

POPULAARTEADUSLIK
SARI

A. Kitaigorodski

KRISTALLID



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

2/19061

A-16558

Prof. A. I. KITAIGORODSKI

KRISTALLID



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1952

Originaali tiitel:

Научно-популярная библиотека

Проф. А. И. Китайгородский

КРИСТАЛЛЫ

Государственное Издательство
Технико-Теоретической Литературы
Москва 1950 Ленинград

Tõlkinud H. Erisild

2

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
19061



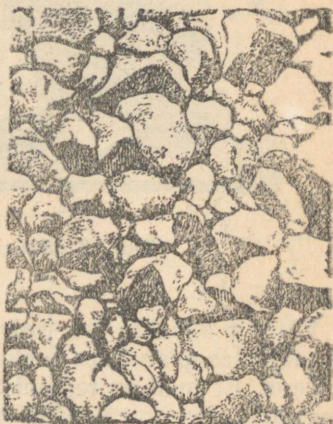
SISSEJUHATUS

Kristallid... need on ju ilusad haruldased kivid. Nad on mitmesuguse värvusega, enamikus läbipaistvad ja — mis on nende juures kõige tähelepanuväärsem — ilusa korrapärase kujuga. Tavaliselt kujutavad kristallid endast hulktahukaid, mille küljed (tahud) on ideaalselt tasased ja servad täiesti sirged. Kogutuna mineraloogiamuuseumi, rõõmustavad nad silma haruldase valgusemänguga tahkudel, ehituse imetlusväärse korrapärasusega...

Kõik öeldu on tõesti õige, kuid... kristallid pole sugugi muuseumiharuldused. Kristallid ümbritsevad meid igal pool. Tahked kehad, millest ehitame maju ja valmistame tööpinke, ained, mida kasutame igapäevases elus — peaaegu kõik nad kuuluvad kristallide hulka.

Kui mikroskoobi abil vaadelda tavalist kivi, siis võib näha, et peaaegu iga kivi koosneb väikestest kristallikestest. Näite selle kohta esitab joonis 1; see ei ole munakivisillutis, vaid tugeva suurendusega pildistatud ametüstidesulgum kivi-
mis.

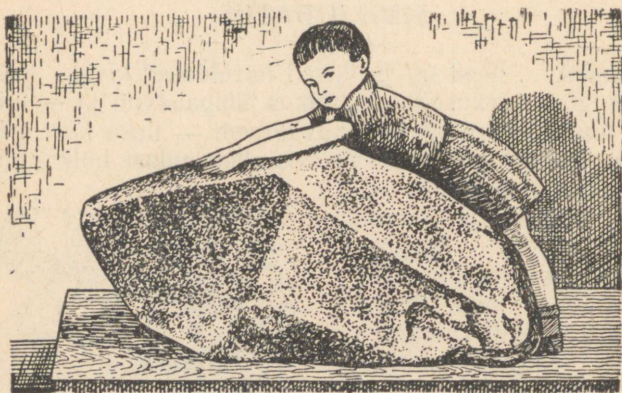
Liiv ja graniit, keedusool ja suhkur, teemant ja smaragd, vask ja raud — kõik need on kristallilised kehad.



Joon. 1. Ametüstidega täitunud õõnsus kivimis (mikroskoobi all).

Looduses leidub niihästi väikesi nõela-, tableti-, püramiidi- ja prismakujulisi kristallikesi kui ka hiiglasuuri, inimesepikkusi kristalle (joonis 2). Mõnikord leitakse üksikuid kristallikesi, teistel juhtudel liituvad kristallikesed keerulisteks põimikuteks, kobarateks.

Kuidas eristame kristalli mittekristallist? Mida on ühist mikroskoobis nähtaval kristallilisel rauateral ja valguses sätendaval teemandil? Me saame teada, et kristalli põhiliseks tunnuseks on ainulaadne kord tema koostisosade paigutuses.



Joon. 2. Mäekristalli suur kristall.

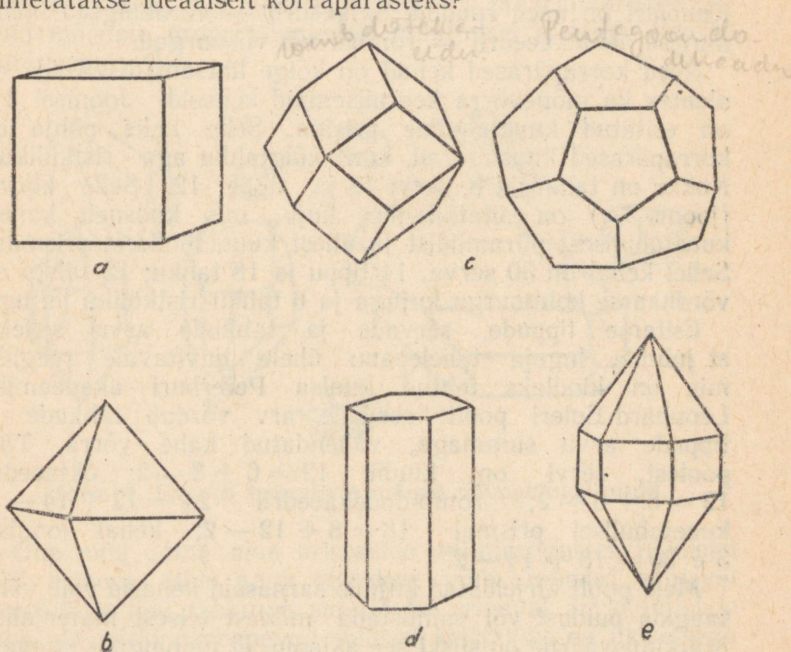
Väliselt avaldub see iseärasus asjaolus, et kristallid on piiratud tasapinnaliste tahkudega, mis lõikuvad sirgete servadena. Et meil on tegemist kristalliga, selles on kerge veenduda siis, kui kristall on suur ja üksik. Mikroskoop ja röntgenikiired abistavad meid üliväikeste kristallide uurimisel.

Ilma selge ettekujutuseta kristallidest on meid ümbritsevate kehade omaduste tundmine võimatu. Sellepärast tuleb kristallidega lähemalt tutvuda. Käesolevas raamatus jutustame sellest, mis on kristallid, kuidas nad on ehitatud, millised omadused neil on ja kus neid kasutatakse. Me selgitame ka, miks on kristallide tundmine vajalik tahkete kehade omadustest arusaamiseks, ja jutustame, mis on ühist terasetüki ja mäekristalli vahel.

I. IDEAALSELT KORRAPÄRASED KUJUD

Joonisel 3 on esitatud mõningad hulktahukad. Nende piirjooned on väga täiuslikud, nagu öeldakse — ideaalselt korrapärased.

Milles seisab esitatud kehade täiuslikkus, mille tõttu neid nimetatakse ideaalselt korrapärasteks?



Joon. 3. Hulktahukad: a — kuup; b — oktaeeder; c — kaks dodekaeedrit — vasakul romb-dodekaeeder, paremal pentagoon-dodekaeeder; d — kuuetahuline prisma; e — prisma koos kahe kuuetahulise püramiidiga.

Joonisel 3 a näidatud hulktahukat nimetatakse k u u b i k s; tal on 6 tahku, 12 serva ja 8 tippu. Joonisel 3 b on näidatud oktaeeder. Sõna „okta“ tähendab kreeka keeles „kaheksa“, lõppliide „eeder“ tähendab „tahk“, nimetus „okta-

eeder" vastab eestikeelsele sõnale „kaheksatahukas“; oktaeedril on 6 tippu ja 12 serva. Joonisel 3 c on kujutatud kaks teineteisest erinevat kaksteisttahukat. Ühte nimetatakse romb-dodekaeedriks (eesliide „romb“ osutab tahu kujule, „dodeka“ tähendab „kaksteist“). Nagu nähtub joonisest, on tema kõigil tahkudel rombi kuju. Lugesdes üle dodekaeedri tippude ja servade arvu, saame vastavalt 14 ja 24. Kõrval on kujutatud pentagoon-dodekaeeder. Sellel on samuti kaksteist tahku, kuid tahud omavad pentagooni — viisnurga kuju („penta“ — viis, „goon“ — nurk).

Seniloetletud kehadel on kõik tahud ühe ning sama kujuga. Kuupidel on need ruudud, oktaeedril — võrdkülgised kolmnurgad, dodekaeedril — rombide või viisnurgad.

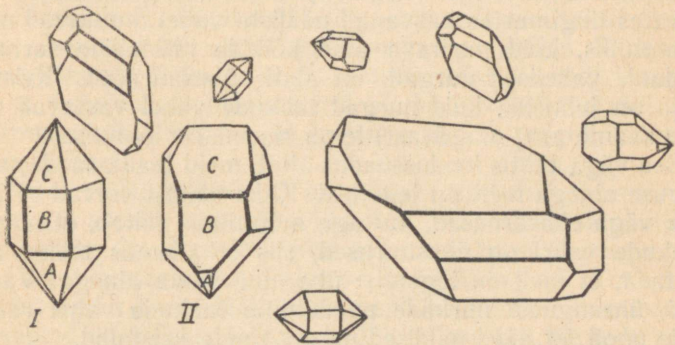
Need korrapärased kehad on kõige lihtsamad. Kuid on olemas ka mõnevõrra keerulisemaid kehasid. Joonisel 3 d on esitatud kuuetahtuline prisma. Selle kaks põhja on korrapärased kuusnurgad, kuus külgtahku aga ristkülikud. Kokku on tahkusi 8, servi 18 ja tippe 12. Selle kõrval (joonis 3 e) on esitatud ilus kuju, mis koosneb kahest kuuetahtulisest püramiidist ja ühest kuuetahtulisest prismast. Sellel kehal on 30 serva, 14 tippu ja 18 tahku; 12 tahku on võrdhaarse kolmnurga kujuga ja 6 tahku ristküliku kujuga.

Esitame tippude, servade ja tahkude arvu selleks, et juhtida lugeja tähelepanu ühele huvitavale reeglile, mis on kindlaks tehtud kuulsa Peterburi akadeemiku Leonhard Euleri poolt: servade arv võrdub tahkude ja tippude arvu summaga, vähendatud kahe võrra. Tõepoolest, servi on kuubil $12 = 6 + 8 - 2$; oktaeedril $12 = 8 + 6 - 2$; romb-dodekaeedril $24 = 12 + 14 - 2$; kuuetahtulisel prismal $18 = 8 + 12 - 2$; kehal joonisel 3 e $30 = 18 + 14 - 2$.

Meie poolt kirjeldatud kujude sarnaseid kehasid võib välja saagida puidust või valmistada mõnest teisest materjalist. Märkimisväärne on siiski see asjaolu, et mõningate ettevootusabinõude korral (millest räägime hiljem, lk. 55) kasvavad kristallid ideaalsete hulktahukatena. Kivisoola võib saada kuupidena. Teemanti leitakse looduses oktaeedrite kujul, graniiti aga romb-dodekaeedrite kujul. Kuid palju sagedamini omavad kristallid mitte lihtsate, vaid keerukate hulktahukate kuju, millel on mitut erinevat liiki tahkusi. Näiteks kvartsi kristallid esinevad päris sageli äsjakirjeldatud kehade (joonis 3 e) kujul kahte liiki tahkudega — ristkülikutega ja kolmnurkadega.

2. KRISTALLID-KAKSIKUD

Vaatleme tähelepanelikult suurt hulka ühe ning sama aine kristalle. Mitte kõik nendest ei ole korrapärase kujuga. Mõned kristallid on lihtsalt killud, teistel on üks või kaks „ebanormaalselt“ arenenud tahku. Kuid rida kristalle näivad meile küllaltki ideaalseina. Võtame need teiste hulgast välja ja joonistame nad üles. Siis näeme, et on olemas kristalle, mis erinevad üksteisest peamiselt suuruse poolest. Kui väikest kristalli proportsionaalselt suurendada, siis osutub ta suure täpseks kordamiseks. Selliste kristallikeste kõrval leiame ka teisi, mis üksteisega teataval määral sarnanevad, kuid mõõdete proportsionaalsel muutmisel ei lange kunagi ühte (joonis 4).



Joon. 4. Kvartsi kristallide mõned võimalikud kujud.

Ühe ning sama aine kristallide mitmesugustel näidistel võib esineda (ehk, nagu öeldakse, võib areneda) erineval arvul ühte liiki tahkusi, samuti ka erineval arvul tahkude liike. Ja siiski sarnanevad sellised kristallikesed üksteisega nagu lähedased sugulased, nagu kaksikud. Milles seisab nende sarnasus? XVII ja XVIII sajandil otsisid paljud teadlased üksteisest eraldi neid sugulusjoni.

Üks nendest teadlastest, kes avastas seda sarnasust selgitava seaduse — nurgade konstantsuse seaduse, oli Mihhail Vassiljevitsš Lomonossov. Uurides kalliskive, leidis ta nende tahkude vahel alati ühe ning sama suurusega nurgad.

Vaadake joonist 4, kus on kujutatud rida kvartsi kristalle.

Kõik need kristallid on lähedased sugulased. Neid võib teha ka päris ühesuguseks, lihvides tahkusid erineva sügavuseni paralleelselt neile endile. On kerge täheldada, et sel viisil võib näiteks kristalli II teha täpselt samasuguseks, nagu on kristall I. See võimalus tuleneb sellest tähelepanuväärsest asjaolust, et neil kristallidel on nurgad sarnaste tahkude, näiteks A ja B, B ja C jne. vahel ühesuurused.

Selles nurkade võrdsuses seisabki kristallide „perekonnasarnasus“. Tahkude lihvimisel paralleelselt neile endile muutub kristalli kuju, kuid nurgad tahkude vahel säilitavad oma suuruse.

Sõltuvalt tervest reast juhuslikkustest võivad kristalli kasvamisel ühed tahud sattuda oma mõõdete suurendamiseks soodsamatesse tingimustesse, teised vähem soodsatesse. Kristall kasvab välja ebakorrapärasena, sugulussuhted erinevates tingimustes kasvanud näidiste vahel muutuvad märkamatuiks, kuid uuritava aine kõikide kristallide sarnaste tahkude vahelised nurgad on alati ühesuurused. Kristalli kuju on juhuslik, kuid nurgad tahkude vahel vastavad (hiljem saame aru, mispärast) tema sisemisele loomusele.

See väga tähtis loodusseadus aitab meid teada saada, misuguse ainega meil on tegemist. Kaks näidist võivad väliselt olla väga ebasarnased, kui aga mõõtmine näitab, et nurgad tahkude vahel on ühesuurused, siis on olemas tõsine alus oletada, et meil on tegemist ühe ning sama ainega. Vastupidi, ühesuguste nurkade puudumine tahkude vahel räägib selle poolt, et need näidised on eri ainete kristallid.

Sellel ideel põhjeneva meetodi ainete analüüsimiseks töötas välja nüüdisaegse kristallograafia (nii nimetatakse teadust kristallide ehitusest ja omadustest) looja, vene teadlane Jevgrafi Stepanovitš Fjodorov.

J. S. Fjodorov mitte ainult osutas võimalusele määrata ainet kristalli kuju järgi, vaid koostas ühes oma õpilastega raamatu „Kristallide riik“, mis oli hiiglasliku, üle 10 aasta kestnud töö viili. See raamat sisaldab nüüdisaegse kristallograafia alused ja andmeid suure arvu kristallide tahkudevaheliste nurkade suuruse kohta.

Aine analüüsimiseks J. S. Fjodorovi meetodi järgi on vajalik väike, kas või liivaterakese suurune kristallike. Sellel kristallil mõõdame spetsiaalsete aparaatide — goniomeetrite abil tahkudevahelised nurgad. Siis, kasutades Fjodorovi poolt väljatöötatud reegleid, määrame, missugusesse ainete rühma kuulub uuritav kristall, ja mõõtmise andmete võrdlemisel

„Kristallide riigis“ toodud arvudega leiame, missuguse ainega meil on tegemist. Mõistagi ei saa analüüsi teostada sel juhul, kui antud ainet pole kunagi uuritud ja tema kohta ei leidu raamatus andmeid.

Analüüs J. S. Fjodorovi meetodi järgi on tööstusele juba palju teeneid osutanud. Näiteks avastati 1938. aastal kristallide määraja abil Uraali kaevandustes tähtsaima tinamaagi — kassiteriidi olemasolu; varem peeti kassiteriidi kristalle eksikombel teise mineraali — rutiili (titaanoksüüdi) kristallideks.

3. MIS ON SÜMMEETRIA

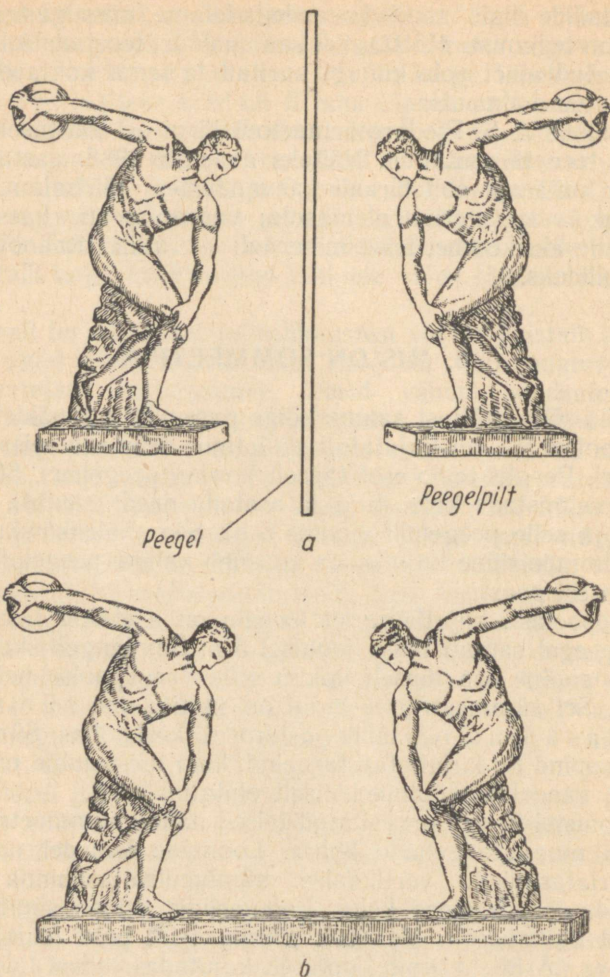
Selle sõna mõttest saame kõige paremini aru näidete abil.

Joonisel 5 a on kujutatud skulptuur; selle ees seisab suur peegel. Peeglis tekib eset täpselt kordav peegeldus. Skulptor võib valmistada kaks kuju ja asetada need samuti, nagu kuju ja selle peegelpilt (joonis 5 b). See „kaksik“-skulptuur on sümmeetriline kuju — ta koosneb kahest peegelpildiliselt sarnasest osast.

Tõepoolest, kujutleme, et ka siin on asetatud tasapinnaline peegel samuti nagu joonisel 5 a. Siis langeb skulptuuri parempoolne osa täpselt kokku selle vasakpoolse peegeldusega. Sel sümmeetrilisel kujul on vertikaalne sümmeetriatasa-pind, mis läbib postamenti keskkohas. Sümmeetriatasapind on kujutletav tasapind, kuid me tajume teda selgesti, vaadeldes sümmeetriliselt ehitatud keha.

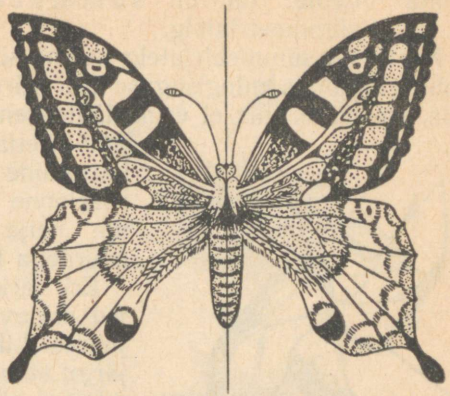
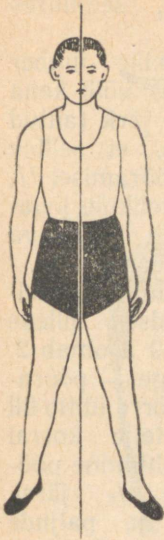
Joonistel 6 ja 7 on esitatud teised näited sümmeetriatasapinda omavate kehade kohta. Loomade kehadel on sümmeetriatasapind, vertikaalse sümmeetriatasapinna võib mõelda läbi inimese keha. Loomariigis esineb sümmeetria ainult ligikaudselt. Ideaalset sümmeetriat pole elus üldse olemas. Arhitekt võib joonisel kujutada kahest ideaalselt sümmeetrilisest poolst koosnevat maja. Kui aga maja on valmis ehitatud (nii hästi kui seda oleks ka tehtud), võib alati leida erinevusi tema kahe teineteisele vastava osa vahel: ühes kohas on pragu, teises ei ole, ühes kohas on värv paksult peale kantud, teises õhukeselt...

Kõige täpsem sümmeetria esineb kristallide maailmas. Kuid ka siin ei ole see ideaalne. Silmale nähtamatute prokeste ja kriimustuste olemasolu teeb võrdsed tahud alati üksteisest natuke erinevaks.

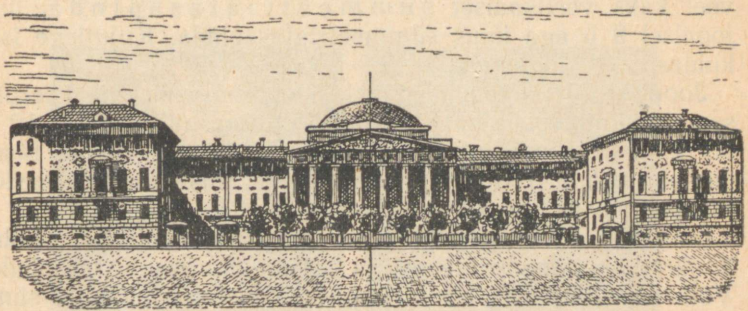


Joon. 5. a — skulptuur ja selle peegelpilt; b — kahest osast koosnev sümmeetriline skulptuur.

Joonisel 8 on toodud laste paberist tuuleveski. See on ka sümmeetriline, kuid sümmeetriatasapinda sellest läbi ei saa mõelda. Milles siis seisab selle kaju sümmeetria? Eelkõige esitame endile küsimuse tuuleveski osade sümmeetriilisuse kohta. Kui palju neid on? Silmanähtavalt neli. Milles



Joon. 6. Inimese ja loomade kehadel on sümmeetria peegeldustasapinnad.

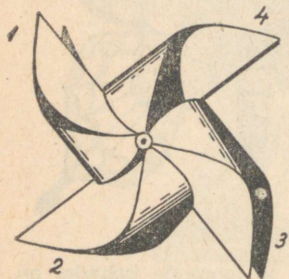


Joon. 7. M. V. Lomonossovi nimelise Moskva Riikliku Ulikooli hooneel on vertikaalne sümmeetriatasapind.

seisab nende ühesuguste osade vastastikuse asetuse korrapärasus? Seda pole samuti raske märgata. Pöörame tuuleveskit täisnurga, s. o. $\frac{1}{4}$ ringjoone võrra; siis asetub tiib 1 kohale, kus oli tiib 2; tiib 2 — kohale 3; 3 — kohale 4 ja 4 — kohale 1. Uus asetuse ei erine eelmisest. Sellise kuju

kohta ütleme: tal on sümmeetriatelg, seejuures 4. järgu sümmeetriatelg.

Niisiis on sümmeetriatelg selline sirgjoon, mille ümber keha ringjoone mingisuguse osa võrra pöörates võib keha viia asendisse, mis ei erine lähteasendist. Telje järk (antud juhul neljas) näitab, et selline kattumine toimub pööramisel $\frac{1}{4}$ ringjoone võrra. Järelikult jõuame nelja üksteisele järgneva pöördega tagasi lähteasendisse.



Joon. 8. Paberist tuuleveskil on 4. järgu sümmeetriatelg.

Eri järkudega sümmeetriateljed esinevad ligikaudselt lillede juures. Lill joonisel 9 a omab 2. järgu sümmeetriatelge — pöörämisel $\frac{1}{2}$ ringjoone võrra ühtib lill iseendaga. 6. järgu telje korral (joonis 9 b) toimub ühtimine pöörämisel täispöörde $\frac{1}{6}$ järel. Öunapuu, pirnipuu ja paljude teiste taimede õitel on 5. järgu sümmeetriatelg.

Peale vertikaalse sümmeetriatelje on õiel joonisel 9 a veel kaks vertikaalset sümmeetriatasapinda, õiel joonisel 9 b aga kuus sümmeetriatasapinda. Kujutlege ise, kuidas need kulgevad.

Joonisel 10 on toodud näiteid looduses esinevate keerulisemate sümmeetriajuhtude kohta. Organismil joonisel 10 a on 4. järgu sümmeetriatelg, perpendikulaarne joonise tasapinnale, neli 2. järgu sümmeetriatelge, mis asetsevad selles tasapinnas, ja rida sümmeetriatasapindu.

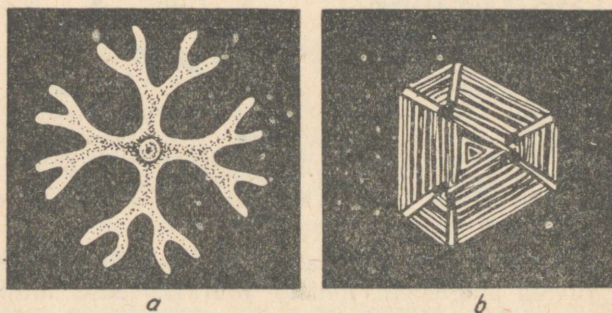
Lumehelbel joonisel 10 b on 3. järgu sümmeetriatelg, kolm 2. järgu sümmeetriatelge ja rida sümmeetriatasapindu. Võib esineda suurel arvul kujusid, mis erinevad oma sümmeetria poolest. (Tähendame, et mõnikord omavad täiesti mittesarnased kehad, näiteks inimene ja liblikas, sarnast sümmeetriat.)¹

Kas leiame kristallide riigis iga tüüpi sümmeetriat? Kogemused näitavad, et ei leia.

¹ Kuju 10 a omab veel nn. sümmeetriakeset, mis langeb kokku organismi keskmega. Sümmeetriakeskmele on iseloomulik see, et mis suunas me ka temast sirge läbi tõmbaksime, kuuluvad sellel joonel keskmest ühesugusel kaugusel olevad punktid alati sarnastele kehaosadele.



Joon. 9. 2. ja 6. järgu sümmeetriateljed õitel.



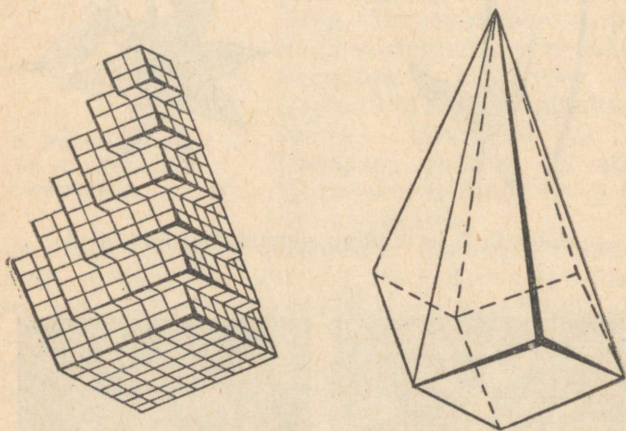
Joon. 10. Looduses esineva keerulisema sümmeetria näited.

Kristallidel leiame ainult 2., 3., 4. ja 6. järgu sümmeetriatelgi. Ja see ei ole juhuslik. Kristallograafid on tõestanud, et see tuleb kristalli võrelisest ehitusest (vt. allpool). Seejärest on kristallide sümmeetria eri liikide ehk, nagu öeldakse, klasside arv suhteliselt väike — nimelt 32.

4. VÄLINE ILU ON SISEMISE KORRAPÄRASUSE TUNNUS

Miks on kristalli kuju nii ilus ja korrapärane? Tema tahud on läikivad ning tasased ja näivad osava lihviija poolt töödelduina. Kristalli üksikud osad kordavad üksteist, moodustades ilusa sümmeetrilise kuju.

See kristalli haruldane korrapärasus oli tuntud juba antiikaja inimestele. Kuid antiikaja teadlaste kujutlused kristallidest erinesid vähe muinasjuttudest ja legendidest, mis olid loodud poetide poolt, kelle fantaasiat kütkestas kristallide ilu. Usuti, et kristallklaas moodustub jääst, teemant aga kris-



Joon. 11. Paremal kristall, vasakul tema ehitus XVIII sajandi teadlaste kujutluse järgi.

tallklaasist. Kristallidele omistati palju saladuslikke omadusi: võimet ravida haigustest, kaitsta mürkide eest, mõjutada inimese saatust. . .

Alles XVII—XVIII sajandil ilmusid esimesed teaduslikud arvamused kristallide loomuse kohta. Kujutluse nendest annab joonis 11, mis on võetud XVIII sajandil ilmunud raamatust. Selle autori arvamuse järgi on kristall ehitatud äärmiselt väikestest, üksteisega tihedalt liidetud „telliskivikestest“. See mõte on kaunis loomulik. Purustame tugeva löögiga kaltsiidi (kaltsiumkarbonaadi) kristalli. Ta puruneb erineva suurusega tükikesteks. Neid tükikesi tähelepaneli-

kult vaadeldes avastame, et nad omavad korrapärast kuju, täiesti sarnast suure kristalli kujuga, millest nad saadi. Arvatavasti mõtles teadlane, et ka edasine kristalli killustamine toimub samal viisil, seni kui jõuame kõige väiksema, silmaga mittenähtava „telliskivikeseni“, mis kujutab endast antud aine kristalli. Need „telliskivikesed“ on nii väikesed, et nendest ehitatud astmelised „trepid“ — kristalli tahud tunduvad meile laitmatult siledatena. Kuid edasi, mida kujutab endast see „viimane“ „telliskivi“? Sellele küsimusele tolle aja teadlane vastata ei saanud.

See kristalli ehituse „telliskivikeste-teooria“ oli teadusele väga kasulik. Ta seletas kristalli sirgete servade ja tahkude tekkimist: kristalli kasvamisel ühed „telliskivikesed“ rivistuvad teiste külge ja tahk kasvab nagu maja sein, mida laovad nähtamatu müürsepa käed. „Telliskivikeste-teooria“ seisukohalt on arusaadav, et kristalli korrapärane kuju on tema sisemiste omaduste väljendus. Suurest kristallist, näiteks kivisoola kristallist, võib lihvida kera. Kristalli tahud ja servad on kadunud, kuid tegelikult on nad olemas, kuigi varjatud kujul. Hakkame kivisoolast kera aeglaselt lahustama. Me näeme, kuidas vastavalt lahustumise määrale kerast moodustub ...kuup, s. t. kuju, mis on omane antud aine kristallile (vt. lk. 51).

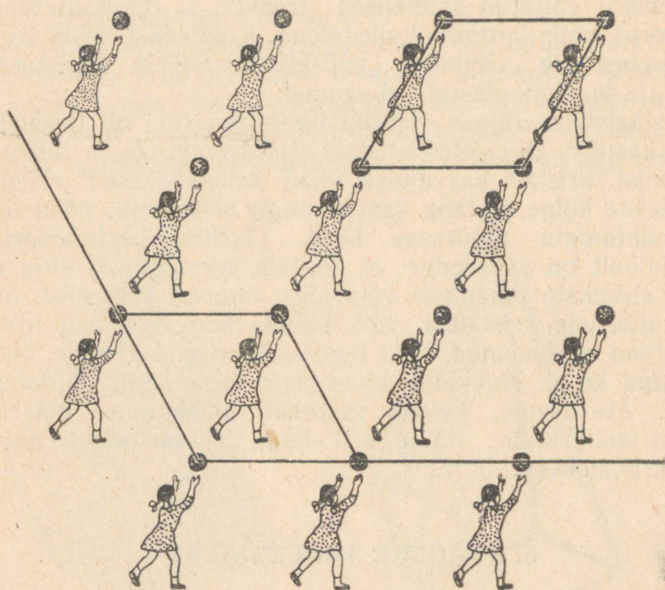
5. RÄÄGIME TAPEETIDEST

Nüüd tahame lugejale anda kaasaegse kujutluse kristalli loomusest. Selleks tuleb meil esialgu rääkida... tapeetidest. Vaadake joonisele 12. Sellel on kujutatud palli mängiv tütarlaps. Ja mitte üks tütarlaps, vaid palju täiesti ühesuguseid kujakesi. Leiame sel tapeedijoonisel kõige väiksema tüki, mille kunstnik peab joonistama, teiste sõnadega, selle tüki, mille lihtsa ümberpaigutamisega võib koostada kogu tapeedi. Et eraldada sellist tükki, tõmbame joonise ükskõik millisest punktist, näiteks palli keskpunktist, kaks joont, mis ühendavad antud palli kahe naaberpalliga. Nagu nähtub meie joonisest, võib nendele joontele ehitada rööpküliku. On täiesti selge, et selle tükikese ümberpaigutamisega põhilähtejoonte suunas võime koostada kogu tapeedi mustri.

Selle kõige väiksema tüki võib valida mitut moodi: jooniselt on kohe näha, et võib valida mitu erinevat rööpkülikut, milledest igaüks sisaldab ühe kuju. Rõhutame, et antud juhul

ei ole meile oluline, kas see kuju on eraldatud tüki sees ter-
vena või on seda tükki piiravate joontega osadeks jaotatud.

Oleks ebaõige oletada, et kui kunstnik on valmis joonis-
tanud tapeedil korduva kuju, võib ta lugeda oma ülesande
lõpetatuks. See oleks nii vaid sel juhul, kui tapeedimustri



Joon. 12. Selle lihtsa tapeedi muster aitab meid aru
saada kristallide võrelisest ehitusest.

koostamise võiks teostada ainult ühel viisil — asetades ühte
kuju sisaldava antud tükikese külge teise samasuguse paral-
leelselt nihutatud tükikese. Kuid peale selle kõige lihtsama
viisi on olemas veel kuusteist viisi tapeetide täitmiseks regu-
laarselt korduva mustriga. Teiste sõnadega, on olemas kokku
17 tüüpi kujukeste vastastikuseid paigutusi tasapinnal. Need
on näidatud joonisel 13*.

Korduva joonisena on siin valitud lihtsam, kuid, samuti
nagu joonisel 12, ilma oma sümmeetriata kujuke.

* See joonis, nagu rida teisigi, on võetud väga huvitavast raa-
matust: А. В. Цубников, «Симметрия», mida soovitame ettevalmis-
tatud lugejale.

Kuid sellest koostatud mustrid on sümmeetrilised ja nende erinevuse määrab kujukeste sümmeetrilise asetuse erinevus.

Me näeme, et näiteks esimesel kolmel juhul ei oma muster sümmeetria peegeldustasapinda — ei saa vertikaalset peeglit asetada nii, et mustri üks osa oleks teise osa peegeldus. Vastupidi, juhtudel 4 ja 5 on olemas sümmeetriatasapinnad. Juhtudel 8 ja 9 võib „üles seada“ kaks vastastikku perpendikulaarset peeglit. Juhul 10 on olemas joonisele perpendikulaarsed 4. järgu teljed, juhul 11 — 3. järgu teljed. Juhtudel 13 ja 15 on olemas 6. järgu teljed, jne.

Meie jooniste sümmeetriatasapinnad ja -teljed ei esine üksikutena, vaid paralleelsete perekondadena. Kui oleme leidnud ühe punkti, millest võib läbi tõmmata sümmeetriatelje (või sümmeetriatasapinna), siis leiame kiiresti ka naabruses oleva ja edasi sama vahemaa järel ka kolmanda, neljanda jne. punkti, milledest lähevad läbi samasugused sümmeetriateljed (või sümmeetriatasapinnad).

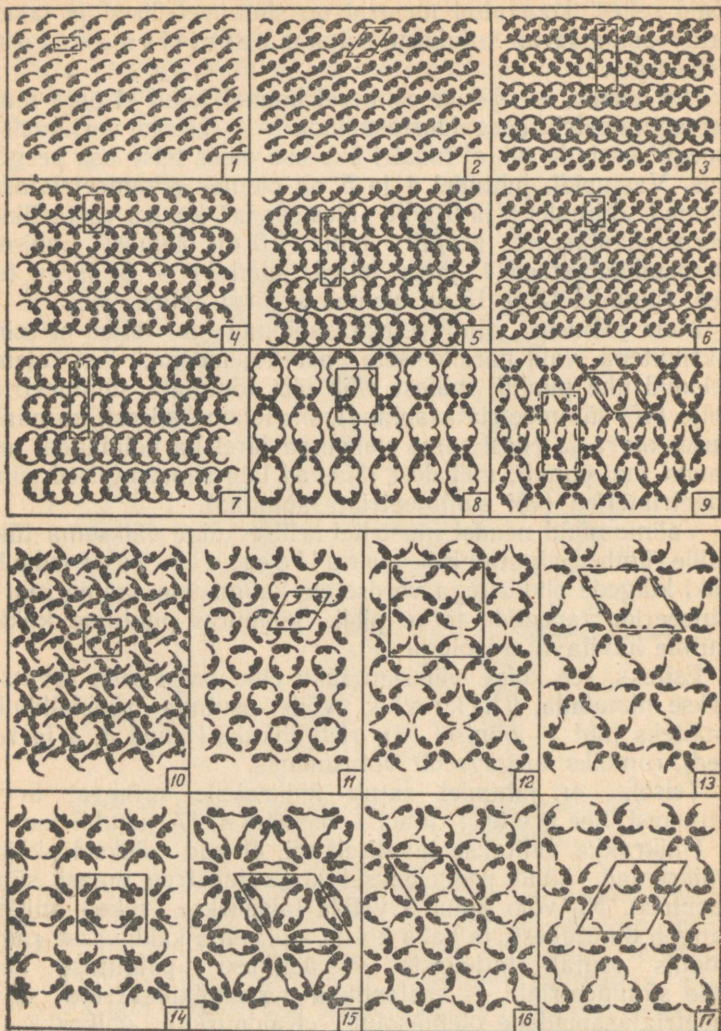
Valime nüüd nendel mustritel sellise kõige väiksema tüki, mille ümberpaigutamisel paralleelselt iseendale tüki külgede pikkustega võrdsetele kaugustele saame reprodutseerida tapeetide terve pildi. Seejuures puutume kokku mitme huvitava asjaoluga.

Esiteks, see kõige väiksem tükk ehk nagu seda tavatsetakse nimetada, ühikrakk võib osutada rööpkülilikuks (näiteks juht 1 joonisel 13), ristkülilikuks (juhud 3, 4 ja teised), rombiks nurgaga 60° või ruuduks.

Teiseks, eri juhtudel satub ühikrakule erineval arvul kujakesi. See arv on 1. juhul 1, 8. juhul 4, 17. juhul 6 jne.

Ühikrakke valitakse tavaliselt nii, et nad oleksid kõige väiksemad, kuid peegeldaksid kogu mustri omast sümmeetriat. Nii võib juhul 9 valida täisnurkse raku, millele langeb 8 kujukest, ja kaks korda väiksema kaldnurkse raku. Joonis osutab kujukeste vastastikuse paigutuse kõrgele sümmeetriale — vastastikku perpendikulaarsete sümmeetriatasapindade olemasolule. Kaldnurkne ühikrakk ei teeks seda kõrget sümmeetriat silmanähtavaks. Sellepärast valitakse siin ja teistel analoogilistel juhtudel ühikrakuks ristkülilik.

Kuid teatav vabadus ühikraku paigutuse valikus on alati olemas. Nii on täiesti ükskõik, kas paigutame raku nurgad kujukeste „peakeste“ või „sabakeste“ kohale või kuhugi nendevahelisele valgele foonile. Juhtudel 14 ja 15 rõhutab

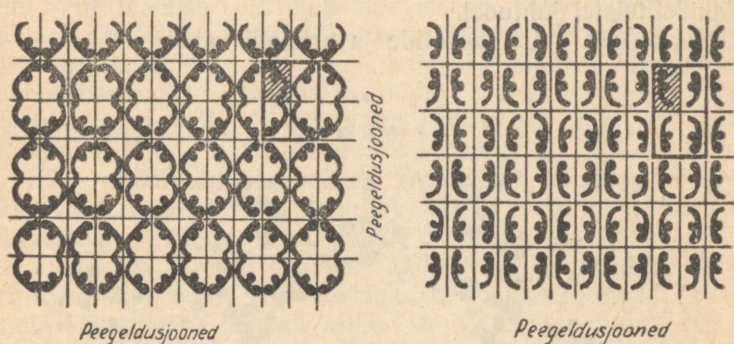


Joon. 13. Tasapinnalise mustri sümmeetria 17 tüüpi; ühikrakud on eraldatud joonega.

raku valik tapeetide sümmeetriat veidi paremini kui, ütleme, juhul 8. Kuid asja sisu see ei muuda ja me võime juhul 8, kui soovime, raku nurgad vabalt ümber paigutada, jättes

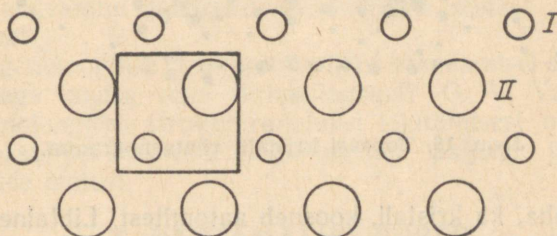
muidugi raku mõõted samadeks ja tema küljed iseendile paralleelseteks.

Ühikraku täitmise viisid üksikute kujukestega on kõikidel juhtudel erinevad. Eelkõige selle poolest erinevadki üks-



Joon. 14. Kaks erinevalt paigutatud kujukest mustris ühesuguse sümmeetriatüübi juures.

teisest näidatud 17 juhtu. Niisiis peab kunstnik, kes kujundab tapeetide korduvat mustrit, peale selle ära näitama, mis-suguse viisi järgi nendest 17-st tuleb konstrueerida muster



Joon. 15. Naatriumi (I) ja kloori (II) aatomite asetuse skeem kivisoola kristalli kuubi tahkudel.

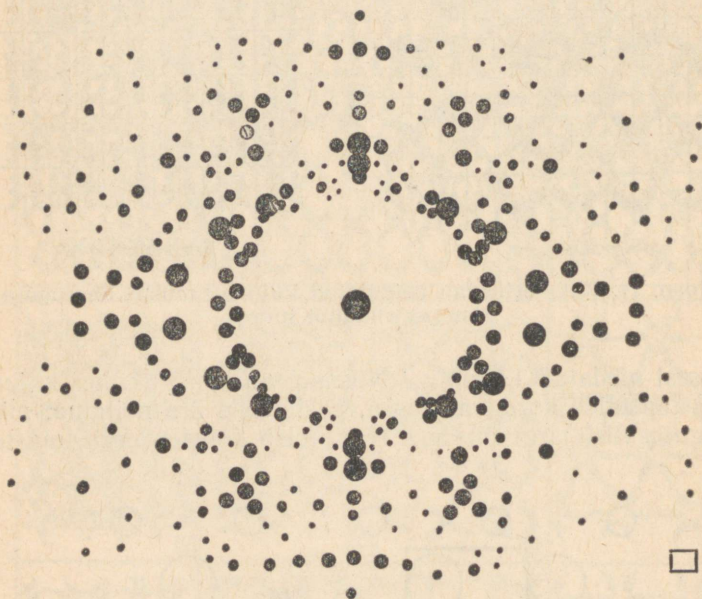
tema joonisest. Näiteks juhul 8 tuleb kujundatud muster paigutada ühikraku viirutatud osasse (ühte veerandisse) ja peegeldada seda kahes „peeglis“ (joonis 14).

Tasapinnalise mustris sümmeetria 17 tüübiga muidugi ei ammendu ühest ja samast kujukestest koostatavate mustrite mitmekesisus: kunstnik peab näitama veel, kuidas pai-

guçada kujuke raku piirjoonte suhtes. Joonisel 14 on näidatud kaks sama lähtekujukesega tapeedimustrit, kusjuures kujukesed on peeglite suhtes erinevalt paigutatud. Need mõlemad mustrid kuuluvad juhu 8 juurde.

Me ei hakka esitama tapeedimustrite koostamise reegleid kõikidel teistel juhtudel.

Mis on siis ühist tapectide ja kristalli vahel?



Joon. 16. Topaasi kristalli röntgenogramm.

Iga keha, ka kristall, koosneb aatomitest. Lihtained koosnevad ühesugustest aatomitest, lihtained aga kahte või mitut liiki aatomitest. Oletame, et me võiksime ülivõimsa mikroskoobi abil vaadelda keedusoola kristalli pinda ja näha aatomite keskmeid. Joonis 15 näitab, et aatomid asetsevad kristalli tahkudel sarnaselt tapeedi mustriga. Nüüd oleme valmis selleks, et aru saada, kuidas kristall on ehitatud. Kristall kujutab endast „ruumilist tapeeti“. Ruumilised, see tähendab mahulised, mitte tasapinnalised ühikrakud — need on „telliskivid“, mis liituvad ruumis üksteisega, ehitades kristalli.

Kui palju on olemas ühikrakkudest „ruumilise tapeedi“ ehitamise viise? Selle keerulise matemaatilise ülesande lahendas samuti J. S. Fjodorov. Ta tõestas, et kristallide ehituses peab eksisteerima 230 viisi ehk, nagu me praegu ütleme, 230 Fjodorovi gruppi. J. S. Fjodorovi avastus kuulub vene teaduse suurimate saavutuste hulka. Umbes 20 aastat pärast Fjodorovi järeltust alustatud katsed tema teooria kontrollimiseks — mis said võimalikuks alles pärast röntgenoloogilise struktuuranalüüsi leiutamist — kinnitasid seda hiilgavalt. Ei leitud ühtegi kristalli, mis ei oleks kuulunud ühte või teise Fjodorovi gruppi.

Kõik nüüdisaegsed andmed kristallide sisemise ehituse kohta on saadud röntgenoloogilise struktuuranalüüsi abil, mis leiutati 1912. aastal.

Väike, 0,5—1 mm suurune kristallike asetatakse kitsa röntgenikiire teele. Kristalli taha pannakse fotoplaat. Kristalli läbinud kiire kõrvale tekib rida hõlbunud kiiri. Me ei hakka siin peatuma nende tekkimise põhjusel. Seda nähtust nimetatakse difraktsiooniks.

Ilmutatud fotoplaat toob nähtavale palju plekke, mille asetuse ja intensiivsuse järgi võib otsustada kristalli struktuuri üle. Sellise ülesvõtte näide — topaasi röntgenogramm — on esitatud joonisel 16 (tegelikult on plekid tavaliselt veidi laiali valgunud ja erinevad mitte niivõrd suuruselt kui eresuselt); paremal all on näidatud kristallikese mōõted. Röntgenogrammi dešifreerimine kujutab endast keerukat ülesannet.

Röntgenoloogilise struktuuranalüüsi arendamisel olid suure tähtsusega kuulsa vene kristallograafi G. V. Vulfi tööd. Röntgenoloogilise struktuuranalüüsi leiutamisest möödunud aja jooksul on selle meetodiga uuritud paljude tuhandete kristallide ehitust.

6. NÄHTAMATUD VÕRED

On olemas lihtsad kristallid, ehitatud ühte liiki aatomitest. Näiteks teemant on puhas süsinik. Keedusoola kristallid koosnevad kahte liiki ionidest (elektriliselt laetud aatomitest) — naatriumi ja kloori ionidest. Keerukamad kristallid võivad olla ehitatud molekulidest, mis omakorda koosnevad mitut liiki aatomitest.

Kuid kristallis võib alati eraldada väikseimat korduvat aatomite gruppi (lihtsaimal juhul on see üks aatom), mis

vastab tasapinnaliste tapeetide ühele korduvale kujukesele joonisel 13.

Nagu tapeetide muustril, nii võib ka kristallis alati leida ühikraku — s. o. sellise rööptahuka (tasapinnalistel tapeetidel oli see täisnurkne või kaldnurkne rööpkülik), mille korduva ümberpaigutamisega paralleelselt iseenda'le, tema servadega võrdsetele kaugustele, võib reprodutseerida kogu kristalli.

Korduvad aatomite grupid (või üksikud aatomid) on kristalli ühikrakus üksteise suhtes pakitud teataval täiesti kindlal viisil, mis vastab ühele Fjodorovi 230 viisist.

Raku tippe nimetavad kristallograafid sõlmedeks. Tavaliselt on neid kõige kohasem paigutada kristalli aatomite keskmesse. Seejuures ei satu muidugi mitte kõik aatomid rakkude tippudesse. Kõige keerukamates kristallides osutub ühikrakk kaldnurkseks rööptahukaks. Sümmeetrilisemates kristallides on rakk näiteks täisnurkse rööptahuka kujuga. Kõige sümmeetrilisemad kristallid on need, millede rakk omab kuubi kuju.

Kui kujutada kristalli ruumilist ehitust, ära märkides ainult sõlmed ja neid ühendavad jooned, siis tekib omamoodi kristalli „skelett“. See skelett, mis on tehtud traadist ja sõlmedest-kerakestest, on näidatud joonisel 17; sellist kristalli kujutamist nimetatakse kristalli ruumvõreks. Uurime eelkõige kristalli „skeletti“ ja alles siis hakkame seda täitma.

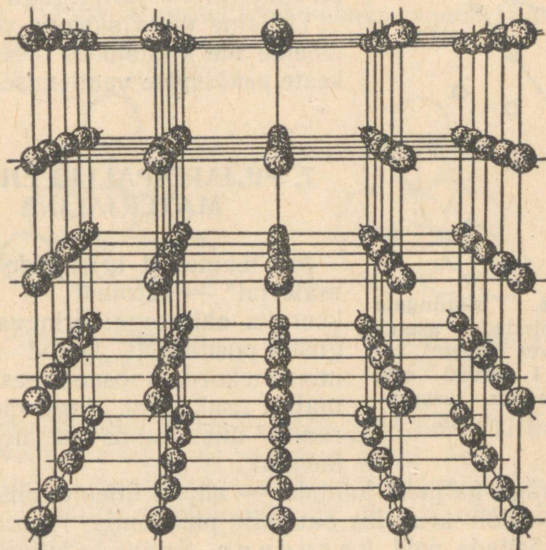
Kristallilise struktuuri põhiline iseärasus seisab tema korduvuses rangelt ühesuguste vahemaade järel. Oletame, et tegime joonisel 17 jalutuskäigu piki ühte traadikest. Väljunud sõlmest ja liikudes traadikest mööda edasi, satuksime kogu aeg uutesse „maastikkudesse“. Kuid meie uued muljed kestaksid ainult kuni järgmise sõlmeni. Sealtpeale näeksime meie rännakul esimesest sõlmest teiseni tuttavaks saanud „maastiku“ täielikku kordumist.

Liikudes kristalli sees mitmesuguses suunas, näeksime erinevaid pilte, kuid kõikidel juhtudel, läbinud teatava vahemaa, satuksime kohtadesse, mis ei erine juba läbikäidud kohtadest, ja see korduks kogu aeg võrdsete vahemaade järel.

Rakkude suurus võib olla väga erinev. Kõige väiksemad kaugused naabersõlmede vahel esinevad lihtsaimatel ühte liiki aatomitest ehitatud kristallidel, suurimad kaugused aga keerukatel valgukristallidel. Vahekaugused kõiguvad 2—3

kuni mõnesaja ångströmi (sentimeetri sajamiljondiku) vahel, vastates viimasel juhul juba suurustele, mis on nähtavad ainult elektronmikroskoobi abil.

Kristallvõred on väga mitmekesised. Kuid kõigile kristallidele ühised omadused on seletatavad kristallide korrapärase võrelise ehitusega. Kõigepealt, ei ole raske mõista, et ideaalselt tasased tahud on tasapinnad, mis läbivad sõlmi, milledes asetsevad aatomid. Kuid sõlmtasapindu võib väga



Joon. 17. Kristallvõre mudel.

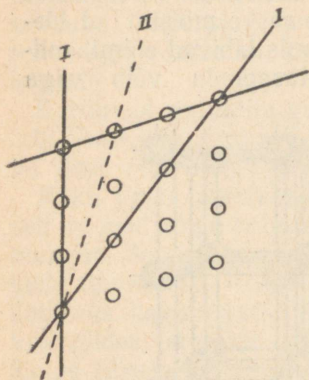
mitmesugustes suundades tõmmata kuitahes palju. Missugused siis nendest sõlmtasapindadest piiravad väljakasvanud kristalli? Pöörame eelkõige tähelepanu järgmisele asjaolule: mitmesugused sõlmtasapinnad ja -jooned ei ole sõlmedega täidetud mitte ühteviisi tihedalt. Kogemused näitavad, et kristall on piiratud selliste tasapindadega, milles on kõige tihedamalt sõlmi; tasapinnad aga ristuvad servi pidi, millel omakorda on kõige tihedamalt sõlmi.

Joonis 18 annab kristallvõrest pildi, mis on perpendikulaarne selle tahule; on tõmmatud mõningate joonisele perpendikulaarsete sõlmtasapindade jäljed. Õeldust on selge, et kristallil võivad areneda sõlmtasapindadele I paralleelsed

tahud ja ei saa olla tahkused, mis oleksid paralleelsed hõredalt sõlmi omavaile tasapindadele II.

Kristalli välist sümmeetriat määratakse ka tema võre tüübi järgi. Kõige sümmeetrilisemad on harilikult kuubilise ühikrakuga kristallid. Kõrgesümmeetriliste kristallide hulka kuuluvad ka kristallid, millel on püstprisma kujuga rakk, mille põhjaks on ruut või 60° -se nurgaga romb.

Täidame nüüd skeletid-võred ja läheme üle kristallides olevate osakeste pakkimuse vaatlemisele.



Joon. 18. Mõningate sõlmitasapindade asetus kristallivõres (skeem); tasapinnad I võivad olla välistahkudeks, tasapinnad II ei või.

7. PILJARDIPALLID EHTUSMATERJALINA

Me teame, et kristallide „ehitusmaterjal“ — aatomid — on väga keeruka ehitusega: erinevatel kaugustel positiivselt laetud tuumast, mis omakorda koosneb reast väiksematest osakestest, ringlevad elektronid, mis kannavad negatiivset laengut¹.

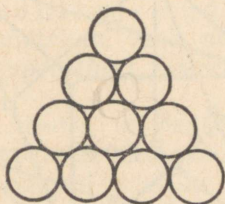
Kuid väga paljudel juhtudel — hiljem ütleme, missugustel nimelt, — võib kristallis aatomite paiknemise reprodutseerimiseks käsitada neid *keradena*. Selline kujutus aatomitest ei peegelda sugugi mitte nende keerukat iseloomu, kuid annab õigesti edasi ühe tähtsa asjaolu, nimelt: kristallide struktuuri röntgenoloogilised uurimised viivad meid mõttele, et kristallid ehituvad kerade kõige tihedama pakkimuse põhimõttel.

Et selgesti kujutleda selle põhimõtte olemust, võtame suurel hulgal piljardipalle ja hakkame neid paigutama, püüdes luua kõige tihedama pakkimuse. Kõigepealt moodustame tiheda kihi — see näeb välja nii nagu enne mängu algust „kolmnurgana“ koondatud piljardipallid (joonis 19). Paneme tähele, et kolmnurga sees oleval pallil on kuus

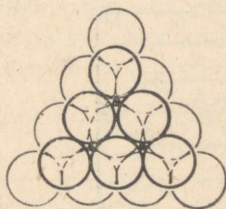
¹ Uksikasjalisemalt aatomi ehituse kohta vt. näiteks järgmisest raamatust: Г. А. Зисман, «Мир атома», «Научно-популярная библиотека».

temaga kokkupuutuvad naabrit. On selge, et pole teist moodust pallidest kõige tihedama kihi koostamiseks.

Jätkame pallide paigutamist, asetades kihid üksteise peale. Kui paigutaksime järgmise kihi pallid vahetult esimese kihi pallide kohale, siis ei oleks selline pakkimus tihe. Tahtes paigutada mingisugusesse ruumalasse suurimal arvul palle, peame teise kihi pallid paigutama alloleva kihi lohkudesse. Pöörame tähelepanu sellele, et kõiki lohkusid ei ole võimalik täita niisama suurte pallidega. Lohke täidetakse üle ühe. Märgime joonisel esimesel kihil vabaks jäänud lohud musta värviga (joonis 20).



Joon. 19. Üks tihe pallide kiht.



Joon. 20. Kaks tihedat pallide kihti.

On olemas samuti ainult üks tihe pakkimus kahest kihist: muidugi võime teises kihis pallidega katta kõik „mustad“ lohud, jättes „valged“ tühjaks, kuid pakkimuse ilme sellest ei muutu. Olukord muutub aga siis, kui läheme üle kolmanda kihi juurde.

Et saada kõige tihedamat pakkimust, peame kolmanda kihi pallid paigutama teise kihi lohkudesse. Seejuures võib kolmanda kihi palle paigutada kahel viisil: kas nii, et nende pallide keskmised asetseksid esimese kihi pallide keskmiste kohal, või nii, et nende keskmised asetseksid „mustade“ lohkude kohal.

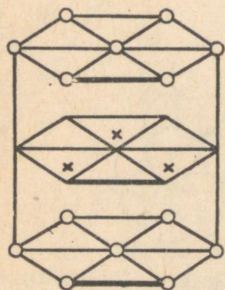
Meie kahes kolmekorruselises ehitises on pakkimuse tihedus ühesugune, kuid nad erinevad teineteisest oluliselt.

Neljanda kihi paigutamisel suurendame veel enam võimalikkude pakkimuste arvu: kahest kolmekihilisest pakkimusest võime teha neli neljakihilist. Viiekihilisi saab juba 8, jne.

On selge, et üksteisest erinevate, ühesuguse tihedusega pallpakkimuste arv võib olla väga suur.

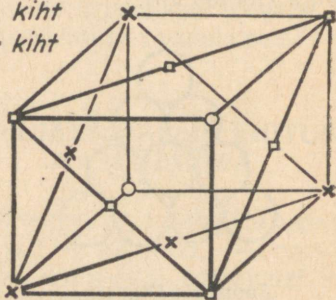
Nüüd peame jälgima seost kristallvõre ja pallpakkimuse vahel. Me teame, et võre aluseks on rakukesed — „tellis-

kivikesed", mille paigutumisel üksteise külge ehitub kristall, ja et missuguse suuna kristallis me ka valiksime, struktuur kordub selles suunas rangelt võrdsete vahemaade järel. Siit järgneb, et kristall peab endast kujutama sellist aatomite-pallide pakkimust, mille kihtide asetuse rangelt kordub teatava arvu kihtide järel. Kui see kordumine algab näiteks 14. kihist, siis see tähendab, et kõrguselt koosneb rakk 13 kihist. Siis asub 14. kiht esimese kohal, 15. — teise kohal, 16. — kolmanda kohal jne.



Joon. 21. Tiheda heksagonaalse pakkimuse skelett.

- 1. kiht
- × 2. kiht
- 3. kiht



Joon. 22. Tahktsentreeritud kuubilise pakkimuse skelett. (Pallide keskmed on ära märgitud.)

Kõige lihtsam pakkimus on kahekihiline: kolmas kiht asub esimese kohal, neljas — teise kohal jne. See on nn. heksagonaalne tihedaim pakkimus. Joonisel 21 on näidatud selle võre (skelett). Ringikesed ja ristikesed vastavad aatomite keskmete asukohtadele. Aatomid, mille keskmed on märgitud ristikestega, asetsevad nii alumise kui ka ülemise kihi lohkudes. Sellisel viisil on ehitatud näiteks magneesiumi kristallid.

Väga laialdaselt on levinud kolmekihilised kristallid, milles neljas kiht kordab esimest, viies — teist jne. Joonis 22, kus endiselt on märgitud ainult aatomite keskmed, näitab, et sellises pakkimuses võib valida kuubikujulise ühikraku. Tihedad kihid asetsevad siin perpendikulaarselt kuubi diagonaalile, mis ühendab kahte aatomit, mille keskmed on märgitud ringikestega.

Püüdke kujutleda rakku, mis on asetatud selliselt, et see diagonaal läheks vertikaalselt. Pahempoolne tagumine rin-

gike osutub sealjuures all olevaks ja ainukesena meie joonisel kuulub esimesse kihti (selle kihi teiste aatomite keskmed, mis kuuluvad naaberrakkudesse, ei sattunud joonisele). Esimese kihi peal asetseb tihedalt teine kiht: tema kuue aatomi keskmed, mis sattusid joonisele, on märgitud kolmnurga tippudel ja külgede keskkohthadel asetsevate ristikestega. Kolmas tihe kiht on esindatud kuue ruudukesega, mis asetsevad samuti kolmnurgal. Lõpuks neljas kiht, mis kordab esimest, sisaldab meie joonisel uuesti ainult ühe ringikese.

Niisiis, kolmekihilise pallpakkimuse ühikrakk on kuup, mille tippudes ja tahkude keskmets asuvad aatomite keskmed. Sellist rakku, mida nimetatakse kuubiliseks tahktsentreeritud rakuks, omab rida metalle, näiteks: alumiinium, vask, nikkel, kõrge temperatuuri puhul — raud (temperatuuri mõjust räägime hiljem, lehekülgedel 36 ja 60).

Nüüd näeme, et reaalne kristall kujutab endast tihedalt pakitud osakeste süsteemi, kusjuures osakeste asetus ruumis kordub. Sõlmed ja sõlmi ühendavad jooned on ainult kujutletav skeem, mis aitab meid kristallis eraldada ühik-„telliskivi“ ja ära märkida suunad, milledes teda tuleb ümber paigutada, et täita tervet kristalli.

Mõned sõnad „pallide“ — aatomite suurusest. Röntgenikiirte abil teostatud täpsetel mõõtmistel saadi järgmised andmed: mitmesuguste ainete aatomite raadiused kõiguvad väikestes piirides, umbkaudu 0,5 sajamiljondikust sentimeetrist kuni 2 sajamiljondiku sentimeetriteni.

Me vaatlesime pakkimusi, mis olid koostatud ühesugustest pallidest. See tähendab, et seni oli juttu keemiliste elementide kristallidest, mis sisaldavad ainult ühte liiki aatomeid (tõsi küll, mitte kõik elemendid ei ole ehitatud nii lihtsalt). Siirdume nüüd kristallide juurde, mis on ehitatud mitut liiki aatomitest, s. o. liitainete kristallide juurde.

8. AATOMITE PAKKIMUS

Katsed näitavad, et väga paljude liitainete kristalle võime samuti kujutada pallide tihedate pakkimustena. Aatomite eri liikidele vastavad erineva suurusega pallid. Kristallide ehitusmaterjaliks on seejuures peamiselt elektriliselt laetud aatomid — ioonid¹.

¹ Vt. prof. A. I. Kitaigorodski raamatut „Aine ehitus“, Tallinn 1950.

Kujutleme, et tuleb võrdtsel arvul pakkida suuri ja väikesi palle. Kuidas teha pakkimus kõige tihedamaks?

Teadlased on leidnud sellele küsimusele vastuse. Vaadeldes ühesuuruste pallide pakkimust näeme, et mitte kogu ruum ei ole täidetud pallidega. Pakkimustesse jäävad tühikud. Võib välja arvutada, et nende maht on umbes $\frac{1}{4}$ üldmahust. Neid tühikuid on kahte erinevat liiki. Ühed nendest on ümbritsetud 4 palliga, mille keskmed asetsevad korrapärase nelitahuka — tetraeedri tippudes (vt. peatükk 1); teised on ümbritsetud 6 palliga, kusjuures nende pallide keskmed moodustavad korrapärase kaheksatahuka — oktaeedri. Esimesed on väiksemad ja nende arv on kaks korda suurem teiste arvust.

Nüüd on meile arusaadav, kuidas pakkida kahe erineva suurusega palle: suurematest pallidest tuleb moodustada kõige tihedam pakkimus ja tühikutesse paigutada väiksemad pallid (ei ole vajalik paigutada neid kõikidesse tühikutesse!).

Joonisel 23, vasakul ülal, on näidatud, kuidas asetseb väike pall väiksemas (4 palliga ümbritsetud) tühikus. Et oleks näitlikum, on tühikut ümbritsevad suured pallid esitatud mitte tervetena, vaid sektoritena, mis on neist välja lõigatud samuti, nagu lõigatakse välja kiilud arbuusidest.

Paremal ülal asub väike pall suuremas tühikus (mis on ümbritsetud 6 suure palliga). All on näidatud sektorite väljalõikamise viis kuuest naaberpallist (eesmine pall on seejuures ära võetud).

Mõlemat liiki tühikuid võib leida joonisel 22 (tahktsentreeritud kuup). Näiteks, suurem tühik asetseb kuubi keskmel; seda ümbritseva kuue aatomi keskmed on näidatud kolme ristikesega ja kolme ruudukesega tahkude keskel.

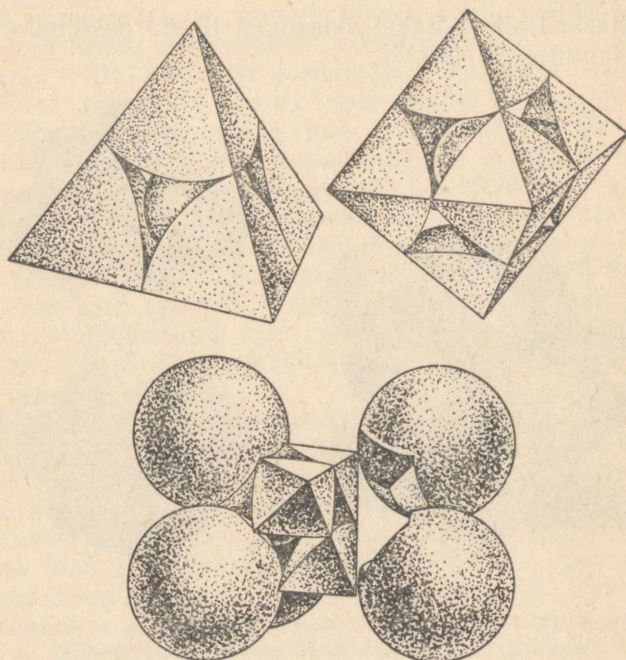
Võib välja arvutada, et igas ühesuguste pallidega tihedas pakkimuses on iga palli kohta üks suur ja kaks väikest tühikut. Väikesed pallid asetsevad nendes tühikutes. Kui nad on aga tühikutest veidi suuremad ja ei mahu neisse, siis nad nihutavad naabruses olevad suured pallid eemale, kobestades tihedat pakkimust.

Asjaolu, et pakkimused võivad olla ehitatud erinevast arvust kihtidest ja et tühikute täitmise „muster“ väikeste pallidega võib samuti olla erinev, põhjustab kristallide struktuuri suurima mitmekesisuse.

Keedusoola kristallid kujutavad endast suurte kloori ionide (heledad pallid joonisel 24 a) tihedat kolmekihilist pakkimust; naatriumi ionid (tumedad pallid) täidavad kõiki suuri

tühikuid, seepärast on iga naatriumi-ioon ümbritsetud kuue kloori-iooniga.

Väävliraud (pürrotiin) kujutab endast suurte väevli ionide kahekihilist pakkimust; väiksemad raua ionid täi-



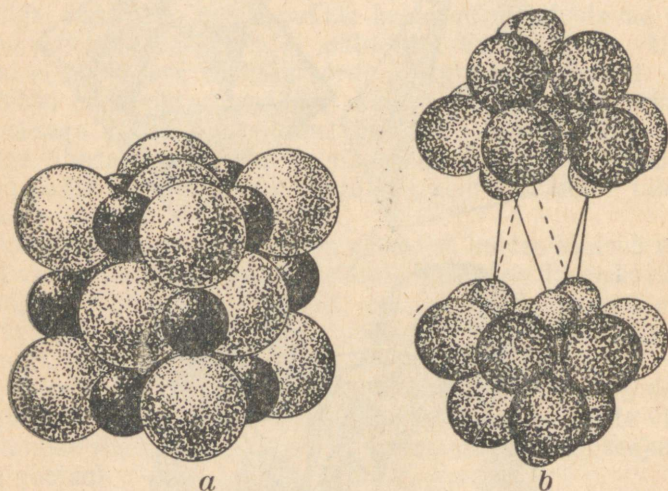
Joon. 23. Ulal: vasakul — väike, paremal — suurem tühik pallide tihedas pakkimuses; all on näidatud, kuidas parempoolne kujund on välja lõigatud.

davad kõiki suuri tühikuid. Liitiumoksüüdi kristallis (mille keemiline koostis on kaks liitiumi aatomit ühe hapniku aatomi kohta) moodustavad tiheda pakkimuse suured hapniku ionid; väikesed liitiumi ionid täidavad kõiki väiksemaid tühikuid. Seepärast on igal liitiumi ionil neli naabrit — hapnikuiooni.

Kadmiumkloriidi kristallis (keemiline koostis — kaks kloori-aatomit ühe kadmiumi-aatomi kohta) on tihe pakkimuse moodustatud suurtest kloori ionidest (suured pallid

joonisel 24 b). Kadmiumi ioonid, mis on kujutatud väikeste pallidena, täidavad suuremaid tühikuid, kuid mitte kõiki, vaid üle kahe kloori-ioonide kihi. Joonisel 24 b on selguse mõttes keskelt ära võetud kaks kihti suuri palle, mis ei sisalda eneste vahel väikesi palle. Joontega on näidatud kristalli ühikrakk.

Esitasime ainult kõige lihtsamaid tiheda pakkimuse tühi-
kute täitmise „mustreid“.



Joon. 24. Ionide pakkimused kristallides: a — keedu-
soola kristallis; b — kadmiumkloriidi kristallis.

Suure töö kristallide struktuuri kirjeldamisel eeltoodud viisil on teinud NSV Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige N. V. Belov. Tema tööd tõid teadusele suurt kasu, võimaldasid leida palju seaduspärasusi, mis seletavad mitmesuguste mineraalide mehaanilisi, optilisi ja elektrilisi omadusi.

Tuletame meelde, et kujutus aatomitest kui pallidest peegeldab õigesti aatomite tähtsat omadust — omadust asetuda tihedatesse kristalliistesse pakkimustesse, kuid ei lahenda sugugi mitte aatomite keerukat loomust ja ei tähenda seda, et aatomid on lihtsalt kõvad pallikesed.

Aatomi võrdlemine pallikesega tähendab tegelikult järgmist. Aatomi tuuma kui keskmee ümber tõmbame mõttes sel-

lise raadiusega sfääri, et põhiline osa antud aatomi elektrone satuks selle sfääri sisse. Nii moodustubki kera, mis, nagu öeldakse, on aatomi m u d e l.

Meie poolt esitatud pilt kristalli ehitusest ei oleks täielik, kui me ei mainiks veel mõningaid aatomi käitumise iseärasusi kristallis.

Asi seisab selles, et aatomite ühinemisel kristalliks mõningane osa nende elektronidest „kollektiviseerub“ — hakkab kuuluma mitte üksikutele aatomitele, vaid kogu kristallile tervikuna. Neil nn. v a b a d e l elektronidel lõpeb pidev liikumine ühe aatomi juures ja nad „hulguvad“ kristalli kogu ulatuses, ajutiselt ühinedes vastutulevate ioonidega ja lahkudes neist jälle. Seejuures aatomite luustikud — nende tuumad koos elektronide põhimassiga, s. o. kristallvõre ioonid, sooritavad vaid väikesi võnkeid tasakaaluasendite ümber, erinevalt kaootiliselt liikuvatest vedeliku või gaasi aatomitest. Vastupidi, kristalli vabade elektronide käitumine on teatavatel tingimustel väga sarnane gaasi aatomite käitumisega. Sellepärast nimetatakse vabu elektrone ka „e l e k t r o n g a a s i k s“.

Vabasid elektrone on enamikul juhtudel väga vähe. Nii on lugu kristallidega, mis on ehitatud isenimelistest ioonidest, näiteks keedusoola kristalliga. Siin liiguvad praktiliselt positiivse naatriumi-iooni kõik 10 elektroni naatriumi tuuma ümbruses ja negatiivse kloori-iooni kõik 18 elektroni kloori tuuma ümbruses. (Tuleb teha vahet püsivat „peremeest“ mitteomavate v a b a d e elektronide ja nende elektronide vahel, mis isenimeliste ioonide moodustumisel läksid, üks iga aatomi kohta, naatriumi juurest üle kloori juurde. Viimaseid hoiab kloor kõvasti kinni ja ei lase neid „vabadusse“.)

Teisiti on lugu metalliliste kristallide juures, kus aatomid annavad ära, kuid ei saa vastu võtta üleliigseid elektrone ja kõik ioonid on seega positiivsed. Siin on suur osa elektrone „kollektiviseerunud“. Iga aatom annab üldisse kasutusse 1 — 3 elektroni välimiste elektronide hulgest, milliseid tuum kõige nõrgemini külge tõmbab.

Ü h e v a l e n t s e t e l metallidel, nagu liitiumil, naatriumil jne., on üks elektron seotud aatomituumaga tunduvalt nõrgemini kui ülejäänud. Nende metallide kristallides annab peaaegu iga aatom üldiseks kasutuseks ühe elektroni.

K a h e v a l e n t s e t e l metallidel, nagu kaltsiumil, baaariumil jne., on k a k s elektroni seotud oma aatomituumaga

palju nõrgemini kui ülejäänud. Seepärast läheb nende aatomitega kristallides aatomist üldiseks kasutuseks kuni kaks elektroni.

Kristall moodustub aatomitest nendevahelise külgetõmbe tõttu. Tugev külgetõmme esineb isenimeliselt laetud ionide vahel, näiteks, negatiivselt laetud kloori-ionide ja positiivselt laetud naatriumi-ionide vahel.

Iga kloori-ioon tõmbab enda külge 6 naatriumi-iooni, ümbritsedes ennast sel viisil „igast küljest“ teisemärgiliste osakestega. Iga naatriumi-ioon tõmbab omakorda enda külge 6 teda ümbritsevat kloori-iooni. Selle tõttu tekibki kristallis osakeste tihe pakkimus.

Ioonide külgetõmme tasakaalustub eemaletõukumisega, mis tekib nende vastastikusel lähenemisel. Tõukejõud on üksteisele lähenenud aatomite elektronide vastastikuse mõjutuse jõud. Niisiis asetsevad ionid kristallis üksteisest sellisel kaugusel, millisel tõmbejõud on tasakaalustatud tõukejõududega.

Kuid metallilistes kristallides on ju kõik ionid positiivselt! See on nii. Kuid ka siin leiab aset ionide vastastikune seostumine, mis viib tiheda pakkimuse moodustumisele. Aatomite küllaldasel lähenemisel üksteisele toimub osa elektronide ülalkirjeldatud kollektiviseerumine. Need „ühised“ elektronid moodustavad omamoodi „tsemendi“, mis liidab aatomite ionid tihedalt pakitud võreks. Aatomite edasist lähenemist takistab ka sel juhul eri aatomitele kuuluvate elektronide vastastikune mõjutus.

9. MOLEKULIDE PAKKIMUS

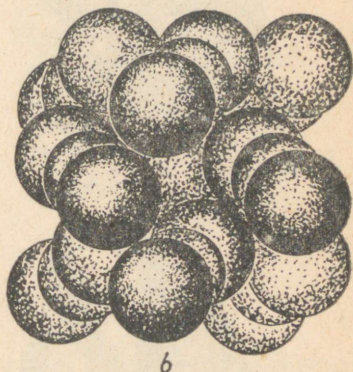
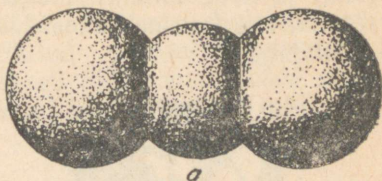
Ülalkirjeldatud kristallide iseloomulikuks iseärasuseks on molekuli puudumine kristallis. Kristall on ehitatud aatomitest või ionidest ja kristallis molekuli eraldada ei saa. Tõepoolest, läheme tagasi näiteks joonise 24 a juurde, mis kujutab kivisoola kristalli ehitust. See aine on ehitatud naatriumi ja kloori vahelduvatestioonidest. Igal naatriumi ioonil on 6 naabrit — kloori iooni. Kõik need kloori ionid asuvad naatriumi iooni suhtes täiesti ühesuguselt, ja ei või öelda, et mõni nendest on naatriumiga ühendatud. Kivisoola ühest kloori aatomist ja ühest naatriumi aatomist koosnevat molekuli kristallis ei ole.

Kuid kaugeltki mitte alati ei ole asi nii. Vaatleme näiteks

süsihappegaasi kristalli ehitust — kristalli, mis esineb ainult madala temperatuuri puhul. See on nõndanimetatud „kuiv jää“, mida saadakse rõhu all veeldatud süsihappegaasi tugeval jahutamisel.

„Kuiva jää“ kristallid on ehitatud molekulidest. Üks selline molekul on kujutatud joonisel 25 a. (Selline kujutus on muidugi tinglik, samuti nagu aatomite kujutamine keradena.)

Joonis 25 b selgitab, kuidas süsihappegaasi molekulid on kristallis pakitud: süsiniku aatom (tinglikult kujutatud väiksemana) omab ainult kahte lähimat naabrit — kahte hapniku aatomit (suuremad). Igal hapniku aatomil on lähimaks naabriks ainult üks süsiniku aatom. Tihedad grupid kolmest aatomist — süsihappegaasi molekulid — paistavad kristallis selgelt välja.

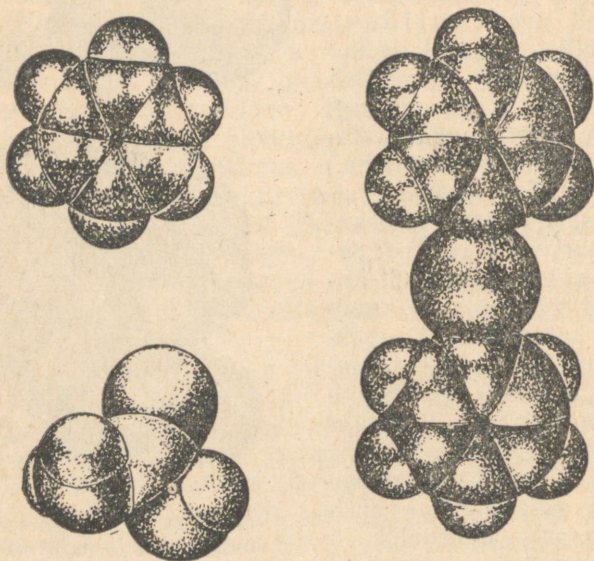


Joon. 25. a — süsihappegaasi molekuli; b — molekulide tihed pakkimus.

Joonisel 25 tõmbab endale tähelepanu molekuli kerade lapikus. Asi seisab selles, et külgetõmbejõud „kolmiku“ aatomite vahel, s. o. ühe ning sama molekuli süsiniku- ja hapniku-aatomite vahel, on tunduvalt suurem kui külgetõmbejõud üksikute molekulide vahel. Ühe molekuli süsiniku- ja hapniku-aatomite elektronkihid tunduval määral katavad üksteist — tungivad üksteise sisse. See on keemiliste jõudude tegevuse tulemus. Õeldust on selge, et elektronkihtide vastastikust sissetungimist võib kujutada üksikutele aatomitele vastavate kerade lapikuks muutumisena.

Mõningad molekulide mudelid, mis on ehitatud deformeeritud (moonutatud) keradest, on toodud joonisel 26. Ülal vasakul näete bensooli molekuli, mis koosneb kuuest süsiniku aatomist (keskel) ja kuuest vesiniku aatomist. Süsiniku „kerad“ on muutunud „lõikudeks“-sektoriteks, aga vesiniku „kerad“ — segmentideks-poolkeradeks.

Vasakul all on kujutatud kusiaine molekul. Keskel on süsiniku aatom. See on ühendatud ühe hapniku-aatomiga (ülal) ja kahe amiinrühmaga (nii nimetatakse aatomite rühma, mis koosneb ühest lämmastiku ja kahest vesiniku aatomist).



Joon. 26. Bensooli (vasakul ülal), kusiaine (all) ja difenüül-elavhõbeda (paremal) molekulid.

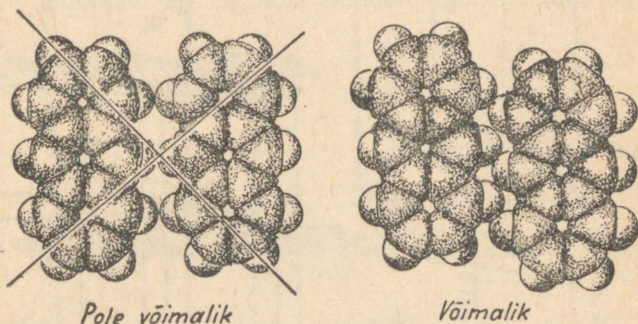
Paremal on difenüül-elavhõbeda molekul. Fenüül on bensooli molekul ilma ühe vesiniku-aatomita; eesliide „di“ osutab sellele, et molekulis on kaks sellist rühma. Elavhõbeda aatom on molekuli keskel.

Arvukate uurimistega on kindlaks tehtud, et kristallide hulka, mis on ehitatud kerakujulistest aatomitest või ioonidest, kuuluvad metallid, sulandid ja enamik anorgaanilisi ühendeid (soolad, leelised). Molekulidest on ehitatud kõigi orgaaniliste ainete ja väheste anorgaaniliste ainete, näiteks sublumaadi kristallid. Küsime nüüd endalt, kuidas asetsevad kristallis molekulid, s. o. kehad, millel on keerukas, sageli kummaline kuju.

Nagu ioonsetes kristallides tekivad ionide külgetõmbe tagajärjel tihedad kerade pakkimused, nii põhjustab ka

molekulide vastastikune külgetõmme kõige tihedamate molekulaarsete pakkimuste tekkimist.

Üldine põhimõte on lihtne: molekulid asetsevad nii, et ühe molekuli „väljaulatuvad osad“ lähevad teise molekuli „lohkudesse“. See on näitlikult esitatud joonisel 27 antratseeni molekulidega. Joonisel on selgesti näha, missugused molekulide asetused looduses esinevad ja missugused mitte.



Joon. 27. Antratseeni molekulide pakkimus.

Molekulaarsete kristallide juures ei luba tiheda pakkimuse põhimõtte sellist ehitust, mille puhul sümmeetriatasapinnad läheksid läbi molekulide vahelt — sel juhul satuks ühe molekuli „väljaulatuv osa“ teise molekuli „väljaulatuvale osale“. Seetõttu on molekulaarsete kristallide juures võimalikud ainult teatavad sümmeetria liigid, kokku 8—10 Fjodorovi gruppi. Tiheda pakkimuse põhimõtte alusel on võimalik ette teada molekulide vastastikuse asetuse iseloomu, kristalli sümmeetriat ja mõningaid teisi tema omadusi.

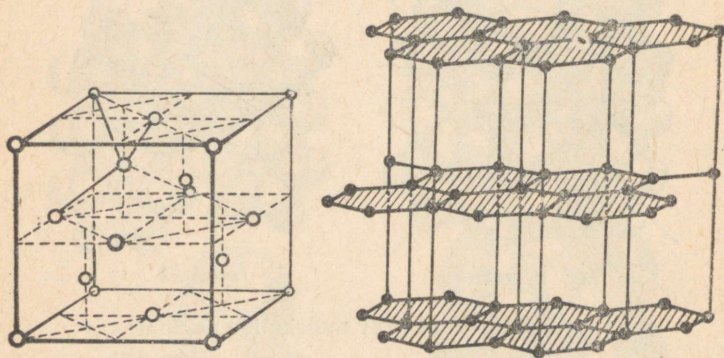
10. ÜHED NING SAMAD AATOMID, KUID ERINEVAD KRISTALLID

Must, pehme, läiketu grafiit, millega me kirjutame, ja läikiv, kõva, läbipaistev, klaasi lõikav teemant on ehitatud ühtedest ning samadest aatomitest, nimelt süsiniku aatomitest. Mispärast nendel kahel sama koostisega ainel on nii teravalt erinevad omadused?

Kui need ained ei oleks kristallilised, siis oleks meil raske seletada süsiniku kahe teisendi olemasolu. Kuid need ained

on kristallid ja me teame, et igale kristallile on omane eriline aatomite asetus. Niisiis järeltame, et kuna grafiidi ja teemandi vahel, mis on ehitatud ühtedest ning samadest süsiniku aatomitest, on selline terav omaduste erinevus, siis peab ka aatomite asetus nende ainete kristallides olema erinev.

Joonis 28 näitab kihilise grafiidi võret (paremal), milles igal aatomil on kolm lähimat naabrit, ja teemandi võret,



Joon. 28. Vasakul — teemandi võre, paremal — grafiidi võre.

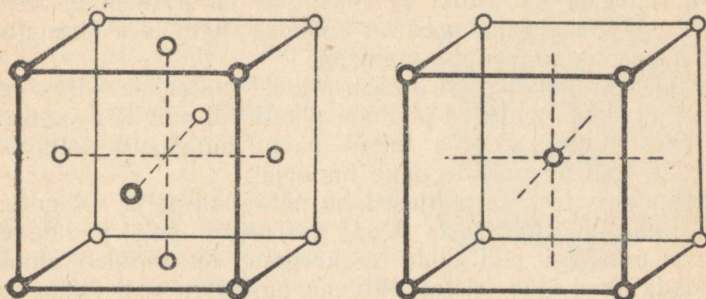
kus aatomil on neli lähimat naabrit. Sellel näitel on erilise selgusega näha, kui teravalt määrab kristallide omadusi aatomite vastastikune asetus. Grafiidist tehakse tulekindlaid tiigleid, mis kannatavad kahetuhande- kuni kolmetuhandekraadist temperatuuri, teemant aga põleb temperatuuril üle 700° . Teemandi erikaal on 3,5, grafiidi erikaal aga 2,1; grafiit juhib elektrivoolu, teemant ei juhi, jne.

Süsinik ei ole ainus aine, millel on omadus anda erinevaid kristalle. Peaaegu iga keemiline element ja mitte ainult element, vaid ka iga keemiline aine esineb mitmes teisendis. Meile on teada kuus jää teisendit, üheksa väävlit teisendit, neli raua teisendit. . .

Grafiit ja teemant on püsivad. Tavalistes maapinna tingimustes võivad nad säilida määramatult kaua. See ei ole aga kaugeltki kehtiv ühe aine kõikide teisendite kohta.

On olemas kahte liiki tina: valget ja halli. Temperatuuril üle $+18^{\circ}$ asuvad tina aatomid ühes võres; seda teisendit nimetatakse valgeks tinaks; madalamal temperatuuril hak-

kavad tina aatomid oma vastastikust asetust muutma: valge tina muutub halliks, mis saadakse seejuures pulbrina. Uued kristallikesed kasvavad vanast kristallist samuti, nagu kristallid kasvavad vedelikust (vt. lk. 50).



Joon. 29. Vasakul — gammaraua ühikrakk, paremal — alfaraua ühikrakk.

Allpool saame teada, kui suurt tähtsust omab tehnikas raua teisendite olemasolu: kõrge temperatuuri puhul moodustavad raua aatomid tahktsentreeritud võre (gammaraud, joonisel 29 vasakul), normaalse temperatuuri puhul — ruuntsentreeritud võre (alfaraud, sealsamas paremal).

11. MISPÄRAST VILGUKIVI ON KIHILINE

Seni arutasime kristallide ehituse küsimusi. Nüüd räägime nende omadustest.

Kristallide omaduste kõige tähelepanuväärsemaks iseärasuseks on anisotropia. Selle kreeka päritoluga sõna mõte on järgmine: isotroopne — igas suunas ühesugune, anisotropne — eri suundades erisugune.

Võtke tükk klaasi (klaas ei ole kristalliline keha; vt. lk. 57) ja katsuge katki murda, surudes teda pressiga mingisuguses suunas. Määrake kindlaks klaasi purustava survejõu suurus, seejärel aga tehke teise samasuguse klaasitükiga uus mõõtmine, paigutades nüüd proovikeha pressi alla teisiti. Teine arv ühtib praktiliselt esimesega. Klaasi purunevus ei olene suunast, milles toimub surumine. (Muidugi peavad sellise katse puhul proovikehad olema ühesuguse kujuga — näiteks kuubid, mis on erinevates asendites välja lõigatud ühest ning samast suurest valatud klaasi tükist.)

On teada, et kehad soojenemisel paisuvad. Soojendamise klaasist kera. Pärast soojendamist mõõdame proovikeha hoolikalt. Ta on säilitanud oma kerataolise kuju. Tükk klaasi on paisunud kõikides suundades ühesuguselt.

Missuguseid klaasitüki omadusi me ka uuriksime, alati selgub, et klaasi omadused on kõikides suundades ühesugused. Klaas on isotroopne materjal.

Igaüks on kohanud ka anisotroopseid materjale. Kes ei teaks, et jõupingutused puuhalu pikuti või põigiti raiumisel on täiesti erinevad. Ka teised puidu omadused sõltuvad suunast. Puit on anisotroopne materjal.

Puidu anisotroopia põhjused on nähtavad palja silmaga. Puit omab kiulist ehitust, kiud asetsevad piki puu tüve. Raiuda puuhalgu piki kiudu on kergem, kuna tuleb ainult eraldada ühed kiud teistest. Raiuda puuhalgu risti kiudu on raskem, sest et tuleb palju kiude läbi-raiuda.

Samuti nagu puidu anisotroopia, on ka kristallide anisotroopia seletatav nende ehitusega. Kristallide anisotroopia väljendub väga selgesti nende lõhevuses — nii nimetatakse kristallide omadust lõhestuda teatavaid kindlaid pindasid mööda. Mitte kõik kristallid ei oma ühteviisi head lõhevust. Kõige paremini võib seda omadust vaadelda kivisoola, kaltsiidi ja vilgukivi juures.

Kivisoola kristallid lõhestuvad väikesteks kuupideks ja täisnurkseteks risttahukateks, kaltsiidi kristallid — väikesteks romboedriteks; vilgukivi lõhestub kõige väiksemagi jõupingutuse puhul lehekesteks. Loetletud ja teistel sarnastel juhtudel torkab silma kristalli põhiline väline iseärasus — olla ümbritsetud tasapindadega.

Vähem täiusliku lõhevusega kristallide purustamisel võib näida, et need purunevad vormitult. Kuid vaatlemine mikroskoobiga näitab, et see ei ole nii. Vähem täiuslik lõhevus takistab kristalli jagamist suurepinnalisteks osadeks, kuid niikuinii on kildude pealispind „astmelise“ iseloomuga — ainult et nende tasaste astmete suurus on väiksem.

Kristalli lõhevus näitab kõige paremini, et kristalli tugevus eri suundades on teravalt erinev. Tuleb oletada, et kohesioonjõud aatomite vahel, millest kristall on ehitatud, on lõhevuspindadele perpendikulaarsetes suundades väga nõrgad.

Kõige paremini illustreerib seda grafiit. Lähimate aatomite keskmete vaheline kaugus kihtides, milledest on ehitatud grafiidi kristall (vt. ülalpool joonis 28) on $2\frac{1}{2}$ korda

väiksem kihtidevahelisest kaugusest. Ei ole imeks panna, et grafiidi kristallid esinevad kõige sagedamini õhukeste lehekete kujul. Sellise teravalt väljenduva lõhevuspinna olemasolu lubab tahket grafiiti kasutada määrdeainena neil juhtudel, kus ei ole võimalik kasutada määrdeõlisid, näiteks kui hõõrduvate osade liikumiskiirus on väga väike, samuti ka kõrge temperatuuri puhul. Grafiit on tahke määrdeaine!

Hõõrdumine kahe keha vahel viib lihtsustatult öeldes selleni, et ühe keha mikroskoopilised väljaulatuvad osad langevad teise keha ebatasasustesse. Jõupingutus, küllaldane selleks, et killustada mikroskoopilist grafiidi kristallikest, on hõõrdumise jõududest palju väiksem, seepärast kergendab grafiitmääre tunduvalt ühe keha libisemist teisel.

Me ei esita vilgukivi kristalli ehituse skeemi, kuna ta on võrdlemisi keerukas keemiline ühend. Kuid vilgukivi täiusliku lõhevuse põhjus on sama, mis grafiidilgi — aatomite kihiline asetuse.

Kuid täiusliku lõhevusega kristall võib olla ka ilma sellise kihilise struktuurita.

Joonisel 30 on näidatud veel kord ionide pakkimuse kivi- (keedu-) soola kristallis. On kujutatud üks ühikkuup; selle tahud koosnevad vahelduvatest kloori ja naatriumi ionidest.

Katsume selgusele jõuda, missugused pinnad siin teistest eralduvad, missuguseid pindu mööda on kõige kergem kristalli murda.

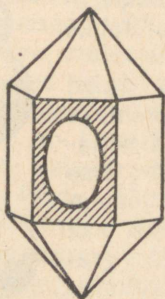
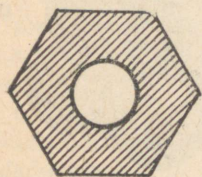
Eemaldame ühest tipust ühe kera — sellega paljastus



Joon. 30.

tasapind, mis on perpendikulaarne keha diagonaalile. See tasapind koosneb ainult naatriumi ionidest (joonis 30 b). Eemaldame naatriumi ionide kolmiku — järgmine paralleelne aatomi tasapind koosneb ainult kloori ionidest (vt. joonis 30 c), jne.

Kõik need kihid on laetud vaheldumisi erineva märgiga: kloori kiht — negatiivselt, naatriumi kiht — positiivselt. Seepärast tõmbuvad nad väga tugevasti üksteise külge ja



selliseid tasapindu mööda kristall ei lõhestu.

Vastupidi, lõhestumine toimub kergesti paralleelselt kuubi tahkudele. On kerge taibata, et seejuures sisaldab iga eralduv kiht võrdselt positiivseid ja negatiivseid ioone. Külgetõmme selliste tervikuna neutraalsete kihtide vahel on väike. Nendes

Joon. 31. Nii näib sulanud vaha kvartsi kristalli peateljele perpendikulaarsel lõikepinnal ja külgtahul.

suundades kulgevadki kivisoola kristallis lõhevuspinnad.

Lõhevusnähtuses avalduva kristallide murduvuse erinevus mitmesugustes suundades on silmatorkav.

Kristallide teiste omaduste anisotroopia vaatlemine on mõnevõrra raskem.

Nii näiteks, kuidas oleks võimalik näidata kristalli soojusjuhtivuse ebaühtlust eri suundades?

Poleerime kristalli tahu ja katame selle ühtlaselt kergestisulava vaha kihiga. Puudutame tahu keskohta soojendatud traadi otsaga. Traadi otsast levib tahku mööda soojus ja traadi ümbruses vaha sulab. Kui kristall juhib soojust igas suunas ühtviisi hästi, siis peab vaha sulamise piirkond olema ringikujuline.

Mida näitab see katse?

Osutub, et kui kvartsi kristallist välja lõigata plaadike perpendikulaarselt sümmeetria peateljele, siis vaha sulab ringikujuliselt (joon 31, vasakul). Täpselt samasuguse katse korral kvartsi kristalli külgtahul saame ellipsi (joonis 31, paremal).

Nähtavasti võib väita, et piki sümmeetria peatelge ja

perpendikulaarselt sellele levib soojus erineva kiirusega. Kõikides peateljele perpendikulaarsetes suundades aga on soojusjuhtivus ühesugune.

Kristalli omaduste anisotroopia on seotud tema struktuuriga. Sellepärast, kui kõik peateljele perpendikulaarsed suunad on soojuse levimise suhtes üheväärsed, siis on nad üheväärsed ka terve rea teiste omaduste suhtes.

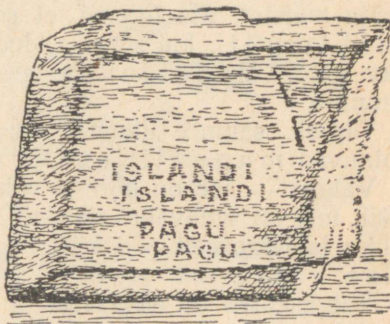
12. KRISTALLID JA VALGUS

Kristallide siledad tahud peegeldavad valgust samuti nagu puhas peegel. Teiste, mittekrustalliliste kehade, nagu vee ja klaasi kõrval kristallid ka muravad valgust. Et valgus murdub langedes õhust tihedamasse keskkonda või, ümberpöörduvalt, veest õhku, see on kõigile teada. Kes ei oleks jälginud naljakat pilti — põlvedeni selges vees seisva inimese „murtud“ jalgu.

Klaasis või veepiiskades murdudes laguneb valge valgus vikerkaare värvusteks. Samuti laguneb valgus ka kristallides murdumisel, pannes kunstipäraselt lihvitud puhtad ning läbipaistvad briljandid „särama kõigis vikerkaare värvustes“.

Paljudes kristallides toimub valguse murdumine täpselt samuti, nagu vees või klaasis. Selliste hulka kuuluvad kuubilise, s. o. kõige kõrgema sümmeetriaga kristallid, näiteks teemant ja kivisool. Teadus ja tööstus on kõige rohkem huvitatud mittekuubilise sümmeetriaga kristallide toimest valguskiirusesse.

Vaatame kaltsiidi (islandi pao) läbipaistva kristalli tükist tehtud väikese aknakese läbi meid ümbritsevatele esemetele. Me näeme kummalist pilti — kõik esemed kahekordistuvad. Paberile on kirjutatud üks sõna. Vaadeldes seda läbi kristalli, näeme kahte sõna (joonis 32). Niisugune



Joon. 32. Kiirte kaksikmurdumine kaltsiidi (islandi pao) kristallis.

kiirte kaksikmurdumine esineb kõikidel mittekuubilistel kristallidel.

Väga tähtis on see, et need kaks kiirt, milleks kristallile sattunud valguskiir lahutus, ei läbi kristalli real juhtudel mitte ühteviisi kergesti. Teiste sõnadega, ühele kiirele on kristall läbipaistvam kui teisele. Selliste kristallide hulka kuulub näiteks turmaliin. Kui vaadelda paberile kirjutatud sõna läbi turmaliinplaadikese, siis võib kahekordistumine meile nägematuks jääda, kuna üks kiirtest on teisest mitu korda nõrgem.

Mille poolest erinevad teineteisest need kaks kiirt, milleks valgus lahutus pärast murdumist kristallis?

Enne kui vastata sellele küsimusele, tuleb meil ütelda mõni sõna valguse olemuse kohta.

Kõigepealt tuletame lugejale meelde elektri- ja magnetvälja mõistet. Me ütleme, et ruumi mõningas osas esineb elektriväli, kui sinna viidud elektrilaengule mõjub teatav jõud. Vahelduv as elektriväljas jõud aja jooksul muutub.

Täpselt samuti ütleme magnetväljast, kuid siin toimivad magnetilised jõud.

Valgus — see on kiiresti vahelduvad elektri- ja magnetväli, mis on omavahel tihedalt seotud ja mis moodustavad ühise lainetaoliselt piki kiirt leviva elektromagnetilise välja.

Valguskiires on elektrilise ja magnetilise jõu muutumise sagedus väga suur — sajad tuhanded miljardid võnkeid sekundis; elektromagnetilise välja levimise kiirus — valguse kiirus — on 300 000 kilomeetrit sekundis.

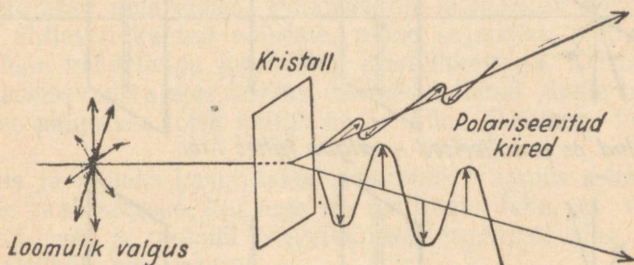
Mõtte valguse- ja elektrinähtuste sugulusest väljendas juba XVIII sajandil suur vene teadlane M. V. Lomonossov; seda mõtet kinnitasid hiljem arvukad katsed. Me ei saa siin peatuda selle juures, kuidas neid tegelikult tehti, ja seepärast katsume piltlikult selgitada valguskiire mõningaid iseärasusi järgmise kujutletava katse abil.

Oletame, et me võiksime vaadelda, kuidas käitub väga väike, aine molekulist väiksem elektriliselt laetud keha, mis on asetatud valguskiire tee. Siis avastaksime, et selline keha võngub väga kiiresti. Nende võngete põhjuseks on valguskiire tee asetatud laetud kehale mõjuv elektriline jõud. Kui katsume selle jõu suurust ja suunda kindlaks määrata, siis leiame, et elektriline jõud muutub suure kiirusega niihästi suuruselt kui ka suunalt, kusjuures kõik tema

võimalikud suunad asuvad alati kiirele perpendikulaarses tasapinnas; mõningad neist on näidatud joonisel 33, vasakul. Mingisugust eelistatud suunda selles tasapinnas endas ei ole — eri hetkedel võtab elektriline jõud temas igasuguseid suundi.

Nii on lugu, kui elektrilaeng on asetatud loomuliku sisse valguskiirde.

Kui aga korraldame samasuguse katse kiirtega, mis on kaksikmurdva kristalliga lahutatud kaheks, siis avastame midagi uut: elektriline jõud muutub samuti suuruselt ja on kiirele perpendikulaarne, kuid elektrilise jõu suund kogu kiire ulatuses ja kõikidel ajamomentidel jääb iseendale paral-



Joon. 33. Loomuliku valguskiire lahutumine kaheks lineaarselt polariseeritud kiireks (skeem).

leelseks (joonis 33, paremal). Selliseid kiiri nimetatakse lineaarselt polariseeritud kiirteks.

See avastus tehti teiste, keerukamate võtete abil, ilma katselise elektrilaengu kasutamisetä, kuna sellised vaatlused, kuidas keha käitub valguskiires, on praktiliselt muidugi teostatamatud — juba jõu liiga kiirete muutuste pärast.

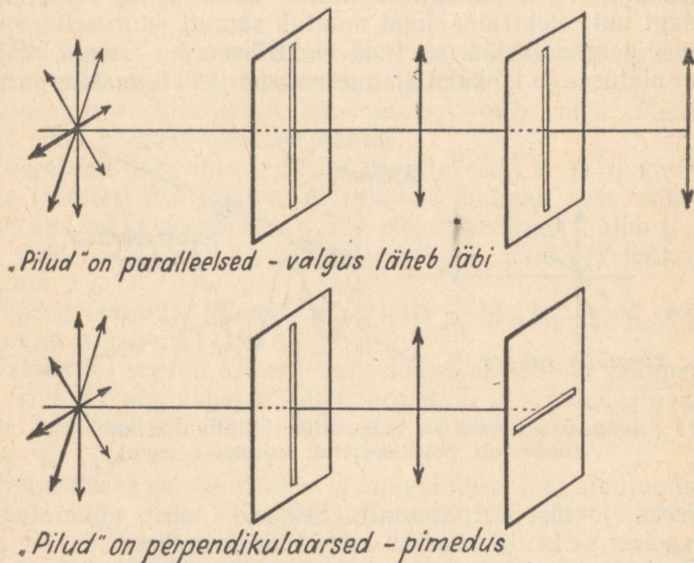
Nüüd saame aru, milles seisab kaksikmurdva kristalliga lahutatud valguskiirte erinevus. Selgub, et need kaks kiirt on mitte ainult lineaarselt polariseeritud, vaid ka elektrilise jõu suunad neis on teineteisele perpendikulaarsed (vt. joonis 33).

Turмалиинтаолised kristallid absorbeerivad peale selle veel ühe neist kiirtest — teiste sõnadega, muudavad loomuliku valguskiire üheksainsaks lineaarselt polariseeritud kiireks ehk, lühemalt öeldes, polariseerivad valgust.

Laseme nüüd turмалиинplaadikesega polariseeritud valguse läbi teisest samasugusest plaadikesest. Kui pöörata

ühte nendest plaadikestest oma tasapinnas, siis nende plaadikeste teatavas vastastikusel asetuses kustub valgus teise plaadikese taga täielikult.

Piltlikult väljendades, kristallid nagu omaksid „pilusid“ ja valgus võib kristalli läbida ainult siis, kui elektriline jõud on suunatud piki „pilu“. Kui kahe kristall-plaadikese „pilud“ on paralleelsed, siis valgus läheb neist läbi, kui aga „pilud“ asetsevad risti, siis kiir kustub (vt. skeemi joonisel 34).



Joon. 34. Valguskiire läbimine kahest turmaliin-plaadikesest (skeem).

Kui „pilud“ asetsevad nurga all, siis toimub teises plaadikeses esimesest plaadikesest väljunud lineaarselt polariseeritud kiire lahutumine elektrilise jõu parallelogrammi reegli järgi. Seejuures osa valgust, mille jõu suund on „pilule“ paralleelne, läheb läbi, see osa, mille jõu suund on „pilule“ perpendikulaarne, absorbeerub.

Täpselt samuti „lahutab“ turmaliin ka loomuliku valguskiire. Loomulik valguskiir ei ole midagi muud kui lineaarselt polariseeritud kiirte kogum elektrilise jõu igasuguste suundadega.

Nagu kiirte kaksikmurdamisega seotud kõikide nähtuste, nii ka selle nähtuse põhjuseks on ikka sama kristallide an-

isotroopia. Asi seisab selles, et turmaliinis ja teistes selle-
taolistes kristallides on teatav kindel valitud suund, mis on
seotud kristallvõrega ja mis on elektrilisele jõule just nagu
„piluks“.

Kaksikmurdvaid kristalle kasutatakse väga laialdaselt
meie instituutide ja tehaste teadusliku uurimise laboratoo-
riumide kõige mitmekesisemates optilistes seadeldistes.
Näiteks teatava polarisatsiooniparaadi — saharimeetri
abil tehakse väga kiiresti ja täpselt kindlaks suhkrulahuse
kontsentratsioon.

Umbes 20 aastat tagasi avastati odav valgust polariseer-
iv aine. Seda võib saada igasuguse suurusega osades. Teda
nimetatakse polaroidiks. Polaroid on läbipaistev tselluloid-
kile, ühtlaselt kaetud väikeste, mõne sajandiku millimeetri
suuruste väävelhapu joodkiniini kristallikestega. Kristallike-
sed asetsevad ranges korras, sarnased tahud ühele poole.
Sellise paigutuse tõttu käitub kogu kile üheainsa kristal-
lina.

Kus ja milleks kasutatakse polaroidi? Vajadus selle aine
järele saab selgeks, kui lugejale teatavaks teha, et valgus
klaasil, veel ja metallil peegeldumisel tugevasti ning vahel
ka täielikult polariseerub.

Et polaroid laseb polariseeritud kiiri läbi ainult „pilu“
„sobiva“ asetuse puhul, siis võib teda vastavalt asetades
peegeldatud valgust alati kustutada või nõrgendada. See aga
on tähtis väga paljudel juhtudel.

Polaroidist prille kasutatakse polaarmaades selleks, et
mitte näha eredat, lumel peegeldatud polariseeritud valgust.
Läbi polaroidi on mugav vaadelda pilte galeriides: valguse-
laigud ei sega. Allveelaeval periskoobiga vaatlejat segab
mere pinnalt peegeldatud polariseeritud valgus, kuid selle
mõju hävitab polaroid. Suurt tähtsust omab polaroidi kasu-
tamine fotograafias ja kinematograafias, kus tema abil
kõrvaldatakse üleliigseid valguseläike, segavat helki jne.

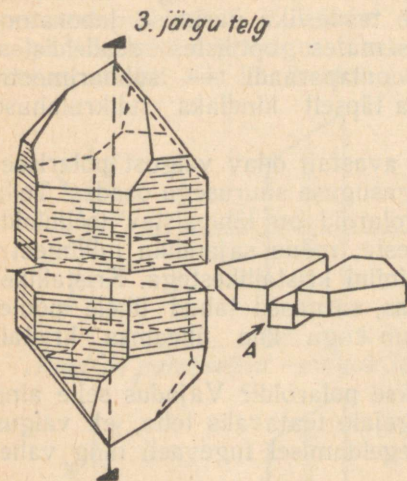
13. PIESOELEKTER

Kristallidel on palju omapäraseid ja kasulikke omadusi.
Võib-olla kõige tähelepanuväärsemate hulka nendest kuu-
luvad piesoelektrilised omadused.

Piesoelektrilised omadused esinevad väga paljudel kris-
tallidel, kuid ainult nendel, millel on teatav kindel süm-

meetria. Selliste kristallide hulka kuuluvad eriti turmaliin, suhkur, kvarts.

Joonisel 35 on kujutatud kvartsi kristall. Selle kristalli peatelg on 3. järgu sümmeetriatelg. Perpendikulaarses pinnas asuvad kolm 2. järgu telge.



Joon. 35. Üks viise kvartsi kristallist piesokvarts-plaadikese väljalõikamiseks.

Joonisel näidatud viisil lõigatakse kristallist välja umbes 2 cm paksune plaadike. Me näeme, et see on perpendikulaarne peateljele, 2. järgu teljed aga asuvad tema pinnas.

Siis lõigatakse sellest paksust plaadikesest perpendikulaarselt ühele 2. järgu teljele välja õhuke, umbes 0,5 mm paksune plaadike. Sellisel viisil saadud õhukese piesokvarts-plaadikese ga (joonisel, paremal, on ta nihutatud allapoole) võib teha huvitavaid katseid.

Surume plaadikest piki suunda A, mis on perpendikulaarne sümmeetriatelgedele, plaadikese külgpindadega aga ühendame elektromeetri — seadise, mis näitab elektrilaengu olemasolu (et saada elektrilist kontakti, tuleb need pinnad hõbetada). Selgub, et kokkusurumise mõjul ilmuvad plaadikese tahkudel võrdsed iseni melised laengud. Kui kokkusurumise asemel kasutatakse tõmbamist, siis laengud vahetavad märgid: seal, kus kokkusurumisel tekkis positiivne laeng, tekib tõmbamisel negatiivne, ja ümberpöörduvalt. See nähtus — elektriliste laengute tekkimine kokkusurumise või tõmbamise mõjul — ongi saanud nimetuse „piesoelekter“.

Piesokvarts-seadised on erakordselt tundlikud: elektriseadised võimaldavad meil mõõta laenguid, mis tekivad kvartsis kõige väiksema jõu juures, millist me teiste meetoditega mõõta ei saa. Piesokvarts on samuti suuteline ära märkima rõhu väga kiireid muutusi, mis ei ole teostatav teiste viisidega. Seepärast omab meie poolt kirjeldatud nähtus väga

suurt praktilist tähtsust kui igasuguste mehaaniliste mõjude, sealhulgas ka helide elektrilise registreerimise viis. On küllaldane kergest puhumisest piesokvarts-plaadikesele, et elektriaparaat seda kajastaks.

Piesokvarts-plaadikesi kasutatakse meditsiinis — nendega kuulatakse kahinat inimese südames. Samal viisil kasutatakse neid ka tehnikas masinate töö kontrollimiseks: kas ei esine mingisuguseid „kahtlasi“ kahinaid. Kuid piesokvartsiga võib ka, vastupidi, mõõta väga suuri rõhke. Piesokvarts-plaadikesed toovad suurt kasu artilleerias — nende abil võib mõõta rõhu muutumist mürsu liikumisel suurtüki torus. Kuid väikeste ja suurte, aeglaselt ja kiiresti muutuva rõhkude mõõtmine ei ole kõik, milleks võib kasutada piesokvartsit.

Meil tuleb nüüd peatuda piesokvarts-plaadikese ühel mehaanilisel omadusel. Nagu igal kõval kehal, nii on ka piesokvarts-plaadikesel oma võnkesagedus, nagu öeldakse, *o m a s a g e d u s*.

Tõmmake vedru pikaks või suruge ta kokku ja laske siis lahti: selle vedru külge riputatud raskus võngub teatava kindla omasagedusega. Kallutage pendlit; pärast seda, kui olete ta lahti lasknud, võngub ta samuti omasagedusega.

Lööge millegagi õrnasti vastu kristallvaasi, ja te kuulete meloodilist kõla. Nagu teada, on heli õhu võnked, esile kutsutud helikiirgavate esemete kiirest nähtamatust võnkumisest. Pärast seda, kui olime löönud vastu kristallvaasi, hakkas see võnkuma omasagedusega.

Kvarts-plaadikene, kui tema pihta lüüa, hakkab ka omasagedusega võnkuma — pikenema ja lühenema. Võib välja arvutada, et 1 cm paksune plaadike teeb ligikaudu 300 000 võnget sekundis. Meie kõrv on suuteline vastu võtma heli, mille sagedus on alates 16 kuni 20 000 võnkeni sekundis. Järelikult kiirgab piesokvarts „mittekuuldavaid helisid“ ehk, nagu öeldakse, *ultrahelisid*¹.

Kuid lihtsa löögiga paneme piesokvarts-plaadikese võnkuma ainult hetkeks. Piesokvartsit tähelepanuväärne omadus, muuta mehaanilist energiat elektriliseks ja ümberpöörduvalt, võimaldab üsna kergesti luua kvarts-plaadikese mittekustuvat võnkumist. Katsetega on kindlaks tehtud, et piesokvartsit ühendamisel elektripinge allikaga plaadike

¹ Ultrahelidest jutustatakse järgmises brošüüris: Проф. Б. Б. Кудрявцев, «Неслышимые звуки», «Научно-популярная библиотека».

veidi pikeneb või lüheneb suunas A — sõltuvalt vooluallika pooluste asetusest.

Piesokvarts-plaadikese lülitamisel vahelduvvoolu ahelasse ta kord suureneb, kord lüheneb, s. o. hakkab võnkuma voolu sagedusega. Kui vool muudab oma suunda 10 000 korda sekundis, siis võngub ka plaadike sama sagedusega. Kuid need võnked on väikesed, kuna nad ei toimu plaadikese omasagedusega, ei toimu „resonantsis“.

Kuidas panna kiik paremini kiikuma? Muidugi tõukamisega omavõnkumise taktis. Toimime samuti ka piesokvartsiga.

Valime vahelduvvoolu sageduse sellise, et see võrduks plaadikese omasagedusega, teiste sõnadega, et elektrivool tegutseks resonantsis piesokvartsiga omavõnkumise. Seejuures hakkab plaadike tugevasti võnkuma, kiirates energiliselt ultrahelilaineid.

Ultrahelilainete allikas — piesokvarts — leiab laialdast kasutamist mitmesugustes tehnikaharudes. Väga suurt tähtsust omavad need lained allvee-signalisatsioonis. Nad on palju kohasemad tavalistest helilainetest, kuna nad levivad rohkem suunatuna. Peale selle ei saa ultrahelisignaale kõrvaga „salaja pealt kuulata“.

Nagu igasugused lained, nii ka ultraheli peegeldub takistustelt. Ultraheli abil võib mõõta mere sügavust ja üldse kindlaks teha mingisuguse takistuse kaugust. Selleks tuleb ainult teada ultraheli levimise kiirust ja määrata aeg, mille jooksul takistuse poole saadetud signaal tuleb tagasi. Raske on ülehinnata tagasihoidliku väikese kvartsikristalli osa kõigi nende ülesannete lahendamisel. Laevale ülesseatud piesokvarts kiirgab vahetpidamatult ultrahelisisid. Kui laeva teel on olemas nähtamatu veetalune takistus (kalju, jäämägi), siis peegeldub sellelt ultrahelilaine ja tagasijõudnult „teatab“ kursi muutmise vajadusest.

Olgugi et ultrahelilained tahketelt kehadelt peegelduvad, tungivad nad ometi osaliselt nendesse. Sellepärast võib ultrahelidega kehi läbi valgustada ja avastada nähtamatuid sisemisi vigasid. Sellise meetodi töötas välja ja kasutas seda edukalt nõukogude teadlane prof. S. J. Sokolov. Väga tähtis on piesokvartsiga kasutamine ka raadiotehnikas, kus ta aitab saatjate tööd teha püsivamaks (stabiilsemaks).

Piesoelektriliste omadustega kristallidest leiab eriti laialdast kasutamist just kvarts. See on seletatav kvartsiga mehaanilise ja keemilise püsivusega, samuti ka tema võrd-

lemisi suure levikuga. Teaduste Akadeemia Füüsika Instituudis ja Kristallograafia Instituudis teostatakse Stalini preemia laureaate, NSV Liidu Teaduste Akadeemia korrespondentide liikmete B. M. Vulli ja A. V. Subnikovi juhtimisel töid teiste, tähelepanuväärsete piesoelektriliste omadustega kristallide saamiseks ja leidmiseks. Nõukogude füüsikud on sel alal saavutanud hiilgavat edu, mis on valitsuse poolt kõrget hindamist leidnud.

14. KUIDAS KASVAVAD KRISTALLID

Veeaur, vesi ja jää — see on üks ning sama aine, mille molekulid koosnevad kahest vesiniku aatomist ja ühest hapniku aatomist. Jää kohta võib öelda, et see on tahke vesi, vee kohta, et see on vedel jää. Üks ning sama aine esineb kolmes olekus — gaasilises, vedelas ja tahkes. Üldse võib kõiki aineid suurema või väiksema vaevaga saada kõigis kolmes olekus. Metallurgiatehastes sulatatakse terast ja rauda. Mitmesugusteks tehnilisteks otstarveteks valmistatakse vedelat õhku ja veetakse laiali spetsiaalsetes soojusisoleeritud nõudes; meile hästi tuntud „kuiv jää“ on tahke süsihappegaas...

Peaaegu iga aine võib teatavates tingimustes anda kristalle. Kristalle võib saada antud aine lahusest või sulamist, samuti ka tema aurudest (näiteks sadestuvad joodi aurudest normaalse rõhu juures kergesti mustad rombi-kujulised joodi kristallid ilma vahepealse üleminekuta vedelasse olekusse).

Hakake vees lahustama lauasoola või suhkrut. Teil ei õnnestu lahustada igasugust kogust. Toatemperatuuril (20°) õnnestub teil lahustada teeklaasis 70 grammi soola. Pärast seda juurdelisatav sool ei lahustu, vaid sadestub põhja. Lahust, milles edasist lahustumist ei toimu, nimetatakse küllastunud lahuseks. Kui temperatuuri muuta, siis muutub ka aine lahustuvus. Kõigile on hästi teada, et enamikku aineid lahustab kuum vesi palju kergemini kui külma vesi.

Kujutlege nüüd, et olete valmistanud küllastunud lahuse, ütleme, suhkrulahuse temperatuuril 30° ja hakkate seda jahutama kuni 20° . 30° juures saate 100 grammis vees lahustada 223 grammi suhkrut, 20° juures lahustub 205 grammi. Jahutamisel 30° kuni 20° osutuvad 18 grammi

„üleliigseteks“ ja, nagu čeldakse, langevad lahusest välja. Seega seisab üks võimalikkudest kristallide saamise viisidest küllastunud lahuse jahutamises.

Võib ka toimida teisiti. Valmistage küllastunud soolalahus ja laske tal seista katmata klaasis. Mõne aja pärast märkate kristallikeste tekkimist. Mispärast nad on tekkinud? Tähelepanelik vaatlus näitab, et üheaegselt kristallide tekkimisega on toimunud veel üks muutus — vee hulk on vähenenud. Vesi auras välja ja lahuses oli „üleliigset“ ainet. Seega on clemas teine kristallide saamise viis — lahuse aurustamine.

Kuidas toimub kristallide tekkimine lahusest?

Me ütlesime, et kristallid „langevad lahusest välja“; kas seda tuleb mõista nii, et nädala jooksul kristalli ei olnud, aga äkki mingisugusel silmapilgul ta tekkis ühe korraga? Ei, asi ei ole nii: kristallid kasvavad.

Mõistagi ei õnnestu silmaga avastada kasvu kõige esimesi momente. Algul kogunevad lahustatud aine korratult liikuvate molekulide või aatomite hulgast mõned umbes sellises järjestuses, mis on tarvilik kristallvõre moodustumiseks. Sellist aatomite või molekulide gruppi nimetatakse kristalli algmeks.

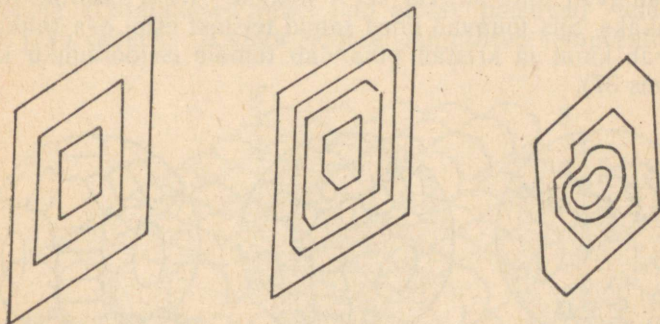
Katsed näitavad, et kristallide algmed tekivad hõlpsamini siis, kui lahuses on mingisuguseid kõrvalisi ülipeenikesi tolmuübemekesi. Kõige kiiremini ja kergemini algab kristalliseerumine siis, kui küllastunud lahusesse paigutatakse väike kristall — „juuretis“. Seejuures ei seisa tahke aine eraldumine lahusest uute kristallikeste tekkimises, vaid „juuretise“ kasvamisest.

Algme kasv muidugi ei erine „juuretise“ kasvust. „Juuretise“ kasutamise mõte seisab selles, et ta „tõmbab“ eralduvat ainet enda peale ja takistab sel viisil suure arvu algmete üheaegset tekkimist. Kui aga korraga tekib palju algmeid, siis nad segavad üksteist kasvamisel ja ei võimalda meil saada suuri kristalle.

Kuidas jaotuvad algme pealispinnal uued lahusest eralduvad aatomite või molekulide kogused?

Katsed näitavad, et algme või „juuretise“ kasv seisab nagu tahkude ümberpaigutumises paralleelselt iseendile, tahule perpendikulaarses suunas. Seejuures jäävad tahkudevahelised nurgad püsivateks. (Me juba teame, et nurkade püsivus on kristalli tähtsaim tunnus, mis tuleneb tema võrelisest ehitusest.)

Joonisel 36* on esitatud ühe ning sama aine kolme kristalli üksteisele järgnevad piirjooned nende kasvamisel. Selle taolist pilti võib vaadelda mikroskoobis. Vasakul näidatud juhul säilib kasvamisel tahkude arv. Keskmine joonis annab näite uue tahu tekkimisest (ülal paremal) ja tema uuesti kadumisest.



Joon. 36. Vasakul — kristalli kasvamine tahkude arvu säilimisega; keskel — tahud võivad kristalli kasvamisel kinni kasvada ja uuesti tekkida; paremal — kristalli kild omandab kasvamisel korrapärase kuju.

On väga tähtis ära märkida, et tahkude kasvamise kiirus, s. o. iseendile paralleelselt ümberpaigutumise kiirus, ei ole eri tahkudel ühesugune. Seejuures „kasvavad kinni“ — kasvavad just need tahud, mis kõige kiiremini ümber asetuvad, näiteks pahempoolne alumine tahk keskmisel joonisel. Vastupidi, aeglaselt kasvavad tahud osutuvad kõige laiemateks, nagu öeldakse, kõige arenenumateks.

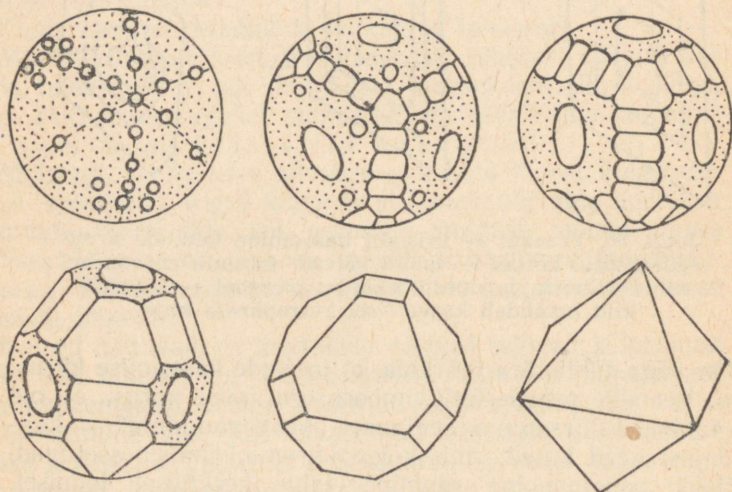
Eriti selgesti on see näha viimasel joonisel. Vormitu kild omandab sama vormi, mis teised kristallidki, just kasvu kiiruse anisotroopia tõttu. Teatavad kindlad tahud arenevad teiste arvel kõige tugevamini ja annavad kristallile kuju, mis on omane selle aine kõikidele näidistele.

Väga ilusaid üleminekuvorme täheldatakse juhul, kui „juuretisena“ võetakse kera ja lahust vaheldumisi jahutatakse ning soojendatakse. Soojendamisel muutub lahus mitteküllastunuks ja toimub „juuretise“ osaline lahustu-

* See joonis on võetud järgmisest raamatust: Член-корр. АН А. В. Шубников, «Образование кристаллов». А. В. Шубниковile võlgname tänu kristallide kasvu mehhanismi üksikasjalise uurimise eest.

mine. Jahutamine viib lahuse küllastumisele ja „juuretise“ kasvamisele. Kuid molekulid sadestuvad seejuures teisiti, just nagu eelistades mõningaid kohti. Sel viisil kandub aine kera ühtedelt kohtadelt üle teistele.

Algul tekivad kera pinnal väikesed ringikujulised tahud. Ringid suurenevad järk-järgult ja üksteisega kokku puutudes sulavad ühte sirgeid servi mööda. Kera muutub hulktahukaks. Siis jõuavad ühed tahud teistest ette, osa tahkusid kasvab kinni ja kristall omandab temale iseloomuliku kuju (joonis 37).



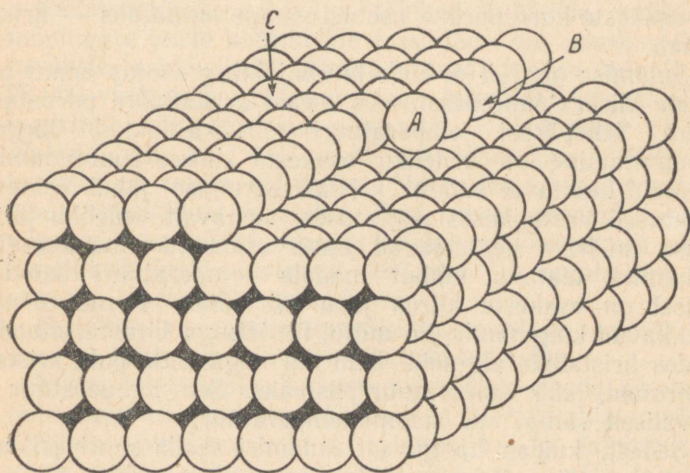
Joon. 37. Kuidas kristallkera muutub korrapäraseks oktaeedriks.

Jälgides kristallide kasvu hämmastab meid kasvu peamine iseärasus — tahkude paralleelne ümberpaigutumine. Osutub, et eralduv aine ehitab tahku kihtidena; seni, kuni üks kiht on valmis ehitamata, ei hakka teine ehituma.

Joonisel 38 on näidatud „valmis ehitamata“ aatomite-pakkimus. Millises tähtedega märgitud asenditest jääb kristalliga ühinenud uus aatom kõige tugevamini pidama? Kahtlemata asendis A, kuna ta siin tunneb kolmelt poolt naabrite külgetõmmet, asendis B aga kahelt poolt ja asendis C ainult ühelt poolt. Seepärast ehitub algul valmis postikene, siis kogu pind, ja alles pärast seda algab uue pinna asetumine.

Tervel real juhtudel tekivad kristallid sulast massist — sulamist. Looduses toimub see hiiglasuures ulatuses: tulisest magmast on tekkinud basaldid, graniidid ja paljud teised kivimid.

Hakkame kuumutama mingisugust kristallilist ainet, näiteks kivisoola. Kuni temperatuurini $+804^{\circ}\text{C}$ muutuvad kivisoola kristallikesed vähe: nad ainult paisuvad veidi ja aine jääb tahkeks. Ainega nõusse paigutatud temperatuuri-



Joon. 38. Kuidas kristall kasvab.

mõõtja näitab kuumutamisel pidevat temperatuuri tõusu. $+804^{\circ}\text{C}$ puhul avastame korraka kaks uut, omavahel seotud nähtust: aine hakkab sulama ja temperatuuri tõus lakkab. Seni kui kogu aine pole muutunud vedelaks, ei muutu temperatuur; edaspidine temperatuuri tõus on juba tekkinud vedeliku kuumutamine. Kõigil kristallilistel ainetel on teatav kindel sulamistemperatuur. Jää sulab 0°C juures, raud $+1527^{\circ}\text{C}$ juures, elavhõbe -39°C juures, jne.

Nagu juba teame, moodustavad igas kristallikeses aine aatomid või molekulid hästi korrastatud pakkimuse ja teevad oma keskmiste asetuste juures väikesi võnkeid. Vastavalt keha kuumutamise määrale tõuseb võnkuvate osakeste kiirus koos võnkeulatusega.

See osakeste liikumiskiiruse suurenemine temperatuuri

tõusmisega moodustab ühe peamistest loodusseadustest, mis on kehtiv aine kohta igasuguses olekus — tahkes, vedelas või gaasilises. Teades temperatuuri võib välja arvutada, kui suure keskmise kiirusega aine osakesed liiguvad. Need kiirused on võrdlemisi suured — mõnisada meetrit sekundis. Keha kuumutamisel näiteks nullist kuni 1000°-ni kasvab osakeste kiirus enam kui kahekordselt.

Kui on saavutatud kristalli teatav, küllalt kõrge temperatuur, muutuvad tema osakeste võnked niivõrd energilisteks, et osakeste korrapärane asetus osutub võimatuks — kristall sulab.

Sulamise algusel ei kulu juurdejuhitud soojus enam osakeste kiiruse suurendamiseks, vaid kristallvõre purustamiseks. Sellepärast temperatuuri tõus ka lakkab. Järgnev kuumutamine on vedeliku osakeste kiiruse suurendamine.

Meid huvitava sulami kristalliseerumise juhul esinevad nähtused vastupidises järjestuses: vastavalt vedeliku jahtumise määrale aeglustavad tema osakesed oma kaootilist liikumist; teatava, küllalt madala temperatuuri saavutamisel on osakeste kiirus juba nii väike, et mõned neist hakkavad külgetõmbejõu mõjul üksteisega liituma, moodustades kristallide algmeid. Seni kui kogu aine pole kristalliseerunud, jääb temperatuur püsivaks. See temperatuur on tavaliselt sama, mis sulamistemperatuur.

Sellest, kuidas hanguvast sulamist saada suuri kristalle, jutustame järgmises peatükis. See ei ole nii lihtne.

Kui ei võeta tarvitusele spetsiaalseid abinõusid, siis algab kristalliseerumine sulamis üheaegselt paljudes kohtades. Kristallikesed kasvavad korrapäraste, neile omaste hulktahukate kujul täpselt samuti, nagu eespool kirjeldasime. Kuid vaba kasvamine ei kesta kaua: suurenedes põrkavad kristallikesed üksteise vastu, kokkupuutumiskohtades kasvamine lakkab ja tahkuv keha omandab teralise ehituse. Iga tera on üksik kristall, millel ei õnnestunud omandada õiget kuju.

Sõltuvalt paljudest tingimustest ja eelkõige jahtumise kiirusest võib tahke keha koosneda suurematest või vähematest teradest: mida aeglasem on jahtumine, seda suuremad on terad. Kristalliliste kehade terade suurus kõigub miljondiku sentimeetri ja mõne millimeetri vahel. Enamikul juhtudel võib kehade teralist kristallilist ehitust vaadelda mikroskoobiga. Tavaliselt on tahked kehad just sellise peenekristallilise ehitusega.

15. KRISTALLIDE KASVATAMINE

Tööstus ja teadus vajavad sageli enam või vähem suuri üksikuid kristalle. Kolossaalset tähtsust omavad tehnikas Seignette'i (loe: senjett) soola ja kvartsi kristallid, millel on tähelepanuväärne omadus muuta mehaanilisi mõjusid (näiteks rõhku) elektriliseks pingeks (lk. 46).

Optikatööstus vajab kaltsiidi, kiviisoe, fluoriidi ja teiste ainete suuri kristalle.

Kellatööstusele on väga tähtsad rubiinide, safiiride ja mõningate teiste kalliskivide kristallid. Asi seisab selles, et tavaliste taskukellade liikuvad osad teevad tunnis kuni 20 000 võnget. Selline suur kiirus esitab telgede otsadele ja laagritele väga tõsiseid nõudmisi. Hõõrdumine on kõige väiksem siis, kui 0,07—0,15-mm läbimõõduga telje otsa laagriks on rubiin või safiir. Võrreldes terasega on nende ainete kunstlikud kristallid väga suure vastupidavusega ja väga väikese hõõrdumisega. Märkimisväärne on see, et kunstlikud kivid osutuvad seejuures paremaks kui samasugused looduses leiduvad kivid.

Metallide omaduste uurimiseks on tähtis omada raua, vase ja teiste ainete suuri üksikuid kristalle.

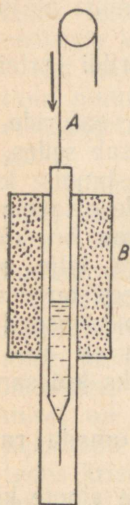
Niisiis tuleb õppida kasvatama kõikide nende ainete kristalle vajaliku suuruseni. Selleks on olemas rida meetodeid. Kristalle võib kasvatada nii sulamist kui ka lahusest. Peamine raskus seisab selles, et kui me ei võta tarvitusele spetsiaalseid abinõusid, siis saame sulamist suure kristalli asemel peenekristallilise tahke keha, lahusest aga peenekristallilise sademe anuma põhjas.

Nagu juba öeldud, hakkavad kristallid lahuses kasvama siis, kui see on lahustuva ainega üleküllastunud. Kuid erinevatel temperatuuridel on erinev ka lahust küllastava aine hulk. Seepärast on suurte, hästi kujunenud tahkudega kristallide kasvatamine lahusest võimalik ainult sel juhul, kui lahuse temperatuur hoitakse termostaadi abil püsivana. Ilma selle seadisea kõiguks lahuse temperatuur ööpäeva jooksul igal juhul 3—4° piiirides; sellistes tingimustes ei saa kristall kasvada küllalt „korralikult“.

Termostaat on vildiga mähitud, hästi suletud ja veega täidetud suur vann. Termostaadi sisemusse paigutatakse lahusega nõu. Elektri ahju abil hoitakse temperatuur vajalikul tasemel. Automaatregulaator lüübib ahju välja, kui temperatuur liiga tõuseb, ja lüübib selle uuesti sisse, kui tempera-

tuur langeb. Nende seadiste abil saab temperatuuri reguleerida kuni $0,01^{\circ}$ täpsusega.

Vastavalt kristalli kasvamisele alandatakse järk-järgult lahuse temperatuuri. Seda tuleb teha selleks, et lahus püsiks kogu aeg natuke üleküllastununa, vaatamata vahetpidamata aine eraldumisele temast. Katsed näitavad, et suuri kristalle on võimalik kasvatada ainult lahuse väga aeglasel jahutamisel, umbes $0,1^{\circ}$ võrra 1—2 päeva jooksul. Suurte kristallide kasvatamine kestab palju nädalaid.



Joon. 39. Üksikute kristallide saamine sulamist.

Väga väärtusliku panuse kristallide kasvatamise meetodite väljatöötamisse on andnud vene kristallograaf G. V. Vulf.

Väga raske on kasvatada suuri kristalle ka sulamitest. Siin aitab üks omapärane nähtus: teatavates tingimustes jääb nõu seintele tekkinud algmeist „ellu“ ainult üks, arenedes oma vähem „õnnelikkude“ naabrite arvel.

Kergesti sulavate metallide üksikuid kristalle saadakse tavaliselt järgmisel viisil (vt. joonis 39). Metall sulatatakse väljavenitatud otsaga katseklaasis A. Katseklaas on niidi abil riputatud vertikaalsesse silindrilisse ahju B. Niidi abil lastakse katseklaas aeglaselt alla. Katseklaasi väljavenitatud ots tuleb aegamööda ahjust välja ja metall hakkab hanguma. Seejuures jääb kõikidest kristallidest „ellu“ üks; sõltuvalt katseklaasi allalaskmise määrast jätkab ta kasvamist piki selle telge. Lõppude lõpuks hangub kogu metall üksiku kristallina.

Rubiini raskesti sulavaid kristalle kasvatavad Stalini preemia laureaadid, NSV Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeerivad liikmed A. V. Šubnikov ja S. K. Popov järgmisel viisil. Aine peenikest pulbrit puistatakse joana läbi leegi. Pulbri terakesed sulavad; tillukesed tilgad langevad raskestisulavale alusele. Siin algab kristalliseerumine ja jällegi kasvab hulgalistest kristallikestest välja ainult üks. Meie teadlased on leidnud meetodi pikkade kristallvarbade saamiseks kalliskivist, mis on nii vajalik kellade ja teiste täpsete mehhanismide valmistamiseks.

16. „TAHKE VEDELIK“

Kui sulamine algab alati ühel ning samal temperatuuril, siis kristalliseerumise käik on veidi enam kapriisne. Tavaliselt õnnestub sulamit jahutada alla sulamistemperatuuri. Mõningatel juhtudel võib see ülejahutamine olla niivõrd tunduv, et järk-järgult paksenev aine muutub käega katsudes tahkeks, kuid mitte kristalliliseks kehaks — aatomitel ei õnnestu asetuda õiges järjestuses.

Sageli on võimalik ülejahutamist (s. o. temperatuuri alandamist alla sulamistemperatuuri) läbi viia ainult mõne kraadi võrra. Seejärel toimub kristalliseerumine korraga kogu mahu ulatuses ning, erinevalt tavalisest, väga kiiresti. Ülejahutatud olukord osutub mõnikord kõrgeimal määral ebapüsivaks olukorraks. Tarvitseb ainult anumad kergesti raputada või teha vedeliku pind tolmu- ja küttesaadevaks, et silmapilkselt algaks kristallikeste moodustumine.

„Juuretise“ olemasolu korral algab kristalliseerumine alati „õigeaegselt“. Sellisteks „juuretisteks“ võivad olla uuritava tahke aine kübemed, milliseid leidub tolmu- ja küttesaadev aine kohal õhus. Seepärast toimub kristalliseerumine lahtises anumas tavaliselt ilma ülejahutamiseteta.

Ühtedel ainetel toimub ülejahutamine väga raskesti, teised aga, vastupidi, kristalliseeruvad raskesti. Esimeste hulka kuuluvad metallid, teiste hulka sellised ained, nagu glütseriin, klaas, suhkrukaramell. Neid viimaseid saadakse jahutamisel alati mittekristalliliste kehadena. Mõnikord ilmnevad nende kristalliseerumine pärast palju aastaid kestnud säilitamist. Sellist klaasi hilinenud kristalliseerumist nimetatakse „lahtiklaasistumiseks“, karamelli kristalliseerumist — suhkrustumiseks.

Mida siis klaas endast kujutab? Kas võib teda vastuvaidlematult nimetada tahkeks kehaks?

Klaas säilitab oma kuju — see on tahke keha omadus. Kuid oma molekulide asetuse poolest on klaas — vedelik. Klaasi molekulide asetuses ei ole korrapärasust, isegi väikeses mahus puudub korrapärane võreline ehitus. Klaasi tüüpi kehi — „tahkeid vedelikke“ — nimetatakse amorfseteks kehadeks.

Vastandina kristallidele ei oma amorfset ained kindlat sulamistemperatuuri. Klaas ei sula, vaid pehmeneb. Kuumutamisel muutub klaasitükk algul tahkest pehmeks; teda võib kergesti painutada või venitada; kõrgemal temperatuuril

hakkab tükki omaenese raskuse mõjul oma kuju muutma. Vastavalt kuumutamise määrale omandab paks, veniv klaasimass selle anuma kuju, milles ta asub. Algul on see mass nii paks kui mesi, seejärel kui hapukoor ja lõpuks muutub ta peaaegu niisama vähe venivaks vedelikuks kui vesi. Kõige paremalgi tahtmisel ei saa me siin näidata teatavat kindlat temperatuuri, mil tahke keha läheb üle vedelikuks. Selle põhjuseks on klaasi ehituse põhiline erinevus kristalliliste kehade ehitusest.

Klaas ei sula, sest et vedelikud ei sula. Sulamine on rangelt korrapärase molekulide asetuse üleminek korratusse asetusse. Tahkes klaasis aga asetsevad molekulid niikuinii korratult. Tähendab, klaasi temperatuuri tõstmine suurendab ainult tema molekulide võnkeulatust, annab neile järkjärgult üha suurema vabaduse ümberpaigutumiseks. Klaasil ja selletaolistel ainetel ei ole „tõelise“ tahke kristallilise keha põhiomadust, keha, mille kohta võime kindlasti öelda, et „kuni nii- ja niisuguse temperatuurini on ta tahke, kuid nüüd hakkab tahke keha kõrval tema sulamise tulemusena ilmuma ka vedelik“.

17. TÕELISELT TAHKED KEHAD ON EHITATUD KRISTALLIDEST

Seega on rõhuv enamik tahkeid kehi kristallilise ehitusega. Metallid ja kivid koosnevad väikestest kristallikestest — teradest, mis on enamikus nähtavad ainult mikroskoobi abil.

Kristallikeste omadused, nende suurus, nende vastastikune asetus määravad kogu tahke keha omadused. Nõukogude teadlased on kulutanud palju vaeva selle seose selgitamiseks ja saavutanud väga suuri edusamme.

Püüame anda lugejale ettekujutuse nende uurimiste suu-
rest tähtsusest meie tehnikale.

Metalli igasugune töötlemine mõjub tema teradele. On näiteks saadud tükki valatud metalli; tema terad asetsevad korratult, nad on kaunis suured. Metallist tehakse traati, venitatakse seda. Kuidas käituvad seejuures kristallilised terad?

Uurimised on näidanud, et tahke keha kuju muutmine traadi venitamisega või mõnel teisel mehaanilisel töötlemisel kutsub esile kristalliliste terade killustumise. Ühtlasi

tekib mehaaniliste jõudude toimetav korrapärasus nende asetuses.

Missugusest korrapärasusest võib siin kõnelda? Terade killud on ju täiesti vormita.

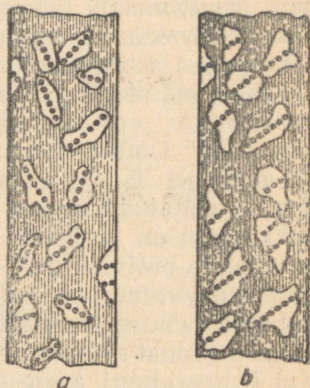
See on õige, killu väline kuju võib olla ükskõik missugune, kuid kristalli kild on siiski kristall; tema võres on ioonid pakitud niisama korrapäraselt kui hästi kujunenud tahkudega kristallis. Seepärast võib igas killus näidata, kuidas on asetatud tema ühikrakk. Enne töötlemist on rakud rangelt korrapäraselt ainult iga üksiku tera piirides — üldist korrapärasust tavaliselt ei ole. Pärast töötlemist paiknevad aga terad nii, et nende rakkude asetuses ilmneb teatav üldine korrapärasus, mida nimetatakse tekstuuriks ehk toimeks, näiteks, kõikide terade rakkude diagonaalid asuvad umbes paralleelselt töötlemise suunale.

Joonisel 40 b on tekstuur kujutatud terades olevate, teatavate kindlate, meie poolt märgitud pindade korraldatuse näites; need on ionidega kõige tihedamini täidetud pinnad ja ioonid on neis tähistatud punktiridadena.

Tekstuuri nähtuse avastasid esimestena nõukogude teadlased prof. N. J. Uspenski ja NSV Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige S. T. Konobejevski.

Erinevad töötlemisviisid (valtsimine, tagumine, venitamine) toovad esile erinevaid tekstuuri tüüpe. Ühel juhul pöörduvad terad nii, et nende ühikrakud asuvad diagonaalina piki töötlemis-suunda, teistel juhtudel — kuubi servana jne. Mida täiuslikum on valtsimine või venitamine, seda täiuslikum on ka metalli kristalliliste terade tekstuur. Tekstuuri olemasolu mõjub väga tugevasti toote mehaanilistele omadustele. Kristalliliste terade asetuse ja suuruse uurimine metalltoodetes heitis valgust metallide mehaanilise töötlemise olemusele ja näitas, kuidas seda tuleb õigesti teostada.

Kristalliliste terade ümberkorraldamisega on seotud ka teine väga tähtis tehniline protsess — loomutamine. Kui



Joon. 40. Tekstuuri puudumine (vasakul) ja tema olemasolu (paremal).

kuumutada valtsitud või venitatud metalli, siis algab küllalt kõrge temperatuuri puhul uute kristallide kasvamine vanade arvel. Lõõmutamise tagajärjel tekstuur järk-järgult hävib; uued kristallid asetuvad korratult. Vastavalt temperatuuri tõstmisele (või lihtsalt lõõmutamise kestuse pikendamisel) uued terad kasvavad, vanad kaovad. Terad võivad kasvada kuni palja silmaga nähtava suuruseni. Lõõmutamine muudab järsult metalli omadusi. Metall muutub plastilisemaks, vähem kõvaks. See toimub põhjusel, et terad muutuvad suuremaks ja tekstuur kaob.

Kõige keerukam ja ühtlasi kõige huvitavam on terase karastamise protsess, mille olemuse avastas „vene metallurgia isa“ Dmitri Konstantinovitš Tšernov.

Leheküljel 35 jutustasime mitmesugustest pakkimustest, mis on ehitatud ühtedest ning samadest aatomitest. Igal pakkimisel on „eelistatud“ temperatuuridevahe, milles ta eksisteerib püsivalt. Selliste ainete hulka kuulub raud. Kõrgete temperatuuride, umbes 1000° puhul moodustavad raua aatomid tahktsentreeritud võre; normaalse temperatuuri puhul on raual ruumtsentreeritud võre (vt. eespool joonis 29). Kui temperatuuri aeglaselt alandada, siis korraldavad raua aatomid oma võre ümber ja moodustavad toatemperatuuril normaalse pakkimuse. Teisiti toimub see protsess temperatuuri kiirel alandamisel, näiteks hõõguva terasetüki viskamisel külma vette. Sel juhul ei jõua aatomid ümber korralduda ja me saame madalal temperatuuril sellise ehituse, mis on tavaliselt omane ainult kõrgele temperatuurile.

Milleks on seda vaja? See on vajalik põhjusel, et raud, milles aatomid on pakitud tahktsentreeritud võres, omab palju paremaid mehaanilisi omadusi; karastatud teras (süsiniku ja mõningate teiste ainete vähese lisandiga raud) on mitu korda kõvem ja tugevam kui karastamata teras.

Teraline kristalliline ehitus määrab mitte ainult metallide, vaid ka teiste tahkete kehade omadused.

Puu kasvuga käib kaasas tselluloosi kristallikeste tekkimine, kasvamine ja nende asetuse muutumine.

Piimasaaduste omadusi määravad laktoosiks nimetatava aine kristallide muutused.

Kautšuki vastupidavus sõltub temas olevate kristallide hulgast.

Näidete arvu võib kergesti suurendada, kui vaadelda peaaegu kõiki rahvamajanduse harusid, kuna peale väheste erandite on kõik meid ümbritsevad tahked kehad kas üksikud

kristallid või nad koosnevad väikestest kristallidest. Tahkete kehade kristallilisele ehitusele ja selle ehituse poolt nende omadustele avaldatavale mõjule on pühendatud palju raamatuid.

Kui sõna „kristall“, mis on sageli seotud millegi harukordsega, kallihinnalisega, ainulaadsega, on lugejale saanud tuttavamaks ja lähedamaks, kui lugeja on aru saanud, et me elame kristallide maailmas, kui lugejal on tekkinud huvi kristallide omaduste, struktuuri ja nende saamise viiside uurimise vastu — ala vastu, mis on juba toonud palju kasu meie Kodumaale, — siis on selle väikese raamatu ülesanne täidetud.



SISUKORD

Sissejuhatus	3
1. Ideaalselt korrapärased kujud	5
2. Kristallid-kaksikud	7
3. Mis on sümmeetria	9
4. Väline ilu on sisemise korrapärasuse tunnus	14
5. Räägime tapeetidest	15
6. Nähtamatud võred	21
7. Piljardipallid ehitusmaterjalina	24
8. Aatomite pakkimus	27
9. Molekulide pakkimus	32
10. Ühed ning samad aatomid, kuid erinevad kristallid	35
11. Mispärast vilgukivi on kihiline	37
12. Kristallid ja valgus	41
13. Piesoelekter	45
14. Kuidas kasvavad kristallid	49
15. Kristallide kasvatamine	55
16. „Tahke vedelik“	57
17. Tõeliselt tahked kehad on ehitatud kristallidest	58

LUGEJALE.

Populaarteadusliku kirjanduse toime-
tus palub hinnangud ja arvamused
teose kohta, samuti teoses kasutatud
terminoloogia kohta saata aadressil:

Tallinn,

Pärnu mnt. 10.

Eesti Riikliku Kirjastuse
populaarteadusliku kirjanduse toimetus.

Toimetaja A. Pärn.

Kaane kujundus V. Toots.

Tehniline toimetaja E. Plaks.

Korrektorid L. Golberg ja
J. Hansen.

Ladumisele antud 20. XII 1951.
Trükkimisele antud 6. III 1952.
Paber 54×84 sm, ¹/₁₆. Trükiarv
5000. Trükipoognaid 4. Formaadile
60×92 kohaldatud trükipoognaid
3,28. Arvutuspoognaid 3,35. Telli-
mise nr. 2171. MB-06135. Trüki-
koda „Punane Täht“, Tallinn,
Pikk t. 54/58.

На эстонском языке.

Hind rbl. 2.10

110,

Rbl 2.10 1.35

A-16558

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00497848 4