üksikasjades. Teised meeleeelundid täidavad sedasama ülesannet, kuid võrreldamatult kohmakamalt ja nõrgemalt. Kompimismeel ja soojustaju annavad meile välismaailma kohta teateid ainult vahetul kokkupuutumisel, kuna kuulmismeel ja haistmismeel, mis toovad teateid kaugusest, ei anna küllaldast informatsiooni kauguse, suuna ja kuju kohta. Meie väljendused «silmnähtav» ja «elame — näeme» näitavad, et nähtavust loetakse samaväärseks usaldatavusega. Tänapäeva füüsik veenab teisi aatomite reaalsuses sellega, et lõpuks on õnnestunud näha üksikute aatomite teid, kuna aatomite eksisteerimise endiste vastaste alatiseks argumendiks oli asjaolu, et aatomeid ei olnud keegi näinud. Selles mõttes tuleb mõista Anaksagorase aforismi: «Nägemine on nähtamatuse nähtus» — nähtamatu maailm muutub nägemise kaudu reaalsuseks, nähtuseks.

Ideaalse silma kui füüsikaaparaadi ülesanded on selged. Ümbritsevatest esemetest lähtub valgus. Silmale antakse edasi kiirte suund, energia, spektraalne koostis ja polarisatsioon. Eseme iga punkt peab esile kutsuma oma eri aistingu. Nende aistingute kogum peab ajutsentris reprodutseerima ideaalsel juhul täpse sarnasuse kiirgava pin-

naga koos kõigi tema optiliste iseärasustega. Tähtis on ülekande ruumiline õigsus — aju peab saama õigeid andmeid kaju, mõõtmete ja kauguse kohta. Hiljem võib aju



Charles Darwin (1809—1882).

saadud andmeid vastavalt organismi vajadustele korri-geerida.

Nagu näeme, jõuab silm küllalt lähedale selle ülesande ideaalsele lahendusele.

Kuidas aga võis tekkida elav meeleeelund, mis ületab optilisi raskusi mõnikord suurema täiuslikkusega, kui seda

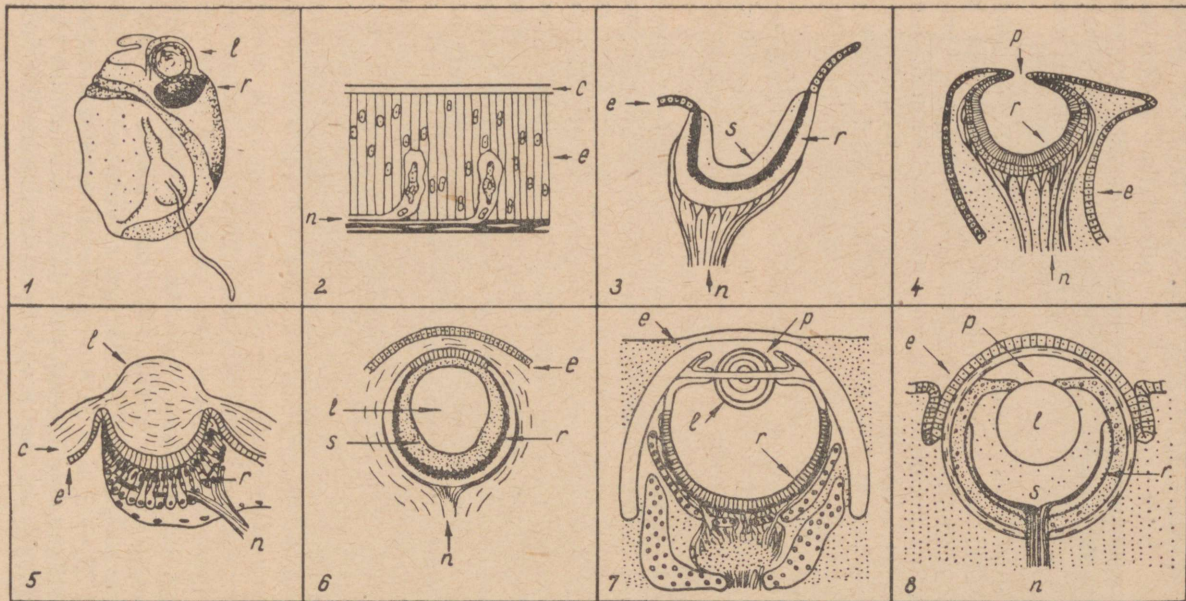
suudab tohutute füüsika-alaste teadmiste ja tehnikaga varustatud kaasaegne optika?

Sedaliiki küsimustele vastas bioloogia Darwini arene-
misteooriaga. Silm on äärmiselt pikaajalise loodusliku
valiku protsessi tulemuseks, nende organismis toimunud
muutuste tulemuseks, mille põhjustajateks on väliskesk-
kond ja olelusvõitlus, võitlus parima kohandatuse eest
välismaailmale.

Pärilikkuse võimas tegur kindlustab bioloogiliste oma-
duste säilimise, kui need vastavad välistingimustele ja
suurendavad organismi vastupidavust olelusvõitluses. Umb-
ritseva maailma mitmekesised mõjutused tekitavad üksiku-
tes indiviidides erinevusi, mis mõnel juhul loovad neile
eeliseid ülejäänud indiviidide suhtes. Nii toimub «loodus-
lik valik», nii jääb ellu ainult välismaailmale kõige koha-
nenum, kõige tugevam indiviid.

Elusmaailma lõpmatus mitmekesisuses, mis meie ees
avaneb, leiame optilise ülesande kõikvõimalikke lahendusi;
ükski neist pole täiuslik, kuid igaühes on palju otstarbe-
kat ja inimese vaatekohast «teravmeelset».

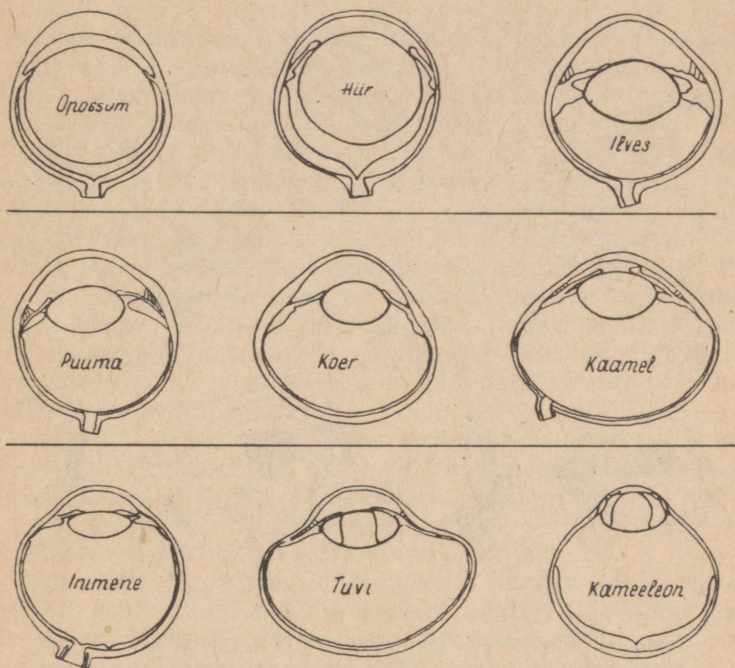
Joonisel 32 on kõrvutatud mõningaid näiteid erinevate
viiside kohta, kuidas on lahendatud silma kui välismaailma
visuaalse tajumise «aparaadi» probleem. Joonisel 32, 1 on
toodud näide ainurakse organismi «silma» kohta. Valgus-
tundliku aine ees rasub kerakujuline lääts *l*. Kujutiste teki-
tamise aparaadist ei saa siin muidugi veel rääkida. Lääts
ja valgustundliku kihi tühised mõõtmed tingivad antud
juhul teravate difraktsiooninähtuste esinemist ja kujutise
äärmist moonutatust. Joonisel 32, 2 on kujutatud vihma-
ussi nägemiselundid. Siin puudub silm — vihmaussil on
kogu keha pind valgustundlik ja närvikiududega ühenda-
tud nägemisrakud on tal ühtlaselt jaotunud üle terve keha;
kujutisest ei saa siin juttugi olla. Joonis 32, 3 on näide
optilise ülesande primitiivsest lahendusest, mille puhul val-
gust tajutakse nägemissüvendi abil, mis moodustab midagi
kõrva taolist; selline konstruktsioon võimaldab ligikaudselt
määrata valgust välja saatva keha suunda, kuid mitte roh-
kem. Joonisel 32, 4 näeme ülesande täiuslikumat lahend-
dust — limuse elusat *camera obscura*'t väikese avausega
p ja sisemise valgustundliku õõnega *r*. Viimased neli näi-
det joonisel 32 — 5, 6, 7 ja 8 — vastavad optilise ülesande
järjest täiuslikumatele lahendustele lääts kasutamise abil.
Algul, skorpionil, on see veel väga jämedatoimeline inst-



Joon. 32. Mitmesuguseid loomariigis esinevaid visuaalse tajumise vahendeid.

1 — ainurakne organism *Pouchetia cornuta*; 2 — vihmaussil on valgustundlikud rakud jaotunud üle terve keha; 3 — liudkodalise *Patella* süvendikujuline nägemiselund; 4 — limuse *camera obscura*'ga sarnanev silm; 5 — kontsentreeriva läätsuga silm skorpionil *Euscorpine*; 6 — ogakodalase *Murex* silm; 7 — peajalgse kalmaari *Loligo* kujutisi andev silm; 8 — selgroogse silm; c — kütikula; e — epiteel; l — lääts; n — närvikiud; p — silmaava; r — võrkkest; s — sisemine läbipaistev keskkond.

rument: läätse asendab kera, mis asub valgustundliku kihi *r* lähedal. See meenutab klaaskerasid, mida vanal ajal pärimuse järgi kasutati süüteklaasidena, või Leeuwenhoek'i meetilkadest «läätsedega» mikroskoopi. Joonisel 32 6, 7, 8 on meie ees järkjärguline üleminek inimese sil-

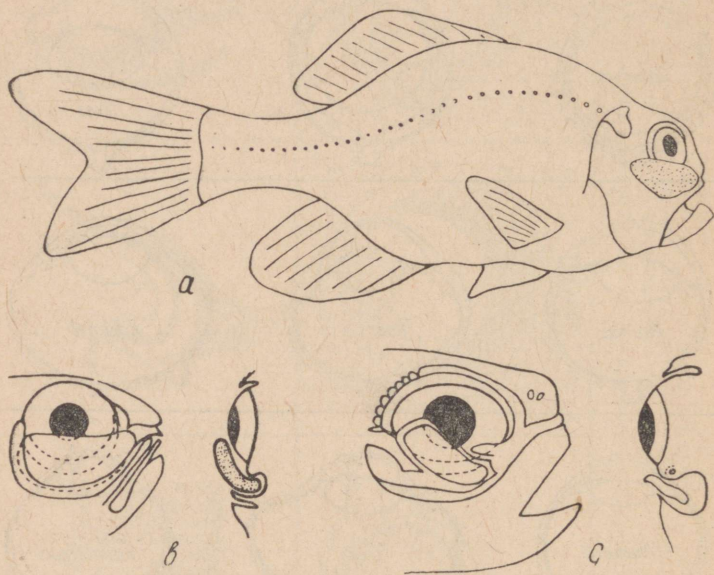


Joon. 33. Silma läbilõige mitmesugustel selgroogsetel.

maga sarnanevatele silmadele ogakodalastel, peajalgsetel ja selgroogsetel. Seejuures ei ole ülesanne erinevate selgroogsete puhul sugugi ühesuguselt lahendatud. Joonisel 33 on toodud näiteid mitmesuguste selgroogsete ööloomade (opossumi, hiire, ilvese) ja päevaloomade (puuma, koera, kaameli, inimese, tuvi, kameeleoni) silmade läbilõigetest. Seletusteta on näha, et ülesande optilises lahenduses esineb laialdasi variatsioone.

Elusorganismi keskkonnale kohanemise seisukohalt on väga huvitavad ja õpetlikud nende kalade silmade iseärasused, kes elavad suurtes sügavustes, kuhu peaaegu üldse

ei tungi päikesevalgust. Näib, et kalad peaksid siin olema lihtsalt silmadeta, sest vajadust silmade järele ei ole. Tegelikult see aga ei ole nii. Suuremal osal süvaveekaladest on silmad, kusjuures need on selgroogsetest suhteliselt kõige suuremad. Seejuures (või suurel määral seetõttu) on nende silmad nähtavasti loomariigis kõige tundlikumad.



Joon. 34. Silmadega seotud helendavate elunditega kalad.

a — *Photoblepharon palpebratus*; *b* — tema pea profiilis ja läbilõikes, mis näitavad valgust tekitavat elundit ja seda varjavat ekraani; *c* — *Anomalops katoptron* profiilis ja läbilõikes. Näha on helendav elund ja süvend, millesse see võib peituda.

Kuidas on see fakt kooskõlas valguse puudumisega meresügavuses? Vastus seisab eelkõige selles, et päikesevalguse nõrgad jäljed tungivad siiski ka tunduvatesse sügavustesse. Toidu hankimise, paljunemise ja olemusvõitluse suhtes aga on visuaalsel tajumisel nii suuri eeliseid, et silma valgustundlikkust tõsta on palju kasulikum kui minna «väikseima vastupanu teed» ja määrata silm väljasuremisele.

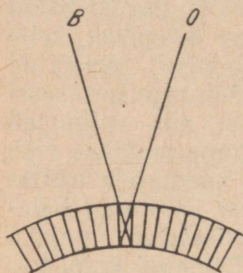
Silmade esinemine meresügavustes elavatel olenditel

seletub aga mitte ainult sinna tunginud valguse nõrkade jälgede olemasoluga. Süvamerekalad on ka ise suutelised valgust tekitama, oma ümbrust veidi valgustama ja teistele nägevatele olenditele nähtavaks saama. Neil on arenenud luminesseerivad elundid, mis asuvad silmade lähedal või teistel kehaosadel. Joonisel 34 on kujutatud kalad *Photoblepharon palpebratus* ja *Anomalops katoptron*, kelle silmade kõrval asub helendav kude (joonisel tähistatud punktiiriga). See kude helendab oksüdeerumisprotsessi arvel ja on kaladele väikeseks majakaks, mis valgustab neile teed ja teel olevaid esemeid. Niisugune majakas võib aga kalale ka ohtlikuks saada, tehes ta vaenlasele nähtavaks. Seepärast leidub kummalgi joonisel kujutatud kaladest laugudetaoline seadeldis luminesseeriva majaka varjamiseks, kui see osutub vajalikuks. Esimesel kalal toimub see erilise tumeda kilbikese väljanihutamise teel, kuna teisel võib helendav kude ise tõmbuda erilisse kaitsekambriisse (joon. 34, c). Süvaveekalade «luminescentslambid» ei ole sugugi haruldaseks nähtuseks. Suurtes sügavustes elavatest kaladest on selliste elunditega varustatud rohkem kui 90 protsenti.

Edaspidi tuleb meil rääkida esmajoones inimese silmast. See tuleneb käesoleva, silma ja Päikese vahelisele seosele pühendatud raamatu põhiteemast; pealegi on ainult inimese silma küllalt põhjalikult tundma õpitud, kuigi ka temas on palju tänapäevani ebaselgeks jäänud.

Alustame ruumilisest ülesandest. Kuidas tekib silmas geomeetiline sarnasus ja kuidas hinnatakse silma abil kaugusi? Valgus kannab endaga ainult üht ruumilisuse elementi — kiirte suunda, mida peavadki kasutama valgustundlikud elundid. Elavale rohelisele lehele on valgus mitte ainult teadete toojaks ümbritsevatest esemetest, vaid ka elu allikaks. Leht tõmbub Päikese poole ja päikesekiired suunavad teda. Lehed kasvavad Päikese suunas, asetudes puul nii, et nad ei varjaks üksteist päikese eest. Väga paljud taimed ja lilled pöörduvad koos Päikese ööpäevase liikumisega. Suurtele aladele külvatud päevalilled järgivad kõik nagu käskluse järgi Päikese asendit taevavõlvil. Selline püüd valguse poole, fototropism (mõnikord negatiivne) avaldub peale taimede ka paljudel bakteritel, infusooridel ja teistel ainuraksetel organismidel. Seda reageerimist valgusele, tema kiirte suunale ja energiale võib pidada nägemise primitiivseks vormiks.

Mõningatel putukatel esinevad järgmised seadeldised kiirte suuna hindamiseks ja nägemiskujude saamiseks (joon. 35). Närvilõpmetest moodustunud võrkkestal paiknevad kärjetaolise mosaiigina väikesed silindrid. Nende



Joon. 35. Mõningate putukate silmade skeem.

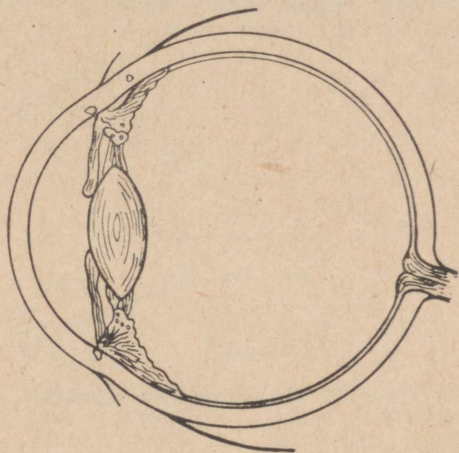
silindrite seinad on kaetud tumeda-värvilise ainega, mis neelab valgust samuti, nagu seda teeb pikksilma sisseinte must tuhm lakk. Sellise silindrikujulise kärjekannu põhja võivad sattuda ainult joontega B ja O piiratud kiired. Teise «kärjekannu» põhja satuvad kiired teisest piirkonnast. Selle tulemusena tekib võrkkestal esimest ligikaudne mosaiikne kujutis, mille põhjal putukas võib tundma õppida eseme kuju.

Nagu fotoaparaadi ajaloos toimus järkjärguline üleminek *camera obscura*'lt objektiivlätsega aparaadile, nii

viis ka bioloogiline evolutsioon torukestest koosnevalt mosaiigilt selgroogsete loomade lätsega varustatud nägemisaparaadile. Joonisel 36 on esitatud läbilõige inimese silmast. Silm on peaaegu kerakujuline, tema läbimõõt on vastsündinul umbes 16 mm, täiskasvanul 24 mm; hobusel on silmamuna läbimõõt 51 mm, rotil 6 mm. Väljast on silm kaetud paksu valge kestaga (kõvakesta e. valgekestaga); selle eesmine osa on läbipaistev ja kumer (sarvkest), olles umbes 1 mm paksune. Sarvkestale järgneb eesmine silmakamber, mida tagumisest silmakambrist eraldab silmaläätis. Vahetult silmaläätse ees asub vikerkest, milles on peaaegu ümmargune ava, mis määrab silma tungiva valgusvoo läbilõike. Eesmise silmakambri ja silmaläätse läbimõõt moodustab umbes 3,6 mm. Eesmine silmakamber on täidetud läbipaistva vedelikuga, tagumine läbipaistva klaasitaolise ainega; kummagi murdumisnäitaja on lähedane vee murdumisnäitajale (1,336). Valgekesta tagaosa on seestpoolt kaetud valgustundliku võrkkestaga (reetinaga), mida võib vaadelda kui nägemisnärvide laiaks kasvamise ja silma toitvate veresoonte hargnemise tulemust.

Läbipaistval silmaläätisel on kihiline struktuur. Lihaste ja vikerkesta mõjul võib silmaläätse kumerus muutuda; suurim murdumisnäitaja silmaläätse kihtides on 1,42. Silmas tekib kujutis võrkkestal samuti, nagu ta fotokaameras

tekib plaadil. Silmaläätse kumeruse muutmise võime (akommodatsioon) annab võimaluse silma «fokuseerimiseks», et võrkkestal tekiks selge kujutis. Lapseeas on eset võimalik selgesti näha alates eseme ja silma vahelisest kaugusest 7—10 cm. Täiskasvanud inimese normaalne silm hakkab selgesti nägema alles ligikaudu 14 cm kauguselt. Parima nägemise kauguseks, mille puhul silmalääts on kõige vähem pingutatud, on tavaliselt 25 cm. Vanaduses nõrgeneb akommodatsioonivõime tavaliselt väga suurel määral.



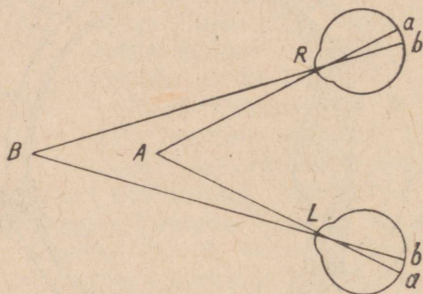
Joon. 36. Inimese silma läbilõige.

Silmadel esinevatest puudustest (liigsest väljavenitatusest telje suunas — lühinägevusest — ja, vastupidi, kokkusurutusest selles suunas — kaugnägevusest) on võimalik üle saada kunstlike klaasist kumer- või nõgusläätsede — prillide — kasutamise teel. Võrkkestal tekkiva kujutise õigsus on kaugel täiuslikkusest. Ülekanne on täpne ainult siis, kui see on väike ja asub silma teljel. Tuleb muide märkida, et nõndanimetatud sfääriline aberratsioon on inimese silmas küllalt hästi välditud. Sellele aitab eriti kaasa asjaolu, et silmaläätse keskosa on tihedam kui tema väliskihid.

Kujutise kvaliteeti aitab parandada vikerkestas oleva silmaava ahenemine. Seda saavad kergesti kontrollida kaugnägevuse all kannatavad inimesed. Heleda valgustuse

kornal näevad nad paremini ja selgemalt väikestel kaugustel (25—40 cm) olevaid esemeid. Silmaava teatavasti aheneb seejuures ja järelikult väheneb nurk äärmiste silma pääsevate kiirte vahel. Teisest küljest saab kaugnägev inimene väikeselt kauguselt prillideta lugeda suhteliselt peent trükki, kui ta vaatab läbi kitsa ava rusikasse tõmmatud käes, mis on surutud vastu silma.

Mainitud puudusi kompenseerib teataval määral võimatus silma silmakoopas kergesti pöörata. Silma saab nii vertikaal- kui ka horisontaalsuunas pöörata üle 60°, sel viisil kiiresti läbi käies kõik vaadeldava suure eseme punktid.

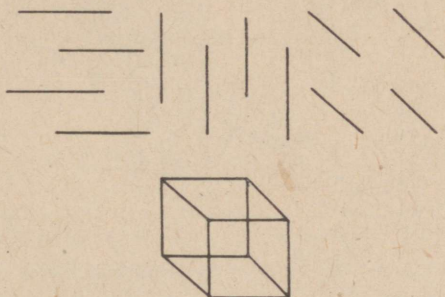


Joon. 37. Nägemine kahe silmaga.

Võrkkestal tekkiv peaaegu tasapinnaline pilt annab kujutluse mitte ainult eseme kujust, vaid ka tema mõõtmetest ja kaugusest isegi ühe silmaga vaatamisel. Seda saab seletada sellega, et me eelnevatel vaatlustel hindame ümbritsevate esemete kaugusi ja mõõtmeid kahe silmaga vaadates ning seostame nende vaatlustega hilisema, ühe silmaga teostatud vaatluse; kaugust ja mõõtmeid võimaldavad määrata varasemad kogemused ja harjumus. Tähtsust omab kahtlemata ka silmaläätse akommodatsioon — me tunneme alateadvuslikult tema pingsust ja hindame selle järgi kaugust. Olulist osa tuleb samuti omistada silma alateadvuslikule liikumisele. Lühikese ajavahemiku kestel saadakse esemest terve rida erinevatest vaatepunktidest pärinevaid pilte, millede kõrvutamise annab võimuse eseme ruumiliseks hindamiseks.

Ruumiliste muljete usaldusväärsus ei ole ühe silmaga nägemisel siiski suur. Võtke kummassegi kätte pliiats, sul-

gege üks silm ja püüdke pliiatsite teravikke vastamisi viia. Enamikul juhtudel ei õnnestu see esimese korruga. Vastupidi: mõlema silmaga vaadates ei eksi me selle katse puhul kunagi. Mõlema silma telgede suunamisel antud esemele jääb nende telgede vahele teatav nurk (joon. 37). Instinktiivne hinnang selle nurga suuruse kohta ongi küllalt laiades piirides kauguse mõõduks. Väga tähtis on tähelepanu pöörata sellele, et meie subjektiivsetes nägemismuljetes ja -aistingutes etendab tohutu suurt osa aju töö, mida me selgesti ei tunneta, kuid mis teeb võrkkestal tekkivas vahetus füüsilises kujutises väga suuri korrektiive. Aju vahelesegamise üheks olulisemaks avalduseks

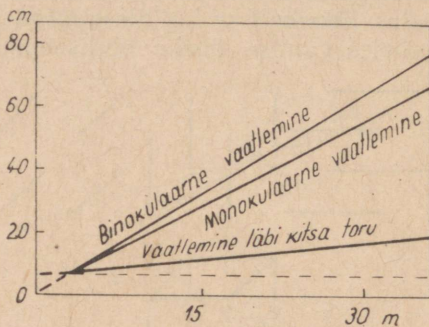


Joon. 38. Perspektiivitaju. 12 joont joo-
nise ülaosas näivad olevat ühes tasa-
pinnas. Nende all paralleelse ümber-
paigutamise teel koostatud kuup, mida
tajutakse ruumilise kujundina.

on silmade võrkkestadel tekkivate kujutiste õigesse asen-
disse pööramine; tegelikult on need silmaläätse abil saa-
dud kujutised ümber pööratud. Väga suurt korrigeerivat
osa etendab aju ruumilise tajumise puhul. Joonisel 38 on
ülal antud kuubi lihtsaima graafilise kujutise elemendid;
all on neist elementidest koostatud kuup ja me saame kohe
ruumilise pildi. See on muidugi aju töö tulemuseks. Sellel
põhineb õigete perspektiivsete kujutiste saamise võimalus
maalikunstis. Et ese näiks kaugemal olevana, tuleb teda
kujutada vastavalt vähendatud mõõtmetes. Kui eeldatakse,
et üks inimene seisab maali kujutletavast vaatlejast kaks
korda kaugemal kui teine, siis peab ta olema maalitud kaks
korda väiksemana. Samal ajal näivad kaks sel viisil kuju-
tatud inimest meile ühekasvulisena ning vaid perspek-

tiivne vähendus annab võimaluse tajuda seda, et väiksemana kujutatud inimene asub meist kaks korda kaugemal.

Joonisel 39 on esitatud Halway ja Bohringi katsete tulemused. Need katsed käsitlevad eseme nähtava läbimõõdu ja kauguse vahelise sõltuvuse küsimust. Katseobjektiks oli helendav ketta, mille nurksuurus jäi kogu aeg konstantseks, kuna tema kaugus vaatlejast muutus 3 meetrist 36 meetrini. Ketta nähtavat läbimõõtu võrreldi teise, vaatlejast püsivalt 3 m kaugusel oleva helendava ketta omaga. Paigaloleva ketta läbimõõtu muudeti mõõdetaval viisil nii,



Joon. 39. Halway ja Bohringi katse.

et see täpselt võrdus liikuva ketta nähtava läbimõõduga. Kui aju ei oleks võrkkestal tekkinud kujutise mõõtmetes mingisuguseid automaatseid parandusi teinud, siis oleks selle tõttu, et esimese ketta nurksuurus jäi kogu aeg konstantseks, tulnud oodata, et joonisel 39, kus abstsisssteljele on kantud kaugus meetrites, ordinaatteljele aga vaatleja poolt tajutud läbimõõt sentimeetrites, saadakse abstsisssteljega paralleelne muutumatu sirge (joonisel tähistatud katkendliku joonega). Tegelikult toimub midagi hoopis muud. Järjekorras kahe silmaga, ühe silmaga ning läbi pika ja peenikese toru vaatlemisel saadakse kaldsirged. Nende sirgete kallak väheneb ümbritsevate esemete nähtavuse piiramisega.

Kvantitatiivselt vastab see katse kõigile hästi tuntud faktile, et meie lähedal asuvate esemete mõõtmed näivad muutumatutena, sõltumatult nende esemete liikumisest ja kaugusest. Selgesti märkame ainult väga kaugete kujundite ja esemete väiksemaks muutumist. Seda on kerge

näha kõrgest tornist alla vaadates. Võrkkestal tekkivatesse esemete füüsikalistesse kujutistesse mainitud paranduste sisseviimisel aju poolt omab väga suurt tähtsust ümbritsev keskkond. Kui see kõrvaldada, siis, nagu jooniselt näha, hakkame liginema puhtfüüsikalisele resultaadile. Seega ei ole aju poolt vastu võetav kujutis lihtne füüsikaline kujutis, vaid on keerukamaks muudetud parandustega aju poolt,



Joon. 40. Lebavat inimest kujutav foto. Näide optilise ja ajalise õigsuse lahkuminekust.

milledest me ei ole teadlikud. Sel asjaolul on muidugi sügav bioloogiline tähendus. Elusolend ei vaja õigeid optilisi kujutisi, vaid õiget kujutlust ümbritsevatest esemetest. Joonisel 40 on esitatud ligidalt tehtud foto lebavast inimesest. Optiliselt on siin kõik korras, kuid ülesvõtte näib meile absurdse karikatuurina, sest pildil domineerivad saapatallad. See pilt näitab muidugi fotograafi tahtlikku või tahtmatut vilumatust, kuid optiliselt on ta õige. Kui aju ei korrigeeriks silma tööd, siis jälitaksid meid pidevalt sellised karikatuurid.

Aju korrigeeriv tegevus võib aga põhjustada ka vigu ja nägemispetteid. Käesoleva raamatu autor on paljusid kordi teinud väga jämedaid ruumilisi vigu. Kord näis ligiduses trammijuhtmetel ripuv väike punane plekist sig-

naalplaadike tohutute mõõtmetega lipuna, kusjuures põhjuseks oli see, et punane plaadike kanti mõttes ekslikult üle tänava lõpus oleva kaugel maja torni tippu. Teine kord näis kass lühikese hetke vältel lehmasuurusena; tundus, et kass liigub mööda kauget planku; tegelikult kõndis ta katusel selle akna lähedal, mille kaudu ta oli näha. Tekkis ligikaudu kahekümnekordne viga kauguse hindamises.



Joon. 41. Nägemispete.

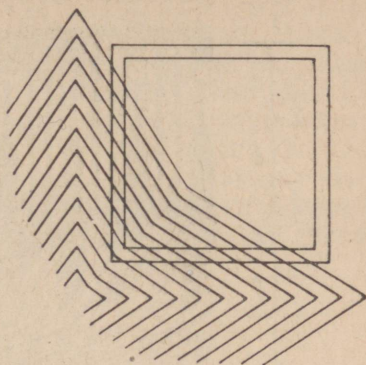
Päike ja Kuu näivad horisondil tohutu suurtena, seniidis väikestena. Siin on kahtlemata jälle tegemist nägemisveaga, mis on pealegi omane kõikidele inimestele.¹ Selle vea tekkimise põhjust ei ole tänapäevani täielikult selgitatud. Võimalik on järgmine seletus. Taeva helenduse hindamisel on loomulik, et me atmosfääri piiriks alateadvuslikult loeme atmosfääri selle koha, mis saadab meie silma veel märgatavat hajunud valgust, ja kanname sellele piirile üle taeval leiduvad esemed. Loojangul ja tõusul helendab kõige rohkem lääne- või idapoolne taevaserv; meile veel valgust saatva atmosfääri piir eemaldub tunduvalt, taevavõlv muutub sügavamaks ning me kanname taevakeha üle sellele kaugemale kihile. Tekib samasugune viga kui eespool vaadeldud juhtumitel lipu ja kassiga.

Psühholoogilised põhjused on vigade allikaks mitte ainult ruumiliste, vaid ka tasapinnaliste kujundite vaatlemisel. Joonisele 41 on tõmmatud kaks paari paralleeljooni,

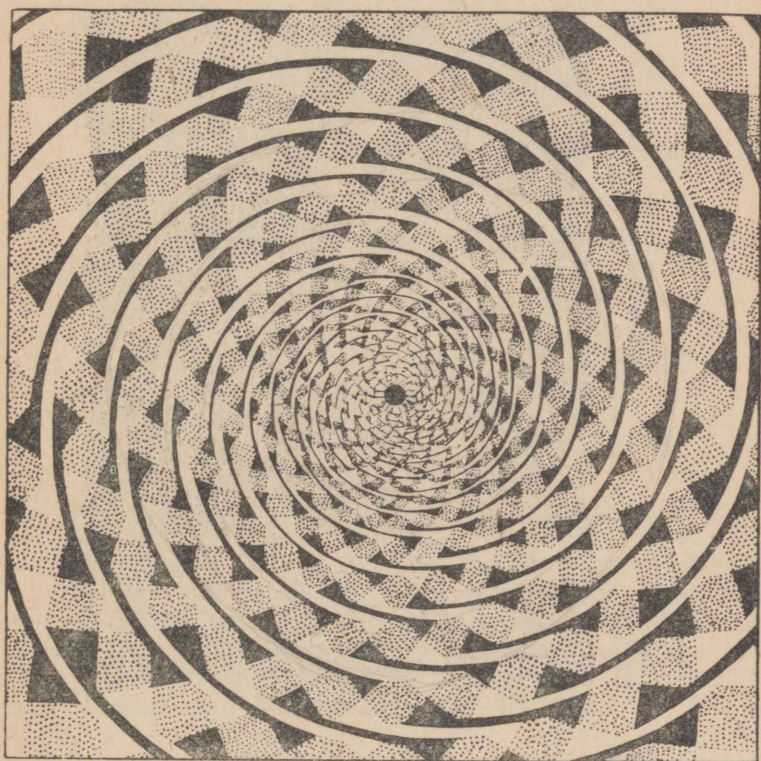
¹ Kui Päikest või Kuud fotografeerida horisondil ja seniidis olevatena, siis osutub, et nende mõõtmed on nii siin kui seal ühesugused.

mis on ääristatud vastava viirutusega. Mõlemad joonepaarid näivad meile paindunudena. Seejuures ei kõrvalda illusiooni isegi koondatud tähelepanu ning tõe saab kaheldamatuks alles joonlaua joonisele asetamisel.

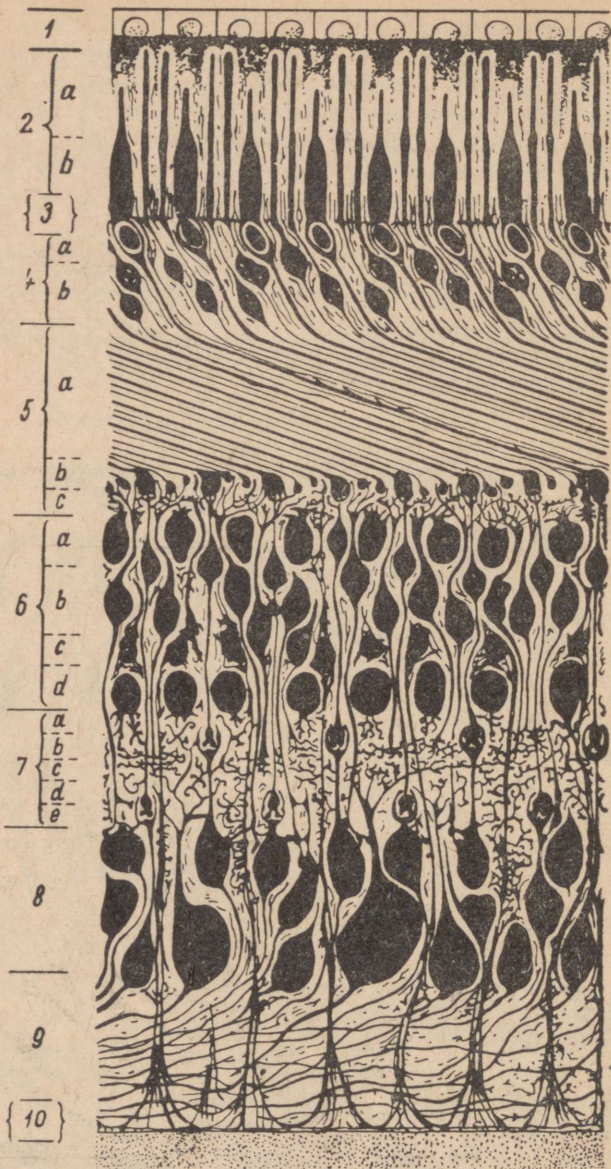
Joonisel 42 on kujutatud ruut, mille üht nurka kattev viirutus tekitab terava mulje ruudu viltuolekust.



Joon. 42. Nägemispete.

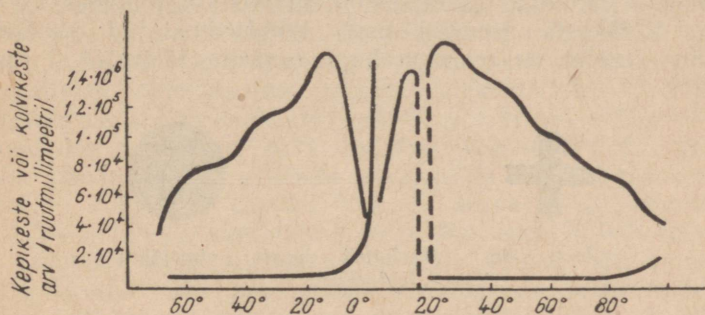


Joon. 43. Nägemispete.



Joon. 44. Inimese silma võrkkesta läbilõike skeem.

Joonisel 43 on kirjule põhjale joonestatud katkendlikud, rangel kontsentrilised ringjooned, kuid meile jääb täielik ja visuaalselt kõrvaldamatu mulje, et joonestatud on spiraal. Veenduda, et see ei ole nii, saab ainult sirkli abil. Üks nägemispetete põhjustest seisab selles, et viirutuse kirevus paneb meie silma tahtmatult liikuma, kriipsult kriipsule üle minema. Kui joonist valgustada elektrisädeme hetkelise valgusega, siis (vähemalt mõningatel juhtudel) pete kaob: silm ei jõua sädeme helendamise ajal märgatavalt liikuda.



Joon. 45. Kepikeste ja kolvikeste jaotus võrkkestal Österbergi järgi.

Seega ei lahenda inimese silmad ja aju ruumilist ülesannet kaugeltki täiuslikult.

Asume nüüd vaatlema seda, kuidas silm hindab valguse energiat ja spektraalset koostist. See hindamine toimub võrkkestas, mistõttu meil tuleb peatuda võrkkesta ehitusel. Joonisel 44 on esitatud võrkkesta ristlambilõike skeem. Väliskihis 1 asuvad musta pigmendiga värvitud rakud. Edasi tulevad visuaalse tajumise põhielemendid 2, mida väliskuju järgi nimetatakse kepikesteks ja kolvikesteks. Kihid 3—5 vastavad kepikeste ja kolvikeste juurde tulevatele närvikiududele. Nende kihtide taga asuvad nõndanimetatud sõmerkihid, mis on samuti seotud närvikiududega. Kihi 8 moodustavad ganglionrakud, millest igaüks on ühenduses kihis 9 asuvate närvikiududega. Kiht 10 on sisemiseks piirkihiks. Iga närvikiud lõpeb kas kolvikese või kepikesega. Nendest rakkudest võrkkesta pinnal moodustunud mosaiik pole kaugeltki ühtlane. Kolvikeste ja kepikeste arv on väga suur (umbes 7 miljonit kolvikest ja üle 100 miljoni kepikesega). Jooniselt 45 on näha

kolvikeste ja kepikeste jaotus silmapõhjal. Abstsistteljele on kantud võrkkesta vastava koha nurkkaugus tsentraallohust (*fovea centrale*), ordinaatteljele kolvikeste või kepikeste arv ühel ruutmillimeetril. Kõveraid katkestab «pimetähn», millest räägime allpool. Jooniselt on näha, et võrkkesta keskosas on ülekaalus kolvikesed, kuna perifeerias omandavad ülekaalu kepikesed. Kepikesed on värvitud punase nägemispurpuriga, mis valguse toimel kiiresti luitub. Kepikeste pikkus on umbes 0,06 mm, kolvikeste pikkus umbes 0,035 mm. Lähimõõdud on vastavalt umbes 2μ ja 6μ . Võrkkesta tsentris asub nõndanimetatud «kollane tähn», millel on ovaalne kuju (suurim lähimõõt 2 mm,



Joon. 46. Mariotte'i joonis pimetähni leidmiseks.

väikseim 0,8 mm). Selle tähni keskel on ülekaalus kolvikesed; kepikesed kaovad täielikult «tsentraallohus»; see on kõige selgema ja teravama nägemise koht. Mõnes kohas puuduvad võrkkestas nii kolvikesed kui ka kepikesed. Kui sulgeda vasak silm ja fikseerida parem ristile (joon. 46), siis lakkab paremal olev must ring olemast nähtav, kui silm on raamatust umbes 20 cm kaugusel: tema kujutis langeb nägemisnärvi silma tuleku kohale, kus pole valgustundlikke elemente (pimetähn).

Kuivõrd lihtne on silma optiline osa, niivõrd keerukas on tema vastuvõtumehhanism. Me mitte ainult ei tunne võrkkesta üksikute elementide füsioloogilist mõtet, vaid ei ole ka suutelised ütleva, kuivõrd otstarbekas on valgustundlike rakkude ruumiline jaotus, milleks on vaja pimetähni jne. Meie ees ei ole kunstlik füüsikaaparaat, vaid elav organ, mille väärtuslikud omadused on segatud puudustega, kuid kõik on lahutamatult seostatud elavaks tervikuks.

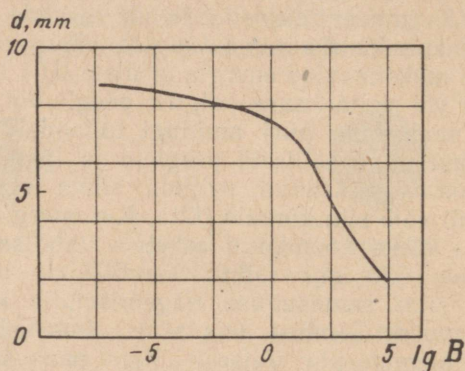
Vaatleme nüüd silma tuleva valguse energia hindamise küsimust. Seda küsimust on raske lahutada värvilisuse küsimusest; silm saab nägemismuljeid ainult kiirtest, millede lainepikkused asuvad ligikaudu vahemikus 400—

750 $m\mu$. Ainult küllalt suure pingutusega läheb korda näha ultravioletseid kiiri lainepikkustega 400—300 $m\mu$ ja infra-punaseid kiiri lainepikkustega 750—800 $m\mu$, kusjuures nähtavus sõltub nendes spektripiirkondades tugevasti vaatleja eest ja kõigub eri vaatlejate puhul laiades piirides. Piirdume ainult selle lainepikkuste lõiguga. Eelmises peatükis nägime, et sekundis maakera atmosfääri pinna ühele ruutsentimeetrile langeva päikesevalguse energia võrdub 0,033 kaloriga. Nähtavate kiirte arvele läheb umbes 40 protsenti sellest suurusest. Suurim silmaava ei ületa pindalalt 0,7 ruutsentimeetrit. Nende arvude põhjal on kerge näha, et sekundis silma tungida võiva nähtava päikesevalguse maksimaalne energia ei ületa 0,01 kalorit. Päikesevalgust või volta kaare valgust peegli või läätse abil koondades saab seda piiri muidugi tuhandeid kordi ületada. Looduses aga selliseid peegleid ja läätsi pole ning sedaliiki faktid ei saanud mõjuda silma evolutsioonile, mistõttu neid võib siin kõrvale jätta. Kui energia 0,01 kalorit sekundis oleks koondatud rohelise valguse piirkonda, lainepikkusele 556 $m\mu$ (silma tundlikkuse maksimum), siis saaks silm samasuguse nägemismulje kui 200 000 küünla tugevusest lambist, mis asub silmast 1 m kaugusel. See on ülemine piir. Teisest küljest peab silm oskama eristada pimedas öö kaduvnõrka valgust, mille tugevus ei küüni isegi miljondike küünaldeni. Silm peab selles tohutus intervallis kohanema igasugustele intensiivsustele, et teenindada maakeral asuvat elusolendit.

Fotoaparaati saab kolmel viisil kohandada valguse heleduse muutumisele. Esiteks saab laiades piirides — tuhandikest sekunditest tundide ja päevadeni — muuta säritusaega. Teiseks saab muuta objektiiviva suurus, nihutades laiemale või koomale nõndanimetatud diafragmat. Lõpuks — plaatide tundlikkus võib olla väga erinev; vastavalt valgustusele võib kasutada ühtesid või teisi plaate.

Esimene meetod on silmale lubamatu — ta peab alati tegema «momentvõtteid». Teist meetodit silm kasutab. Sõltuvalt valguse heledusest võib silmaava automaatselt aheneda või laieneda. Ava suurim läbimõõt on umbes 8 mm, väikseim umbes 2 mm. Tema pindala võib seega kuni 16-kordselt muutuda. Joonisel 47 on toodud silmaava läbimõõdu muutumise käik valgustustugevuse suurenemisel. Abstsisssteljele on kantud heleduse logaritmid, ordinaatteljele silmaava läbimõõdud. Joonisel 48 on kujutatud silma-

ava läbimõõdu d muutumine aja jooksul pärast hästivalgustatud ruumist pimedusse üleminekut. Nende jooniste põhjal on selge, et silmaava läbimõõdu muutumine on täiesti mittepiisav nende valgustustugevuse muutuste kompenseerimiseks, milledega silmal tuleb tegemist teha. Loodus rakendab kolmandat, kõige radikaalsemat meetodit — võrkkesta tundlikkuse muutmist. Pimedusse sattudes hakkavad silmad sellega kohanema (adaptatsioon) ja võrkkesta tundlikkus kasvab pikkamööda. Võrkkesta elemendid —



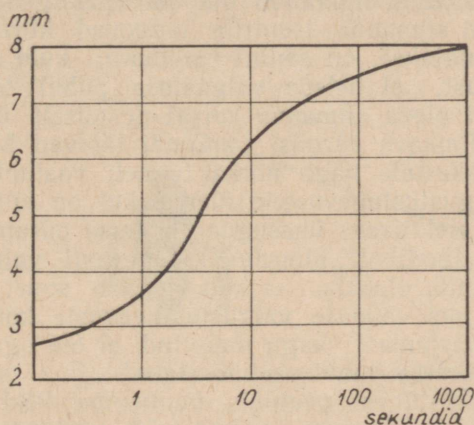
Joon. 47. Silmaava läbimõõdu muutumine valgustustugevuse suurenemisel.

kolvikesed ja kepikesed — käituvad seejuures väga erinevalt. Kolvikeste tundlikkus kasvab võrreldes nende tundlikkusega päevavalguse suhtes ainult mõnikümmend korda. Kepikeste tundlikkus suureneb täielikus pimeduses aeglaselt (tunni või rohkema vältel) sadu tuhandeid kordi, saavutades lõpuks teatava piiri. Nägemiskünnise suurus kalorites väljendub valguse puhul, mille lainepikkus on umbes $500 \text{ m}\mu$, ligikaudselt arvuga $5 \cdot 10^{-18}$. See suurus on erinevatel inimestel siiski erinev ja sõltub katsetingimustest (suur või väike valgusallikas, katkev või püsiv valgustus). Peale selle on niisuguse tundlikkuse saavutamiseks tarvis, et valgusallika kujutis ei tekiks võrkkesta tsentris, vaid perifeerias, kus tundlikkus on suurem. Selleks tuleb vaatlemisel silmi kõõritada, vaadates valgusallikale «viltu».

1 m kaugusel olev steariinküünal saadab silma 1 cm^2 kohta sekundis umbes kaks kümnemiljondikku ($2 \cdot 10^{-7}$)

kalorit energiat nähtavates kiirtes. Et temast jõuaks silma $5 \cdot 10^{-18}$ kalorit, tuleks ta silmast eemaldada 200 km kaugusele. Teiste sõnadega: võib öelda, et nägemiskünnis vastab niisuguse nähtava valguse energiale, mis langeb sekundis 1 cm^2 -le silmast 200 km kaugusel olevast steariinküünlast. Seejuures muidugi eeldatakse, et atmosfäär ei neela valgust, mis tegelikult pole õige.

Silma hämmastav võime kohaneda valgustustugevuse muutustele on eriti hakanud selguma viimastel aastatel.



Joon. 48. Silmaava läbimõõdu muutumine aja jooksul pärast hästivalgustatud ruumist pimedusse üleminekut.

Võrkkesta ristläbilõike skeemilt (joon. 44) on näha, et tema väliskihis asuvad musta pigmendi terad. Missugust osa see pigment etendab? Pole kahtlust, et pigment nõrgendab kepikete ja kolvikesteni jõudvat valgust ning järelikult kaitseb neid liiga heleda valguse eest. On aga ilmne, et selline kaitse muutub mittevajalikuks ja isegi kahjulikuks öistes tingimustes, väga väikeste valgustustugevuste korral. Mõningate loomaliikide (kalade, kahepaiksete) uurimine on näidanud, et nõrga valguse puhul laskub must pigment võrkkesta ülemisest kihist aegamööda võrkkesta põhja, lakates seega takistamast valguse juurdepääsu. Pimeduses toimuvat silma järkjärgulise adaptatsiooni protsessi ennast võiks seletada musta pigmendi aeglase üleminekuga võrkkesta põhja. Teistel loomadel

(näiteks ahvidel) aga nähtavasti pigmendi liikumist ei toimu. See küsimus on muide veel lõplikult selgitamata.

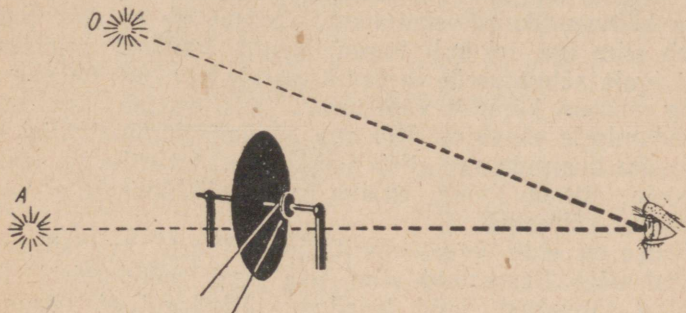
Me rääkisime eespool, et silmaava muutub valgustustugevuse kasvamisel väiksemaks, kuid mõningate haiguste puhul ning mitmesuguste ainete süstimisel organismi lakkab silmaava ahenemine ja ta jääb igasuguse valgustuse juures pärani lahti. Pimedaks jäämise oht on seejuures siiski välditud. Pärani lahti oleva silmaava äärele langevad valguskiired tekitavad küllalt heleda valgustuse tingimustes võrkkestal ligikaudu viis korda nõrgema nägemisärrituse kui silmaava tsentrile langevad kiired. Kuidas seda saavutatakse, on senini teadmata, kuid igal juhul pole kahtlust, et heleda valgustuse puhul tegutseb ka täiesti lahti oleva silmaava korral peamiselt üksnes ava keskosa; silmaava äärmisi piirkondi läbivad kiired avaldavad võrkkestale väga nõrka toimet; vastupidi — väikestele valgustustugevustele üleminekul on silmaava kõikide osade efektiivsus ühesugune ja tema pärani lahti olek suurendab järelkult pimeduses tugevasti valgusärritust.

On loomulik oletada, et siin etendab suurt osa must pigment, mis väikeste valgustustugevuste korral lakkab võrkkesta varjamast. Nagu mainitud, ei ole aga pigmendi liikumist inimese puhul veel tõestatud.

Valgust käsitlevas peatükis puutusime kokku valguse toime üldise seadusega: valgus võib neelduda ja toimet avaldada ainult tervete kvantidena. Teiste sõnadega: ei ole võimalik ehitada aparaati, mis reageeriks kvandi energiast väiksemale energiale — sel lihtsal põhjusel, et valgust saab avastada ainult tema toime järgi. Energia $5 \cdot 10^{-18}$ kalorit sekundis vastab (lainepikkuse 500 m μ korral) 57 kvandile. Need 57 kvanti on «hargnenud» üle sekundi. Siit on selge, et silm on hetkeliselt suuteline visuaalselt tajuma väga väikest arvu kvante, s. o. on tundlikkuse suhtes omadustelt lähedane ideaalsele aparaadile.

Seda kasutades saab silma abil avastada valguse katkendlikku, kvandilist ehitust. Kujutleme, et vaatame väikesele, nõrgale valguspunktile A (joon. 49), mille heledust saab meelevaldselt muuta. Eeldame, et valgusallika heledust on nõrgendatud sellise astmeni, kus temast satub sekundis silma ainult väike arv kvante. Kvandid ei või üksteisele järgneda regulaarselt, ühesuguste ajavahemike tagant, vaid lendavad korrapäratult, kord suuremal, kord

väiksemal arvul. Endastmõistetavalt kiirgab ka hele valgusallikas korrapäratut kvantide voogu, kuid sel juhul on kvantide arv tohutu ja juhuslikud protsentuaalsed keskmisest kõrvalekaldumised on praktiliselt märkamatud. Täpselt samuti on näiteks protsentuaalsed kõikumised suures linnas aasta jooksul sündinud laste arvus kaduvväikesed ja statistika ennustab seda arvu suure täpsusega, kuna samas linnas asuvas väikeses majas kõigub sündide aastane arv äärmiselt laiades piirides ning statistiku ennustused osutuvad sel juhtumil muidugi ekslikeks.



Joon. 49. Valguse kvantfluktuatsioonide vaatlemise skeem.

Seega tuleb statistika seaduste põhjal oodata (kui ainult kvantide-teooria on õige), et valgusallika nõrgenemisel, kui sekundis satub silma väike arv kvante, peavad tekkima järsud kõikumised valgusallika heleduses. Kui silma sattuvate kvantide arv langeb alla nägemiskünnisele vastava arvu, siis lakkab silm valgust tajumast; vastupidi — kui kvantide arv ületab künnise väärtuse, saab valgus nähtavaks. Järelikult peab valgusallika heleduse järkjärgulisel vähenemisel saabuma hetk, kus valgusallikas muutub silmale püsivast vilkuvaks.

Niisugusel lihtsal kujul katset siiski teostada ei saa, ja seda kahel põhjusel. Esiteks, nagu me rääkisime, on silmamuna äärmiselt liikuv, mistõttu heleduse kõikumine ilmneb ka suurte intensiivsuste korral. Seetõttu tuleb silm fikseerida. Seda saavutatakse sellega, et valguspunkti *A* veidi eemale paigutatakse heledam (harilikult punane) valguspunkt *O* (vt. joon. 49), millele fikseeritaksegi silm. Seega tekib võrkkesta tsentris selle fikseerimispunkti

kujutis, kuna valgusallika A kujutis tekib kõrval, tsentrist konstantsel kaugusel.

Edasi: silmal on omadus säilitada nägemismuljet; see omadus on näiteks andnud võimaluse kino loomiseks. See sama omadus aga hakkab muidugi takistama valgusallika intensiivsuse kiirete kõikumiste tajumist; need kõikumised sulavad silmas ühte, valguvad laiali ja ühtlustuvad.

Selle raskuse ületamiseks võib toimida järgmiselt. Silma ja valgusallika vahele paigutatakse ühe avaga varustatud ketas (vt. joon. 49). Ketas teeb ühe pöörde sekundis, jättes valgusallika katmata ainult ava möödumise ajaks (näiteks kümnendikuks sekundiks). Niisuguse seadme puhul näeb silm iga sekundi tagant ainult lühikest sähvatust. Kui igale sähvatusele vastav kvantide arv on ühesugune ning suurem künnise väärtusest, siis vastab ava igale möödumisele sähvatus. Kui aga ava möödumise vältel kiirratavate kvantide arv allub järskudele statistilistele kõikumistele, siis on ilmne, et ava igale möödumisele ei vasta nähtavat sähvatust.

Katse on seda ootust kinnitanud. Suurte intensiivsuste korral näeb fikseeritud silm ava igal möödumisel tõe-poolset sähvatust, kuid heleduse järkjärgulisel nõrgenemisel hakkavad ilmnema lüngad, mis muutuvad heleduse kahanemisega üha sagedamateks.

Lünkade ja sähvatuste arvu loendades saab statistika seaduste järgi määrata sellistel tingimustel ühe sähvatuse jooksul kiirratavate kvantide keskmise arvu. Seega võimaldab silm tõe-poolset «oma silmaga» veenduda valguse kvandilises, katkendlikus struktuuris.

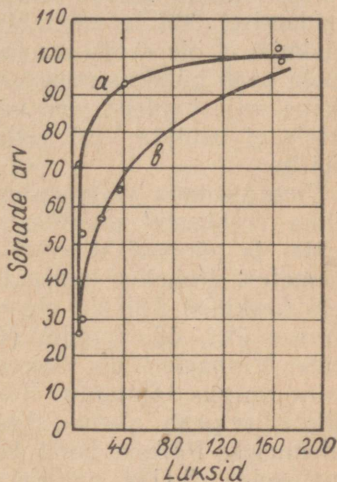
On tähelepanuväärne, et sel viisil määratakse mitte silma kui terviku tundlikkust, vaid üksnes nägemisärrituse eest vastutavate rakkude (kepikeste) tundlikkust. Senini erinevatel vaatlejatel leitud piiriline tundlikkus kõigub laiades piirides ühest mitmekümne kvandini — footonini. Üksikud kvandid on sõna otseses mõttes nähtavateks saanud.

Peale oma ilmse tähtsuse valguse ja silma teooria suhtes annavad kirjeldatud katsed uurijale uue meetodi tervete ja haigete inimeste silma võrkkesta uurimiseks kirurgilise vahelesegamiseta, silma normaalses olekus.

Me rääkisime seni energia piirilistest väärtustest, milledega silmal tuleb maakeral tegemist teha. Otsest päikesevalgust talub silm aga suuri vaevu, kuna nägemis-

künnise lähedal olevaid heledusi märkab ta ainult äärmise pingutusega. Pärast kestvat Päikesele vaatamist saadab meid pikka aega päikeseketta jäljend võrkkestal: valgele seinale vaadates näeme sellel tumedat värvilist ringi — see on võrkkesta väsinud koht. Samasugust kauakestvat väsimust põhjustavad ka harilikud lambid, kui nad on liiga heledad. Pärast pikaajalist töötamist lahtise volta kaarega näiteks võib see väsimus kesta tunde ning äärmisel juhul viia pimedaks jäämiseni. Kui kaua vaadata Päikesele või heledale lambile, siis näeme ka suletud silmadega selgesti valgusallika pilti, mille värvus pikkamööda muutub ja mille intensiivsus aja jooksul väheneb (järelpildid). Järelpildid (negatiivsed ja positiivsed) on võrkkestal tekkiva kujutise ebanormaalse heleduse korral vältimatuks nähtuseks. Mõnikord jääb heleda valgustuse puhul tekkinud jäljend võrkkestale peaaegu terveks ööpäevaks. Eriti selgesti on teda võimalik näha öösel või varahommikul suletud silmadega. Võrkkest tegutseb sel juhul fotoplaadina. Seni on teadmata, missugused võrkkestas toimuvad muutused seda nähtust põhjustavad. Ilmselt on olemas mingisugune silmale sobivaim heledus, mis on vaadeldav pingutuseta ja talutav väsimuseta.

Joonisel 50 on graafiliselt kujutatud järgmise katse tulemused: katsealune isik pandi lugema parima nägemise kaugusel (25 cm) olevat avatud raamatut; raamatu valgustamise heledust muudeti; katseobjekti paluti ära märkida, mitu sõna ta ühe või teise valgustuse juures minutis läbi loeb. Joonisel on horisontaalteljele kantud valgustugevused sellise arvestusega, et näiteks arv 40 vastab raamatust ühe meetri kaugusel olevale 40-küünlasele lambile; vertikaalteljele on paigutatud minutis läbi loetud sõnade arvud. Ülemine kõver α vastab normaalsele sil-



Joon. 50. Lugemise kiiruse sõltuvus valgustusest.

male, alumine kõver *b* silmale, mis on rikutud pikaajalise töötamisega kunstliku valgustuse juures. Me näeme, et valgustuse tugevnemisel kasvab lugemise produktiivsus algul kiiresti, kuid 100 küünla juures see kasvamine lakkab. See on väga tähtis asjaolu, millele tuleb tähelepanu pöörata tööruumide, tubade jn. valgustamisel.

Valgustehnikute ja arstide poolt viimastel aastakümnetel läbi viidud arvukad katsed näitavad, et mitmesuguste tööliikide jõudlus kasvab märgatavalt valgustustugevuse suurendamisel 300 ja isegi 500 luksini¹. Silma märgatavat väsimist ei ole seejuures tähele pandud. See on piir, mille poole peab püüdma meie valgustehnika. Enamikul juhtudel oleme sellest piirist veel väga kaugel. Kunstlikule valgustusele ei osutata veel seda suurt tähelepanu, mida ta väärrib.

Ümbruskonna valgustatus looduses ja kujutiste heledus silma võrkkestal muutub väga laiades piirides, sõltuvalt aasta- ja päevaajast, pilvitusest ning ümbruses olevatest esemetest (roheline, lumi). On võimatu tuletada «optimaalset» keskmist kõikide elusolendite jaoks. Päevaloomadel on see üks, ööloomadel (öökullidel, nahkhiirtel) hoopis teine. Viimastele on meie tagasihoidlike lampide ja küünalde valgus talumatu. Bioloogia vaatekohast optimaalne valgustus peab olema silma evolutsioonilise kohanemise tulemuseks Päikese poolt Maal tekitatavale keskmisele valgustusele. Silm on energia suhtes kohandatud mitte Päikesele endale, vaid ümbritsevatelt kehadel hajunud päikesevalgusele. Seda tõendavad silmaava muutuv suurus, võrkkesta tundlikkuse muutumine ja sobivaim heledus.

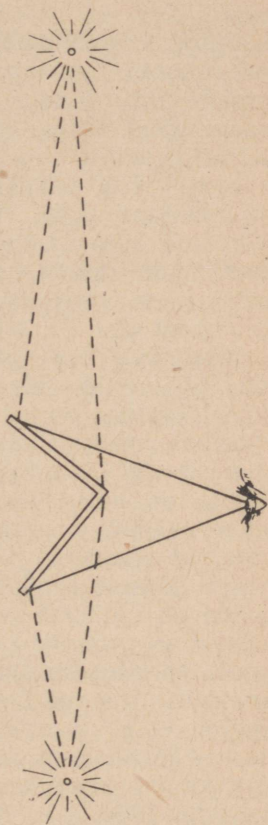
Märgime veel järgmist. Silma võrkkesta väsimises etendab tähtsat osa mitte niivõrd kogu silma minev energia, kui võrd võrkkestal tekkiva kujutise ühe pinnaühiku kohta tulev energia. Mida kaugemal asub küünal, seda väiksem on tema kujutis; «erihedus» aga, s. o. kujutise pinnaühiku heledus, jääb küünla ümberpaigutamisel laiades piirides konstantseks. Kui vaadata kaugusse suunduvat linnatänavat valgustavate kaarlampide pikka rida, siis näib lähedaste ja kaugete lampide heledus peaaegu ühesugusena (kaugete lampide valgust nõrgendab veidi neeldumine tol-

¹ Luks — valgustustugevus, mis saadakse siis, kui pinda valgustab ühe meetri kauguselt ühe küünla tugevune valgusallikas.

muses õhus). Teine on lugu siis, kui valgustada esimese, teise, kolmanda jne. lambi valgusega mingit pinda; sel juhul näeme, et valgustuse heledus kahaneb lambi kauguse suurenemisel äärmiselt kiiresti. Kui üksisilmi vaadata nõrka, tuhmi lampi, siis võib see silma äärmiselt väsitada — lambi hõõgniidist võrkkestale tekkival kujutisel on väga suur «erihelendus». Seetõttu varustataksegi lambid valgust hajutavate kolbide ja varjudega. Selle unustamisega seletuvad sagedased kaebused, et kaasaegsed peenikeste, eredalt helenduvate torude kujulised luminesentslambid tekitavad silmades «valu». Sellest on lihtne pääseda, varjates lampide rühma hajutava matt- või piimklaasiga. Lampe võib ka nii peita, et nad valgustaksid, kuid ei oleks ise nähtavad. Kõige lihtsam on muidugi vaadata mitte otse lampidele, vaid ainult nende poolt valgustatud esemetele.

Seni me rääkisime valgusenergia absoluutsest hindamisest silma abil. See hindamine on täiesti kvalitatiivne: suuri heledusi tajume «valuga», tühiselt väikesi «ebameeldiva pingega» ning on olemas meie jaoks «mugavaid ja meeldivaid» heledusi, kuid me ei tunne silmava suuruse ega võrkkesta tundlikkuse muutumist — need protsessid ei jõua meie teadvusse, kuid ainult nende abil saaks heledust tõeliselt hinnata. Me märkame teravalt ainult valguse minimaalset hulka (nägemiskünnis), sest selle piiri taga kaob nägemismulje täielikult. Seetõttu annab ainult nägemiskünnise olemasolu võimaluse kasutada silma mõnikord valgusenergia suuruse absoluutse mõõtmise seadmena.

Silm võib aga heledusi võrrelda, otsustada selle üle,



Joon. 51. Fotomeetri skeem.

mis on heledam ja mis tumedam. Hinnang on iseendast jälle kvalitatiivne, kuid teda on kerge kasutada kvantitatiivseteks mõõtmisteks. Oletame, et kahest lambist kumbki valgustab üht kõrvuti asetatud valgetest pindadest (joon. 51). Üks pind näib tumedamana, teine heledamana. Leidub palju meetodeid valguse nõrgendamiseks täpselt teada olev arv kordi (lihtsaimaks meetodiks on lambi kauguse suurendamine). Muudame ühe lambi kaugust nii mitu korda, et tema poolt valgustatava pinna heledus näiks olevat võrdne naaberpinna heledusega. Olles seda saavutanud, võime öelda, et üks lamp on teisest nii mitu korda heledam, kui mitu korda tuli nõrgendada tema valgust. Kui näiteks paremal seisis küünal ja vasakul 16-küünlane lamp, siis tuli viimast valgustustugevuse võrdsuse saavutamiseks nõrgendada 16 korda (näiteks eemaldada küünla kaugusest neli korda suuremale kaugusele). Seda võtet nimetatakse fotomeetrimiseks, vastavaid seadmeid aga fotomeetriteks.

Käesoleval ajal on olemas palju iga liiki fotomeetreid, mis põhinevad valguse fotograafilisel, fotokeemilisel ja fotoelektrilisel toimel. Need seadmed annavad võimaluse teostada mõõtmisi mitte ainult nähtavas, vaid ka infra-punases ja ultravioletses valguses, kusjuures mõõtmiste täpsus on suur. Praegu aga huvitab fotomeeter meid peamiselt seetõttu, et ta võimaldab avastada inimese silma tähtsaid omadusi.

Kui täpselt suudab silm otsustada selle üle, et kaks pinda on ühtlaselt valgustatud? Missugust valgustuse erinevust ta märkab? Olgu näiteks kaks pinda ühtlaselt valgustatud tuhandeküünlaste lampidega. Kas me märkame erinevust, kui me ühele poolele lisame ühe küünla? Katse näitab, et ei — tuleb lisada umbes 20 küünalt, et valgustuse erinevus muutuks märgatavaks. Valgustuse väikseima märgatava juurdekasvu suhe põhivalgustusse on järelikult 20 : 1000, s. o. 2%. Tabelis 2 on toodud selle protsentuaalse juurdekasvu väärtused mitmesuguste valgustugevuste jaoks (küünaldes) kollase valguse puhul, mille lainepikkus on 605 m μ .

Tabelis lähtealuseks võetud 200 000-küünlane valgustugevus vastab ligikaudselt otsesele päikesevalgusele. Me näeme, et silm eristab heleduse erinevusi kõige paremini valgustugevusel umbes 5000 küünalt; suuremate ja väiksemate heleduste puhul see võime väheneb ning vajalik

Tabel 2

Valgustugevus küünaldes	Väikseim märke- gata kasv juurde- kasv %%-des	Valgustugevus küünaldes	Väikseim märke- gata kasv juurde- kasv %%-des
200 000	4,25	100	2,78
50 000	2,55	50	3,78
20 000	1,83	20	4,60
10 000	1,63	10	6,10
5 000	1,58	5	10,3
2 000	1,80	2	16,7
1 000	1,98	1	21,2
500	2,25	0,5	27,6
200	2,35	0,2	33,2

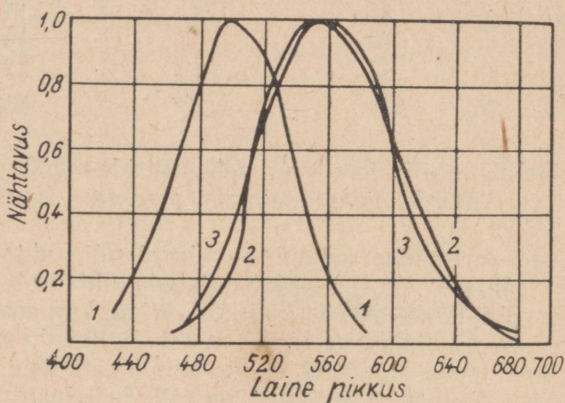
protsentuaalne juurdekasv suureneb. Piirides 200—20 000 küünalt on juurdekasvu suurus peaaegu konstantne (umbes 2%).

Heleduste eristamise võimel on elusolendi suhtes muidugi suur tähtsus: ta võimaldab eristada üht eset teisest. Selle intervalli (200—20 000 küünalt) laius, kus see võime on kõige rohkem välja arenenud, vastab ligikaudu nendele Päikese poolt esile kutsutud valgustuse kõikumistele, millest oli eespool juttu. Järelikult on nii heleduste eristamise võime kui ka heleduse absoluutne visuaalne tajumine kohandatud Päikesele, kuid mitte otsesele, päikesevalgusele, vaid päikesekiirtele, mis on hajutatud atmosfääri ja ümbritsevate esemete poolt.

Silma «päikeselisus», täpsemalt väljendudes tema kohandatus päikesevalgusele, väljendub kõige selgemalt siiski selles, kuidas silm reageerib valguse spektraalsele koostisele. Kiirte skaalal pole piire: pikkade lainete pool suundub ta lõpmatusse, lühikeste lainete pool asuvad piiril kaduvväikesed lained. Nähtavate lainete piirkond upub sellesse mitmekesisusse. Oletame, et silma juhitakse erineva lainepikkusega, kuid võrdse energiaga kiiri. Infrapunaseid kiiri ei näe silm peaaegu üldse, punaseid märkab, kuid nõrgalt, kollakasrohelist näivad kõige heledamatena, violetised on vaevalt märgatavad, ultravioletsed aga peaaegu täiesti nähtamatud.

Võtame kollakasroheliste kiirte heleduse ühikuks ja võrdleme sellega teiste kiirte heledust ühesuguse energia puhul (praktiliselt ei ole seda sugugi kerge teha). Sel viisil

saame kiirte nõndanimetatud «nähtavuse» kõvera (joon. 52). Joonise horisontaalteljele on kantud lainepikkused, vertikaalteljele nähtavus. Küllalt suurte heleduste korral saadakse paremal olevad kõverad: kõver 2 vastab «keskmisele» silmale, kõver 3 juhusliku üksikvaatleja silmale. Me näeme, et kõvera maksimum asub spektri kollakasrohelises osas (556 m μ) ning et kõver on järsk ja langeb mõlemas suunas peaaegu sümmeetriliselt. Pikalainelisi (umbes



Joon. 52. «Päevane» ja «hämariku» nähtavuskõver.

360 m μ) ultravioletseid kiiri on võimalik näha siis, kui nende intensiivsus on suur. Nende valgus on violetne. Võib näha — tõsi küll, väga nõrgalt — ka lühemate lainetega kiiri, ligikaudu lainepikkuseni 300 m μ . Need kiired neelduvad tugevasti silmaläätses ja ainult tühine mürdosa nendest jõuab võrkkestani. Neeldudes aga tekitavad nad silmas sinist fluorestsentsi, mida võrkkest samuti näeb. Kui näiteks vaadata võimsale ultravioletsete kiirte allikale — elavhõbe-kvartslambile — läbi erilise musta klaasi, mis peab kinni kõik nähtavad kiired ja laseb läbi ultravioletsed kiired, siis näib kogu ümbritsev ruum olevat täidetud sinaka uduga, mis sarnaneb tubakasuitsuga. See «suits» kujutab endast silma fluorestsentsi, mida märkab võrkkest.

Normaalsed silmad näevad kiirte piiritust valdkonnast ainult väikest lõiku. Mis siis tingis nähtavuspiirkonna

valikut? Meenuatame (vt. peatükki «Päike»), et maakera pinna jaoks lõpeb Päikese spekter praktiliselt lainepikkusega umbes 290 m μ , sest lähemaid laineid tõkestab atmosfääris olev osoonikiht. 290 millimikronist väiksema lainepikkusega kiirte tajumisele kohandatud silma eksisteerimine oleks muidugi bioloogiliselt otstarbetu. Leidub aga veel ka teine põhjus, mis sunnib silma mitte üksnes mitte kohanduma ultravioletsete kiirte tajumisele, vaid vastupidi — kaitsma end nende eest. Lühikeste lainetega kiired lagundavad enamikul juhtudel orgaanilisi aineid keemiliselt ja võivad elusorganisme surmata. Sellel põhineb nõndanimetatud bakteritsiidsete elavhõbelampide toime. Need lambid asuvad kvartsist või kõige sagedamini spetsiaalsest klaasist torudes, mis lasevad läbi lühikeste lainetega ultravioletseid kiiri. Niisuguste lampide valgus desinfitseerib haiglaruume, toiduaineladusid, veevärgivett jne. Ta tekitab samuti kunstlikku päevitust, kuid võib ka silma pimestada, kui silm allub pika aja vältel umbes 250-millimikronise lainepikkusega ultravioletsete kiirte toimele.

Nagu on tõestatud, omab inimese silma võrkkest ise küllalt suurt tundlikkust 300 millimikronist (nähtava spektri praktilisest piirist) lähemate lainetega kiirte suhtes, kuid osutub, et need kiired ei pääse peaaegu üldse võrkkestani selle tõttu, et silmalääts neelab neid äärmiselt tugevasti. Silmalääts mitte ainult annab võrkkestale kujutise, vaid on võrkkestale ka valgusefiltriks, kaitstes teda lühikeste lainetega kiirte eest, alates lainepikkusest umbes 400 m μ . Märgatavalt tõkestades siniseid ja violetseid kiiri, aitab silmalääts sellega ühtlasi vähendada silmas kroonilist aberratsiooni, mis muudab kujutise ääred värviliseks.

Esitatud põhjused annavad täieliku bioloogilise seletuse valguse nähtavuse praktilisele lakkamisele lähemate lainete pool (lainepikkusel umbes 400 m μ).

Läheme üle nähtavuse teisele piirile, mis asub pikemate lainete pool. Miks lakkab silm nägemast infrapunaste kiirte piirkonnas? Ka siin võib osutada kahele väga kaaluvale põhjusele. Kujutleme, et silmad muutuvad niisama tundlikeks infrapunaste kiirte suhtes, kui nad on seda roheliste kiirte suhtes. Inimesega toimuks siis midagi raskesti ettekujutatavat. Kõik soojendatud kehad, nagu me rääkisime, kiirgavad valgust; vähe soojendatud kehadel on

kogu kiirgus koondunud spektri infrapunasesse ossa. Inimese keha ja ühtlasi ka silmakoopa temperatuur on umbes 37° . Soojuskiirguse seaduste põhjal võib arvutada (vt. lk. 54), et inimese keha kiirguse maksimum vastab lainepikkusele 9—10 μ , kuna pinna ühelt ruutsentimeetrilt sekundis kiiratud energia võrdub ligikaudu 0,012 kaloriga. Seda energiat saadavad endastmõistetavalt välja ka silma siseseinad; silma sisemus kiirgab infrapunast valgust. Seejuures neelab pind silmakoopa sisemuses niisama palju valgust, kui ta seda kiirgab. Silma üldine sisepind moodustab umbes 17 cm^2 . Korrutades 0,012 17-ga, saame 0,2 kalorit, s. o. silma poolt neelatava sisemise nähtamatu omavalguse üldenergia. Kujutleme nüüd hetkeks, et nähtamatu infrapunane valgus saab niisama nähtavaks kui roheline valgus. Üks «roheline küünal» kiirgab ühele ruutsentimeetrile ühe meetri kauguselt sekundis umbes 38 miljardikku kalorit; 0,2 kalorit on võrdne 5 miljoni küünlaga. Silma valgustaks seestpoolt miljonite küünalde tugevune valgus. Selle sisemise valguse kõrval tuhmuksid Päike ja kõik ümbritsevad esemed. Inimene näeks ainult oma silma sisemust ja mitte midagi muud, kuid see oleks võrdne pimedaksjäämisega.

Seetõttu on täiesti otstarbekohane, et silm ei näe pikade lainetega infrapunaseid kiiri.

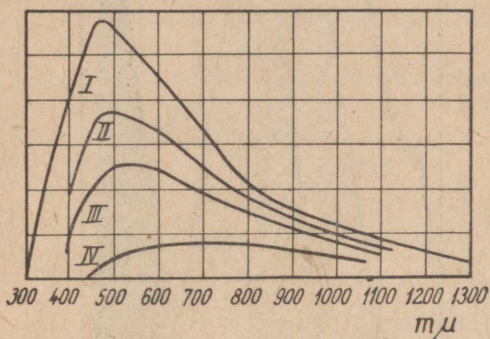
Miks puudub aga nägemine väiksemate lainepikkustega infrapunaste kiirte piirkonnas, näiteks lainepikkuste vahemikus 1—5 μ ? Selle põhjus peitub ilmselt nägemise mehhanismis endas. See mehhanism on senini tundmatu, kuid igal juhul võib kinnitada, et nägemine peab algama kas valguse keemiliste või fotoelektriliste (elektronide väljarebimine molekulidest) toimetega. Nii fotokeemiliste kui ka fotoelektriliste protsesside kulgemine aga nõuab energiat, mis ei või olla väiksem teatavast minimaalväärtusest, sest vastasel korral on võimatu molekuli lõhkuda või temast elektroni välja rebida.

Tänapäeval tuntakse mitmeid fotoelektrilisi protsesse (eriti elektrijuhtivuse suurenemist valgustamisel), mis võimaliku tundlikkuse mõttes ulatuvad väga kaugemale infrapunasesse piirkonda, küündides lainepikkusteni 5—6 μ . Tundlikkuse suurus on aga seejuures siiski äärmiselt tühine. Täpselt samuti pole ka fotoplaadid nende lainepiirkondade suhtes tundlikud.

Käsitletud põhjused, mis on määratud ühest küljest

päikesevalguse omadustega ja teisest küljest valguse poolt ainele avaldatava toime iseärasustega, selgitavad piisavalt, miks silm näeb ainult kitsast spektriosa, mis asub lainepikkuste piirkonnas umbes $0,4-0,7 \mu$.

Leidub aga veel teine väga tähtis Päikesest sõltuv tegur, mis tingib just sellist nähtavuspiirkonna «looduslikku valikut». Pöördume tagasi energia jaotuse vaatlemisele päikesevalguse spektris. Maakera pinnal elutseva olendi



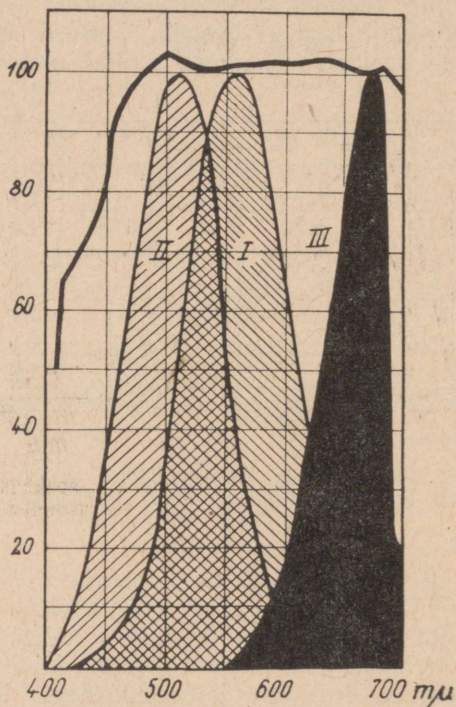
Joon. 53. Energia jaotus Päikese spektris tema erinevate kõrguste puhul horisondist.

jaoks ei ole see jaotus kaugeltki konstantne. Ta muutub järsult seoses Päikese asendiga taevavõlvil. Sõltuvalt Päikese erinevatest kõrgustest horisondi kohal tuleb tema kiirtel läbida erineva paksusega atmosfäärikihte, mis hajutavad ja neelavad erinevate lainepikkustega kiiri erinevalt. Sellele vihjasime juba Päikest käsitlevas peatükis. Joonisel 53 on kujutatud päikesevalguse energia jaotuse silutud (fraunhoferi joonteta) kõverad: I — väljaspool atmosfääri; II — Päikese pea kohal olles; III — Päikese kõrgusel horisondist 30° ; IV — tõusule ja loojangule lähedastel tingimustel, 10° horisondi kohal. Joonisel 54 on esitatud Päikese keskpäevase energia jaotuse aasta keskmine kõver (ülemine kõver). Silmale on endastmõistetavalt tähtis just selline keskmine kõver.

Kõverast ilmneb, et «keskmise» Päikese energia on piirkonnas $450-650 \mu$ jaotatud peaaegu ühtlaselt, kuid kahaneb järsult lühemate ja pikemate lainete suunas. Teisiti öeldes — joonisel 54 viirutatud pindalaga I tähistatud

nähtavuskõver asub keskmise päikesevalguse jaotuskõvera soodsaima osa kohal.

Kui silma ülesandeks oleks ainult valgusenergia võimalikult ökonoomsem tajumine, siis oleks ülesande parimaks



Joon. 54. Keskpäevase Päikese energia jaotuse aasta keskmine kõver keskmiste lauskraadide jaoks (ülemine kõver). I — päevane nähtavuskõver; II — hämariku nähtavuskõver; III — klorofüllil neelamiskõver.

lahenduseks muidugi ühtlane tundlikkus kogu vahemikus 0,4—0,7 μ .

Niisugune kaalutlus tähendab aga liiga lihtsustatud ja jämedat lähenemist sellele küsimusele. Bioloogiliselt on oluline mitte silma absoluutne tundlikkus ühtede või teiste valguslainete suhtes, vaid oskus valgustatud esemeid või-

malikult paremini eristada. Nägemine tähendab bioloogilises mõttes mitte lihtsalt nägemisaistingu saamist, vaid oskust eristada ümbruskonna üksikasju. Nähtavuskõvera kitsus ja järskus nõrgendab tunduval määral kromaatilise aberratsiooni mõju, mistõttu kasvab võrkkestal tekkiva kujutise selgus. Sellele aitavad kaasa ka erinevused mitmesuguste kehade võimes peegeldada erinevate lainepikkustega kiiri. Seejuures on äärmiselt tähtis, et mitmesuguste ümbritsevate esemete värvuse heleduse kontrasti teravus suureneb väga tugevasti selle tagajärjel, et nähtavuskõver ei ole lauge, vaid omab teravat maksimumi ja langeb järsult spektri mõlemas suunas. Just seetõttu eraldab silm ümbritseva maailma esemeid teravalt üksteisest.

Pöördume tagasi selle juurde, millest oli juttu valgust käsitlevas peatükis — Newtoni interferentsirõngaste juurde. Osutub, et kui me hakkaksime läätse ja klaasi poolt peegeldatud energiat mõõtma seadmega, mis on ühtlaselt tundlik igasuguste lainete suhtes (selliseks seadmeks on termoelement), siis ei märkaks me üldse Newtoni rõngaid! Ainult seetõttu, et nähtavuskõver kujutab endast küllalt kitsast, terava maksimumiga kõverat, näeb silm neid rõngaid hästi. Kui silma tundlikkuse kõver oleks väga lai, siis ei näeks me väga paljut sellest, mis meid ümbritseb.

Tuleb märkida, et päevase nägemise puhul langeb nähtavuskõver peaaegu ühte roheliste taimede poolt peegeldatava ja hajutatava päikesevalguse energia keskmise jaotuskõveraga. See asjaolu on muidugi väga soodne olendile, kes elab taimede keskel ning tunduval määral toitub neist.

Meie ees on näide silma õnnestunud kohandumisest reaalistele elutingimustele Maal ning tõend silma ja Päikesetõelise suguluse kohta.

Väga väikeste valgustustugevuste korral muutub nähtavuskõver küllalt järsult. Joonistel 52 ja 54 on vasakul esitatud nähtavuskõver nõrkade valgustuste jaoks; me märkame, et ta on heledate valgustuste kõveraga võrreldes tunduvalt spektri sinisesse piirkonda nihutatud. Füsioloogid annavad sellele hämarikus nägemise iseärasusele järgmise seletuse. Võrkkestas, nagu me nägime, esineb kaht liiki valgustundlikke elemente — kolvikesi ja kepi-kesi. Päevases nägemises etendavad peaosa kolvikesed,

kuid nende tundlikkus on väike ning valguse nõrgenemisel nad lakkavad tegutsemast ja asemele astuvad kepikesed, millede puhul nähtavuskõver on teistsugune. Sellelt seisukohalt vastab kõver *I* joonisel 54 «päevastele» kolvi-kestele, kõver *II* aga «öistele» kepikesetele.

Kui päevane nähtavuskõver on silma kohanemise tulemuseks atmosfääri, roheluse jm. poolt hajutatud päikesevalgusele, siis võiks pidada õigustatuks ootust, et «öine» kõver on kohandatud öötaevale. Öötaeva (kui temas puudub otsesest päikesevalgust hajutav Kuu) helendus koosneb tähtede valgusest, tühisest hulgast hajunud päikesekiirtest, mis isegi südaööl teatud määral atmosfääri tungivad, ja lõpuks taeva omahelendusest, mis moodustab tunduva osa üldisest helendusest. Seda taeva omahelendust seletatakse hapniku- ja lämmastikuaatomite kiirgamisega ülemistes atmosfäärikihtides. Taeva öise helenduse spekter kujutab endast joonspektrit, milles eriti hele on roheline joon lainepikkusega 558 $m\mu$. Taeva omahelendus saavutab maksimumi kesköö paiku. Küsimus «öise» nähtavuskõvera kohandatusest öötaevale on aga seni lõplikult lahendamata jäänud. Tähtedelt pärineva ning taeva helendusest tingitud valguse energia summaarset jaotust ei ole veel piisavalt mõõdetud. P. P. Feofilovi poolt 1941. aasta talvel teostatud katsete põhjal osutus öötaeva kiirguse energia summaarne jaotus ekvivalentseks 4000°-se temperatuuriga musta keha kiirguse omaga, s. t. see kiirgus ei olnud sinine, nagu oodati, vaid punane. Neid mõõtmisi ei saa siiski lugeda üldkehtivateks ning neid tuleb korrata, laiendada neid maakeri eri kohtadele ning eri aastaaegadele. Peale selle on oluline veel kord rõhutada, et rasketes öistes tingimustes on silmale veel tähtsam kui päevastes tingimustes mitte nägemisaisting ise, vaid võimalus eristada ümbritsevaid esemeid. Neid küsimusi on veel väga vähe uuritud. Ei tohiks arvata, et öise nägemise kõvera nihkumine lühikeste lainete suunas on juhuslik. Vastavalt elusmaailma kogu arenemiskäigule on loomulik oletada, et öise nähtavuse kõvera mainitud nihkumine soodustab silma eristusvõime suurenemist öistes tingimustes.

Erinevalt silmast, mis peab nägema, peab taimeleht valgusenergiat omastama keemilisteks muundumisteks. See asjaolu leiab väljenduse rohelise taime fotokeemilise tundlikkuse kõvera spektraalses paigutuses. Joonisel 54 on pindalaga *III* tähistatud taime rohelise värvaine — klo-

rofüllil — põhiline neelamiskõver. Selle kõvera maksimum on päevase nähtavuse kõvera suhtes järsult pikkade lainete suunas nihutatud. Kui otstarbekohane on see bioloogiliselt ja miks on antud juhul kasulikumad pikad lained?

Pöördume tagasi fotokeemia põhiseaduse juurde, millest me rääkisime valgust käsitlevas peatükis (lk. 31). Me nägime, et keemilise muundumise toimumiseks peab molekul neelama ühe kvandi $h\nu$. Selle kvandi energia peab muidugi ületama teatava minimaalse väärtuse $h\nu_0$, mis on vajalik keemiliseks lagunemiseks, sest vastasel korral reaktsioon ei toimu. Seetõttu on selge, et infrapunaste kiirte toimel on keemiliste protsesside kulgemine vähe tõenäoline.

Teisest küljest võivad lagunemist esile kutsuda kõik neeldunud kvandid $h\nu$, millede energia ületab suuruse $h\nu_0$. Kui suur aga ka ei oleks kvandi energia, ta neelatakse siiski ainult ühe molekuli poolt ning tema toime on sama-sugune kui kvandil, mille energia on suhteliselt väike, kuid ületab energia $h\nu_0$. Siit selgub, et fotokeemia seisukohalt on taimele kõige kasulikumad väiksema energiaga (mis ületab $h\nu_0$), s. o. suurima lubatava lainepikkusega kvandid.

Kui nüüd võtta arvesse päikesevalguse keskmise jaotuse kõverat, mis on kujutatud joonisel 54 (ülemine kõver), siis on ilmne, et ühtlases piirkonnas 450 ja 650 $m\mu$ vahel on klorofüllil kõverat kõige kasulikum paigutada vahemikku 600—700 $m\mu$, kus ta tegelikult asubki.

Kui fotograafil on tarvis plaadi spektraalse tundlikkuse maksimumi ühest piirkonnast teise üle viia, siis värvib ta valgustundliku kihi mitmesuguste orgaaniliste värvainetega — «sensibilisaatoritega», saades sel viisil fotograafilisi kihte, mis on vastavalt vajadusele eriti tundlikud punaste, kollaste või roheliste kiirte suhtes. Nagu me veendusime, toimub see täpselt samuti ka looduses, kusjuures sensibilisaatoriteks on nägemispurpur ja klorofüll.

Nähtavuskõvera ikujul on tohutu tähtsus valgustustehnikas. Enamikus kunstlikest valgusallikatest kasutatakse kuumutamise tingitud kiirgust (küünlad, petrooleumilambid, hõõglambid jne.); selles kiirguses on ainult osa kiiri nähtavad, kuna ülejäänud lähevad silma jaoks jäljetult kaduma. Kui tõsta musta pinnaga keha temperatuuri, siis lähevad üha suuremad kiirgusenergia annused infrapuna-

sest piirkonnast üle nähtavasse piirkonda ja valgusallikas muutub kasulikumaks. See ei kesta aga lõpmatult nii. Temperatuuri tõstmisel rändab samaaegselt osa kiirgusenergiat nähtamatusse ultravioletsesse piirkonda. Teoreetiliselt on võimalik saavutada temperatuure, millede puhul väga suur osa kiirgusenergiast läheb üle ultravioletsete kiirte ja röntgenikiirte nähtamatusse piirkonda. Tähendab, on olemas mingi silmale sobivaim valgusallika hõõgumistemperatuur. Missugune on see temperatuur?

Tabelis 3 on ära toodud erinevatel temperatuuridel nähtava valgusena avalduva kiirgusenergia protsentuaalsed hulgad.

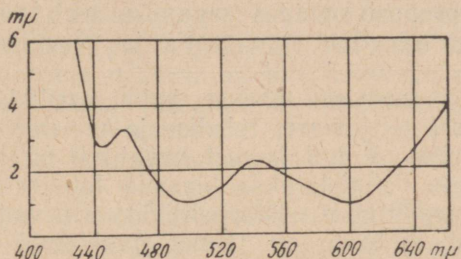
Tabel 3

Absoluutne temperatuur, °K	1500	2000	3000	4000	6000	8000	12000
Nähtava valgusena saadav energia, %	0,0	1,7	14,6	31,8	49,7	47,7	18,6

Me näeme, et sobivaimaks temperatuuriks on 6000°, mille puhul nähtavaks valguseks muundub pool kogu energiast. See on aga Päikese temperatuur! Missugune on siis seos Päikese kiirguse, musta keha ja silma vahel? Kas leitud ühtesattuvus pole juhuslik? Pärast seda, mis me saime teada valgusest, Päikesest ja silmast, pärast seda, kui meile saab kaheldamatuks, et silm on arenenud Päikese olemasolu tõttu, teatud mõttes Päikese jaoks ja Päikese toimel, muutub leitud seos täiesti loomulikuks ja vajalikuks. Nii Päikest kui ka helendavat musta keha vaadeldakse ühe ja sama silmaga. Silm on aga kohanenud Päikesele, mistõttu tema jaoks on ülesande kõige täiuslikumaks lahenduseks kunstliku valgusallika spektri sarnasus Päikese spektriga.

Kuidas aga silm orienteerub valguse spektraalses koostises? Seni me veendusime ainult selles, et silm ei taju üldse suuremat osa spektripiirkondi, ja et nähtavas piirkonnas näivad ühed kiired talle heledamatena, teised nõrgematena. Valime punasele ja sinisele valgusele ligikaudu ühesugused heledused; me näeme, et silm eristab neid sellest hoolimata eksimatult. Peale aistingu tugevuse on silmal järelikult veel teine võimalus valguse spektraalses koostises orienteerumiseks. Päikese spektris eristab silm

seitset vikerkaarevärvust ning varjundeid, millede arv eri vaatlejatel kõigub mõnesaja piirides. Selleks, et täpselt väljendada silma võimet värvusi eristada, võib toimida järgmiselt. Võrdleme pideva spektri kaht naaberpiirkonda ja paneme tähele, mitme millimikroni võrra on võimalik muuta üht võrreldavatest piirkondadest, enne kui silm märkab värvuse erinevust. See suurim lainepikkuste erinevus millimikronites võibki iseloomustada eristusvõimet antud spektripiirkonnas. Joonisel 55 on esitatud silma eristusvõime kõver, mis on saadud sel viisil. Horisontaalteljele on kantud lainepikkused, vertikaalteljele aga laine-



Joon. 55. Silma spektraalse eristusvõime kõver.

pikkuste suurimad võimalikud erinevused, millede puhul silm veel ei märka värvuse erinevust. Kõveral on väga keerukas kuju, kuid ta annab siiski teatava põhjenduse spektri subjektiivsele vikerkaarevärvusteks jaotamisele meie poolt. Kõiki selle kõvera miinimume ja maksimume võib vaadelda omalaadsete piirimärkidena vikerkaarevärvuste vahel. Seega asub umbes 445 $m\mu$ juures piir violetse ja sinise värvuse vahel, 460 $m\mu$ juures piir sinise ja helesinise vahel, 500 $m\mu$ juures helesinise ja rohelise vahel, 540 $m\mu$ juures rohelise ja kollase vahel, 600 $m\mu$ juures kollase ja oranži vahel. Kaugemal punases piirkonnas mõõtmisi ei ole teostatud.

Värvuste eristamise võimet omavad ainult kolvikesed; hämarikus nägemisel, mis toimub kepikeste abil, kaovad spektrivärvused ja kõik näib valkjashallina. Kolvikeste puudumise tõttu öökullide, öösel teotsevate hiirte ja kalade silmade võrkkestades võib arvata, et neil puudub värviline nägemine. Maailm näib neile ühevärvilise fotona — musta

ja valge kombinatsioonina. Inimese silmal on kaks erinevat valgustundlikku aparaati. Üks sarnaneb värvilise fotograafiaga, on vähetundlik ja teda kasutatakse päeval, kuna teine, hämarikus või öösel kasutatav, on võrreldav ühevärvilise, kuid see-eest väga tundliku hariliku fotograafiaga.

Silma võime värvusi eristada ei suuda muide võistelda spektraalanalüüsiga. Kui valgus on ruumiliselt lagundatud lihtkiirteks, siis eristab silm kiiri värvuse erinevuste põhjal küllalt teravalt, kuid teda on kerge petta. Mistahes puhast spektrivärvust saab reprodutseerida kolme teise lihtvärvuse, näiteks punase, roheline ja violetse, erinevates proportsioonides segamise teel. Sellel põhinevad lihtsaim värviline fotograafia ja värviline kinematograafia.

Värvilisest esemest tehakse kolm harilikku ülesvõtet läbi värviliste — punase, roheline ja violetse — klaaside (valgusefiltrite). Kõigil kolmel negatiivil on harilik välimus; nendest valmistatakse klaasile fotograafilised äratõmbed (diapositiivid). Diapositiivid erinevad üksteisest selle poolest, et ühele on toimet avaldanud esmajoones punased kiired, teisele roheline, kolmandale violetse; seetõttu on valguse ja varju jaotus nendel erinev. Diapositiivid värvitakse selliselt, et iga diapositiivi värvus vastab selle klaasi värvusele, mille läbi ta on saadud. Kui nüüd suunata kolme projektsioonilaterna valgusvihud ühte ekraani punkti ning paigutada laternatesse värvilised diapositiivid, siis kattuvad punane, roheline ja violetne kujutis üksteisega, mille tulemusena ekraanile ilmub pildistatud ese kõigis oma loomulikes värvides. Kolmest värvusest saadakse kõik ülejäänud. Kui osa pildistatavast esemest oli näiteks valge, siis pääsesid sellest osast tulevad kiired aparaati läbi kõigi kolme klaasi. Seetõttu asetuvad värvuste liitumisel ekraani vastavas kohas üksteise peale punane, roheline ja violetne värvus, andes koos silmale valge värvuse. Kui osa esemest oli kollane, siis läbisid sellest osast lähtunud kiired punase ja roheline klaasi, kuid ei läbinud sinist klaasi; sinisele diapositiivile tekib sellesse kohta must laik, mis ei lase valgust läbi. Selle tulemusena satuvad ekraanile ainult punane ja roheline valgus, mis koos loovad silmale mulje kollasest värvusest, jne. Kaasaegne värviline fotograafia on oma tehnikalt palju keerukam kirjeldatud lihtsast võttest, kuid kõi-

gis nõndanimetatud «aditiivsetes» meetodites esineb põhiliselt seesama printsiip.¹

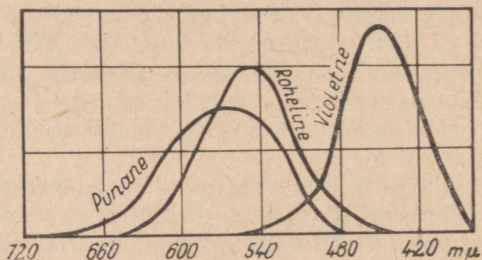
Mistahes spektrivärvuse saamiseks on üldiselt võttes vaja erinevates proportsioonides kolme lihtvärvust. Need samad kolm värvust võivad aga tekitada ka värvusi, mis spektris puuduvad, nagu näiteks valge ja purpur. Kui lihtvärvusega, näiteks punasega, segada valget värvust, siis jääb värvus punaseks, kuid muutub üha lahjendatumaks, vähem küllastatuks. Ühest punasest lihtvärvusest on järelikult võimalik saada lõpmatult mitmekesiseid erineva küllastatusega punaseid värvusi puhtast punasest valgeni. Üldiselt iseloomustavad mistahes värvust silma jaoks kolm tunnust: heledus, värvilisus ja küllastatus. Seega on inimese poolt nähtavate värvuste mitmekesisus lõpmatult suurem nähtava spektri värvuste arvust. Silm on sellelt seisukohalt valguse spektraalanalüüsiks väga sobiv aparaat.

Sõjaasjanduses kasutatakse kahurite, kaevikute jm. moondamiseks vaenlase silmade eest pinnase, rohu jne. värvust. Vaatamata moondatud esemelt ja ümbritsevalt foonilt peegeldunud valguse tunduvale spektraalsele erinevusele võib inimsilm kergesti eksitusse sattuda; ainult spektroskoop on suuteline pettust paljastama. Loomariigis on maskeerumine, loomade kohandumine maastiku värvusele äärmiselt levinud; paljudel putukatel on lehtede ja rohu roheline värvus, jäneseid vahetavad karva, kohandudes talvel valgele lumikattele ja suvel pinnase hallikaspruunile toonile, jne. Eriti tähelepanuväärne on asjaolu, et väga sageli sarnaneb maskeerunud looma värvus ümbruskonna omaga mitte ainult näiliselt, silma jaoks, vaid langeb sellega ühte ka spektraalselt koostiselt. See täiuslik kaitse tekitab arvamust, et mõningad loomad, kelle kui vaenlaste

¹ Värviline fotograafia annab õigesti edasi ainult «päevase» silma muljeid. Nõrga valguse, näiteks öise kuuvalguse puhul muutub esemete värvus meie jaoks oluliselt teistsuguseks selle tagajärjel, et hämarikus nägemise kõver on nihutatud lühikeste lainete suunas, ja peale selle seetõttu, et hämarikus nägemisel kaob värvide tajumine. Meile näib näiteks, et Kuu ise saadab välja rohekat valgust, hoolimata sellest, et energia jaotus kuuvalguse spektris on peaaegu samsugune kui Päikese puhul. Kui väga suure valgusjõuga fotokaamera abil valmistaksime harilike meetoditega värvilise ülesvõtte Kuu poolt valgustatud maastikust, siis saaksime tõenäoliselt tavalise pildi hariliku päevase koloriidiga, samal ajal kui tegelik nägemispilt on hoopis teistsugune.

pilgu eest need loomad maskeeruvad, omavad võib-olla kvaliteedilt veidi paremaid silmi kui inimene.

Silma kui spektroskoobi ebatäiuslikkus on täiesti mõistetav. Füüsikul õnnestub liitvalgust lihtvalgusteks lagundada ainult tema koostisse kuuluvate lihtkiirte ruumilise lahutamise teel, kasutades selleks prismaid ja teisi seadmeid.¹ Kiirte ruumilise lahutamisetä on valguse spektraalset koostist võimalik hinnata ainult väga ligikaudselt, erilise toime järgi, mida üksikud spektripiirkonnad ainele avaldavad. Punased kiired näiteks avaldavad fotoplaadile



Joon. 56. Kolme «põhiärrituse» kõverad.

tugevat toimet, sinised nõrka. Tekitab tõepoolest häämmastust, et iga lihtvärvus kutsub energiast sõltumatult silmas esile oma erilise toime, kuigi puudub igasugune kiirte ruumiline jaotumine. Meie kunstlikes aparatuurides on sobivat energiat valides alati võimalik imiteerida ühtede kiirte toimet teiste omaga, kui ainult uuritakse pidevaid spekt-

¹ Lihtsaimat spektroskoopi oleks võimalik konstrueerida järgmiselt. Joonistame valgele paberile vikerkaarevärvilise spektri, kasutades selleks värve, mis hajutavad ainult väga kitsast lainepikkuste piirkonda, neelates kõiki ülejäänud lainepikkusi. Olgu öeldud, et selliseid värve on väga raske valmistada. Kui mainitud viisil joonistatud vikerkaarevärvilist riba valgustada näiteks elavhõbelambi valgusega, siis näeme paberil elavhõbeda spektri ligikaudset kujutist. Elavhõbeda kollast joont hajutab ainult joonistatud riba kollane piirkond, rohelist — roheline, sinist — sinine, jne. Elavhõbelambi valgus lagundub spektriks. Selline spektroskoop jääb muidugi alati väga jämedatoimeliseks, kuid tema eelis seisab selles, et tema puhul pole vaja mingisuguseid pilusid ega prismaid. Joonistatud spektri asemel võib muidugi valmistada komplekti kitsaid läbipaistvaid värvilisi kelmeid, mis koos moodustavad spektri. Valgusallika valgus, mis on juhitud läbi sellise spektraalse kelmekomplekti, annab ekraanil ligikaudse spektri.

reid. Kuidas on silma võrkkest nii suure täiuslikkuse saavutanud, seda me seni veel usaldusväärset ei tea. Oletatakse, et võrkkestas leidub kolme eri liiki valgustundlikke elemente, kusjuures igal liigil on oma eriline lai ärritusriba (joon. 56). Kui võrkkestale langeb näiteks punane valgus, siis mõjutab see kõiki kolme elementi ja kõik nad neelavad punast valgust, kuid erineval määral. Silm tajub seda erinevust, millega kaasnebki punase värvuse aisting. Roheline valgus ärritab samuti kõiki kolme elementi, kuid teistes vahelkordades kui punane valgus, jne. Kõigi kolme elemendi ärrituste summa aisting vastab langeva valguse heledusele, kolme erineva elemendi ärrituste suhete aisting aga värvusele. Kui järele jääks ainult üks element, siis poleks mõtet rääkida suhetest ning puuduks värvuse aisting, kuigi heleduse mulje jääks endiseks. Selline kujutus seletab hästi võimalust koostada mistahes värvust kolmest teisest värvusest, värvusepimeduse (daltonismi) juhtumeid, kus silm kaotab mõningates spektripiirkondades värvilisuse aistingut, jne. Seni ei ole see teooria aga veel leidnud laitmatut anatoomilist kinnitust.

Värviline nägemine tõstab väga tunduvalt visuaalse tajumise kvaliteeti. Ta annab võimaluse esemeid väga kiiresti ja uuel viisil eristada. Kujutleme, et värvusetaju puudub ja me otsustame esemete erinevuse üle nagu harilikult foto puhul ainult hajutatava valguse hulga järgi. Kaks fotomeetriliselt võrdset pinda, näiteks kollane ja roheline, näiksid seejuures eristamatutena ning pilt ümbritsevast maailmast vaesestuks kohe üksikasjade poolest. Peale selle tajutakse värvuse erinevusi äärmiselt kiiresti, kuna heleduse väikeste erinevuste kindlakstegemine (eriti üksteisest kaugel asuvate esemete puhul) nõuab pikka aega ja isegi kvantitatiivseid mõõtmisi. Värvusetaju puhtkunstilest elemendist me ei hakkagi rääkima.

Värvusetaju selliste tohutute eeliste tõttu on värvilisust kasulik üle kanda isegi niisugustesse valdkondadesse, kus ta juba iseendast näib olevat välja lülitatud, nagu see näiteks on esemete uurimisel nähtamatutes ultravioletsetes või infrapunastes kiirtes. See on tegelikult täiesti võimalik, nagu seda mikroskoopia tõestas J. M. Brumberg.

Oletame, et fotografeerime mikroskoobi all mingit preparaati ultravioletsetes kiirtes. Teeme kolm ülesvõtet erinevate lainepikkuste juures, hoolitsedes selle eest, et kõigi ülesvõtete mõõtkava oleks ühesugune. Kolme erineva lai-

nepikkusega ultravioletsete kiirte abil saadud fotod on üldiselt erinevad, sest erinevad lained neelduvad tugevamalt või nõrgemalt. Toimime nüüd kolme saadud «musta» fotoga täpselt samuti nagu värvilise fotograafia puhul (lk. 116). Projekteerime nad laternate abil läbi erinevate värvustega — näiteks punase, rohelise ja violetse — klaaside ühele ja samale ekraanile ning viime kõik kolm kujutist ühtimiseni. Me saame värvilise foto nähtamatutes kiirtes pildistatud objektist. Antud juhul on muidugi tegemist kunstliku fotoga. Võib kasutada erinevaid värvilisi klaase ning saada erinevaid värvilisi fotosid. Niisugustel kunstlikel värvilistel fotodel nähtamatutes kiirtes pildistatud objektidest on väga suuri praktilisi eeliseid. Nad võimaldavad esemes kiiresti avastada varem varjatuks jäänud detaile ja läbi viia kvalitatiivset keemilist analüüsi.

Seda meetodit on muidugi võimalik mikroskoopiast üle kanda nähtamatutes kiirtes fotografeerimise kõikidele liikidele. Eksperimenteerija matkib seejuures õigesti loodust, milles eksisteerib see imeline visuaalse tajumise viis.

Meie küllaltki ekslev rännak mööda mitmesuguseid teaduse valdkondi on lõppenud. Peamiselt füüsika, astronoomia ja bioloogia kaasabil hakkasime lõpuks mõistma silma ja Päikese vaieldamatu suguluse tõelist loomust.

Nende seos on peaaegu samasugune kui seos fotoaparaadi ja valgusallika vahel, mille kiirtes tehakse ülesvõte. Enamikul juhtudel ei pildistata muidugi valgusallikat, vaid tema poolt valgustatavat eset, kuid eset on võimalik pildistada ainult seetõttu, et ta hajutab valgusallikast lähtuvaid kiiri, mistõttu aparaat peab olema kohandatud nendele kiirtele. Tema objektiiv peab neid läbi laskma ja andma nendes õige kujutise; fotoplaat peab omama vajalikku spektripiirkonnas hea tundlikkuse; aparaat peab olema varustatud diafraggaga, mis võimaldab kohandumist erinevatele valgustustingimustele. Sõltuvalt valgustustugevusest tuleb kasutada erineva tundlikkusega plaate. Kõik see kehtib silma kohta, mis on kohandunud Päikesele kui valgusallikale. Silmalääts laseb päikesekiired, mis ei ole organismile kahjulikud, võrkkestale ning annab päikesevalguse lainepikkustel hea kujutise. Silma võrkkest on väga tundlik, kuid päevastes tingimustes see tundlikkus kahaneb, kasvades uuesti öistes tingimustes. Silm on varustatud diafraggaga, mille ava automaatselt (sõltuvalt

valgustustugevusest) laiades piirides muutub. Silma spektraalne tundlikkus langeb ühte Päikese energia spektraalkõvera maksimumiga.

Kõik see on tingitud silma kohanemisest valgusele, mida Päike Maale saadab.

Silma ei saa mõista Päikest tundmata. Vastupidi — Päikese omaduste järgi on üldjoontes võimalik teoreetiliselt tuletada silma iseärasusi sellistena, nagu nad peavad olema, neid enne tundmata.

Seetõttu ongi silm poeedi sõnade järgi päikeseline.

SISUKORD

Sissejuhatus	3
Valgus	15
Päike	47
Silm	77

Toimetaja R. Mägi
Tehniline toimetaja I. Vahtre
Korrektorid E. Valdna ja E. Kask

Ladumisele antud 20. VIII 1954.
Trükkimisele antud 30. XI 1954.
Trükiarv 7000. Paber 54×84^{1/16}.
Trükipoognaid 7,75. Formaadile
60×92 kohaldatud trükipoognaid
6,35. Arvutuspoognaid 6,36.
MB-20874. Trükikoda «Tartu
Kommunist», Tartu, Ülikooli
17/19. Tellimise nr. 2202.

На эстонском языке.

Hind rbl. 1.90

Rbl. 1.90

A

16558

24584

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00498144 7