

TEADUSE TEEDELT

$$-\frac{1}{c} \frac{\delta H}{\delta t}$$

0

$$\text{rot } H = \frac{1}{c} \frac{\delta E}{\delta t} + \frac{4\pi}{c} j$$

$$\text{div } E = 4\pi \rho$$

A. EINSTEIN L. INFELD

# Füüsika evolutsioon



**FÜÜSIKA  
EVOLUTSIÓN**

A. Einstein ja L. Infeld

## FÜÜSIKA EVOLUTSIOON

Raamat «Füüsika evolutsioon» jutustab kaasakiskuvalt füüsika põhiideede arenemisest, alates kõige vanemast ajast kuni tänapäevani. Raamat koosneb neljast peatükist, mis omakorda jagunevad paljudeks alapunktideks. Esimene peatükk on pühendatud mehhanistliku maailmavaate arenemisele füüsikas. Teine peatükk jutustab mehhanistliku maailmavaate taandumisest ning elektromagnetilise väljaga seotud probleemide päevakorda kerkimisest. Kolmas peatükk käsitleb relatiivsusteooria ja neljas kvantide teooria probleeme. «Füüsika evolutsioon» ei nõua lugejalt peaaegu mitte mingisuguseid eelteadmisi füüsika valdkonnast.



---

TEADUSE  
TEEDELT

---

A-24414

A. EINSTEIN, L. INFELD

# FÜÜSIKA EVOLUTSIOON

IDEEDE ARENEMINE ALGMÖISTETEST  
KUNI RELATIIVSUSTEORIANI JA  
KVANTIDE TEORIANI

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS  
TALLINN 1962

*Originaali tiitel:*

**The Evolution of Physics**

The Growth of Ideas from the Early Concepts  
to Relativity and Quanta

by

Albert Einstein

and

Leopold Infeld

Cambridge

at the University Press

1938

Tõlkinud: *H. Õiglane*

Kaas: *V. Vare*

**TARTU ÜLIKOOLI  
RAAMATUKOGU**

---

## EESSÕNA

Enne kui alustate lugemist, on teil kahtlemata õigus oodata vastust paarile lihtsale küsimusele. Missuguse eesmärgiga on kirjutatud see raamat? Missugusele lugejale on ta määratud?

Alustada täpse ning selge vastusega neile küsimustele on raske. Lihtsam oleks vastata raamatu lõpus, kuid siis on see juba täiesti üleliigne. Meile näib, et lihtsam on öelda, mida see raamat ei taha olla. Me ei kirjutanud füüsikaõpikut. Siin puudub elementaarsete füüsikaliste faktide ja teooriate süstemaatiline esitus. Meie taotlused seisnesid pigem selles, et laias laastus visandada inim-mõistuse püüdeid ideede maailma ja nähtuste maailma vahelise seose leidmisel. Me tahtsime näidata neid aktiiv-seid jõude, mis sunnivad teadust looma meie maailma tegelikkusele vastavaid ideid. Kuid meie käsitus peab olema lihtne. Läbi faktide ja mõistete labürindi tuli meil valida tee, mis näis olevat kõige iseloomulikum ja olulisem. Faktid ja teooriad, mis ei asetsenud valitud teel, pidime jätma kõrvale. Meie kavatsus sundis meid teostama faktide ja ideede kindla valiku. Probleemi tähtsuse üle ei tule otsustada temale pühendatud lehekülgede arvu järgi. Mõned olulised mõttesuunad pole leidnud kajastamist mitte sellepärast, et nad näisid meile väheolulistena, vaid sellepärast, et nad ei asetsenud meie poolt valitud teel.

Kui me kirjutasime raamatut, siis pidasime pikki diskussioone meie idealiseeritud lugeja üle ja olime tema pärast üsna mures. Me asendasime tema täieliku teadmatuse konkreetsetes füüsika ja matemaatika küsimustes terve rea hinnatavate omadustega. Me oletasime, et ta on huvitatud füüsikalistest ning filosoofilistest ideedest ja olime vaimustatud kannatlikkusest, millega ta rühkis läbi vähemhuvitatavate ja raskemate lehekülgede. Ta teadis täpselt, et mingist leheküljest arusa-

miseks peab tähelepanelikult läbi lugema kõik eelneva. Ta mõistis, et teaduslikku raamatut, olgugi lihtsat, ei saa lugeda nagu romaani.

Raamat, see on vestlus teie ja meie vahel. Te võite pidada teda igavaks või huvitavaks, väsitavaks või erutavaks, kuid meie eesmärk on saavutatud siis, kui need leheküljed annavad mingisuguse ettekujutuse leidliku inimhõimuse igavesest võitlusest füüsikalisi nähtusi juhtivate seaduste täielikuma mõistmise eest.

*A. Einstein*  
*L. Infeld*

## MEHCHANISTLIKU VAATE EDUKÄIK

*Suurte saladuste romaan. — Esimene juhtidee. — Vektorid. — Liikumise mõistatus. — Veel üks juhtidee. — Kas soojus on substants? — Lõbus raudtee. — Muutumise määr. — Filosoofiline taust. — Aine kineetiline teooria.*

### Suurte saladuste romaan

Kujutleme head raamatut, mis käsitleb meile salapärasena näivaid ja arusaamatuid sündmusi. Lugemisel suunab niisugune raamat meie mõtteid vajalikus suunas ja sunnib meid looma oma teooriat kõige toimuva kohta. Lugedes seda jutustust tähelepanelikult, jõuame saladuste täieliku lahenduseni parajasti enne seda, kui autor avaldab need raamatu lõpus. Vastandina tavalistele põnevusjuttudele ei ole lõpplahenduse etteaimamises siin midagi halba; pealegi tuleb seletus just sel momendil, kui me seda ootame.

Kas me võime niisuguse raamatu lugejaid võrrelda õpetlastega, kes üksteisele järgnevate inimpõlvede jooksul püüavad lahendada saladusi looduse raamatus? Niisugune võrdlus oleks vale ja sellest tuleks hiljem nagunii loobuda. Kuid sellel võrdlusel on olemas siiski ka teatud õigustus, mis lubab teda avardada ja muuta, nii et ta vastaks paremini teaduse püüetele lahendada universumi saladust.

See haarav jutustus looduse saladustest ei ole veel lõpetatud. Ei või olla kindel isegi selles, et tal lõpp on olemas. Kuid juba selle jutustuse lugemine on andnud meile palju: ta on õpetanud meid tundma looduse keele põhialuseid. See on aidanud meil mõista mitmeid juhtideid ja on olnud rõõmu ning erutuse allikaks neil perioodidel, kui teadus tegi peadpööritavaid edusamme. Kuid me teame selgesti, et vaatamata paljudele läbiuuri-

tud köidetele, oleme lõpust veel kaugel, kui seda lõppu üldse on olemas. Igal vaheetapil püüame seletada kõike kooskõlas juba avastatud ideedega. Katseks loodud teooriad seletasid palju, kuid üldist lahendust, mis oleks vastavuses kõigi meile tuntud faktidega, pole seni leitud. Tihti juhtus, et esimesel pilgul täiuslikuna näiv teooria osutus edasisel lugemisel ebaõigeks. Ilmusid uued faktid, mida teooria ei seletanud või mis olid temaga koguni vastuolus. Mida rohkem me loeme, seda kõrgemalt hindame raamatu täiuslikku ülesehitust, kuigi tema saladuste lõplik lahendus näib eemalduvat seda rohkem, mida kaugemale me lugemisega jõuame.

Alates Conan Doyle'i suurepäraresetest jutustustest, saabub peaaegu igas detektiivromaanis niisugune silmapilk, kus uurija on kogunud kõik faktid, mis on talle vajalikud vähemalt probleemi mõne etapi lahendamiseks. Need faktid näivad tihti väga kummalistena, täiesti juhuslikena ning üksteisest sõltumatutena. Kuid suur detektiiv otsustab, et edasine uurimine pole antud momendil vajalik, ja seose kogutud faktide vahel võib leida ainuüksi puhta mõtlemise abil. Nii ta mängib viiulit või pahvib tugitoolis lamades oma piipu, kui äkki, Jupiteri nimel, on see seos leitud! Nüüd on tal vajalik seletus käes ja ta teab ka, missugused teised sündmused pidid veel juhtuma. Et nüüd on selge, kust neid sündmusi otsida, võib ta soovi korral koguda uusi kinnitusi oma teooriale.

Teadlane, kes loeb looduse raamatut — kui korrata kulunud fraasi —, peab leidma lahenduse ise, sest ta ei saa vaadata raamatu lõppu, nagu seda teeb sageli kannatamatu lugeja teiste raamatute puhul. Käesoleval juhul on lugeja ühtlasi uurija, kes püüab seletada, vähemalt osaliseltki, sündmuste omavahelist seost. Selleks peab teadlane koguma seni veel süstematiseerimata fakte ja oma loova mõtlemisega muutma nad seostatuks ning arusaadavaks.

Meie eesmärgiks ongi järgnevatel lehekülgedel kirjeldada üldistes joontes seda osa füüsikute tööst, mis vastab uurija puhtale mõtlemisele. Seetõttu käsitleme peamiselt mõtete ja ideede osatähtsust nendes julgetes otsingutes, mis on tehtud füüsikalise maailma tunnetamise eesmärgil.

## Esimene juhtidee

Katsed lugeda haaravat jutustust looduse saladustest on sama vanad kui inimmete ise. Ent alles veidi rohkem kui kolmsada aastat tagasi õppisid teadlased mõistma selle jutustuse keelt. Sellest ajast peale, s. o. alates Galileist ja Newtonist, on lugemine edenenud kiiresti. Arendati uurimistehnikat, süstemaatilisi meetodeid juhtideede leidmiseks ja analüüsimiseks. Mõned looduse mõistatustest lahendati, kuigi edasiste uurimuste valgusel selgus, et paljud lahendused olid pealiskaudsed ja ajutised.

Kõige põhilisemaks probleemiks, mis oma keerukuse tõttu jäi tuhandete aastate jooksul selgusetuks, oli liikumise probleem. Liikumised, mida kohtame looduses — õhku visatud kivi lendamine, laeva ujumine merel, vankri veeremine tänaval —, on tegelikult väga keerulised. Et mõista kõiki neid nähtusi, on otstarbekohane alustada kõige lihtsamatest võimalikest juhtudest ja järkjärgult üle minna keerulisematele. Vaatleme paigalseisvat keha, s. o. juhtu, kus liikumine täielikult puudub. Et muuta niisuguse keha asendit, tuleb avaldada talle mingisugust mõju, teda tõugata, tõsta või mõjutada mõne teise keha, näiteks hobuse või aurumasina abil. Meie intuitsioon seob liikumise tõukamise, tõstmise või tõmbamisega. Korduv kogemus annaks meile julguse väita veel rohkem: kui me tahame keha kiiremini liikuma panna, peame teda tugevamini tõukama. Näib olevat loomulik järeldada, et mida tugevam on kehale avaldatav mõju, seda suuremaks muutub keha kiirus. Nelja hobusega veetav tõld veereb kiiremini kui tõld, mille ette on rakendatud ainult kaks hobust. Seega intuitsioon ütleb meile, et kiirus on tihedalt seotud välismõjuga.

Neile, kes loevad väljamõeldisi detektiividest, on juba tuttav niisugune olukord, kus valejäljed toovad jutustusse segaduse ja lükkavad lõpplahenduse edasi. Nii ka see arutlusmeetod, mida nimetame intuitsiooniks, polnud sobiv ja viis ebaõigetele järeldustele liikumise kohta. Aastasadu peeti neid järeldusi õigeiks. Peamiseks süüdlaseks selles, et seda intuiitvset arusaamist liikumisest kogu Euroopas nii kaua usuti, oli nähtavasti Aristotelese suur autoriteet. «*Mehhaanikas*», mille autoriks teda juba kaks tuhat aastat peetakse, loeme:

«Liikuv keha peatub, niipea kui teda tõukav jõud lõpetab oma mõju.»

Teadusliku arutluse meetodi avastamine ja rakendamine Galilei poolt oli üheks tähtsaimaks saavutuseks inimhõlme ajaloos, tähistades ühtlasi füüsika tõelist algust. See avastus õpetab meile, et vahetutel vaatlustel tuginevaid intuitsiivseid järeldusi ei või alati usaldada, nad viivad mõnikord valejälgedele.

Missuguseid vigu intuitsioon siis põhjustab? Kas tõesti on see vale, kui öelda, et nelja hobusega veetav tõld liigub kiiremini kui tõld, mille ees on ainult kaks hobust?

Peatume lähemalt tähtsamatel liikumisega seotud tõsi-asjadel, mida inimkond tunneb hästi igapäevastest kogemustest juba tsivilisatsiooni algusest peale, olles omandanud need karmis võitluses olemasolu eest.

Oletame, et keegi lükkab käru mööda tasast teed. Äkki lõpetab ta tõukamise. Käru läbib veel lühikese teelõigu ja jääb siis seisma. Me küsime: kuidas suurendada seda teelõiku? Selleks on olemas mitu võimalust, näiteks määrata rattaid või ehitada väga tasane tee. Mida kergemini pöörlevad rattad ning mida vähem on teel konarusi, seda kaugemale veereb käru. Kuid mida annab rataste määrimine või tee konaruste silumine? Ainult seda, et välismõju kärule muutub väiksemaks. Nähtus, mida nimetatakse hõõrdumiseks, väheneb nii ratastes kui ka rataste ja tee vahel. See on juba vaatlusandmete teoreetiline ja küllaltki meelevaldne tõlgendamine. Veel üks tähtis samm edasi, ja me olemegi õigetel jälgedel. Kujutleme täiesti siledat teed ja rattaid, kus hõõrdumine täiesti puudub. Siis poleks enam midagi, mis peataks käru, ja see liiguks igavesti. Sellele järeldusele jõudsimme ainult idealiseeritud eksperimendi analüüsimise teel. Niisugust katset ei saa kunagi tegelikult teostada, sest pole võimalik kõrvaldada kõiki välismõjusid. Idealiseeritud eksperiment annab juht-idee, mis tegelikult moodustaski liikumise mehhaanika aluse.

Võrreldes mõlemaid lähenemisviise probleemile, võime öelda, et intuitsiivne arusaamine seisneb järgnevas: mida suurem on mõju, seda suurem on kiirus. Seega kiiruse olemasolu näitab, kas kehale mõjub välisjõude või mitte. Galilei esitatud uus seisukoht on aga midagi muud: kui keha ei tõugata, ei tõmmata ega avaldata talle mingisugust muud mõju, lühidalt öeldes, kui kehale ei mõju

mingisuguseid välisjõude, siis ta liigub sirgjooneliselt ja ühtlaselt, s. o. ta liigub mööda sirgjoont alati ühesuguse kiirusega. Järelikult kiiruse olemasolu iseendast veel ei näita, kas kehale mõjub välisjõude või ei. Inimpõlv hiljem formuleeris Newton selle Galilei õige järelduse kui *inert-siseaduse*. See on seadus, mis füüsikas harilikult esimesena pähe õpitakse ja paljud mäletavad seda veel praegugi.

Iga keha säilitab paigalseisu või ühtlase sirgliikumise seni kuni ta seda olekut jõudude mõjul pole sunnitud muutma.

Nägime, et inert-siseadust pole võimalik tuletada vahe-tult eksperimendist, vaid me saame ta ainult puhtmõt-telisel teel, s. o. vaatlustega seotud mõtlemise abil. Idealisee-ritud katset ei saa kunagi teostada, kuigi ta võimaldab meil sügavamalt mõista tegelikke eksperimente.

Meid ümbritsevas maailmas esinevate keeruliste liiku-miste hulgast valime esimeseks näiteks ühtlase sirgliiku-mise, mis on lihtsaim liikumise liik, kuna sel juhul ei mõju kehale ühtegi välisjõudu. Kuid ühtlast sirgliiku-mist ei saa kunagi realiseerida; tornist allavisatud kivi või tõuke saanud kärü ei saa kunagi liikuda absoluutselt ühtlaselt ja sirgjooneliselt, sest pole võimalik kõrvaldada välisjõudude mõju.

Heas jutustuses mõistatuslikest saladustest viivad kõige silmatorkavamad jäljed sageli ebaõigetele kahtlustustele. Püüetes mõista looduse seadusi leiame samuti, et kõige silmnähtavam intuiitiivne seletus osutub tihti vääraks.

Inimmõte loob universumist igavesti muutuva pildi. Galilei panus teadusesse seisnes intuiitiivse vaatekoha purustamises ja selle asendamises uuega. Selles on Galilei avastuse tähtsus.

Kuid otsekohe kerkivad järgmised küsimused liikumise kohta. Kui kiirus ei ole kehale mõjuva jõu näitajaks, mis selleks siis on? Sellele põhiküsimusele leidis vastuse Gali-lei, täpsemini Newton. Nii tekkis meie uurimuste uus juhtidee.

Õige vastuse leidmiseks püstitatud küsimusele tuleb meil veidi sügavamalt mõelda vankrist absoluutselt sile-dal teel. Liikumise ühtlane ja sirgjooneline iseloom selles idealiseeritud katses oli tingitud kõigi välisjõudude puu-dumisest. Kujutleme nüüd, et ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuv kärü saab tõuke liikumise suunas. Mis siis juhtub?

Käru kiirus ilmselt kasvab. Samuti on selge, et tõuge liikumise vastassuunas vähendab kiirust. Esimesel juhul tõuge kiirendab käru liikumist, teisel juhul aeglustab. Siit saab kohe teha järelduse: välisjõu mõjul kiirus muutub. Seega on tõuke või tõmbe järelduseks mitte kiirus ise, vaid tema muutumine. Niisiis, jõud suurendab või vähendab kiirust, sõltuvalt sellest, kas ta mõjub liikumisega samas või vastupidises suunas. Seda mõistis selgesti Galilei, kui ta kirjutas oma raamatus «*Vestlused kahest uuest teadusest*»:

...liikuvale kehale kord antud kiirus püsib muutumatuna, niikaua kuni on kõrvaldatud kiirenemise või aeglustumise välistes põhjused, — tingimus, mis kehtib ainult rõhttasapinnal, sest liikumisel mööda kaldpinda allapoole on juba olemas kiirenemise põhjus, kuna liikumisel mööda kaldpinda ülespoole esineb aeglustumine. Sellest järgneb, et liikumine rõhttasapinnal on igavene, sest kui kiirus on muutumatu, siis liikumine ei või nõrgeneda ega väheneda, ammugi veel kaduda.

Jälgides seda õiget juhtideed, jõuame liikumise probleemi sügavama mõistmiseni. Newtoni järgi on klassikalise mehhaanika aluseks seos jõu ja kiiruse muutumise vahel, mitte aga seos jõu ja kiiruse enda vahel, nagu intuiitiivselt arvaksime.

Me kasutasime kahte mõistet, mis etendavad klassikalises mehhaanikas tähtsat osa: need on jõud ja kiiruse muutumine. Teaduse edasise arenemise jooksul üldistatakse ning avardatakse neid mõlemaid mõisteid ja seejärel tuleb neid lähemalt uurida.

Mis on jõud? Intuiitiivselt me tunneme, mida selle all mõeldakse. See mõiste tekib pingutusest, mis kulub tõuke, viske või tõmbe teostamiseks, lihaste tegevusega kaasnevast aistingust. Jõu mõiste üldistamine läheb aga nendest lihtsatest näidetest kaugemale. Me võime mõelda jõust, ilma et tarvitseksime kujutleda hobust koorma ees. Me räägime tõmbejõust Päikese ja Maa ning Maa ja Kuu vahel, samuti jõududest, mis põhjustavad tõusu ja mõõna. Me räägime jõust, millega Maa mõjub kõigile meid ümbritsevatele esemetele, hoides neid oma mõjupiirkonnas. Me räägime ka jõust, millega tuul tekitab merelaineid ja paneb liikuma lehed puudel. Kus ja kunas me ka ei märkaks kiiruse muutumist — selle põhjuseks on välisjõud kõige üldisemas mõttes. Newton kirjutas oma «*Printsiipides*»:

Rakendatud jõud on mõju, mida avaldatakse kehale, et muuta tema paigalseisu või ühtlase sirgliikumise olekut.

See jõud ilmneb ainult mõjutamises ja ei säili kehas, kui mõjutamine lõpetatakse, sest inertsitõttu säilitab keha iga uue oleku, mille ta on omandanud. Mõjuvad jõud on mitmesuguse päritoluga, näiteks löögil mõjuvad jõud, rõhumine ja tsentripetaaljõud.

Kui kivi langeb tornist alla, on tema liikumine mitteühtlane: kivi kiirus langemise vältel järjest kasvab. Siit järeldame, et liikumise suunas mõjub välisjõud, teiste sõnadega — Maa tõmbab kivi enda poole. Võtame teise näite. Mis juhtub, kui visata kivi otse üles? Niisugusel juhul kivi kiirus kogu aeg väheneb, kuni ta on jõudnud lennu kõige kõrgemasse punkti. Seejärel hakkab kivi langema tagasi Maa poole. Kiiruse vähenemine kivi tõusmisel on tingitud samast jõust kui langeva keha kiirenduski. Erinevus on ainult selles, et teisel juhul mõjub jõud liikumise suunas, esimesel juhul aga vastassuunas. Jõud on üks ja seesama, kuid ta kutsub esile kas kiiruse kasvamise või kahanemise olenevalt sellest, kas kivi langeb või liigub ülespoole.

## Vektorid

Kõik senivaadeldud liikumised on *sirgliikumised*, s. o. liikumised mööda sirgjoont. Nüüd peame tegema järgmise sammu. Jättes esialgu kõrvale kõik keerukused ja analüüsides ainult lihtsamaid juhte, jõuame looduse seaduste mõistmiseni. Sirgjoon on lihtsam kui kõverjoon, ent me ei saa piirduda ainult sirgliikumise uurimisega. Kuu, Maa ja planeetide liikumised — just need liikumised, kus klassikalist mehhaanikat rakendati nii hiilgava eduga — toimuvad kõverjoonelistel teedel. Üleminek sirgliikumiselt kõverjoonelisele liikumisele toob kaasa uusi raskusi. Kui me aga tahame klassikalise mehhaanika printsiipe mõista, siis peab meil jätkuma julgust nende raskuste ületamiseks. Just klassikaline mehhaanika andis meile esimesed juhtideed ja rajas sellega lähtekoha loodusteaduse arenemiseks.

Vaatame teist idealiseeritud eksperimenti, kus täiuslikult sile kuulike veereb tasasel laual. Me teame, et kui kuulikest tõugata, s. o. rakendada jõudu, muutub tema kiirus. Oletame nüüd, et erinevalt käru näitest tõuke suund ei ühti liikumise sihiga. Olgu tõuge suunatud näi-

teks ristsihis liikumisega. Mis juhtub siis kuulikesega? Kuuli liikumisel võib eristada kolme etappi: esialgne liikumine, liikumine jõu mõjumise ajal ja liikumine siis, kui jõud on oma mõju juba lõpetanud. Inertsiseaduse kohaselt kuulikese kiirus ei muutu ei enne ega ka pärast jõu mõjumist. Kuid kuulikese ühtlases liikumises enne ja pärast jõu mõjumist on erinevus: on muutunud liikumise suund. Kuulikese esialgse liikumise suund ja jõu mõjumise suund olid omavahel risti. Jõu mõju lakkamisel ei liigu kuulike aga kummaski neist suundadest, vaid mingisuguses vahepealses suunas. Kui tõuge on tugev ja kuuli esialgne kiirus väike, siis on uus liikumissuund lähedane jõu mõjumise suunale. Kui aga tõuge on nõrk ja algkiirus suur, siis kuulike jätkab liikumist suunas, mis peaaegu ühtib esialgse liikumise suunaga. Tuginedes inertsiseadusele, jõuame uuele järeldusele: välisjõud muudab üldiselt nii kiirust kui ka liikumise suunda. Selle tõsiasja mõistmine valmistab meid ette järgmiseks üldistuseks: *vektori* mõiste sissetoomiseks füüsikasse.

Nüüd võime jätkata oma vahetu arutluse meetodit, kusjuures lähtekohaks jääb ikka Galilei inertsiseadus. Me pole selle seaduse väärtuslikku sisu liikumise mõistatuse lahendamisel veel kaugeltki ammendanud.

Vaatleme kahte kuulikest, mis veerevad erinevates suundades mööda tasast lauda. Konkreetsuse mõttes oletame, et nende liikumissuunad on omavahel risti. Kuna välisjõud puuduvad, siis on kuulikeste liikumine täiesti ühtlane. Oletame veel, et kiirused on võrdsed, s. o. mõlemad kuulikesed katavad võrdsed teelõigud sama aja jooksul. Kas saab aga öelda, et kuulikesed liiguvad ühesuguse kiirusega? Vastus võib olla nii jah kui ei! Kui kahe auto kiirusemõõtjad näitavad mõlemad nelikümmend kilomeetrit tunnis, siis harilikult öeldakse, et autodel on ühesugune kiirus sõltumatult sellest, missuguses suunas kumbki neist liigub. Kuid teadusel on vaja oma keelt ja omi mõisteid. Teaduslikud mõisted saavad tihti alguse igapäevases elus kasutatavatest mõistetest, kuid nende arenemine läheb oma rada. Nad muutuvad, kaotavad igapäevasele keelele omase mitteühesuse ja võtavad range vormi, mis annabki võimaluse kasutada neid teadusliku mõtlemise juures.

Füüsiku seisukohalt on otstarbekohane kahes erinevas suunas liikuvate kuulikeste kiirusi erinevateks lugeda.

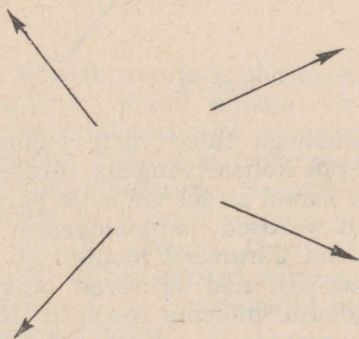
See on muidugi kokkuleppe küsimus, kuid on ju palju lihtsam öelda, et ühelt teeristilt nelja erinevat teed mööda sõitvate autode kiirused on erinevad isegi sel juhul, kui kõigil neil kiirusemõõtjad näitavad nelikümmend kilomeetrit tunnis. Vahetegemine ainult absoluutväärtusega võetud kiiruse ja selle kiiruse vahel, kus on arvestatud ka liikumise suunda, näitab kujukalt, kuidas füüsika lähtub igapäevase elu mõistetest ja muudab neid niisugusel viisil, et sellest oleks kasu teaduse edasisele arenemisele.

Pikkuse mõõtmisel avaldub tulemus alati teatud pikkusühikute arvu kaudu. Lõigu pikkus võib olla kolm meetrit seitse sentimeetrit; mingi ese võib kaaluda kaks kilogrammi kolm grammi; mõõdetud ajavahemik võib võrduda nii ja nii mitme minuti või sekundiga. Kõigil neil juhtudel avaldub mõõtmistulemus mingi arvuna. Kuid mõnede füüsikaliste suuruste kirjeldamisel ei piisa ainult arvust. Sellele arusaamisele jõudmine tähendas tõsist edusammu teaduslikus uurimistöös. Näiteks kiiruse iseloomustamisel on suund sama oluline nagu arvgi. Suurust, millel on nii arvuline väärtus kui ka suund, nimetatakse *vektoriks*. Vektori sümboliks võetakse harilikult nool. Kiirust võib esitada noolena, täpsemalt öeldes, vektorina, mille pikkus valitud ühikuteskaalas väljendab kiiruse arvulist väärtust ja suund näitab liikumise suunda.

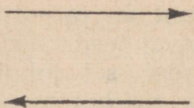
Kui neli autot sõidavad arvuliselt võrdsete kiirustega ühest punktist laiali, siis võib nende kiirusi esitada nelja võrdse pikkusega vektorina, nagu on näidatud joonisel 1.

Valitud ühikuteskaalas vastab üks sentimeeter kiirusele kakkümmend kilomeetrit tunnis. Sel teel saab iga kiirust kujutada vektorina ja, vastupidi, kui on teada mõõteskaala, võib niisugusest vektordiagrammist välja lugeda kiirust.

Kui kaks autot mööduvad teineteisest, nii et mõlema



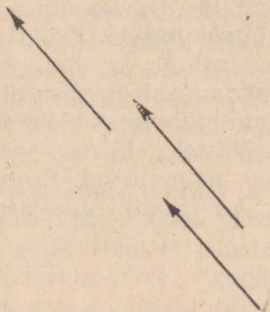
Joon. 1.



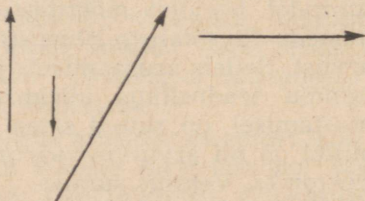
Joon. 2.

kiirusemõõtjad näitavad nelikümmend kilomeetrit tunnis, siis iseloomustame nende kiirusi võrdse pikkusega, kuid vastupidiselt suunatud vektoritega (joonis 2). Samuti peavad nooled New Yorgi metroos, mis näitavad «Linna»

ja «Rongile», olema suunatud vastupidiselt. Kuid kõigil rongidel, mis liiguvad arvuliselt võrdsete kiirustega linna poole, on kiirused ühesugused ka suuna poolest, nii et neid võib kujutada ühe ja sama vektoriga. See kiirusvektor ei ütle aga seda, mis jaama rong parajasti läbib või missugusel paralleelteil ta liigub. Teiste



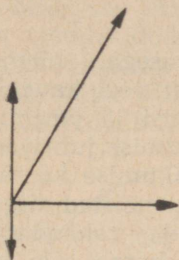
Joon. 3.



Joon. 4.

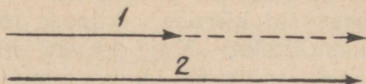
sõnadega tuleb meil joonisel 3 toodud vektorid kokkuleppe kohaselt lugeda võrdseteks: kõik nad asetsevad ühel ja samal sirgel või selle paralleelsirgetel, nende pikkused on võrdsed ja noolekesed on neil kõigil ühes ja samas otsas. Järgmisel joonisel on kujutatud ebavõrdsed vektorid, sest nad erinevad omavahel kas pikkuse, suuna või koguni mõlema poolest. Needsamad neli vektorit võib joonistada ka nii, et nad lähtuksid ühest punktist (joonis 5). Kuna vektori alguspunkt pole oluline, siis võivad need neli vektorit kujutada nelja auto kiirusi nii sel juhul, kus autod väljuvad samast kohast, kui ka juhul, kus autod liiguvad eri maanurkades niisuguste kiirustega ja niisugustes suundades, nagu on näidatud joonisel.

Sellist vektorilist kujutamiseviisi võime rakendada nüüd eespool käsitletud sirgliikumise juhtude kirjeldamiseks. Seal vaatasime ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvat käru, mille kiirus suurenes liikumissuunalise tõuke



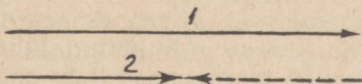
Joon. 5.

mõjul. Graafiliselt võib seda esitada kahe vektori abil, millest lühem kujutab kärü kiirust enne tõuget, samasuunaline pikem vektor aga kärü kiirust pärast tõuget (joonis 6). On selge, mida tähendab



Joon. 6.

dab punktiiriga kujutatud vektor: see on tõukest tingitud kiiruse muutus. Juhul, kui jõud mõjub liikumisele vastupidises suunas, s. t. kiirus väheneb, on vektordiagrammil teine kuju (joonis 7). Punktiirvektor vastab jällegi kiiruse muutusele, kuid nüüd on tema suund vastupidine eelmisele juhule. On selge, et samuti nagu kiirus ise, on



Joon. 7.

vektor ka kiiruse muutus. Iga kiiruse muutuse põhjuseks on aga välisjõud, järelikult tuleb ka jõudu esitada vektorina. Kärule mõjuva jõu iseloomustamiseks ei piisa ainult sellest, kui teame kärule antud tõuke suurust, vaid tuleb ka öelda, missuguses suunas tõukasime. Seepärast peab jõudu, samuti nagu kiirust ja kiiruse muutustki, esitama vektorina, mitte aga hariliku arvuna. Järelikult on välisjõud vektor, mille suund ühtib kiiruse muutuse suunaga. Punktiirvektorid joonistel 6 ja 7 näitavadki nii jõu suunda kui ka kiiruse muutuse suunda.

Skeptik võiks nüüd öelda, et ta ei näe vektori sissetoomises mingisugust kasu. Sellega ainult avaldati juba varem tuntud tõsiasi ebatavalise ja keerulise keele kaudu. Tõepoolest, praegu oleks skeptikut raske veenda, et ta eksib. Käesoleval momendil on tal tõepoolest õigus. Kuid varsti näeme, et just see ebatavaline keel viib tähtsatele üldistustele, kus olulist osa mängivad vektorid.

## Liikumise mõistatus

Seni kui piirdume ainult sirgliikumisega, oleme looduses jälgitavate liikumiste mõistmisest veel kaugel. Meil tuleb uurida ka kõverjoonelisi liikumisi ja järgmiseks sammuks ongi leida niisuguseid liikumisi juhtivad seadused, mis pole kerge ülesanne. Sirgliikumise korral osutusid kiiruse, kiiruse muutuse ja jõu mõisted väga kasulikeks. Kuid ei ole silmanähtav, kuidas rakendada neid mõisteid kõverjoonelise liikumise korral. On ju tõepoolest mõeldav, et üldjuhulise liikumise puhul need vanad mõisted ei sobi ja et nende asemel tuleks luua hoopis uued. Kuidas siis on, kas me peaksime minema vana rada mööda või otsima uut?

Mõistete üldistamist esineb teaduses väga tihti. Üldistamise meetod pole aga üheselt määratud, sest harilikult on selleks palju võimalusi. Kuid mis tahes üldistamise korral peab olema rangelt täidetud järgmine nõue: niipea kui on rahuldatud lähtetingimused, peab üldistatud mõiste taanduma selleks mõisteks, millest me üldistamisel lähtusime.

Kõige lihtsam on seda seletada meid praegu huvitava näite varal. Püüame üldistada kiiruse, kiiruse muutuse ja jõu mõisteid kõverjoonelise liikumise juhule. Kui me räägime kõverjoonest, siis haarame selle mõistesse ka sirgjoone. Sirgjoon on kõverjoone eriline lihtne kuju. Seetõttu kiiruse, kiiruse muutuse ja jõu mõistete rakendamine kõverjoonelise liikumise korral peab automaatselt andma nende mõistete rakendamise ka sirgliikumisele. Kuid sirgliikumise kohta tulenevad järeldused ei tohi olla vastuolus varemsaadud tulemustega. Kui kõverjoon muutub sirgeks, siis peavad kõik üldistatud mõisted taanduma tuttavateks mõisteteks, mis kirjeldavad sirgliikumist. Kuid sellest kitsendusest üksi ei piisa üldistuse üheseks määramiseks. Siin jääb veel palju võimalusi. Teaduse ajalugu näitab, et kõige lihtsamad üldistused on mõnikord otstarbekohased, mõnikord mitte. See pärast tuleb olemasolevaid üldistamisvõimalusi eelnevalt hinnata. Meie juhul on õiget üldistamisviisi kerge leida. Osutub, et uued üldistatud mõisted on valitud erakordselt õnnestunult ja aitavad meil mõista nii visatud kivi kui ka planeetide liikumist.

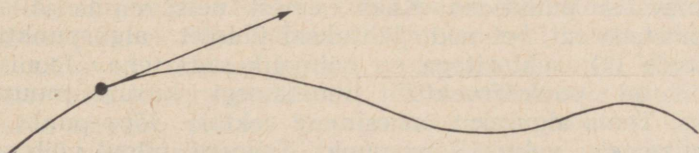
Mida siis tähendavad sõnad «kiirus», «kiiruse muutus» ja «jõud» üldise kõverjoonelise liikumise korral? Alustame kiirusest. Liikugu mööda kõverjoont vasakult paremale väga väike keha. Niisugust väikest keha nimetatakse harilikult *osakeseks*. Punktike joonisel 8 näitab



Joon. 8.

osakese asendit mingil ajamomendil. Missugune on osakese kiirus meid huvitaval ajahetkel kõvera antud punktis? Jällegi on Galilei juhtidee see, mis näitab võimaluse kiiruse sissetoomiseks. Kasutame veel kord oma kujutlusvõimet ja analüüsime idealiseeritud eksperimenti. Liikugu osake välisjõudude mõjul mööda kõverjoont vasakult paremale. Kujutleme nüüd, et sel hetkel, kui osake jõuab joonisel märgitud punkti, kaovad äkki kõik välisjõud. Inertsiseaduse kohaselt peab sellest momendist alates osakese liikumine jääma ühtlaseks ja sirgjooneliseks. Muidugi, praktikas ei saa me kunagi kaotada kõiki välisjõude. Me võime ainult oletada, «mis juhtuks, kui...», ja hinnata oma oletuse tõepärasust sellest tulenevate järelduste abil ning samuti selle põhjal, kui hea on nende järelduste kooskõla katsetega.

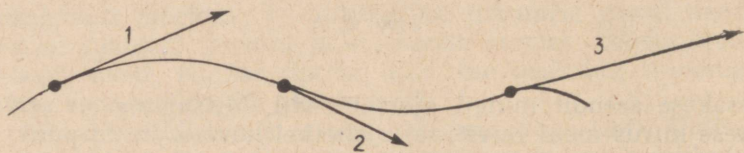
Vektor joonisel 9 näitab oletatava ühtlase sirgliikumise suunda pärast seda, kui kadusid kõik välisjõud. See on niinimetatud tangentsiaalne või puutesuund osakese teele. Vaadeldes liikuvat osakest läbi mikroskoobi, näeme ainult väga väikest osa tema teest, mis paistab peaaegu sirglõiguna. Puutejoon on selle lõigu pikendus.



Joon. 9.

Sel viisil joonistatud vektor kujutabki kiirust antud hetkel. Kiirusvektor asetseb puutejoonel; tema pikkus annab kiiruse arvulise suuruse, s. o. selle kiiruse, mida loeme näiteks auto kiirusemõõtjalt.

Idealiseeritud eksperimenti, kus kiirusvektori leidmiseks kõrvaldatakse kõik jõud, ei saa väga tõsiselt võtta. Ta aitab meil ainult mõista, mida tuleb nimetada kiirusvektoriks kõverjoonelisel liikumisel ja lubab defineerida seda vektorit antud punkti ja antud ajahetke jaoks.

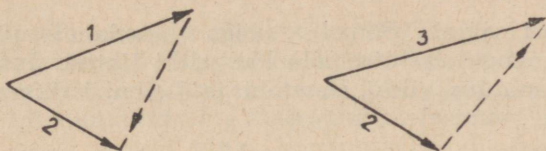


Joon. 10.

Joonisel 10 on toodud kõverjoont mööda liikuva osakese kiirusvektorid kolmes erinevas punktis. Nagu näitavad need vektorid, muutub siin liikumise jooksul nii kiiruse suund kui ka suurus.

Kas uus kiiruse mõiste rahuldab nõuet, mille me eespool püstitasime kõigile üldistatud mõistetele? Teisiti öeldes: kui kõverjooneline liikumistee muutub sirgeks, kas siis uus kiiruse mõiste taandub selleks mõisteks, mida kasutasime eespool? Ilmselt jah. Sirgjoone puutujaks on sirgjoone ise. Kiirusvektor asetseb siis täielikult liikumisteele, nii nagu see oli käru või veereva kuulikese näites.

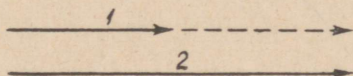
Järgmiseks sammuks on kiiruse muutuse mõiste sissetoomine kõverjoonelisel liikuva osakese korral. Seda võib teha mitmel viisil; meie valime siin kõige lihtsama ja otstarbekohasema tee. Viimasel joonisel on kolm kiirusvektorit, mis iseloomustavad osakese liikumistee erinevates punktides. Kaks esimest neist võime jällegi joonistada nii, et nad lähtuksid ühisest alguspunktist (joonis 11); vektoritega on võimalik seda teha. Joonisel näidatud punktiirvektorit nimetamegi kiiruse muutuseks. Tema alguseks on esimese vektori lõpp-punkt ja lõpuks teise vektori lõpp-punkt. Esimesel pilgul võib see kiiruse muutuse definitsioon tunduda kunstliku ja mõtte-



Joon. 11.

tuna. Ta muutub aga palju selgemaks niisugusel erijuhul, kui vektorid 1 ja 2 on samasuunalised (joonis 12). See tähendab muidugi juba üleminekut sirgliikumisele.

Kui mõlemal vektoril on sama alguspunkt, siis punktiirvektor ühendab joonisel jällegi mõlema vektori lõpp-punkte. Joonis 12 langeb nüüd ühte



Joon. 12.

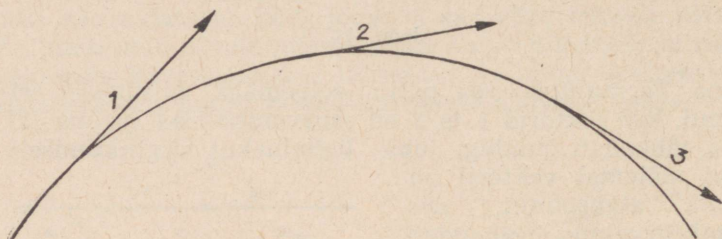
joonisega 6, tähendab, endine kiiruse muutuse mõiste on erijuht uuest, üldistatud mõistest.

Olgu märgitud, et samasuunaliste vektorite kujutamisel peame nad joonistama üksteise kõrvale; joonistades vektorid teineteise peale, nad ühtiksid ja meil poleks võimalik neid eristada.

Nüüd tuleb meil astuda üldistamisprotsessi viimane, kõige tähtsam samm. Tuleb püstitada seos jõu ja kiiruse muutuse vahel, nii et saaksime formuleerida juhtidee, mis võimaldaks meil mõista liikumise põhiprobleeme.

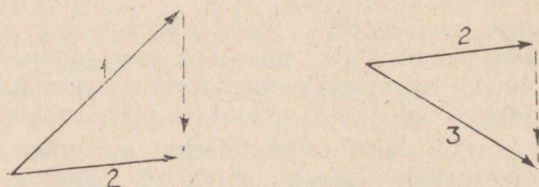
Juhtidee sirgliikumise seletamiseks oli väga lihtne: välisjõud põhjustab kiiruse muutuse; jõuvektor on samasuunaline kiiruse muutuse vektoriga. Kuidas tuleks nüüd sõnastada juhtidee kõverjoonelise liikumise korral? Täpselt samuti! Erinevus on ainult selles, et kiiruse muutusel on nüüd laiem tähendus kui varem. Seda näitab selgesti põgus pilk punktiirvektoritele kahel viimasel joonisel. Kui on teada osakese kiirus kõvera kõigis punktides, võib otsekohe leida osakesele mõjuva jõu suuna mis tahes punktis. Selleks tuleb välja joonistada kiirusvektorid kahel väga lähedasel ajamomendil (need vektorid näitavad osakese kiirust teineteisele õige lähedal asetsevates kõvera punktides). Siis vektor, mis on tõmmatud esimese vektori lõpp-punktist teise vektori lõpp-punkti, näitab mõjuva jõu suunda. Seejuures on oluline, et kiirusvektorid oleksid võetud just väga lühikese aja-

vahemiku järel. Sõnade «väga lähedane» või «väga lühike» ranget analüüs pole kaugeltki lihtne. Just nende sõnade analüüs viiski Newtoni ja Leibnizi diferentsiaal-arvutuse loomisele.



Joon. 13.

Tee Galilei juhtidee üldistamisele on tegelikult käänuline ja pikk. Me ei saa siin rääkida nendest paljudest viljakatest järeldustest, millele see üldistus viis. Olgu ainult öeldud, et ta andis otstarbekohase ja lihtsa seletuse paljudele faktidele, mis enne seda näisid olevat vastuolulised ja arusaamatud.



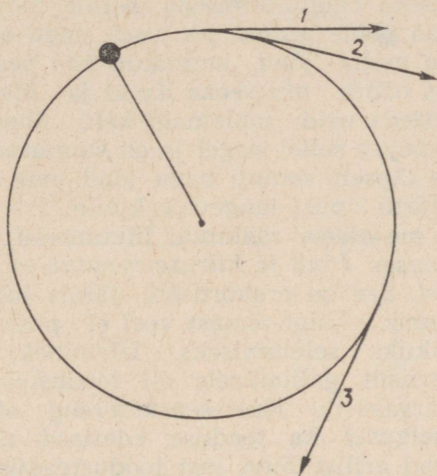
Joon. 14.

Kõikvõimalikest liikumistest vaatame siin ainult kõige lihtsamaid ja rakendame äsjasõnastatud seadusi nende seletamiseks.

Püssist väljatulistatud kuul, horisondi suhtes nurga all visatud kivi, torust väljuv veejuga — kõik nad joonistavad õhku ühte ja sama tüüpi hästituntud kõvera, — parabooli. Kujutleme nüüd, et näiteks kivi on varustatud kiirusemõõtjaga, nii et kivi kiirust saab määrata igal ajamomendil. Tulemused on esitatud joonisel 13. Kivile mõjuva jõu suund langeb ühte kiiruse muutuse suunaga; eespool me nägime, kuidas seda määrata. Järgmine joonis näitabki, et jõud on vertikaalne ja suunatud alla-

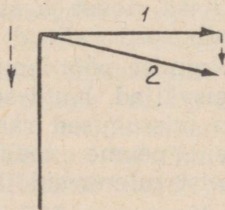
poole. Täpselt sama on olukord tornist langeva kivi korral. Käidud teed ja kiirused on kummalgi kivil erinevad, kiiruse muutustel on aga mõlemal juhul sama suund, — s. t. nad on suunatud Maa keskpunkti.

Nööri külge seotud ning horisontaaltasapinnas tiirlev kivi liigub mööda ringjoont.



Joon. 15.

Kui kivi kiirus suuruse poolest ei muutu, on kõik liikumise diagrammil esitatud vektorid võrdse pikkusega (joonis 15). Et aga trajektoor ei ole sirgjooneline, siis kiirusvektor ikkagi muutub. Ainult ühtlane sirgliikumine toimub ilma, et mõjuks ühtegi jõudu. Siin aga on jõud olemas ja kivi kiirus muutub, kuigi mitte suuruse, vaid ainult suuna poolest. Vastavalt liikumise seadusele peab seda muutust põhjustama mingi jõud, mis antud juhul mõjub kivi ja nööri hoidva käe vahel. Otsekohe tekib järgmine küsimus: missuguses suunas mõjub see jõud? Vastuse annab jällegi vektor-diagramm. Joonisel 16 on esitatud kiirusvektorid kahes lähedases punk-



Joon. 16.

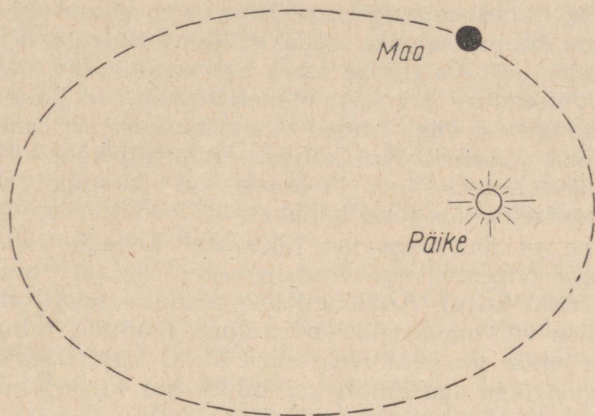
tis ja on leitud kiirendus (kiiruse muutus). On näha, et kiirendusvektor on suunatud piki nööri ringjoone tsentrisse ja on alati risti kiirusvektoriga, s. o. ringjoone puutujaga. Teiste sõnadega, käsi mõjub kivile nööri kaudu teatud jõuga.

Olulisem näide, Kuu tiirlemine ümber Maa, on eelmisega täiesti analoogiline. Kuu tiirlemist võib lugeda ligikaudu ühtlaseks ringliikumiseks. Kuule mõjuv jõud on suunatud Maa poole samal põhjusel, nagu eelmises näites oli kivile mõjuv jõud suunatud käe poole. Muidugi ei ole olemas nööri, mis seoks Kuud ja Maad, kuid me võime kujutleda neid mõlemaid kehi ühendavat sirgjoont. Jõud mõjub sellel sirgel ja on suunatud Maa keskpunkti poole täpselt samuti nagu jõud, mis mõjub õhku visatud või torni tipust langevale kivile.

Kõik, mis me oleme rääkinud liikumisest, võib kokku võtta ühes lauses. *Jõud ja kiiruse muutus on samasuunalised vektorid.* See on erakordselt tähtis juhtidee liikumise probleemis, kuigi temast veel ei piisa kõigi liikumiste täielikuks seletamiseks. Üleminek aristoteelilikult mõtteviisilt galileilisele oli loodusteadusele väga oluliseks nurgakiviks. Kui see murrang oli kord juba toimunud, selgusid ka teaduse edasised arenemisteed. Meile pakuvad erilist huvi just loodusteaduse arenemise esimesed etapid, esimesed juhtideed, millest näeme, kuidas uued füüsikalised mõisted tekivad ägedas võitluses vanade ideedega. Me oleme puudutanud ainult novaatorlike töid teaduses, mis seisnesid uute ja ootamatute arenemissuundade leidmises; me käsitlesime ainult progressi teaduslikus mõtlemises, selles mõtlemises, mis loob meile alaliselt muutuva maailmapildi. Teaduse aluseid rajavad lähtesammud on alati revolutsioonilise iseloomuga. Teaduslik mõte leiab vanad mõisted tihti liiga kitsad olevat ja asendab nad uutega. Arenemine, mis jätkub kord valitud suunas, on evolutsiooniline ainult kuni järgmise pöördepunktini, kus peab vallutama uued uurimisväljad. Kuid selleks et mõista, missugused põhjused ja missugused raskused sunnivad muutma olulisi mõisteid, peame teadma mitte ainult lähteideid, vaid ka neist tulenevaid järeldusi.

Kaasaegse füüsika üheks kõige iseloomulikumaks jooneks on see, et lähteideedest tulenevatel järeldustel on peale kvalitatiivse iseloomu ka kvantitatiivne külg. Vaa-

tame jällegi tornist langevat kivi. Eespool nägime, et langemise jooksul tema kiirus kasvab. Meil on aga tarvis teada palju rohkem. Missugune on kiiruse muutus kivi langemisel? Missugune on kivi asend ja kiirus mingil langemishetkel? Me tahame ennustada sündmusi ja kontrollida eksperimendi abil, kas vaatlused kinnitavad neid ennustusi ja sellega ka lähteideid.



Joon. 17.

Kvantitatiivsete järelduste tegemiseks tuleb kasutada matemaatika keelt. Teaduse põhiideed on oma olemuselt lihtsad ja harilikult võib neid esitada igaühele mõistetavas keeles. Selleks et mõista kõiki neist põhiideedest tulenevaid järeldusi, on tarvis tunda väga peent uurimistehnikat. Ja kui tahame jõuda järeldustele, mida saaks katsete abil kontrollida, peame kasutama uurimisevahendina matemaatikat. Et me käesolevas vaatame ainult füüsika alusideid, siis saame läbi ka ilma matemaatikata. Seejuures tuleb küll vahete-vahel loobuda tõestustest ja piirduda ainult viitega ühele või teisele tulemusele, mis on vajalikud järgnevate tähtsate juhtideede mõistmiseks. Hind, mida me peame maksma matemaatilisest keelest loobumise eest, on arutluste täpsuse vähenemine ja vajadus viidata mõnikord tulemustele, ilma et oleks näidatud, kuidas need on saadud.

Vaatame nüüd ühte olulist näidet — Maa liikumist ümber Päikese. On teada, et Maa teeks on kinnine kõver-

joon, mida nimetatakse ellipsiks (joonis 17). Kiiruse muutuse vektordiagrammi ehitamine näitab, et Maale mõjuv jõud on suunatud Päikese poole. Kuid sellest tulemusest on meile vähe. Me tahaksime ennustada Maa ja teiste planeetide asendit mis tahes ajamomendil. Meile meeldiks ennustada järgmise päikesevarjutuse aega ning kestust ja teisi astronoomilisi sündmusi. See kõik on võimalik, kuid ainult lähteideest siin enam ei piisa: peale jõu suuna on vaja teada ka tema suurust. Viimase määramise eest võlgname tänu Newtonile. Newtoni gravitatsiooniseaduse kohaselt oleneb tõmbejõud kahe keha vahel kaugusest väga lihtsal viisil: kauguse suurenemisel tõmbejõud väheneb. Kui kaugus muutub kahekordseks, siis jõud väheneb  $2 \times 2 = 4$  korda, kui kaugus muutub kolmekordseks, siis jõud kahaneb  $3 \times 3 = 9$  korda.

Näeme, et jõu olenevust liikuvate kehade vahelisest kaugusest õnnestus gravitatsioonijõu korral avaldada väga lihtsal kujul. Analoogiliselt toimime teiste, näiteks elektrilise või magnetilise päritoluga jõudude juhul. Me püüame anda jõu seadusele alati lihtsa kuju. Leitud jõu avaldis on õige aga ainult sel juhul, kui katsed kinnitavad temast tulenevaid järeldusi.

Ainult gravitatsioonijõu tundmisest planeetide liikumise kirjeldamiseks veel ei piisa. Me nägime, et jõu ja kiiruse muutust esitavad vektorid on iga lühikese ajavahemiku jooksul samasuunalised. Nüüd tuleb meil nagu Newtonilgi teha veel üks samm — püstitada lihtne seos nende vektorite pikkuste vahel. Kui kõik teised tingimused on samad, s. o. kui jälgida ühe ja sama keha liikumist ning mõõta tema kiiruse muutust võrdsete ajavahemike järel, siis Newtoni järgi on kiiruse muutus võrdeline jõuga.

Kvantitatiivsete järelduste tegemiseks planeetide liikumise kohta on tarvis seega kahte täiendavat oletust. Esimene neist, üldise iseloomuga oletus, fikseerib seose jõu ja kiiruse muutuse vahel. Teine oletus on kitsam: ta määrab kindlaks kehadele mõjuva jõu täpse olenevuse kehadevahelisest kaugusest. Esimene oletus on Newtoni üldine liikumise seadus, teine — Newtoni gravitatsiooniseadus. Koosvõetuna määravad need seadused planeetide liikumise. Seda võib selgitada järgmise, tõi küll, veidi kohmakalt kõlava arutluse abil. Oletame, et antud hetkel saame määrata planeedi asukoha ja kiiruse ning et pla-

needile mõjuv jõud on teada. Siis saame Newtoni seadusest arvutada kiiruse muutuse lühikese ajavahemiku jooksul. Teades algkiirust ja selle muutust, on võimalik leida planeedi kiirust ja asukohta nimetatud lühikese ajavahemiku lõpul. Kui niisugust protseduuri järjest korrata, võime samm-sammult arvutada planeedi liikumise kogu tema orbiidil. Algandmed on seejuures ainult lähtekohaks, hilisema arvutuse juures neid enam tarvis ei ole. Kirjeldatud meetod on tegelikult läbiviimiseks aga ääretult kohmakas. Niisugune korduv arvutamine nõuaks väga palju aega, oleks igav ja pealegi ebatäpne. Õnneks pole kõike seda vaja. Matemaatika annab liikumise täpseks kirjeldamiseks palju lühema tee, mis nõuab näiteks vähem tinti kui üheainsa lause kirjapanemine. Niisugusel matemaatilisel teel saadud tulemusi vaatlus kas kinnitab või lükkab ümber.

Sama liiki välisjõu kui Maa liikumisel võime avastada ka õhus langeva kivi korral või Kuu tiirlemisel ümber Maa. See jõud on materiaalse keha tõmbumine Maa poole. Newton tegi kindlaks, et kivi langemisel või Kuu ja planeetide liikumisel ilmnev jõud on ainult erijuht universaalsest, kõigi kehade vahel valitsevast gravitatsioonijõust. Lihtsatel juhtudel võib gravitatsioonijõule alluvate kehade liikumist kirjeldada matemaatika abil. Keerulisematel juhtudel, kui uuritakse paljude kehade mõju üksteisele, pole liikumise matemaatiline kirjeldamine enam nii lihtne, kuid põhiprintsiibid jäävad igal juhul samadeks.

Näeme, et eespool formuleeritud juhtideest järelduvad tulemused on õiged nii visatud kivi kui ka Kuu, Maa ja planeetide liikumise kohta.

Niisugune on kogu meie oletuste süsteem, mida tuleb eksperimenti abil kas tõestada või ümber lükata. Kõiki neid oletusi tuleb kontrollida koos, ühtegi neist pole võimalik eraldi proovida. On leitud, et päikesesüsteemi planeetide liikumise kirjeldamiseks sobib ülalkirjeldatud seletustele tuginev mehhaanika väga hästi. Sellest hoolimata võib kujutleda, et saab luua mingit teist mehhaanikat, mis tugineks küll teistele eeldustele, aga kirjeldaks planeetide liikumist sama hästi kui meie praegune süsteemgi.

Füüsikalised mõisted on inimhõimuse vaba looming, nad pole välismaailma poolt sugugi üheselt määratud,

nagu see vahel võiks tunduda. Meid ümbritseva reaalse maailma mõistmise püüdlustes sarnaneme teatud mõttes inimesega, kes tahab aru saada suletud kella mehhanismist. Ta näeb kella numbrilauda ja liikuvaid osuteid, kuuleb isegi tiksumist, kuid kella avada pole tal võimalik. Kui ta on küllalt teravmeelne, võib ta luua kella-mehhanismist endale mingisuguse pildi, mis oleks kooskõlas kõige sellega, mida ta näeb, kuid ta ei või kunagi olla päris kindel, et see mehhanismi pilt on ainuke, mis võimaldab vaatlusi seletada. Ta ei saa oma pilti kunagi reaalse mehhanismiga võrrelda, ta isegi ei kujutle niisuguse võrdlemise võimalust ja mõtet. Kuid ta usub muidugi, et teadmiste kasvamisel muutub loodud reaalsuse pilt ikka lihtsamaks ning lihtsamaks ja seletab ära üha rohkem andmeid, mis inimene oma meelega abil maailmast saab. Ta võib isegi uskuda, et teadmistel on olemas ideaalne piir, millele inimõistus kogu aeg läheneb. Seda ideaalset piiri võib ta nimetada objektiivseks tõeks.

### Veel üks juhtidee

Kes õpib mehhaanikat esmakordselt, sel jääb mulje, nagu oleks siin kõik lihtne, hästi põhjendatud ning igavene. Vaevalt tekiks kellelgi kahtlust, et mehhaanikas on olemas üks tähtis juhtidee, mida ei märgatud tervelt kolmesaja aasta jooksul. See kahe silma vahele jäänud idee on seotud mehhaanika ühe põhimõistega, nimelt *massiga*.

Vaatame jällegi lihtsat idealiseeritud eksperimenti, mida tehakse käruga täiuslikult siledal teel. Oletame, et algul kärü seisab paigal. Kui nüüd kärü tõugata, hakkab ta teatud kiirusega ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuma. Mõjume kärule ühe ja sellesama jõuga mitu korda, s. o. oletame, et kärü tõukamise mehhanism arendab alati ühesugust jõudu.<sup>1</sup> Ükskõik, kui palju me seda katset ka kordaksime, ikka selgub, et kärü omandab ühe ja sellesama lõppkiiruse, kui ainult kärü ise kõigis katsetes üks ja seesama on. Mis juhtub aga siis, kui muuta katsetingimusi, tõugata algul näiteks tühja, teine kord aga koor-

<sup>1</sup> On veel oluline, et ka tõuke kestus, s. o. jõu mõjumise aeg oleks alati üks ja seesama. — *Tõlk.*

matud käru? Osutub, et koormaga käru lõppkiirus on tühja käru omast alati väiksem. Siit järeldus: kui üks ja seesama jõud mõjub kahele erinevale kehale, mis algul on paigal, siis kehade lõppkiirused ei ole võrdsed. Me ütleme, et keha kiirus oleneb tema massist: mida suurem on mass, seda väiksem on kiirus.

Vähemalt teoreetiliselt teame nüüd, kuidas määrata keha massi või, õigemini öeldes, kuidas teha kindlaks, mitu korda on üks mass teisest suurem. Selleks tuleb kahele paigalseisvale massile mõjuda ühesuguse jõuga. Kui siis selgub, näiteks, et esimene mass saab selle jõu mõjul kolm korda suurema kiiruse kui teine, võime järeldada, et esimene mass on teisest kolm korda väiksem. See on muidugi kaunis ebamugav meetod kahe massi suhte määramiseks. Kuid peaks selge olema, et kirjeldatud viisil või mõnel analoogilisel teel, kus kasutatakse inertsiseadust, on masse tõepoolest võimalik võrrelda.

Kuidas me määrame massi igapäevases elus? Ülalkirjeldatud meetodit siin muidugi keegi ei kasuta. Selle asemel rakendatakse, nagu igaüks teab, hoopis kaalusid.

Analüüsime lähemalt neid kahte, oma olemuselt täiesti erinevat massi määramise meetodit.

Esimese meetodi juures pole midagi tegemist keha raskusega, keha tõmbumisega Maa poole. Pärast tõuget liigub käru ideaalselt siledal horisontaaltasapinnal. Raskusjõud, mis hoiab käru tasapinnal, katse jooksul ei muutu ja järelikult ei mängi massi määramisel mingisugust osa. Kaalumisega on hoopis teine lugu. Me ei saaks kaale üldse kasutada, kui Maa ei tõmbaks kõiki kehi enda poole, kui ei oleks olemas raskust. Erinevus massi määramise kahe meetodi vahel seisab just selles, et esimene neist pole kuidagi seotud raskusjõuga, teine aga põhineb oluliselt just sellel.

Küsime nüüd: kui määrame kahe massi suhte mõlemal eespool kirjeldatud viisil, kas saame siis ühe ja sama tulemuse? Eksperiment annab sellele küsimusele selge vastuse. Tulemused on alati täpselt ühtelanged! See on puhas eksperimentaalne fakt, mitte mingisugused arutlused ei vii meid järeldusele, et see just nii peaks olema. Lihtsuse mõttes nimetame esimesel viisil määratud massi *inertseks massiks*, teisel viisil määratud massi *raskeks massiks*. Meie maailmas on need massid võrdsed, kuid me võiksime väga hästi kujutleda maailma, kui see nii ei

oleks. Otsekohe kerkib teine küsimus: kas kahe massi võrdsus on puhas juhus või on tal sügavam mõte? Klassikaline füüsika vastab sellele: inertse ja raske massi võrdsus on juhuslik nähtus, millele ei ole vaja pöörata erilist tähelepanu. Kaasaegne füüsika ütleb aga täiesti vastupidist: kahe massi võrdsus on põhilise tähtsusega fakt, tähtis juhtidee, mis võimaldab maailma sügavamalt tunnetada. Raske ja inertse massi võrdsus oligi tõepoolest üheks kõige kaalukamaks alusideeks üldisele relatiivsusteooriale.

Meile tundub, et jutustus mingisugustest saladustest on sel juhul väiksema väärtusega, kui ta seletab mõistatuslike nähtusi nagu juhuseid. Jutt, milles kõik toimub mõistuspäraselt, rahuldab meid hoopis rohkem. Täpselt samuti teooria, mis annab seletuse raske ja inertse massi võrdsusele, on parem teooriast, kus seda võrdsust käsitletakse mingi juhusena — muidugi eeldusel, et mõlemad teooriad on vaatlusandmetega ühteviisi hästi kooskõlas.

Kuna inertse ja raske massi võrdsus oli üheks relatiivsusteooria alusfaktiks, siis peatume üksikasjalikumalt selle eksperimentaalsel kontrollil. Missugused katsed tõestavad veenvalt, et mõlemad massid on ühesugused? Vastus peitub vanas Galilei katses, kus ta laskis torni tipust langeda erineva massiga kehi. Galilei märkas, et langemiseks kulus alati üks ja seesama aeg, s. o. langeva keha liikumine ei sõltu selle massist. Et siduda seda lihtsat, kuid erakordselt tähtsat katsetulemust kahe massi võrdsusega, tuleb kasutada märksa keerukamaid arutlusi.

Alludes välisjõu mõjule hakkab paigalseisev keha liikuma ja omandab teatud kiiruse. Ta annab jõu mõjule järele suurema või väiksema vastupanuga, olenevalt oma inertsest massist. Mida suurem on see mass, seda rohkem paneb keha vastu oma liikumise muutumisele. Kui me ei taotle erilist rangust, siis võime öelda, et valmisolek, millega keha reageerib välisjõu mõjule, oleneb tema inertsest massist. Kui oleks õige, et Maa tõmbab kõiki kehi ühesuguse jõuga, siis kõige suurem inertne mass langeks aeglasemalt kui ükski teine. Tegelikult langevad aga kõik kehad ühteviisi. See tähendab, et Maa tõmbejõud erinevatele kehadele on erineva suurusega. Tõmmates näiteks kivi teatud jõuga enda poole, ei tea Maa midagi tema inertsest massist. Jõud, millega Maa «kutsub» kivi, oleneb ainult viimase raskest massist. Kivi «vastusliikumine»

sõltub aga inertsest massist. Et «vastusliikumine» on alati ühesugune — võrdselt kõrguselt langevad kõik kehad ühesuguse kiirusega —, siis tuleb järeldada, et raske ja inertne mass on võrdsed.

Füüsik formuleerib sellesama järelduse pedantsemalt: langeva keha kiirendus kasvab võrdeliselt tema raske massiga ja kahaneb võrdeliselt tema inertse massiga. Et kõigil langevatel kehadel on üks ja sama konstantne kiirendus, siis peavad mõlemad massid olema võrdsed.

Meie haaravas jutustuses looduse saladustest ei ole ühtegi probleemi, mis oleks lahendatud lõplikult ja kõigiks aegadeks. Kolmesaja aasta pärast pidime jälle tagasi pöörduma liikumise probleemi juurde, parandama uurimismeetodit ja leidma juhtideed, mida varem ei märgatud, luues sellega endale uue pildi ümbritsevast maailmast.

### Kas soojus on substants?

Hakkame nüüd uurima uut juhtideed, mis pärineb soojusnähtuste valdkonnast. Teadust õieti polegi võimalik jagada eraldatud, üksteisest sõltumatuteks alaosadeks. Varsti näeme, et käesolevas punktis käsitletavat uued mõisted põimuvad tihedalt juba varem tuntutega, samuti nende mõistetega, millega meil tuleb tegemist hiljem. Ühes teadusharus arendatud mõttekäike võib väga sageli rakendada teiste, väliselt täiesti erinevate nähtuste kirjeldamisel. Niisuguses ülekandmise protsessis omandavad mõisted sageli uue kuju ja me hakkame paremini aru saama nii nendest nähtustest, kust mõisted pärinevad, kui ka nendest, mille puhul neid nüüd rakendatakse.

Soojusnähtuste kirjeldamisel on kõige tähtsamateks mõisteteks *temperatuur* ja *soojus*. Võttis uskumatult palju aega teaduse ajaloos, enne kui neid kahte asja eristama hakati, aga kui lõpuks siiski nii kaugele jõuti, hakkas teadus kiiresti arenema. Kuigi need mõisted on nüüd igapäevale tuttavad, uurime neid siiski põhjalikumalt, kriiputades alla just nende erinevusi.

Kompamismeel ütleb meile alati täiesti kindlalt, et üks keha on soe, teine aga külm. Kuid see on puhtkvalitatiivne kriteerium, millest ei piisa soojusnähtuste kvantitatiivseks kirjeldamiseks ja mis on mõnikord isegi ebamäärane. Seda kinnitab hästituntud katse. Olgu meil kolm

nõu, ühes külma, teises leige ja kolmandas suhteliselt kuum vesi. Asetades ühe käe külma ja teise käe kuuma vette, tunneme ühe käega külma, teisega aga kuuma. Kui paneme nüüd mõlemad käed ühte ja samasse leigesse vette, saame kummaltki käelt vastupidised aistingud. Samal põhjusel eskimo ja ekvaatori piirkonna elanik, kohtudes ühel kevadisel päeval New Yorgis, jääksid eriarvamustele küsimuses, kas ilm on soe või külm. Kõigil niisugustel juhtudel võetakse appi termomeeter, riist, mille lihtsal kujul visandas juba Galilei. Jälle seesama tuttav nimi! Termomeetri kasutamine rajaneb paaril silmanähtaval füüsikalisel oletusel. Meenutame neid, tsiteerides mõned read loengust, mille pidas umbes sada kuuskümne aastat tagasi Black, mees, kes aitas tublisti kaasa soojuse ja temperatuuri mõistetega seotud raskuste selgitamisele.

Tänu selle riista kasutamisele saime teada, et kui võtta tuhat või isegi rohkem liiki aineid, nagu metallid, kivid, soolad, puu, suled, vill, vesi ja terve hulk teisi vedelikke, kusjuures algul on nad kõik erineva soojusega, ning asetada nad koos ühte ja samasse tupp, kus pole tuld ja kuhu ei paista päike, siis soojus läheb soojematelt kehadel üle külmematele, mis võtab aega võib-olla mõne tunni või isegi terve päeva, nii et termomeeter, mis pärast asetatakse järjest kõigi kehade juurde, näitab kõigil neil täpselt ühte ja sedasama soojusastet.

Toodud tsitaadis kursiiviga eraldatud sõna *soojus* tuleks tänapäeva terminoloogia kohaselt asendada sõnaga *temperatuur*.

Arst, vaadates haige temperatuuri mõõtmiseks kasutatud termomeetrit, võib arutleda umbes nii: «Termomeeter näitab elavhõbedasamba pikkuse kaudu oma temperatuuri. Oletame, et elavhõbedasamba pikkus suureneb võrdeliselt temperatuuri kasvuga. Kuid termomeeter oli mõne minuti jooksul vahetus kokkupuutumises minu patsiendiga, seega patsiendil ja termomeetril peaks olema üks ja seesama temperatuur. Siit ma järeldan, et minu patsiendil on just see temperatuur, mida näitab termomeeter.» Tegelikus elus toimib doktor tõenäoliselt mehaaniliselt, s. o. ta kasutab füüsikaseadusi, ilma neist mõtlemata.

Aga kas termomeeter sisaldab sama hulga soojust kui inimese keha? Muidugi mitte. Kui oletada, et kaks keha sisaldavad võrdsel hulgal soojust just seepärast, et nende temperatuurid on võrdsed, oleksime, nagu märkis Black,

selles küsimuses väga ennatlikul seisukohal. See tähendaks erinevates kehaosades oleva soojushulga äravahetamist soojuse üldise tugevuse või intensiivsusega, kuigi on selge, et need on kaks täiesti erinevat asja ja neid peaks alati eristama, kui mõtiskleme soojuse jaotumisest kehaosades.

See erinevus saab arusaadavaks, kui vaadelda väga lihtsat eksperimenti. Selleks et tõsta kilogrammi vee temperatuuri toatemperatuurilt keemispunktini, kulub teatud aeg. Palju rohkem aega kulub näiteks kaheteistkümne kilogrammi vee keema ajamiseks samas rõus ja samal leegil. Me saame sellest nii aru, et «midagi», mis tõstab temperatuuri, kulub nüüd rohkem kui esimesel juhul. Seda «midagi» nimetame *soojuseks*.

Uue olulise mõiste, *erisoojuse* saame järgmisest eksperimentist: sisaldagu üks nõu kilogrammi vett ja teine kilogrammi elavhõbedat, kusjuures mõlemat nõu soojendatakse ühtemoodi. Siis muutub elavhõbe kuumaks palju kiiremini kui vesi. See näitab, et elavhõbeda temperatuuri tõstmiseks ühe kraadi võrra kulub vähem «soojust». Võrdse massiga erinevate ainete, nagu vee, elavhõbeda, raua, vase, puu jne. temperatuuri tõstmiseks ühe kraadi võrra, ütleme neljast kraadist kuni viie kraadini Celsiuse järgi, kulub üldiselt erinev hulk «soojust». Me ütleme, et igal ainel on oma individuaalne *soojusmahtuvus* või *erisoojus*.

Olles omandanud soojuse mõiste, võime uurida lähemalt tema olemust. Olgu meil kaks keha, üks kuum, teine külm, täpsemini öeldes, olgu ühe keha temperatuur kõrgem kui teisel. Viime need kehad kokkupuutesse ja kõrvaldame kõik välismõjud. Me teame, et kehade temperatuur saab siis lõpuks võrdseks. Kuidas niisugune olukord tekib? Mis toimub, alates kehade kokkupuutemomentist kuni hetkeni, millal kehade temperatuurid on võrdsustunud? Mõeldes sellele küsimusele tekib kujutus soojuse «voolamisest» ühest kehast teise analoogiliselt vee voolamisega kõrgema nivoo poolt madalama nivoo suunas. Kuigi see kujutus on primitiivne, vastab ta siiski paljudele faktidele, nii et võib kasutada analoogiat:

Vesi — Soojus  
Kõrgem nivoo — Kõrgem temperatuur  
Madalam nivoo — Madalam temperatuur

Voolamine toimub niikaua, kuni mõlemad nivood, s. o. mõlemad temperatuurid, on saanud võrdseks. See naiivne

vaade võib olla kasulik probleemide kvantitatiivsel lahendamisel. Kui segame teatud hulgad kindlate temperatuuridega vett ja piiritust, siis erisoojuste teadmine võimaldab meil arvutada segu lõpptemperatuuri. Vastupidi, lõpptemperatuuri mõõtmine ja vähene algebraoskus võimaldavad meil leida vee ja piirituse erisoojuste suhte.

Me jõudsime soojuse mõisteni, mis sarnaneb teiste füüsikaliste mõistetega. Soojus on meie arvates samasugune substants nagu näiteks mass mehhaanikas. Tema hulk võib muutuda või mitte analoogiliselt rahaga, mida võib kulutada või pista seifi. Niikaua kui seif on suletud, jääb temasse paigutatud raha hulk muutumatuks, samuti nagu massi- või soojushulk isoleeritud kehas. Seif on seega ideaalse termos pudeli võrdkujuks. Edasi, nii nagu jääb muutumatuks isoleeritud süsteemi mass isegi keemilistes reaktsioonides, samuti säilib ka soojus üleminekul ühest kehast teise. Isegi siis, kui soojust ei kasutata keha temperatuuri tõstmiseks, vaid, ütleme, jää sulatamiseks või vee aurustamiseks, võime teda ikkagi aienena kujutleda, sest vee jäätumisel või auru veeldumisel saame kulutatud soojushulga jälle tagasi. Vananenud nimetused — varjatud sulamis- või aurustumissoojus — näitavad, et need mõisted tekkisid siis, kui soojust mõisteti nagu substantsi. Varjatud soojus kaob ajutiselt samuti nagu seifi pandud raha, ent me saame teda kasutada, kui tunneme avamismehhanismi.

Muidugi, soojus ei ole substants samas mõttes nagu mass. Massi saab mõõta kaalude abil, kas on aga võimalik kaaluda ka soojust? Kas punaseks kuumutatud rauatükk kaalub rohkem kui sama rauatükk jääkülmal? Katse vastab sellele eitavalt. Kui soojus ongi substants, siis on ta igatahes kaalutu substants. «Soojussubstantsi» nimetatakse harilikult *soojusaineks*; see on meie esimeseks tuttavaks terveist kaalutute substantside perekonnast. Hiljem on meil võimalik jälgida selle perekonna ajalugu, näha tema tõusu ja langust. Siinkohal piisab ainult sellest, et märkisime selle perekonna ühe liikme sündi.

Iga füüsikalise teooria sihiks on võimalikult suure hulga nähtuste seletamine. Teooria õigustab end ainult niivõrd, kui ta muudab sündmused meile arusaadavateks. Nägime, et substantsiaalne teooria<sup>1</sup> seletab paljusid soo-

<sup>1</sup> Teooria, mis käsitleb soojust kaalutu substantsina. — Tõlk.

jusnähtusi. Kuid varsti selgub, et see oli jällegi vale idee. Soojust ei saa lugeda substantsiks, isegi mitte kaalutuks substantsiks. See saab selgeks, kui tuletame meelde mõnda lihtsat eksperimenti, mis kunagi tähistasid tsivilisatsiooni algust.

Substantsi me kujutleme kui midagi niisugust, mida ei saa luua ega hävitada. Kuid juba ürgnimene tekitas soojust hõõrumise abil, nii et sellest piisas puutüki süütamiseks. Näited hõõrumisel tekkinud soojusest on selleks liiga arvukad ja hästi tuntud, et neist oleks tarvis pike-malt rääkida. Kõigis niisugustes katsetes tekib teatud hulk soojust, fakt, mida substantsiaalse teooria abil on raske seletada. Tõsi, selle teooria pooldaja võib oma seisukoha kaitseks välja mõelda mitmesuguseid argumente. Tema arutlus oleks umbes niisugune: «Substantsiaalne teooria võib seletada ka soojuse näivat tekkimist. Võtame lihtsaima näite kahe puutüki hõõrumisest teineteise vastu. Hõõrumine on protsess, mis mõjub puule ja muudab tema omadusi. Seejuures need omadused muutuvad niisugusel viisil, et muutumatu soojushulk tekitab kõrgema temperatuuri, kui oli varem. Ainuke, mida lõppude lõpuks märkame, on temperatuuri tõus. On võimalik, et hõõrumine muudab ainult puu soojusmahtuvust, kuna kogu soojushulk jääb muutumatuks.

Antud uurimisstaadiumis oleks substantsiaalse teooria kaitsjaga vaidlemine kasutu; see on küsimus, mida saab lahendada ainult eksperimendi abil. Kujutleme kahte ühesugust puutükki ja oletame, et nende temperatuuri muudetakse ühepalju, kuid erinevate meetoditega; ühel juhul näiteks hõõrdumise abil, teisel juhul aga puutüki asetamisega radiaatorile. Kui osutub, et mõlema puutüki erisoojus pärast soojenemist on ühesugune, siis langeb kokku kogu substantsiaalne teooria. Erisoojuse määramiseks on olemas väga lihtsaid meetodeid ja substantsiaalse teooria saatus sõltub just niisuguse eksperimendi tulemusest. Füüsika ajaloos võib sageli kohata katseid, mis otsustavad teooriate elu ja surma üle; neid nimetatakse *experimentum crucis*, s. o. otsustav eksperiment.<sup>1</sup> Niisuguse eksperimendi kohtuotsus võib anda eluõiguse ainult

<sup>1</sup> *Experimentum crucis* (lad.) tähendab sõnasõnalisel tõlkes *risti kontroll*. See mõiste pärineb Francis Baconilt (1561—1626) ja juurdus teadusesse Newtoni ajal. — *Tõlk.*

ühele teorialele. Kahe ühesuguse keha erisoojuse määramine, kui kehade temperatuuri tõstmiseks kasutati ühel juhul hõõrdumist, teisel juhul soojuse juurdevoolu, on otsustava eksperimendi tüüpiliseks näiteks. Selle katse teostas umbes sada kuuskümmend aastat tagasi Rumford ja sellega anti soojuse substantsiaalsele teorialele surmahoop.

Rumfordi enda seletusest loeme:

Sageli juhtub, et igapäevased harilikud tööd ja toimetused annavad meile võimaluse jälgida kõige huvipakkuvamaid looduse protsesse; tihti võib ülihuvitavaid filosoofilisi katseid teha ilma erilise kulu ja vaevata, kasutades mehhanisme, mis on määratud lihtsate mehhaaniliste operatsioonide teostamiseks käsitöös ja tööstuses.

Mul on väga tihti olnud juhust niisugusteks vaatlusteks ja ma jõudsin veendumusele, et harjumus hoida silmad lahti kõigele igapäevases elus juhtuvale on viinud niiõelda juhuslikult või kujutluse vallatu kõrvalhüppe kaudu, mis tekkis kõige harilikumate asjade üle mõtisklemisel, tulutoovatele kahtlustele ning otstarbekohastele uurimis- ja täiustamisplaanidele palju sagedamini kui filosoofide kõige pingelisem mõtlemine teaduslikuks tööks ettenähtud tundidel.

Hiljuti, kui mu ülesandeks oli jälgida suurtükitorude puurimist Müncheni sõjaväearsenali töökodades, olin ma rabatud väga suurest soojusest, mille sai vasksuurtükk lühikese puurimisaja jooksul; veelgi intensiivsem (palju intensiivsem kui keeva vee soojus, nagu ma katsega kindlaks tegin) oli puurimisel eralduvate metallilaastude soojus...

Kust tuleb soojus, mis tekkis ülalkirjeldatud mehhaanilise protsessi juures?

Kas ta sisaldus metallilaastudes, mis puurimisel eralduisid kõvast metallist?

Kui see nii oleks, siis, kaasaegse õpetuse kohaselt varjatud soojusest ja soojusainest, peaks laastude soojusmahtuvus mitte ainult muutuma, vaid selleks et seletada kogu tekkinud soojust, peaks see muutus olema ka küllalt suur.

Kuid mingit niisugust muutust ei olnud; ma tegin selle kindlaks, võttes võrdse kaaluhulga neid laaste ja samast metallisulamist väikese sae abil eraldatud tükikesi ning asetades nad võrdse temperatuuri juures (keeva vee temperatuur) nõudesse, kus olid võrdsed hulgad külma vett (näiteks temperatuuril 59°,5 Fahrenheiti järgi); kõige järgi otsustades vesi, millesse asetati metallilaastud, ei soojenenud rohkem ega vähem kui vesi, millesse pandi metallipulgad.

Lõpuks jõuame Rumfordi tehtud järeldusele:

Mõeldes selle asja üle, me ei tohi unustada kõige üllatavamat momenti, nimelt seda, et hõõrdumise poolt tekitatud soojuse allikas osutus neis eksperimentides praktiliselt ammendamatuks.

On vaevalt vaja lisada, et see midagi, mida piiramatu võib endale varuda iga isoleeritud keha või kehade süsteem, ei saa

oila *aineline substants*, ja mulle näib ülraskena, kui mitte täiesti võimatu, luua täpset kujutlust millestki, mis võib tekkida ja levida sarnaselt sellega, nagu tekib ja levib nendes eksperimentides soojus, kui mitte oletada, et see midagi on liikumine.

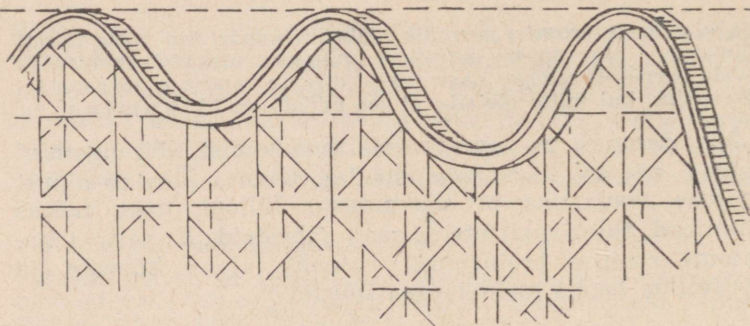
Me näeme seega vana teooria purunemist, või, õigemini öeldes, näeme, et substantsiaalne teooria piirdub ainult soojuse voolamise probleemidega. Jällegi, nagu näitas Rumford, tuleb meil otsida uusi juhtideid. Et seda teha, jätame soojuse probleemid mõneks ajaks kõrvale ja pöördume tagasi mehhaanika juurde.

### Lõbus raudtee<sup>1</sup>

Vaatame ühte ajaviiteparkide populaarset lõbustusvahendit — väikest vagunit, mis mööda lainelist teed künka tipult alla veereb. Vagun on tõstetud või lükatud tema tee kõrgeima punktini. Niipea kui ta seal vabastatakse, hakkab ta raskusjõu mõjul veerema, liigub üles ja alla fantastilise kujuga kõverat mööda, üllatades reisijaid kiiruse ootamatute muutumistega. Tee igal lainel on oma kõige kõrgem punkt. Kuid kogu liikumise jooksul ei tõuse vagun enam kordagi nii kõrgele, nagu ta oli algul. Vaguni liikumise täielik kirjeldamine oleks väga keeruline. See on ühelt poolt mehhaanika probleem, sest siin on tegemist vaguni kiiruse ja asukoha muutumisega. Teiselt poolt esineb siin hõõrdumine ja järelikult ka soojuse tekkimine rööbastes ning ratastes. Füüsikalise protsessi jagamine kaheks niisuguseks aspektiks on põhjendatud ainult sooviga kasutada eespool sissetoodud mõisteid. See jagamine viib idealiseeritud eksperimendile, sest füüsikalist protsessi, millel on ainult mehhaaniline aspekt, võime küll kujutleda, mitte kunagi aga teostada.

Idealiseeritud eksperimendi puhul võime kujutleda, et kellelgi õnnestus täielikult kõrvaldada hõõrdumist, mis alati kaasneb liikumisega. See keegi otsustab kasutada oma avastust selleks, et konstrueerida lõbus raudtee, ja peab leidma viisi, kuidas seda ehitada. Lähtudes maapinnast, ütleme, kolmekümne meetri kõrguselt, peab vagun oma teel liikuma kord alla-, kord ülespoole. Õppides kogemustest ja vigadest, taipab konstruktor varsti, et ta

<sup>1</sup> Mööda lainelist teed (vt. joonis 19) laskuv vagun. — Tõlk.

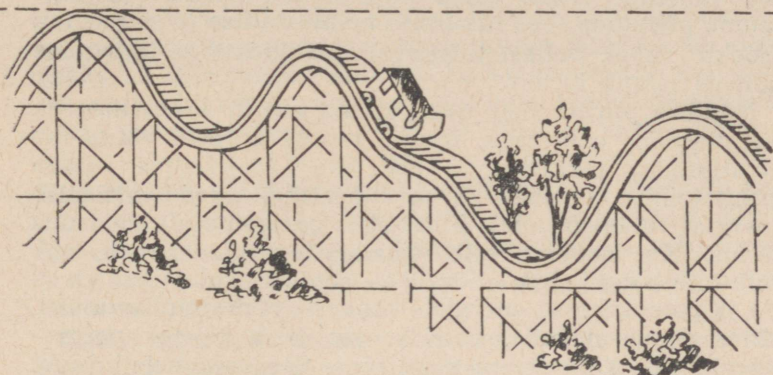


Joon. 18.

peab arvestama väga lihtsat reeglit: tee võib ehitada täiesti meelevaldse kujuga, kuid tingimusel, et ta üheski kohas ei tõuse lähtepunktist kõrgemale. Kui vagun liigub tee lõpuni hõõrdumiseta, siis võib ta oma teel tõusta kolmekümne meetri kõrgusele nii tihti, kui konstruktor seda ainult soovib, mitte kunagi aga kõrgemale. Tegelikult ehitatavatel lõbustusteedel ei saavuta vagun oma liikumisel enam kunagi lähtekõrgust. See on tingitud hõõrdumisest, mida meie kujuteldav insener ei tarvitse- nud arvestada.

Jälgime idealiseeritud vagunit idealiseeritud teel, kui ta on alustanud liikumist. Liikumise jooksul vaguni kõrgus maapinnast väheneb, tema kiirus seevastu suureneb. See lause võib meenutada esimesel pilgul keeletundi: «Mul ei ole ühtegi pliiatsit, kuid teil on kuus apelsini.» Osutub, et meie väide ei ole siiski nii rumal. Et mul ei ole ühtegi pliiatsit, sel pole midagi tegemist teie kuue apelsiniga, aga vaguni kõrgus maapinnast on väga konkreetsest seotud tema kiirusega. Me võime täpselt ette arvutada vaguni kiiruse mis tahes ajamomendil, kui me ainult teame tema kõrgust maapinnast. Et see arvutus on kvantitatiivse iseloomuga ja nõuab matemaatiliste valemite kasutamist, siis tuleb temast siinkohal loobuda.

Kõige kõrgemas punktis on vaguni kiirus null ja ta kaugus maapinnast kolmkümmend meetrit. Kõige madalamas punktis on vaguni kaugus maapinnast null, kiirus aga maksimaalne. Seda võib väljendada teiste sõnadega. Kõige kõrgemas punktis on vagunil *potentsiaalne energia*,



Joon. 19.

kuna kineetiline energia või liikumisenergia puudub. Kõige madalamas punktis on vaguni kineetiline energia maksimaalne, aga tal ei ole mingisugust potentsiaalset energiat. Kõigis vahepealsetes asendites, kus vagunil on teatud kiirus ja teatud kõrgus maapinnast, on tal olemas nii kineetiline kui ka potentsiaalne energia. Potentsiaalne energia kasvab koos kõrgusega, samal ajal kui kineetilise energia kasvuks on vajalik kiiruse suurenemine. Mehhaanika printsiipidest piisab liikumise seletamiseks. Matemaatilises formuleeringus esineb kaks energiaavaldist; liikumise jooksul nad mõlemad muutuvad, kuid nende summa jääb muutumatuks. Seega on võimalik matemaatiliselt täiesti rangelt sisse tuua potentsiaalse ja kineetilise energia mõisteid; esimene neist sõltub asukohast, teine kiirusest. Niisuguste nimetuste kasutamine on muidugi meelevaldne ja seda õigustab ainuüksi otstarbekohasus. Kahe nimetatud energia summa jääb muutumatuks, seepärast nimetatakse seda summat liikumiskonstandiks. Koguenergiat — kineetiline energia pluss potentsiaalne energia — võib võrrelda näiteks rahasummaga, mis tervikuna jääb muutumatuks, kuid mida vahetatakse pidevalt kindla kursi järgi, ütleme, naeltest dollariteks või vastupidi.

Reaalsel lõbusal raudteel, kus hõõrdumine takistab vagunit tõusmast esialgsele kõrgusele, toimub pidev kineetilise energia muutumine potentsiaalseks ja vastupidi, kuid nende summa ei jää konstantseks, vaid kogu

aeg väheneb. Nüüd tuleb meil astuda otsustav ja julge samm, püstitada seos liikumise mehhaanilise ja soojusliku aspekti vahel. Sellest tulenevate järelduste ja üldistuste tähtsus selgub hiljem.

Nüüd ei piirdu meie uurimisvald ainult kineetilise ja potentsiaalse energiaga, nimelt peame arvesse võtma ka hõõrdumisel tekkinud soojust. Kas see soojus vastab mehhaanilise energia, s. o. kineetilise ja potentsiaalse energia vähenemisele? Siin tuleb paratamatult teha uus oletus. Kui soojust võib vaadata energiavormina, siis võib-olla kõigi kolme energia — soojuse, kineetilise energia ja potentsiaalse energia — summa jääb muutumatuks. Mitte soojus üksinda, vaid soojus koos teiste energiavormidega on hävimatu nagu aine. See sarnaneb juhule, kus inimene, vahetades oma dollareid naelteks, peaks vahetamise eest maksma sellest samast rahast komisjonimaksu frankides; komisjoniraha jääb samuti alles, nii et dollarite, naelte ja frankide summa moodustab kindla suuruse vastavalt mingile kindlale vahetuskursile.

Teaduse progress purustas vana arusaamise soojusest kui ainest. Püüame nüüd luua uut substantsi, energiat, mille üheks vormiks oleks soojus.

### Muutumise määr

Vähem kui sada aastat tagasi tõi Mayer sisse uue idee, mis käsitles soojust kui energia ühte vormi. Seda ideed kinnitasid Joule'i katsed. On kummaline kokkusattumus, et peaaegu kõik tähtsamad tööd soojuse olemuse kohta on tehtud mitte elukutseliste füüsikute, vaid asjaarmastajate poolt, kellele füüsika oli ainult lemmikharrastuseks. Siin on näiteks mitmekülgne šotlane Black, saksa arst Mayer ja ameerika suurseikleja krahv Rumford, kes hiljem elas Euroopas ja sai peale muu koguni Baieri sõjaministriks. Lisaks eelmistele tuleks nimetada veel inglise õllepruulijat Joule'i, kes tegi vabal ajal väga tähtsaid eksperimente energia jäävuse seaduse uurimise eesmärgil.

Joule'i katsed kinnitasid arvamust, et soojus on üks energiavormidest ja andsid võimaluse määrata soojuse vahekorda teiste energialiikidega. Tasub kulutada aega nende katsete sisusse tungimiseks.

Süsteemi kineetiline ja potentsiaalne energia moodusta-

vad koos süsteemi *mehhaanilise* energia. Oletame, et vaguni liikumisel eelkirjeldatud lõbusal raudteel muutub osa mehhaanilisest energiast soojuseks. Kui see on õige, peaks nii nimetatud juhul kui ka kõigis teistes analoogilistes füüsikalistes protsessides olema kindel *muutumise määr*, kindel vahekord mehhaanilise energia muutmisel soojuseks.<sup>1</sup> See on puhtkvantitatiivset laadi küsimus, kuigi fakt, et antud hulk mehhaanilist energiat võib muutuda kindlaks soojushulgaks, on erakordselt tähtis. Meid huvitaks arv, mis väljendab muutumise vahekorda, s. o. me tahame teada, kui palju soojust saame antud mehhaanilise energia hulgast.

Selle arvu määramine oligi Joule'i uurimiste eesmärgiks. Üks tema katseseadeldistest meenutab väga pommidega kella mehhanismi. Niisuguse kella üleskeeramine seisneb pommide ülestõmbamises, mis suurendab süsteemi potentsiaalset energiat. Kui kella enam ei puudutata, võib seda vaadata kui suletud süsteemi. Vähehaaval vajuvad pommid jälle allapoole ja kell käib maha. Kindla ajavahemiku lõpuks on pommid jõudnud oma kõige madalamasse asendisse ja kell jääb seisma. Mis sai energiast? Pommide potentsiaalne energia muutus mehhanismi kineetiliseks energiaks ja hajus seejärel vähehaaval soojusena.

Teravmeelsed muudatused, mida Joule kirjeldatud mehhanismiga ette võttis, võimaldasid tal mõõta soojuskadusid ja järelikult ka vahekorda, milles mehhaaniline energia muutub soojuseks. Veas asetsev väikeste labidatega varustatud ratas pandi Joule'i katseseadeldises kahe vihi abil pöörlema (joonis 20). Vihtide potentsiaalne energia muutus liikuvate veosakeste kineetiliseks energiaks ja seega soojuseks, mis tõstis vee temperatuuri. Joule mõõtis selle temperatuurimuutuse ja, teades vee soojusmahtuvust, arvutas neeldunud soojushulga. Oma rohkearvuliste katsete tulemused võttis ta kokku järgmiselt:

1. Nii tahkete kui ka vedelate kehade hõõrdumisel tekkinud soojushulk on alati võrdeline kulutatud jõu hulgaga (jõu all mõtles Joule energiat).

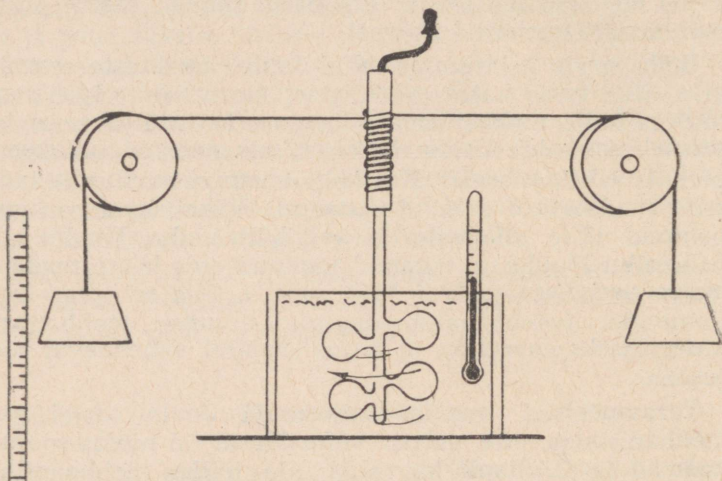
2. Soojushulk, mis kulub ühe naela<sup>2</sup> vee soojendamiseks 1° Fahrenheiti võrra (vesi on kaalutud vaakumis ja tema tem-

<sup>1</sup> Seda vahekorda nimetatakse soojuse mehhaaniliseks ekvivalendiks. — *Tõlk.*

<sup>2</sup> 1 nael = 453,6 g. — *Tõlk.*

peratuur on 55 ja 60 kraadi vahel), nõuab tekkimiseks mehhaanilist jõudu (energiat), mille saame 772 naela langemisel ühe jala kõrguselt.

Teiste sõnadega: maapinnast ühe jala kõrgusele tõstetud 772 naela potentsiaalne energia on ekvivalentne soojushulgaga, mis kulub ühe naela vee temperatuuri tõstmiseks 55 kraadilt 56 kraadini Fahrenheiti järgi. Hilisemad katsetajad saavutasid küll mõnevõrra suurema täpsuse<sup>1</sup>, kuid oluliselt jäi soojuse mehhaaniline ekvivalent samasuguseks, nagu leidis selle Joule oma esialgses töös.



Joon. 20.

Kui see oluline samm oli tehtud, toimus edasine progress juba ruttu. Seisukoht, et mehhaaniline energia ja soojus on ainult energia paljude avaldumisvormide kaks eri liiki, sai varsti üldtunnustatuks. Kõik see, mida saab muuta nendeks energiavormideks, on samuti energiavorm. Päikesekiirgus on energia, sest osa temast muutub Maa peal soojuseks. Elektrivoolul on olemas energia, sest ta soojendab juhet ja paneb elektrimootoris pöörlema rootori. Süsi esitab keemilist energiat, mis põlemi-

<sup>1</sup> Praegu teame, et soojushulk, mis kulub ühe kilogrammi vee temperatuuri tõstmiseks 14 kraadilt 15 kraadini Celsiuse järgi, nõuab tekkimiseks 427 kilogramm-meetrit energiat. — Tõlk.

sel vabaneb soojuse näol. Igas loodusnähtuses muutuvad ühed energiavormid teisteks, kusjuures niisugused muutumised toimuvad alati kindla vahekorra järgi. Kõigist välismõjudest isoleeritud suletud süsteemis on energia jääv ja käitub seega nagu substants. Kõikvõimalike energialiikide summa on niisuguses süsteemis alati muutu-matu, kuigi iga üksikut liiki energia eraldi võib muu-tuda. Kui käsitleme universumit suletud süsteemina, siis võime koos üheksateistkümnenda sajandi füüsikutega uhkelt kuulutada, et universumi energia koguhulk on jääv, et mitte ühtki osa sellest pole kunagi võimalik luua ega hävitada.

Sel juhul on meil kaks substantsi mõistet: *aine* ja *ener-gia*. Need mõlemad alluvad jäävuse seadustele: isoleeri-tud süsteemi mass ja koguenergia ei saa muutuda. Ainel on olemas kaal, energia on aga kaalutu. Sellest tingituna on meil kaks erinevat mõistet ja kaks jäävuse seadust. Kas võime neid ideid veel praegugi samal kujul kasutada? Või on see omal ajal kahtlemata hästi põhjendatud kujut-lus uuemate uurimuste valgusel muutunud? Jah, on muutunud! Aine ja energia mõistete edasine muutumine on seotud relatiivsusteooriaga. Selle küsimuse juurde pöördume hiljem tagasi.

### Filosoofiline taust

Teadusliku uurimistöö tulemused muudavad sageli filosoofilisi vaateid probleemi enda kohta. Need muuda-tused levivad teaduse kitsastest piiridest harilikult kau-gele üle. Mis on teaduse eesmärgiks? Mida nõutakse teoorialt, mis püüab kirjeldada loodust? Need küsimused, mis lähevad füüsika valdkonnast küll kaugele välja, on temaga siiski tihedalt seotud, sest just füüsika annab materjali nende küsimuste tekkimiseks. Filosoofilised üldistused peavad tuginema teaduse resultaatidele. Kord juba tekkinud ja õigeks tunnistatud, avaldavad nad oma-korda mõju teadusliku mõtte arenemisele, näidates ühte tema kõikvõimalikest arenemisteedest. Edukas mäss üld-kehtivate vaadete vastu toob kaasa teaduse ootamatu ja täiesti uuesuunalise arenemise, mis omakorda saab uute filosoofiliste vaadete aluseks. See skeem kõlab muidugi ebamääraselt ja mõttetuna, kuni me pole teda füüsika ajaloost võetud näidetega illustreerinud.

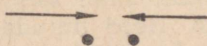
Püüame siin kirjeldada esimesi filosoofilisi mõtteid teaduse eesmärkidest. Need esimesed ideed avaldasid suurt mõju füüsika arenemisele, kuni nad umbes sada aastat tagasi kõrvale heideti, tänu uutele andmetele, uutele faktidele ja teooriatele, mis omakorda rajasid teadusele uue aluse.

Kogu teaduse ajaloos, alates kreeka filosoofiast ja lõpetades kaasaegse füüsikaga, on pidevalt püütud loodusnähtuste keerukat kompleksi taandada paarile lihtsale põhiideele ja -seosele. See on kogu loodusfilosoofia alusprintsipiiks, mis avaldus juba atomistide töös. Kaks-kümmend kolm sajandit tagasi kirjutas Demokritos:

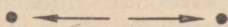
Tinglikult on magus magus, tinglikult on mõru mõru, tinglikult on kuum kuum, tinglikult on külm külm, tinglikult on värvus värvus. Aga tegelikkuses on olemas aatomid ja tühjus. See tähendab, et meie meelte objekte peetakse harilikult reaalsedeks niisugustena, nagu nad meile näivad, kuid tegelikult pole see nii. Reaalsed on ainult aatomid ja tühjus.

Antiikfilosoofias jääb see idee ainult inimliku kujutlusvõime teravmeelseks loominguks. Kreeklased ei tundnud loodusseadusi, mis seovad omavahel üksteisele järgnevaid sündmusi. Teooriat ja eksperimenti siduv teadus algas faktiliselt alles Galilei töödega. Me jälgisime selle teaduse esimesi samme, mis viisid liikumise seadusteni. Kahesaja aasta jooksul olid kõigis loodusest arusaamise

*tõmbumine*



*tõukumine*



Joon. 21.

püüetes põhimõisteteks jõud ja aine. On võimatu kujutleda ühte neist ilma teiseta, sest aine ilmutab oma olemasolu jõu allikana, mõju kaudu teisele ainele.

Vaatame kõige lihtsamat näidet, kahte osakest, mille vahel mõjuvad jõud. Kõige lihtsam on meil kujutleda tõmbe- ja tõukejõude. Mõlemal juhul asetsevad jõuvektorid ainepunktide ühendaval sirgel (joonis 21). Lihtsuse nõue viib meid kujutlusele osakestest, mis tõmbuvad või tõukuvad; igasugune muu oletus mõjuvate jõudude suuna kohta annaks palju keerulisema pildi. Kas võime püstitada sama lihtsa oletuse ka jõuvektorite pikkuse kohta? Isegi kui tahame vältida liiga spetsiaalseid kitsendusi, võime oletada veel ühte: analoogiliselt gravitatsiooni-jõuga oleneb kahte osakest ühendav jõud ainult kaugu-

sest nende osakeste vahel. See on küllaltki lihtne oletus. Võiks kujutleda palju keerulisemaid jõude, mis sõltuksid, näiteks, peale kauguse veel mõlema osakese kiirusest. On vaevaltusutav, et me oskaksime aine ja jõuga kui põhimõistetega siduda ülalöeldust lihtsamaid eeldusi: jõud mõjuvad osakesi ühendavate sirgete sihis ja olenevad ainult kaugusest osakeste vahel. Kas on aga võimalik kõiki füüsikalisi nähtusi eranditult niisugust liiki jõudude abil kirjeldada?

Mehhaanika kõigi harude suurepärased saavutused, tema hämmastav edu astronoomia vallas, tema rakendamine probleemidele, mis oma iseloomult näivad mehhaanikast koguni eemal seisvat — kõik see süvendas veendumust, et muutumatute objektide vahel valitsevate lihtsate jõudude abil on võimalik kirjeldada kõiki loodusnähtusi. Galileile järgneva kahe sajandi jooksul ilmnesid niisugused taotlused, olgu siis teadlikud või ebateadlikud, peaaegu kõigis loodusteaduslikes töödes. Eriti selgelt formuleeris selle suuna Helmholtz üheksateistkümnenda sajandi keskpaiku:

Niisiis, füüsikateaduse ülesannet näeme lõppudelõpuks selles, et taandada loodusnähtused muutumatutele tõmbe- ja tõukejõududele, mille suurus sõltub ainult kaugusest. Selle ülesande lahendamiseks on looduse täieliku mõistmise tingimuseks.

Helmholtzi järgi on teaduse arenemisjoon seega täpselt määratud ja kulgeb kindlas suunas:

Tema kutsumus lõpeb siis, kui ta suudab loodusnähtusi taandada lihtsatele jõududele ja tõestada, et see taandamine on antud nähtuste korral ainuvõimalik.

Kahekümnenda sajandi füüsikule tundub niisugune vaade piiratuna ja naiivsena. Teda kohutaks mõte, et grandioosne uurimistöo, täis üllatusi ja ootamatusi, võiks varsti lõppeda ja kõikideks aegadeks fikseeritaks kindel ning muutumatu pilt universumist.

Kui niisugused dogmad taandaksidki kõik sündmused lihtsatele jõududele, jääks ikkagi lahtiseks küsimus, kuidas peaksid jõud olenema kaugusest. On võimalik, et erinevates nähtustes tuleb see olenevus erinev. Paljude jõuliikide kasutamise vajadus erinevate loodusnähtuste seletamisel ei ole filosoofilisest seisukohast kindlasti vastuvõetav. Vaatamata sellele mängis see nõndanimetatud *mehhanistlik vaade*, mille sõnastas kõige selgemalt

Helmholtz, omal ajal väga tähtsat osa. Teaduse üheks kõige suuremaks saavutuseks, mille tingis mehhanistlik vaade, oli aine kineetilise teooria areng.

Enne kui näitame selle vaate taandumist, asume ajutiselt seisukohale, mida pooldasid möödunud sajandi füüsikud, ja vaatame, missugustele järeldustele välismaailma kohta see meid viib.

### Aine kineetiline teooria

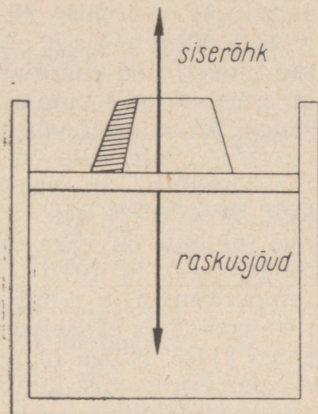
Kas on võimalik seletada soojusnähtusi üksteist lihtsate jõudude kaudu mõjustavate osakeste liikumisena? Sisaldagu kinnine anum teatud hulga kindla temperatuuriga gaasi, näiteks õhku. Soojendades tõstame õhu temperatuuri ja suurendame sel teel tema energiat. Kuidas on see soojus aga seotud liikumisega? Usku niisuguse seose olemasolusse sisendab meile nii eespool omaks võetud filosoofiline vaade kui ka asjaolu, et soojust saab tekitada liikumise abil. Kui kõiki probleeme vaadata mehhaanika probleemidena, siis peab ka soojus olema mehhaaniline energia. *Kineetilise teooria* eesmärgiks ongi aine mõiste käsitlemine eeltoodud viisil. Selle teooria kohaselt on gaas ülisuur hulk osakesi, nõndanimeetatud *molekule*, mis liiguvad kõikvõimalikes suundades, pörkavad üksteisega kokku ja muudavad iga pörke mõjul oma liikumise suunda. Niisuguse gaasi korral võime rääkida molekulide keskmisest kiirusest, nii nagu võime rääkida keskmisest elueast või keskmisest sissetulekust inimühiskonnas. Järelikult saame rääkida ka osakeste keskmisest kineetilisest energiast. Mida rohkem soojust sisaldab anum, seda suurem on temas liikuvate gaasiosakeste keskmine kineetiline energia. Selle kujutluse kohaselt on soojus energiavorm, mis millegi poolest ei erine mehhaanilisest energiast, ta on molekulide liikumise kineetiline energia. Igale kindlale temperatuurile vastab kindel molekuli keskmine kineetiline energia. See pole tegelikult meelevaldne oletus. Kui tahame luua järjekindlalt mehhanistlikku kujutlust aine ehitusest, oleme sunnitud molekuli kineetilist energiat käsitlema kui gaasi temperatuuri mõõtu.

Niisugune maailmapilt pole lihtsalt kujutluse vili. Saab näidata, et gaaside kineetiline teooria on kooskõlas

eksperimentidiga ja viib meid faktide sügavama mõistmiseni. Seda võib illustreerida paljude näidete abil.

Olgu meil vabalt liikuva kolviga suletud anum. See sisaldab teatud hulga gaasi, mille temperatuuri hoitakse muutumatuks. Kui kolb on algul teatud asendis paigal, siis koormuse vähendamisel

tõuseb see ülespoole, koormuse lisamisel aga vajub allapoole. Kolvi nihutamiseks allapoole tuleb rakendada jõudu, mis mõjub gaasi siserõhumisele vastassuunas. Missugune on selle siserõhumise mehhanism kineetilise teooria järgi? Ülisuur hulk osakesi, mis moodustavad gaasi, liiguvad kõigis suundades. Nad pommitavad anuma seinu ja kolbi, põrkudes ise tagasi nagu vastu seinu visatud pallid. See suure hulga osakeste pidev pommitamine hoiab kolbi kindlal kõrgusel, mõjudes vastupidises suunas kui kolvile ja kolvil asetsevale koormusele



Joon. 22.

avalduv raskusjõud, mis suundub allapoole. Ühes suunas mõjub kogu aeg raskusjõud, teises suunas molekulide loendamatud korrapäratud põrked. Tasakaalu korral peab kõigi nende korrapäratult ilmnevate üliväikeste jõudude kogumõju kolvile olema võrdne raskusjõuga.

Oletame, et kolbi suruti allapoole, nii et gaasi ruumala vähendati teatud osa, näiteks poole võrra esialgsest ruumalast, kusjuures gaasi temperatuur jäi muutumatuks. Mis peaks siis gaaside kineetilise teooria kohaselt juhtuma? Kas molekulide pommitamisest tingitud jõud muutub siis efektiivsemaks kui varem või mitte? Osakesed täidavad anumad nüüd endisest tihedamini. Kuigi keskmine kineetiline energia jäi endiseks, toimuvad osakeste põrked vastu kolbi sagedamini ja järelikult on ka üldine mõjuv jõud suurem. Sellest kineetilise teooria poolt antud seletusest ilmneb, et kolvi hoidmiseks madalamas asendis on tarvis suuremat koormust. Seda lihtsat katsetlikku fakti tuntakse hästi, kuid lähtudes aine kineetilisest teooriast, võime seda ka loogiliselt ennustada.

Vaatleme teist katseseadet. Võtame kaks anumad, mis sisaldavad ühesuguse ruumala ja temperatuuri juures kahte erinevat gaasi, näiteks vesinikku ja lämmastikku. Oletame, et mõlemaid anumaid sulevad ühesugused kolvid, mis on koormatud võrdsete raskustega. Lühidalt öeldes, gaasidel on võrdsed ruumalad, temperatuurid ja rõhud. Et temperatuurid on võrdsed, siis teooria järgi peavad olema võrdsed ka osakeste keskmised kineetilised energiad mõlemas gaasis. Kuna ka rõhud on võrdsed, siis pommitatakse mõlemat kolbi ühesuguse jõuga. Keskmiselt võttes on kõigil osakestel ühesugune energia. Peale selle on mõlemal anumal sama ruumala. Siit järeldub, et gaasid on keemiliselt küll erinevad, kuid *molekulide arv mõlemas anumal peab olema sama*. See tulemus on väga oluline paljude keemiliste nähtuste mõistmiseks ja ütleb meile, et kindlas ruumalas antud temperatuuril ja rõhul olevate molekulide arv on midagi niisugust, mis ei iseloomusta gaaside erinevaid liike, vaid gaasi üldse. Kõige hämmastavam on, et kineetiline teooria peale niisuguse universaalse arvu olemasolu ennustamise võimaldab teda ka määrata. Selle küsimuse juurde pöördume varsti tagasi.

Aine kineetiline teooria seletab eksperimendi abil avastatud gaaside seadused nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt. Veel enamgi. Teooria on saavutanud kõige paremaid tulemusi küll gaaside uurimisel, kuid tema rakenduspiirkond ei piirdu kaugeltki ainult sellega.

Gaasi võib veeldada temperatuuri alandamise teel. Aine temperatuuri vähenemine tähendab tema osakeste keskmise kineetilise energia kahanemist. Seepärast on selge, et vedelikuosakese keskmine kineetiline energia on väiksem kui vastava gaasi osakesel.

Üllatavaks näiteks osakeste liikumisest vedelikus sai esimesena nõndanimetatud *Browni liikumine*, mille olemus ilma aine kineetilise teooriata oleks jäänud mõistematuks ja salapäraseks. Niisugust liikumist märkas esimesena botaanik Brown, kuid seletada suudeti seda alles kaheksakümnend aastat hiljem, käesoleva sajandi algul. Ainuke Browni liikumise jälgimiseks vajalik riist on mikroskoop, mis ei tarvitsegi olla eriti hea.

Brown töötas teatud taimede õietolmuga, s. o. tema oma sõnade järgi

erakordselt suurte osakeste või terakestega, mille pikkus oli ühest neljatumandikust tollist kuni umbes viietuhandiku tollini.

Edasi ta jutustab:

Uurides nende vette puistatud osakeste kuju, märkasid paljusid neist ilmses liikumises... liikumised olid niisugused, mis pärast korduvaid vaatlusi viisid mind veendumusele, et need ei saa tekkida voolamisest vedelikus ega vedeliku järkjärgulisest aurustumisest, vaid kuuluvad osakestele endale.

See, mida Brown oma mikroskoobis jälgis, oli vees hõljuvate terakeste pidev rappumine. See on hämmastav vaatepilt!

Kas selle nähtuse jälgimiseks on oluline eriliste taimede valik, millelt tolmuterakesed pärinevad? Brown vastas sellele küsimusele, korrates eksperimenti paljude erinevate taimedega, ja leidis, et kõik vees hõljuvad terakesed, kui nad on ainult küllalt väikesed, liiguvad samal viisil. Veelgi enam, ta avastas samasuguse lakkamatu korrapäratu liikumise nii orgaaniliste kui ka mitteorgaaniliste ainete üliväikeste kübemekeste juures. Niisugust liikumist võis vaadelda isegi kivitolmu terakeste korral, mis saadi sfinksi tükikese purustamisel.

Kuidas niisugust liikumist seletada? Näib, et see räägib vastu kõigile meie senistele kogemustele. Vees hõljuva osakese asendi fikseerimine näiteks iga kolmekümne sekundi järel näitab, missuguse fantastilise kujuga on osakese poolt läbitud tee. Kõige hämmastavam on, et osakese liikumine näib olevat igavene. Vette asetatud võnkuv pendel jääb varsti seisma, kui teda ei sunni mingisugune välisjõud. Lakkamatu liikumine näib olevat vastuolus kõigi meie kogemustega. Selle raskuse seletas suurepäraselt ära aine kineetiline teooria.

Kui vaatame vett kas või kõige võimsama mikroskoobi abil, ei näe me molekule ja nende liikumist, millest räägib aine kineetiline teooria. Tuleb järeldada, et juhul, kui kujutlus veest nagu osakeste kogumist on õige, peab nende osakeste suurus olema kõige paremate mikroskoopide nähtavuspiiri taga. Sellele vaatamata jääme teooriale truuks ja oletame, et ta annab reaalsusest järjekindla pildi. Mikroskoobis nähtavaid Browni osakesi pommitavad veel väiksemad vee koostisosakesed. Kui pommitatavad osakesed on küllalt väikesed, siis tekibki Browni liikumine. Ta tekib sellepärast, et see pommitamine, tänu oma kaootili-

sele ja juhuslikule iseloomule, ei ole kõigist suundadest ühesugune ning sellest tingituna ei tasakaalustu. Nähtav liikumine on seega nähtamatu liikumise tulemuseks. Suurte osakeste käitumine peegeldab teatud viisil molekulide liikumist, annab viimasest, piltlikult öeldes, nii suure suureduse, et see liikumine muutub mikroskoobis nähtavaks. Browni osakeste kaootiline ja juhuslik liikumistee peegeldab samasugust korrapäratust aine väiksemate koostisosakeste liikumises. Öeldust saame järeldada, et Browni liikumise kvantitatiivne uurimine võib meid viia aine kineetilise teooria sügavama mõistmiseni. On ilmne, et nähtav Browni liikumine oleneb nähtamatute pommitavate molekulide suurusest. Kui pommitavatel molekulidel ei oleks teatud hulka energiat või, teiste sõnadega, kui neil ei oleks massi ja kiirust, ei esineks ka Browni liikumist. Seepärast pole midagi imestada, et Browni liikumise uurimine võib viia molekuli massi määramisele.

Tänu visale uurimisele, nii teoreetilisele kui eksperimentaalsele, andis kineetiline teooria ka kvantitatiivseid tulemusi. Browni liikumise jälgimisest tekkinud idee oli üks neist ideedest, mis viis arvulistele resultaatidele. Ühe ja sama suuruse võib määrata mitmel viisil, lähtudes täiesti erinevatest oletustest. On väga oluline, et kõik need meetodid toetavad ühte ning sedasama vaadet, sest see näitab aine kineetilise teooria sisemist järjekindlust.

Meenutame siin ainult ühte neist paljudest tulemustest, millele viis katse koos teooriaga. Oletame, et meil on üks gramm kõige kergemat elementi — vesinikku — ja küsime: kui palju osakesi sisaldub selles grammis? Vastus sellele küsimusele iseloomustab peale vesiniku ka kõiki teisi gaase, sest teame juba, missugustel tingimustel sisaldavad kaks gaasi ühesuguse arvu osakesi.

Lähtudes vedelikus hõljuvate osakeste Browni liikumise mõõtmistest, võimaldab teooria meil leida vastuse eeltoodud küsimusele. Tulemuseks on üllatavalt suur arv: number 3, millele järgneb veel kakskümmend kolm kohta! Molekulide arv ühes grammis vesinikus on järgmine:

303 000 000 000 000 000 000 000.

Kujutleme ühe grammi vesiniku molekule nii palju suurendatuna, et nad oleksid mikroskoobis nähtavad; nende diameeter oleks siis võrdne ühe viietuhandiku

tolliga, s. o. Browni osakeste diameetriga. Selleks et asetada need molekulid tihedalt üksteise kõrvale, peaks meil olema kast, mille kõik servad oleksid umbes veerand miili pikad!

Me saame lihtsalt arvutada ühe vesiniku molekuli massi, kui jagame arvu üks ülaltoodud arvuga. Vastus tuleb fantastiliselt väike:

0,000 000 000 000 000 000 000 000 003 3 grammi,

mis annabki meile vesiniku molekuli massi.

Browni liikumise eksperimentaalne uurimine on ainult üks paljudest sõltumatutest eksperimentidest, mis viivad selle füüsikas erakordset osa mängiva arvu määramisele.

Aine kineetilises teoorias ja kõigis tema tähtsamates saavutustes näeme üldise filosoofilise programmi teostumist: seletada kõiki nähtusi materiaosakeste vastastikuste mehhaaniliste mõjude abil.

Teeme kokkuvõtte:

Mehhaanikas võib ennustada liikuva keha teed tulevikus ja teada saada tema liikumist minevikus, kui on teada keha liikumise tingimused antud momendil ja talle mõjuvad jõud. Näiteks võime ennustada kõigi planeetide tulevaseid teid. Seejuures oletame, et planeetidele mõjuvad jõud on Newtoni seadusele vastavad gravitatsioonijõud, mis sõltuvad ainult kaugusest. Klassikalise mehhaanika ülisuured saavutused sisendavad mõtte, et mehhanistlikku vaadet võib järjekindlalt rakendada kõigis füüsikaharudes, et kõiki nähtusi saab seletada ainult kaugusest sõltuvate, kahe muutumatu osakese vahel valitsevate tõmbe- või tõukejõudude abil.

Aine kineetilise teooria põhjal näeme, kuidas vaade, mis kasvas välja mehhaanika probleemidest, haarab soojusnähtusi ja kuidas see viib kiiresti edasi meie kujutlusi aine ehitusest.

## MEHCHANISTLIKU VAATE TAANDUMINE

*Kaks elektrivedelikku. — Magnetivedelikud. — Esimene tõsine raskus. — Valguse kiirus. — Valgus kui substants. — Värvuse mõistatus. — Mis on laine? — Valguse laineteooria. — Longitudinaalsed või transversaalsed valguslained? — Eeter ja mehhanistlik vaade.*

### Kaks elektrivedelikku

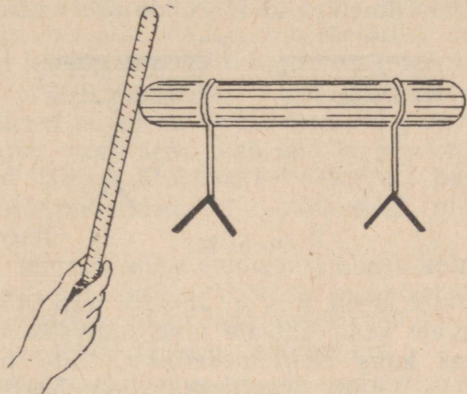
Järgmised leheküljed annavad pealiskaudse ülevaate paarist väga lihtsast eksperimendist. Ülevaate napolisõnalisus pole tingitud mitte ainult sellest, et eksperimentide kirjeldamine pakub vähe huvi, võrreldes nende teostamisega, vaid ka sellest, et nende eksperimentide mõte saab päris selgeks alles siis, kui võtame appi ka teooria. Meie eesmärgiks on tuua eredat näidet, mis iseloomustaks teooria osa füüsikas.

1. Olgu metallvarras kinnitatud klaasalusele, kusjuures varda otsad olgu metalljuhtmetega ühendatud elektrooskoobi külge. Mis on elektrooskoop? See on lihtne riist; oma põhiosas koosneb ta kahest õhukesest, lühikese metallvarda otsas rippuvast kullalehekesest. Lehekesed on ümbritsetud klaasanuma või -pudelig, nii et metall puudutab ainult mittemetallilisi kehi, nõndanimetatud isolaatoreid. Peale elektrooskoobi ja metallvarda olgu meie käsutuses veel kõva kautšukkepik ja tükike flanelli.

Enne katsete juurde asumist pöörame tähelepanu sellele, kas elektrooskoopide lehekesed ripuvad koos, nagu on nende normaalasend, või mitte. Kui nad juhuslikult koos ei ole, siis metallvarda puudutamine sõrmega viib nad õigesse asendisse. Pärast neid ettevalmistavaid abinõusid hõõrutakse kautšukkepikest energiliselt flanelliga ja puudutatakse temaga siis metallvarrast. Otsekohe eemalduvad elektrooskoopide lehekesed teineteisest. Nad jäävad niisu-

gusesse asendisse isegi siis, kui kautšukkepike on metallvarda juurest eemale viidud (joonis 23).

2. Teeme teise katse, kasutades samu vahendeid kui eelmise katse juures. Elektroskoopide lehekesed olgu katse alguses jälle asendis, kus nad teineteist puudutades vabalt ripuvad. Sel korral me metallvarrast kautšukkepi-



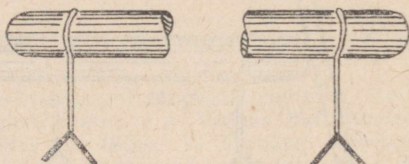
Joon. 23.

kesega ei puuduta, ainult lähendame seda vardale. Elektroskoopide lehekesed lähevad jälle laiali, kuid see laialimine on tingitud millestki muust kui esimeses katse. Kui me kepikese eemaldame, ilma et oleksime metalli üldse puudutanud, langevad lehekesed, selle asemel et laiali jääda, otsekohe tagasi oma normaalasendisse.

3. Kolmanda katse jaoks muudame veidi oma abinõusid. Oletame, et metallvarras koosneb kahest teineteisega ühendatud osast. Hõõrume kautšukkepikest flanell-lapikesega ja asetame ta jälle metalli lähedusse. Toimub sama mis eelmiselgi juhul — elektroskoopide lehekesed lähevad laiali. Seekord eraldame aga kõigepealt metallvarda osad teineteisest ja alles seejärel viime kautšukkepikese eemale. Märkame, et nüüd elektroskoopide lehekesed jäävadki laiali, nad ei lange normaalasendisse tagasi, nagu see juhtus eelmises katses (joonis 24).

Vaevalt need lihtsad, isegi naiivsevõitu eksperimendid kelleski elavat huvi või entusiasmi äratada suudavad. Keskajal oleks nende teostajat vaadatud tõenäoliselt hukkamõistva pilguga; meile näivad taolised katsed igavate

ning ebaloogilistena. Kui ollakse lugenud katse kirjeidust ainult üks kord, oleks väga raske neid ilma eksimata korrata. Mõned teoreetilised kaalutlused muudavad need katsed arusaadavaiks. Võiks öelda rohkemgi: vaevalt on võimalik kujutleda, et niisuguseid eksperimente tehakse juhuslikult, ilma et juba varem oleks olnud vähem või rohkem väljakujunenud ideid nende tähenduse kohta.

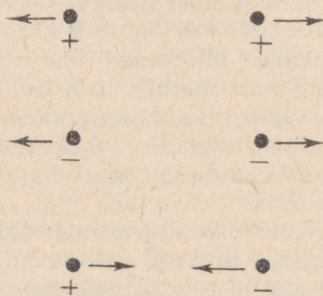


Joon. 24.

Esitame nüüd ideed, mis on aluseks eespool kirjeldatud fakte seletavale väga lihtsale ning naiivsele teooriale.

On olemas kaks *elektrivedelikku*, ühte nimetatakse *positiivseks* (+), teist *negatiivseks* (—). Need vedelikud on substantsitaolised selles mõttes, nagu me eespool rääkisime: kummagi hulka saab suurendada või vähendada, aga nende koguhulk igas isoleeritud süsteemis on jääv. On siiski oluline erinevus käesoleva juhu ja soojust, ainet või energiat käsitleva juhu vahel.

Elektrisubstantse on meil kaks. Eeltoodud analoogiat rahaga ei saa me siin ilma teatud üldistuseta enam kasutada. Keha on elektriliselt neutraalne, kui positiivne ja negatiivne elektrivedelik hävitavad teineteist täielikult. Inimene on maksujõuetu kas sellepärast, et tal üldse raha



Joon. 25.

ei ole, või sellepärast, et tema seifis olev rahasumma on sama suur kui tema võlad. Kahte liiki elektrivedelikega võime võrrelda deebetit ja krediidit raamatupidamises.

Edasi oletab teooria, et ühte liiki elektrivedelikud tõukuvad, kuna eri liiki elektrivedelikud tõmbuvad. Seda võib graafiliselt kujutada nii, nagu on näidatud joonisel 25.

Tuleb teha veel viimane teoreetiline oletus. On olemas kahte liiki kehi: ühed, kus elektrivedelikud võivad vabalt liikuda — nõndanimetatud *juhid*, ja teised, kus elektrivedelikud liikuda ei saa — neid kutsutakse *isolaatoriteks*. Nagu alati taolistel juhtudel, nii ka seda kehade jaotamist kahte liiki ei saa võtta liiga tõsiselt. Ideaalne juht, samuti nagu ideaalne isolaator, on abstraktsioon, mida pole kunagi võimalik realiseerida. Metallid, maa, inimkeha — need on kõik näited juhtide kohta, kuigi nende juhtide kvaliteet on erinev. Klaas, kumm, portselan ja teised nendesarnased ained on isolaatorid. Õhk on ainult osaliselt isolaator, nagu seda teab igaüks, kes on eelkirjeldatud katseid näinud. Elektrostaatikatsete halbu tulemusi on alati hea vabandada õhu niiskusega, mis suurendab õhu juhtivust.

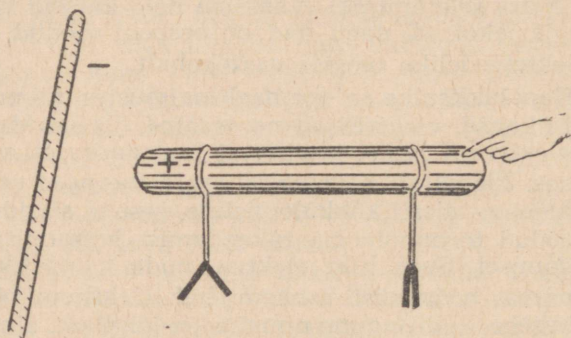
Nendest teoreetilistest eeldustest piisab kolme eelkirjeldatud katse seletamiseks. Vaatame neid katseid veel kord samas järjekorras, nagu nad on eespool toodud, seekord aga elektrivedelike teooria vaatekohalt.

1. Kautšukkepikete on normaaltingimustes, nii nagu kõik teisedki kehad, elektriliselt neutraalne. Ta sisaldab mõlemad elektrivedelikke, positiivset ja negatiivset, võrdsetes hulkades. Flanelliga hõõrumisel eraldame need vedelikud. See väide on täiesti kokkuleppeline, sest ta sisaldab teoorias loodud terminoloogia rakendamist hõõrumisprotsessi kirjeldamisel. Seda liiki elektrit, mida kautšukkepikesse jääb pärast hõõrumist rohkem, hakati hiljem nimetama negatiivseks — niisugune nimetus on kindlasti ainult kokkuleppe asi. Kui katseid oleks tehtud kassinaha abil hõõrutud klaaspulgaga, siis kooskõlas vastuvõetud kokkuleppega oleks tulnud klaaspulgas ülejäävat elektrivedelikku nimetada positiivseks. Jätkates katset, anname elektrivedeliku kautšukkepikese puudutusega üle juhile. Juhis liigub elektrivedelik vabalt, levides üle kogu metalli, kullalehekesele kaasa arvatud. Kuna negatiivsed vedelikud tõukuvad, siis püüavad lehekesele teineteisest nii kaugemale eemalduda kui võimalik. Selle tulemusena märkamegi lehekese laialiminemist. Elektroskoobi metallosa varras toetub klaasist või mõnest teisest isoleerivast aineksest alusele. Elektrivedelik jääb seega juhisse, niivõrd kui seda võimaldab õhu elektrijuhtivus. Nüüd on ka arusaadav, miks pidime enne katse algust metallvarrast sõrmega puudutama. Puudutamise hetkel metallvarras, inimese keha ja

maa moodustavad kokku ühe suure juhi, millesse elektrivedelik nii laiali voolab, et elektroskoop praktiliselt tühjeneb.

2. Teine eksperiment algab samuti kui esimene. See-kord kautšukkepikete aga metallvarrast ei puuduta, ainult läheneb temale. Kuna elektrivedelikud võivad metallis vabalt liikuda, siis nad eralduvad; üks neist tõukub kautšukkepikesest eemale, teine aga tõmbub tema juurde. Kui kautšukkepikete eemale viia, siis vastastikuse tõmbumise tõttu elektrivedelikud segunevad uuesti.

3. Nüüd me jaotame metallvarda kaheks osaks, kusjuures kautšukkepikete on varda ühe otsa läheduses, ja seejärel eemaldame kepikesed. Elektrivedelikud ei saa nüüd enam seguneda, nii et ühte sorti elektrivedeliku puudub jääk kullalehekestel ei kao ja lehekesed jäävadki laiali.



Joon. 26.

Selle lihtsa teooria valgusel näivad kõik eeltoodud katsed arusaadavaina. Sama teooria annab veel rohkemgi, seletades paljusid «elektrostaatika» valdkonda kuuluvaid fakte. Iga teooria eesmärgiks on suunata meid uute faktide leidmisele, viia ideedele uutest võimalikest eksperimentidest ja näidata teed uute nähtuste ning seaduste avastamisele. Seda selgitab järgmine näide. Kujutleme teist eksperimenti veidi muudetuna. Oletame, et ma jätan kautšukkepikesed metalli lähedusse ja puudutan samal ajal metalli sõrmega. Mis juhtub? Teooria vastab sellele: kepikesest eemal tõukub negatiivne (—) vedelik saab nüüd minu keha kaudu eemalduda, metallvardasse jääb seega ainult üks elektrivedelik, nimelt positiivne (+). Elektros-

koobi lehekused peavad jääma laiali. Tõepoolest, eksperiment kinnitab seda ennustust.

Teooria, millest me siin räägime, on muidugi naiivne ja ei lange kaugeltki ühte kaasaegse füüsika vaadetega. Sellele vaatamata on ta heaks näiteks, mis demonstreerib iga füüsikalise teooria peamisi jooni.

Teaduses pole igavesi teooriaid. Alati juhtub, et mõned teooria poolt ennustatud nähtused on eksperimendiga vastuolus. Igal teorial on oma järkjärgulise arenemise ja triumfi periood; pärast seda võib järgneda aga kiire langus. Soojuse substantsiaalne teooria, mida me eespool üksikasjalisemalt vaatasime, on üheks paljudest võimalikest näidetest selle kohta. Teisi, veelgi sügavamaid ja olulisemaid näiteid, käsitleme hiljem. Peaaegu iga suurem edusamm teaduses tekib püüetest kõrvaldada vana teooria kriisis esilekerkinud raskusi. Me peame vaagima vanu ideid ja teooriaid, kuigi nad kuuluvad minevikku, sest see on ainuke tee uute ideede tähtsuse ning kehtivuspiiride mõistmiseks.

Meie raamatu esimestel lehekülgedel võrdlesime uurijat detektiiviga, kes on kogunud talle vajalikud faktid ja leiab nüüd õige lahenduse puhta mõtlemise teel. Ühest vägagi olulisest seisukohast tuleb seda võrdlust lugeda aga äärmiselt pealiskaudseks. Nii elus kui ka kriminaalromaanides on kuritegu alati olemas. Detektiiv peab otsima dokumente, sõrmejälgi, kuule, revolvreid, kuid ta vähemalt teab, et kuritegu on tõesti toimunud. Teadlase puhul lugu nii ei ole. Võib kergesti kujutleda inimest, kes ei tea elektrist absoluutselt mitte midagi; antiikaja inimesed elasid küllaltki õnnelikult, ilma et nad oleksid kunagi elektrist midagi kuulnud. Antagu niisugusele inimesele metall, kullaleheke, pudelid, kautšukkepik, flannel-lapp, ühe sõnaga kõik, mida on vaja meie kolme eksperimendi teostamiseks. See võib olla hea haridusega inimene, kuid tõenäoliselt valaks ta pudelisse veini, kasutaks flanelli puhastuslapina ja mitte kunagi ei tekiks tal eespool kirjeldatud eksperimentide teostamise mõtet. Detektiivile on kuriteo fakt antud ja probleem formuleerub umbes nii: kes tappis Cock Robini? Teadlane peab aga kuritöö vähemalt osaliselt ise teostama ja seejärel ka asja uurimise lõpule viima. Veelgi rohkem, tema ülesanne on selles, et seletada peale antud juhu ka kõiki tei-

si sellega seotud nähtusi, mis on kas juba juhtunud või võivad veel juhtuda.

Vedeliku mõiste kasutuselevõtmises näeme nendesama mehhanistlike ideede mõju, mis püüdsid kõike seletada substantside ja nende vahel valitsevate lihtsate jõudude abil. Et näha, kas mehhanistlikku vaadet võib rakendada elektrinähtuste kirjeldamiseks, peame uurima järgmist probleemi. Olgu meil kaks väikest laetud kera, see tähendab kera, millel on ühe elektrivedeliku puudujääk. Me teame, et need kerad kas tõmbuvad või tõukuvad. Kas aga keradevaheline jõud sõltub ainult kaugusest? Kui jaa, siis missugusel viisil? Kõige lihtsam on oletada, et see jõud sõltub kaugusest sama seaduse kohaselt nagu gravitatsioonijõudki, mis väheneb näiteks üheksa korda, kui kaugus suureneb kolm korda. Coulomb'i katsed näitasid, et niisugune seadus on tõepoolest õige. Sada aastat pärast Newtonit, kes avastas gravitatsiooniseaduse, tegi Coulomb kindlaks elektriliste jõudude lihtsa olenevuse kaugusest, mis tuli välja samasugune. Kuid Newtoni seadusel ja Coulomb'i seadusel on kaks olulist erinevust. Gravitatsiooniline tõmbumine on alati olemas, samal ajal kui elektrilised jõud valitsevad ainult laengut kandvate kehade vahel. Gravitatsiooniseaduses esineb ainult tõmbumine, kuna elektrilised jõud võivad olla nii tõuke- kui ka tõmbejõud.

Siin tekib sama küsimus, mida puudutasime juba seoses soojusega. Kas elektrivedelikud on kaalutud substantid või mitte? Teiste sõnadega, kas laetud metallitükikese kaal on sama kui neutraalsel? Kaalud siin mingisugust erinevust ei avasta. Tuleb järeldada, et ka elektrivedelikud kuuluvad kaalutute substantside perekonda.

Elektriteooria edasiarendamine nõuab meilt kahe uue mõiste sissetoomist. Loobume jälle rangetest definitsioonidest, kasutades nende asemel analoogiat juba tuttavate mõistetega. Meenutame, kui vajalik oli soojusnähtuste mõistmiseks soojuse ja temperatuuri eristamine. Täpselt samuti on ka siin oluline vahet teha elektrilaengu ja elektrilise potentsiaali vahel. Nende mõistete erinevus saab selgeks järgmisest analoogiast:

Elektriline potentsiaal	—	Temperatuur
Elektrilaeng	—	Soojus

Kahel juhil, näiteks kahel erineva suurusega keral, võib olla ühesuurune laeng, s. o. ühte ja sama liiki elektrivedeliku ühesuurune ülejääk, kuid potentsiaal on neil erinev: väiksemal keral on ta kõrgem, suuremal — madalam. Väiksemas juhisis on elektrivedeliku tihedus suurem ja seega on vedelik seal rohkem kokku surutud. Et elektrivedeliku tiheduse kasvamisel peavad suurenema ka temas mõjuvad tõukejõud, siis laengu püües laiali voolata on väikeses kemas tugevam kui suures. Juhi potentsiaal avaldub vahetult just laengu püüdes juhisis välja voolata. Et selgesti näidata laengu ja potentsiaali erinevust, sõnastame mõned laused, mis kirjeldavad vastavalt soojendatud kehi ja laetud juhte.

### Soojus

Kaks erineva algtemperatuuriga keha omandavad ühesuguse temperatuuri teatud aja jooksul pärast seda, kui nad on viidud omavahelisse kokkupuutesse.

Kui kahe keha soojusmahtuvus pole ühesugune, siis põhjustavad võrdsed soojushulgad erinevaid temperatuurimuutusi.

Mingi kehaga kontaktis olev termomeeter näitab elavhõbedasamba pikkuse kaudu omaene temperatuuri ja selle kaudu ka keha temperatuuri.

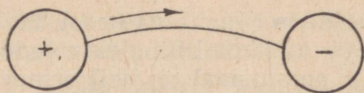
Niisugust analoogiat ei saa aga liiga kaugele jätkata. Järgmine näide toob esile nii sarnased kui ka erinevad küljed soojusnähtuste ja elektrinähtuste juures. Kui kuum keha viiakse kokkupuutesse külma kehaga, siis voolab soojus kuumemalt kehalt külmemale. Oletame nüüd, teiselt poolt, et meil on kaks isoleeritud juhti, mis kannavad võrdseid, kuid märgilt vastupidiseid laenguid, s. o. ühel neist on positiivne, teisel negatiivne laeng. Kumbki juht olgu erineva potentsiaaliga. Kokkuleppeliselt loeme negatiivsele laengule vastava potentsiaali madalamaks kui positiivsele laengule vastava potentsiaali. Kui need juhid on viidud kokkupuutesse või ühendatud juhtmega, siis

### Elekter

Kaks erineva potentsiaaliga isoleeritud juhti omandavad pea-aegu silmapilkselt ühesuguse potentsiaali, niipea kui nad on viidud omavahelisse kokkupuutesse.

Kui kahe keha elektrimahtuvus pole ühesugune, siis põhjustavad võrdsed hulgad elektrilaengut erinevaid potentsiaalimuutusi.

Mingi juhiga kontaktis olev elektrooskoop näitab kullalehekete eemaldumise astme kaudu omaene potentsiaali ja selle kaudu ka juhi potentsiaali.



Joon. 27.

elektrivedelike teooria kohaselt mingisugust elektrilaengut alles ei jää. See tähendab, et ei jää enam ka juhtide potentsiaali erinevust. Meil tuleb oletada,

et elektrilaengu «voolamine» ühelt juhilt teisele toimub väga lühikese aja jooksul: sama aja jooksul tasakaalustub ka potentsiaalide erinevus. Kuidas see aga toimub? Kas positiivne vedelik voolab negatiivselt laetud kehale või, vastupidi, negatiivne vedelik voolab positiivselt laetud kehale?

Eespool käsitletud katsed ei anna meile kõige vähematki viidet selle küsimuse lahendamiseks. Võime oletada, et emb-kumb neist võimalustest on õige, kuid võiksime ka oletada, et nad mõlemad on õiged — elektri voolamine toimuks siis üheaegselt mõlemas suunas. Tegemist on siin ainult kokkuleppega, millele ei saa omistada mingisugust tähtsust, sest me ei tea ühtki meetodit selle küsimuse eksperimentaalseks lahendamiseks. Teaduse edasine arenemine annab meile palju sügavama elektriteooria ja lahendab ka selle probleemi, mis primitiivses elektrivedelike teoorias osutub täiesti mõttetuks. Esialgul aga peame kinni järgmisest väljendusviisist: elektrivedelik voolab kõrgema potentsiaaliga juhilt madalama potentsiaaliga juhile. Seega antud näites voolab elekter positiivselt laetud kehalt negatiivselt laetud kehale. See väide on puhtalt kokkuleppe asi ja on täiesti meelevaldne. Kõik need raskused näitavad, et analoogia soojuste ja elektri vahel ei ole mingil juhul täielik.

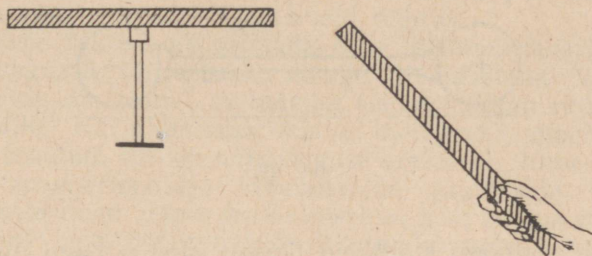
Nägime, missugused on võimalused mehhanistliku maailmavaate kohandamiseks, nii et see kirjeldaks lihtsaid elektrostaatikanähtusi. Sama on võimalik teha ka magnetinähtuste korral.

### Magnetivedelikud

Toimime siin samuti nagu eespoolgi, s. o. alustame väga lihtsate faktidega ja otsime neile hiljem teoreetilise seletuse.

1. Meil on kaks pikka magnetpulka, üks neist toetub keskkohaga vabalt teravikule, kuna teist hoitakse käes. Kui magnetpulkade otsi teineteisele lähendada, ilmneb

nende vahel tugev tõmbejõud (joonis 28). Seda katset võib alati teostada. Kui tõmbejõudu märgata ei ole, siis tuleb meil magnetit pöörata ja proovida teise otsaga. Kui pulgad on korralikult magnetiseeritud, midagi kindlasti juhtub. Magnetite otsi nimetatakse nende *poolusteks*. Jätka-



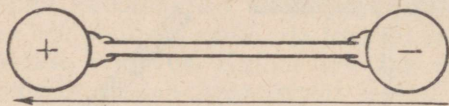
Joon. 28.

tes katset, nihutame käes hoitava magneti poolust piki teist magnetit. Seejuures märkame tõmbejõu vähenemist, nii et pooluse jõudmisel nõelale toetuva magneti keskkoha tõmbejõud kaob. Kui poolust endises suunas edasi nihutada, tekib tõukejõud, mis saavutab oma suurima tugevuse nõelal asetseva magneti teise pooluse juures.

2. Ülaltoodud näide viib järgmisele mõttele. Igal magnetil on kaks poolust; kas poleks võimalik ühte neist eraldada? Selle mõtte teostamine näib olevat väga lihtne, selleks tuleks murda magnet kaheks võrdseks osaks. Me ju nägime, et ühe magneti poolus ei avalda mingisugust mõju teise magneti keskkohale. Kui me magneti aga tõepoolest pooleks murrame, on tulemused ootamatud. Korra punktis 1 toodud katset ainult poole magnetiga, mille oleme samal viisil toetanud, saame täpselt samasugused tulemused nagu enne. Seal, kus varem polnud magnetijõududest jälgegi, asetseb nüüd tugev poolus.

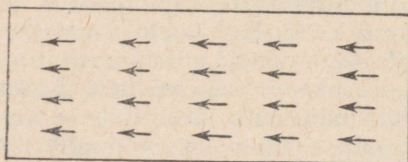
Kuidas neid nähtusi seletada? Proovime visandada magnetismi teooriat, mis oleks analoogiline elektrivedelike teooriaga. Selle püüde sisendab meile tõsiasi, et ka siin, samuti nagu elektrinähtuste korralgi, esinevad nii tõmbe- kui ka tõukejõud. Kujutleme kahte kerakujulist juhti, mis kannavad võrdseid laenguid, üks positiivset, teine negatiivset. Sõna «võrdsed» tähendab siin ühesuguse absoluutväärtusega suurusi; näiteks arvudel  $+5$  ja

—5 on ühesugune absoluutväärtus. Oletame, et need kerad on ühendatud mingi isolaatori, näiteks klaasvarda abil. Skemaatiliselt võib niisugust konstruktsiooni kujutada noolekesena, mis on suunatud negatiivselt laetud juhi poolt positiivselt laetud juhi poole. Niisugust süsteemi nimetame elektriliseks *dipooliks*. On selge, et kaks



Joon. 29.

elektrilist dipooli käitumiseid täpselt samuti nagu magnetpulgad katses 1. Kui vaatame oma konstruktsiooni nagu reaalse magneti mudelit ja oletame magnetivedelike olemasolu, võime öelda, et magnet pole midagi muud kui *magnetiline dipool*, mille otstes on kahte erinevat sorti



Joon. 30.

magnetivedelikku. See lihtne teooria, mis imiteerib elektriteooriat, sobib täiesti esimese eksperimendi seletamiseks. Selle teooria järgi peakski magneti ühes otsas ilmema tõmbejõud, teises — tõukejõud, kuna magneti keskel mõjuvad võrdsed ja vastassuunalised jõud, mis teineteist tasakaalustavad. Kuidas on aga teise eksperimendiga? Kui murrame elektrilist dipooli kujutava klaasvarda pooleks, saame kaks isoleeritud poolust. Sama peaks juhtuma ka magnetilise dipooli, rauast magnetpulga korral. Me teame aga, et teise eksperimendi tulemused seda ootust ei kinnita. Niisugune vastuolu sunnib meid täpsemat teooriat arendama. Esialgse mudeli asemel võime kujutleda, et magnet koosneb väga väikestest *elemen-*

taarsetest magnetilistest dipoolidest, mida ei saa üksiku- teks poolusteks lahutada. Magnetis tervikuna valitseb range kord, sest kõik elementaardipoolid on temas ühe- suguse suunaga. Siit on kohe näha, miks magneti poolita- misel tekivad uutes otstes uued poolused ja kuidas see detailiseeritud magnetiteooria seletab nii eksperimendis 1 kui ka eksperimendis 2 esinevaid nähtusi.

Paljusid fakte saab seletada juba lihtsama teooria abil ja igasugused täpsustused näivad üleliigsetena. Võtame ühe näite: me teame, et magnet tõmbab külge rauatüki- keski. Miks? Harilikus rauatükis on mõlemad magnetivede- likud segatud, nii et mingisugust efekti ei ilmne. Posi- tiivse magnetipooluse lähendamine rauatükile mõjub vedelikele nagu «käsk eraldumiseks», sest poolus tõmbab rauas olevat negatiivset vedelikku enda poole, kuna posi- tiivset vedelikku tõukab ta eemale. See tingib tõmbejõu magneti ja rauatüki vahel. Kui magnet on eemale viidud, lähevad vedelikud tagasi enam-vähem algasendisse, sõltu- valt sellest, kui hästi vedelikud välisjõu käskivat häält «meeles peavad».

Tuleb öelda paar sõna ka probleemi kvantitatiivse külje kohta. Kasutades kahte väga pikka magnetpulka, võime uurida magnetipooluste tõmbumist (või tõukumist) sel teel, et lähendame neid teineteisele. Kui pulgad on küllalt pikad, siis nende teiste pooluste mõju on tühiselt väike. Kuidas oleneb tõmbe- või tõukejõud kaugusest pooluste vahel? Coulomb'i katse vastab siin, et sõltuvus kaugusest on sama kui Newtoni gravitatsiooniseaduses ja Coulomb'i elektrostaatikaseaduses.

Me näeme, kuidas selles teoorias rakendatakse jällegi üldist seisukohta: kõiki nähtusi püütakse kirjeldada tõmbe- ja tõukejõudude abil, mis sõltuvad ainult kaugu- sest ja mõjuvad muutumatute osakeste vahel.

Siin tuleks meenutada ühte üldtuntud fakti, mida meil hiljem tarvis läheb. Maa on suur magnetiline dipool. Miks see nii on, selle seletamiseks pole meil kõige väiksematki viidet. Geograafiline põhjapoolus ja negatiivne (—) mag- netipoolus langevad ligikaudu ühte, samuti geograafiline lõunapoolus ja positiivne (+) magnetipoolus. Nimetused positiivne ja negatiivne on ainult kokkuleppe asi, olles neid aga kord juba nii tähistanud, mõjustab see meid ka kõigil teistel juhtudel pooluseid analoogiliselt nimetama. Vertikaalsele teljele toetuv magnetnõel allub Maa mag-

netijõu mõjule. Nõel suunab oma positiivse pooluse geograafilise põhjapooluse, s. o. Maa negatiivse magnetpooluse suunas.

Eespool käsitletud elektri- ja magnetinähtuste valdkonnas saame mehhanistlikku vaadet küll järjekindlalt rakendada, kuid see ei anna veel erilist põhjust uhkustamiseks või rahuloluks. Teoorial on ilmselt ebarahuldavaid, kui mitte päris kahtlasena tunduvaid jooni. Meil tuli välja mõelda uut liiki substantse: kaks elektrivedelikku ja elementaarsed magnetidipoolid. Substantside hulk muutub juba liiga suureks.

Jõud on lihtsad. Nad avalduvad ühtemoodi nii gravitatsiooni- kui ka elektri- ja magnetijõudude korral. Ent hind, mida tuli maksta selle lihtsuse eest, on kõrge: tuli võtta kasutusele uued kaalutud substantSID. Need on küllaltki kunstlikud mõisted, kuşjuures nad pole üldse seotud põhisubstantSi — massiga.

### Esimene tõsine raskus

Me oleme nüüd valmis märkima esimest tõsist raskust, mis tekib meie üldise filosoofilise vaatekoha rakendamisel. Hiljem näeme, et see raskus koos teiste, veelgi tõsisemate komplikatsioonidega purustas täielikult usu sellesse, nagu saaks kõiki nähtusi mehhanistlikult seletada.

Elektriasjanduse kui teaduse ja tehnika ühe haru kiire arenemine sai alguse elektrivoolu avastamisest. Siin kohutume teaduse ajaloo väga harva esineva juhuga, kus tähtsat osa mängis juhus. Lugu konna reie tõmblemisest on jutustatud mitmes variandis. Jättes kõrvale küsimuse selle loo detailide tõepärasusest, pole siiski kahtlust, et Galvani juhuslik avastus viis kaheksateistkümnenda sajandi lõpul Volta niikaugele, et ta konstrueeris seadeldise, mida tuntakse *volta patarei* nime all. Praegu seda patareid praktiliselt enam ei kasutata, kuid ta on väga lihtsa vooluallika näiteks koolidemonstratsioonides ja õpikute seletustes.

Tema ehituse põhimõte on lihtne. Siin on mõned klaasanumad, igaüks neist sisaldab vett koos vähese hulga väävelhappega. Igas anumad on lahusesse pistetud kaks metallplaati — üks vasest, teine tsingist. Ühe anuma vaskplaat on ühendatud järgmise anuma tsinkplaadiga,

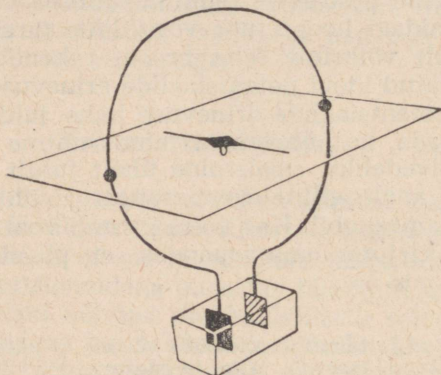
nii et ainult esimese anuma tsinkplaat ja viimase vaskplaat jäävad vabaks. Kui «elementide» arv, see tähendab patareid moodustavate klaasanumate ja plaatide arv on küllalt suur, siis võime väga tundliku elektroskoobi abil avastada elektripotentsiaali erinevuse esimese anuma vaskplaadi ja viimase anuma tsinkplaadi vahel.

Mitmest elemendist koosnevast patareist rääkisime ainult selleks, et saada märgatavat efekti, mida oleks lihtne juba eespool kirjeldatud riistade abil mõõta. Järgnevas arutluses on meil ühest elemendist küllalt. Osutub, et vase potentsiaal on tsiingi potentsiaalst kõrgem. «Kõrgem» on mõeldud siin samas mõttes nagu  $+2$  on suurem kui  $-2$ . Kui üks juht on ühendatud elemendi vaba vaskplaadiga ja teine tsinkplaadiga, siis saavad need juhid laengu, esimene positiivse, teine negatiivse. Seni me selles kõiges midagi hoopis uut või üllatavat avastanud ei ole, järelikult võiksime teha proovi rakendada ka siin varem kasutatud ideid potentsiaalide erinevuse kohta. Me nägime, et potentsiaalide erinevuse kahe juhi vahel võib kiiresti kaotada, kui ühendada juhid juhtme abil, milles tekib elektrivedeliku voolamine ühelt juhilt teisele. See protsess oli analoogiline temperatuuride ühtlustamisega soojuse voolamise abil. Kas volta patarei vool teeb aga ka tööd? Volta kirjutas oma aruandes, et plaadid käituvad nagu juhid, mis on

... nõrgalt laetud ja toimivad pidevalt või nii, et pärast iga lahendust nende laeng taastub jälle iseenesest; mis, lühidalt öeldes, varustavad meid piiramatult elektrilaenguga või avaldavad elektrivedelikule pidevat mõju või sundust.

Volta katse üllatavaks tulemuseks on see, et potentsiaalide erinevus vask- ja tsinkplaadi vahel ei kao, nagu see toimub ühendatud juhtide korral. Potentsiaalide vahe säilib ja vastavalt elektrivedelike teooriale peab see põhjustama vedeliku pideva voolamise kõrgema potentsiaaliga nivoolt (vaskplaat) madalama potentsiaaliga nivoole (tsinkplaat). Püüdes päästa vedelike teooriat, võiksime oletada, et patareis mõjub mingisugune konstantne jõud, mis taastab potentsiaalide erinevuse ja põhjustab elektrivedeliku voolamise. Kuid energeetilisest seisukohast vaadatuna on see nähtus väga veider. Juhtmes, kus voolab elektrivedelik, tekib märgatav hulk soojust, millest juhul,

kui juhe on küllalt peenike, piisab isegi juhtme sulatamiseks. Juhtmes tekib seega soojusenergiat. Kogu volta patarei moodustab aga isoleeritud süsteemi, sest väljastpoolt ta energiat juurde ei saa. Kui tahame päästa energia jäävuse seadust, peame tegema kindlaks, mille arvel soojus tekib, ja leidma koha, kus see muundumine toimub. Pole raske taibata, et patareis toimuvad komplitseeritud keemilised protsessid, millest võtavad aktiivselt osa vedelikus asetsevad vask ja tsink, samuti vedelik ise. Energeetilisest vaatekohast on siin tegemist transformatsioonide ahelaga: keemiline energia  $\rightarrow$  voolava elektrivedeliku, s. o. elektrivoolu energia  $\rightarrow$  soojus. Volta patarei ei tööta igavesti; elektrivooluga seotud keemilised muundused teevad patarei mõne aja pärast kõlbmatuks.



Joon. 31.

Katse, mis tõi ilmsiks aga tõeliselt suured raskused mehhanilike ideede rakendamisel, peab igaühele, kes kuuleb sellest esmakordselt, kõlama üsna kummalisena. Selle katse tegi Oersted umbes sada nelikümmend aastat tagasi. Ta kirjutab:

Nende katsetega näib olevat tõestatud, et magnetnõel nihkus paigast ära galvaanilise aparraadi toimel ja nimelt siis, kui galvaaniline ahel oli suletud, mitte aga avatud, nagu mõned hästi tuntud füüsikud mõni aasta tagasi asjatult näidata püüdsid.

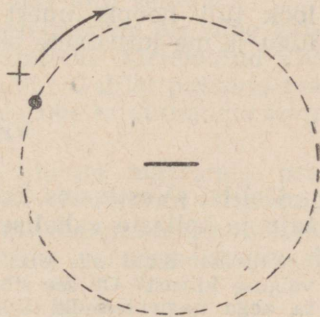
Oletame, et meil on volta patarei ja metalljuhe. Kui juhe on ühendatud vaskplaadiga, tsinkplaadiga aga mitte, siis on olemas potentsiaalide erinevus, sest voolu olla ei

saa. Oletame, et juhe on painutatud rõngakujuliseks ja rõnga tsentris paikneb magnetnõel. Nõel ja juhtmekontuur asetsegu ühes tasapinnas. Kuni juhe tsinkplaadi külge ei puutu, ei juhtu midagi. Mingisuguseid jõude siin ei mõju, potentsiaalide erinevus nõela asukohta kuidagiviisi ei muuda. Näib arusaamatuna, miks «hästituntud füüsikud», nagu neid nimetas Oersted, niisugust mõju ootasid.

Nüüd ühendame juhtme vaba otsa tsinkplaadiga. Otsekohe juhtub kummaline lugu: magnetnõel pöördub oma esialgsest asendist kõrvale. Kui selle raamatu lehekülge kujutaks rõnga tasapinda, siis magnetnõela üks poolustest oleks suunatud lugeja poole (joonis 31). See näitab, et magnetipoolusele mõjuv jõud on suunatud *risti* rõnga tasapinnaga. Olles silm silma vastu seatud eksperimentaalsete faktidega, on meil vaevalt võimalik mõjuva jõu suuna kohta mingisuguseid teisi järeldusi teha.

See katse on huvitav kõigepealt selle poolest, et ta näitab seose olemasolu kahe näivalt täiesti erineva nähtuse — magnetismi ja elektrivoolu vahel. Siin on ka teine, veelgi tähtsam moment. Jõud magnetipooluse ja väikeste juhtmelõikude vahel, kus liigub elektrivool, ei saa mõjuda juhet ja nõela ühendava sirge suunas, s. o. suunas, mis ühendab voolava elektrivedeliku osakesi elementaarsete magnetidipoolidega. Jõud on selle suunaga *risti!* Esma-kordselt puutume kokku jõuga, mis erineb täielikult nendest jõududest, millele me oma mehhanistliku vaate kohaselt püüdsime kõiki välismaailma mõjusid taandada. Meenutame, et gravitatsiooni-, elektrostaatika- ja magnetismijõud, alludes Newtoni ja Coulomb'i seadustele, mõjuvad kaht tõmbuvat või tõukuvat keha ühendava sirge sihis.

Seda raskust tõstis veelgi rohkem esile katse, mille pea-aegu kaheksakümmend aastat tagasi suure osavusega teostas Rowland. Jättes kõrvale tehnilised detailid, võime seda katset kirjeldada järgmiselt. Kujutleme väikest laetud kerakest. Liikugu kerake väga kiiresti mööda ringjoont, mille keskpunktis asetseb magnetnõel (joonis 32). See on põhimõt-



Joon. 32.

teliselt seesama Oerstedi katse, selle ainsa erinevusega, et hariliku voolu asemel on siin elektrilaengu mehhaaniline liikumine. Rowland leidis, et katse tulemus on tõepoolest sarnane sellega, mis saadakse siis, kui vool liigub rõngakujulises juhtmes. Magnetnõela kallutab kõrvale ristsuunaline jõud.

Laseme laengut nüüd kiiremini liikuda. Tulemusena magnetipoolusele mõjuv jõud suureneb ja magnetnõela kõrvalekaldumine oma esialgsest asendist muutub märgatavamaks. See tähelepanek toob kaasa uue tõsise komplikatsiooni. Raskused ei piirdu ainult sellega, et jõu suund erineb laengut ja magnetipoolust ühendava sirge sihist, vaid peale selle oleneb jõu tugevus ka laengu liikumise kiirusest. Kogu mehhanistlik vaade tugines usule, et kõiki nähtusi saab seletada ainult kaugusest, mitte aga kiirusest olenevate jõudude abil. Pole kahtlust, et Rowlandi katse tulemus õnestab seda usku. Me võiksime muidugi ka edaspidi jääda konservatiivseteks ja otsida lahendust vanade ideede alusel.

Seda liiki raskused, äkilised ja ootamatud teooria triumfaalses arenemises, tekivad teaduses sageli. Mõnikord näib heaks väljapääsuks, vähemalt ajutiseks, olevat vanade ideede lihtne üldistamine. Näiteks antud juhul näib piisavat eespool toodud seisukoha laiendamisest ja üldisemate jõudude sissetoomisest, mis valitseksid elementaarsete osakeste vahel. Tihti pole vana teooria parandamine siiski võimalik ja raskused viivad vana teooria langusele ning uue tõusule. See ei olnud ainult väikese magnetnõelakese käitumine, mis purustas näivalt hästi põhjendatud ja viljakad mehhanistlikud teooriad. Teine, veelgi vapustavam löök tuli hoopis uuest suunast. Kuid see on juba uus lugu ja me jutustame temast hiljem.

## Valguse kiirus

Galilei «Vestlustes kahest uuest teadusest» leiame õpetaja ja õpilaste vahelise jutuajamise valguse kiiruse üle:

*Sagredo:* Kuid mis liiki ja kui suurena peame käsitama seda valguse kiirust? On see silmapilkne ehk momentaanne või nõuab ta aega nagu teisedki liikumised? Kas saame seda küsimust lahendada eksperimendi abil?

*Simplicio:* Igapäevane kogemus näitab, et valguse levimine on

silmapilkne, sest kui me suurest kaugusest vaatame suurtükiväe tulistamist, siis tuleb leegi välgatus meie silmadeni ilma ajakuluta, kuna hääl jõuab meie kõrvu alles tüki aja pärast.

*Sagredo:* Oige, Simplicio, kuid ma saan sellest hästituntud kogemusest järeldada ainult seda, et hääl, levides meie kõrvadeni, liigub aeglasemalt kui valgus; see ei anna meile andmeid, kas valgus levib silmapilkselt või, kuigi ta liigub väga kiiresti, nõuab ikkagi aega...

*Salviati:* Nende ja teiste taoliste vaatluste vähene veenvus sundis mind kord välja mõtlema meetodit, millega saaks täpselt kindlaks teha, kas valgustus, s. o. valguse levimine on tõepoolest silmapilkne...

Salviati jätkab oma eksperimendi meetodi seletamist. Tema idee mõistmiseks oletame, et valguse kiirus on mitte üksnes lõplik, vaid ka väike, et valguse liikumine on aeglustunud samuti, nagu aeglustuvad liikumised aeglaselt jooksvas filmis. Kaks inimest, *A* ja *B*, on katnud laternad ja seisavad, ütleme, ühe miili<sup>1</sup> kaugusel teineteisest. Esimene neist, *A*, avab oma laterna. Mõlemad on eelnevalt kokku leppinud, et *B* avab oma laterna sel hetkel, kui ta näeb *A* juurest tulnud valgust. Oletame, et meie «aeglases filmis» läbib valgus ühe miili sekundi jooksul. *A* saadab välja signaali, avades oma laterna. *B* näeb seda ühe sekundi pärast ja saadab vastussignaali. Selle võtab *A* vastu kaks sekundit pärast seda, kui ta oma signaali välja saatis. Järelikult saame öelda, et juhul, kui valgus liigub kiirusega üks miil sekundis ja *B* on ühe miili kaugusel, peab signaali saatmise ja vastuvõtmise vahel mööduma kaks sekundit. Überpöörduvalt, kui *A* ei tea valguse kiirust, aga märkab *B* laterna avamist kaks sekundit pärast seda, kui ta avas oma laterna, ja oletab, et tema kaaslane toomis kokkuleppe kohaselt, võib ta järeldada, et valguse kiirus on üks miil sekundis.

Galilei ajal olemasoleva katsetehnikaga oli vähe väljavaateid valguse kiiruse määramiseks kirjeldatud viisil. Kui kaugus oleks üks miil, oleks Galilei pidanud määrama ajavahemikke suurusjärgus üks sajatuhandik sekundit.

Galilei formuleeris valguse kiiruse määramise probleemi, kuid ta ei lahendanud seda. Probleemi püstitamine on sageli olulisem kui sellé lahendamine, sest viimane võib taanduda ainult matemaatilise või eksperimentaalse

<sup>1</sup> Siin ja edaspidi on mõeldud inglise miili, mis on 1609 meetrit. — Tõlk.

vilumuse küsimuseks. Püstitada uusi küsimusi, leida uusi võimalusi, vaadata vanadele probleemidele uuest vaatekohast — see nõuab loovat kujutlusvõimet ja tähistab tõelist edu teaduses. Inertsiprintsiip ja energia jäävuse seadus avastati ainult tänu uutele ning originaalsetele mõtetele hästituntud eksperimentide ja nähtuste kohta. Mõned seda liiki näited võib leida käesoleva raamatu järgmistel lehekülgedel, kus kirjeldatakse uusi teooriaid ja rõhutatakse seda, kui oluline on tuntud faktide käsitlemine uues valguses.

Pöördudes tagasi suhteliselt lihtsa küsimuse juurde valguse kiiruse määramisest, tuleb märkida: on üllatav, miks Galilei ei taibanud, et tema katse võib teostada palju lihtsamini ja täpsemalt üksainuke inimene. Selle asemel et panna teatud kaugusele seisma oma kaaslast, oleks ta võinud asetada sinna peegli, mis signaali otsekohe pärast selle saabumist automaatselt tagasi saadab.

Ligi kakssada viiskümmend aastat hiljem kasutas Fizeau just niisugust põhimõtet; tema oli esimene, kes määras valguse kiiruse maapealsetest katsetest. Astronoomiliste vaatluste abil oli Rømer selle palju varem määranud, kuigi väiksema täpsusega.

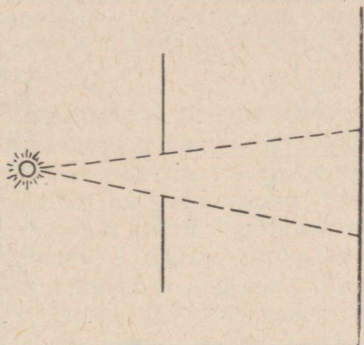
On täiesti selge, et erakordse suuruse tõttu saab valguse kiirust mõõta ainult niisuguste distantside korral, mis on võrreldavad Maa kaugusega teistest päikesesüsteemi planeetidest, või siis ülipeene katsetehnika rakendamisel. Esimest nendest meetoditest kasutas Rømer, teist Fizeau. Esimestest eksperimentidest alates on valguse kiirust, seda väga tähtsat suurust, mõõdetud palju kordi üha kasvava täpsusega. Meie sajandil töötas selleks erakordselt peene katsetehnika välja Michelson. Tema katsete tulemuse võib avaldada lihtsalt: valguse kiirus *vaakuumis* on ligikaudu 186 000 miili ehk 300 000 kilomeetrit sekundis.

### Valgus kui substants

Lähtume jälle paarist eksperimentaalsest faktist. Eeltoodud arv käib valguse kohta vaakuumis. Niisuguse kiirusega liigub valgus tühjas ruumis, kui miski teda ei sega. Me võime vaadata läbi tühja klaasnõu ka siis, kui õhk sellest on kõrvaldatud. Me näeme planeete, tähti, udukogusid, kuigi nende valgus meie silmadeni levides

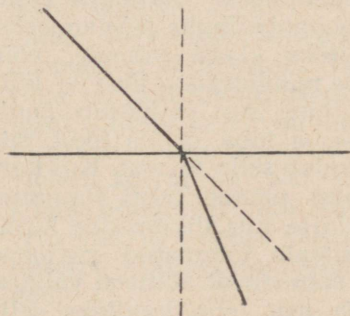
vahepeal läbib tühja ruumi. See lihtne fakt, et me võime näha läbi klaasnõu, ükskõik kas seal sees õhku on või mitte, näitab meile õhu väga väikest osa selle juures. Seejärest võime teha optikakatseid harilikus toas sama edukalt nagu sel juhul, kui toas puuduks õhk.

Üks kõige lihtsamatest optika faktidest ütleb, et valgus levib sirgjooneliselt. Kirjeldame lihtsat katset, mis seda näitab. Punktikujulise valgusallika ette on asetatud avausega varustatud ekraan. Punktikujuliseks allikaks nime-tame väga väikest valgusallikat, näiteks väikest auku laternat varjavas kattes. Kaugemal seinal saame siis ekraanis oleva avause heleda kujutise tumedal tagapõhjal. Joonisel 33 on näha, kuidas see nähtus on seotud valguse sirgjoonelise levimisega. Kõiki taolisi nähtusi, isegi keerukamaid juhte, kus näeme valgust, varju ja poolvarju, saab seletada oletusel, et valgus levib nii vaakuumis kui ka õhus sirgjooneliselt.



Joon. 33.

Võtame teiseks näiteks juhu, kus valgus läheb läbi aine. Olgu meil valguskiir, mis langeb vaakuumist klaasplaadi-

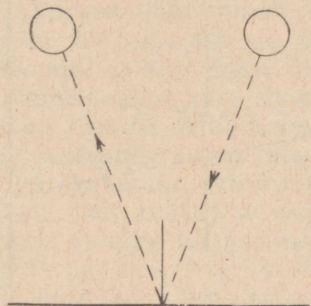


Joon. 34.

le. Mis juhtub? Kui sirgjoonelise liikumise seadus kehtiks ka sel juhul, liiguks valgus nii, nagu näitab punktiirjoon joonisel 34. Tegelikult see nii ei ole. Valguskiir murdub oma teel, nagu on kujutatud joonisel. Nähtust, millega me siin kokku puutume, tuntakse *refraktsiooni* nime all. Hästituntud katse, kus poolest saadik vette pistetud kepp näib keskelt murdunud olevat, on üheks paljudest näidetest refraktsiooni kohta.

Nendest faktidest piisab valguse lihtsa mehhanistliku teooria arendamiseks. Meie sihiks on siin näidata, kuidas substantside, osakeste ja jõudude mõisted tungivad optika valdkonda ja kuidas puruneb lõpuks vana filosoofiline vaade.

Teooria pakub siin ennast oma kõige lihtsamas ja primitiivsemas kujus. Oletame, et kõik helenduvad kehad saadavad välja valguseosakesi või *korpuskleid*, mis meie silma langedes tekitavad valguseaistingu. Me oleme juba nii harjunud uute substantside sissetoomisega, kui see on



Joon. 35.

vajalik mehhanistlikuks seletamiseks, et võime seda veelkord pikemalt kõhklemata teha. Need korpusklid peavad tühjas ruumis liikuma sirgjooneliselt ja antud kiirusega, tuues meie silmadele andmeid valgust kiirgavate kehade kohta. Kõik nähtused, kus ilmneb valguse sirgjooneline levimine, kinnitavad korpuskulaarset teooriat, sest just niisugune liikumine on korpuskulatele ette nähtud. Teooria seletab väga lihtsalt ka valguse peegeldumist peeglitelt, mis on sama liiki peegeldumine, nagu näeme mehaanikakatses elastsete pallide põrkamisel vastu seinat (joonis 35).

Murdumise seletamine on mõnevõrra raskem. Ilma et me tarvitseksime süveneda detailidesse, märkame siiski võimalust ka selle nähtuse mehhanistlikuks seletamiseks. Kui korpusklid langevad näiteks klaasi pinnale, võib aineosakeste poolt mõjuda neile mingisugune jõud — küllaltki kummalise iseloomuga jõud, sest ta mõjub ainult aine vahetus läheduses. Me teame juba, et iga jõud, mis mõjub liikuvale osakesele, muudab selle kiirust. Kui korpusklile mõjuv jõud on klaasi pinnaga risti suunatud tõmbejõud, siis asetseb valguskiire uus liikumistee kusa-

gil esialgse tee ja klaasi pinnale tõmmatud ristjoone vahel. See lihtne seletus näib ennustavat eduteed valguse korpuskulaarsele teooriale. Et aga teha kindlaks selle teooria kasulikkuse ja usaldatavuse astet, peame uurima uusi ja keerukamaid nähtusi.

## Värvuse mõistatus

See oli jällegi Newtoni geenius, kes esimesena seletas ära värvide külluse looduses. Toome siin kirjelduse ühest Newtoni eksperimendist tema oma sõnadega:

Aastal 1666 (sel ajal lihvisin ma optilisi klaase, mis oma kujult erinesid sfäärilistest klaasidest) hankisin endale kolmnurkse klaasprisma, et proovida tema abil tuntud värvinähtust. Pimendanud selleks oma toa ja teinud vajaliku hulga päikesevalguse saamiseks aknaeesriidesse väikese augu, asetasin ma oma prisma valguse sissetulemise kohale, nii et valgus võis murduda vastasolevale seinale. Oli väga meeldiv näha elavaid ja eredaid värve, mis seeläbi tekkisid.

Päikesevalgus on «valge». Läbinud aga prisma, ilmuvad temas kõik nähtavas maailmas esinevad värvused. Looduse tekitab sama nähtuse vikerkaarvärvide kauni gamma näol. Püüded seletada seda nähtust on väga vanad. Piibli legend, nagu oleks vikerkaar jumala märk lepingust inimesega, on ka omamoodi «teooria». Kuid see «teooria» ei anna rahuldavat seletust, miks vikerkaar aeg-ajalt uuesti ilmub ja miks iga kord koos vihmaga. Newton oma kuulsas töös ründas esmakordselt kogu värvide mõistatust teaduslikust seisukohast ja visandas ka lahenduse.

Vikerkaare üks äär on alati punane, teine violetne. Nende vahel asetsevad kõik teised värvused. Newtoni järgi on selle nähtuse seletus niisugune: iga värvus sisaldub juba valges valguses. Kõikvõimalikku värvi kiired läbivad planeetidevahelise ruumi ja atmosfääri ning annavad üheskoos valge valguse efekti. Valge valgus on niioelda segu mitut liiki korpusklitest, mis vastavad erinevatele värvustele. Newtoni katses eraldab prisma need korpusklid ruumiliselt. Vastavalt mehhanistlikule teooriale on murdumine tingitud valguseosakestele mõjuvast jõust, mille kutsuvad esile klaasiosakesed. Need jõud mõjuvad erinevate värvuste korpusklitele erinevalt, violeti korral on nad kõige tugevamad, punase korral kõige nõrgemad. Iga värvuse korpusklite tee murdub erinevalt ja valguse väljumisel prismast eraldub seetõttu teistest. Vikerkaare puhul mängivad prisma osa veetilgad.

Valguse substantsiaalne teooria on muutunud endisest komplitseeritumaks. Meil pole tegemist enam ühe, vaid juba paljude valguse substantsidega, igaüks neist vastab

eri värvusele. Kui selles teorias on aga terakegi tõtt, peavad tema järeldused olema kooskõlas vaatlustega.

Värvuste seeriat valges päikesevalguses, mis tuli ilmsiks Newtoni katses, nimetatakse päikese *spektri*ks või, täpsemini öeldes, tema *nähtavaks spektri*ks. Valge valguse lagunemist komponentideks, nii nagu siin on kirjeldatud, nimetatakse valguse *dispersiooniks*. Kui toodud seletus ei ole vale, siis peaks võimalik olema eraldatud spektrivärvusi teise, sobivalt kohandatud prisma abil jälle segada. See protsess oleks eelmisele just vastupidine. Me peaksime varem lahutatud värvilistest kiirtest saama jälle valge valguse. Newton näitas katseliselt, et sel lihtsal viisil on tõepoolest võimalik saada valget valgust tema spektrist ja spektrit valgest valgusest niimitu korda järjest, kui ainult soovitakse. Need katsed rajasid tugeva aluse teooriale, mille kohaselt igale värvusele vastavad korpusklid käituvad muutumatu substantsina. Newton kirjutas:

... need värvused pole uuesti tekkinud, ainult eraldamise teel nähtavaks tehtud, sest kui nad on jälle kokku viidud ja täielikult segatud, annavad nad sama värvi valguse, kui oli enne eraldamist. Samal põhjusel ei ole reaalsed igasugused muutused, mis tekivad erinevate värvuste kokkujuhtimisel, sest kui erinevad kiired uuesti lahutada, saame täpselt samad värvused, mis olid enne segamist. Kui teie vaatate hästi segatud sinist ja kollast pulbrit, näete palja silmaga rohelist, ja ometi pole segu osakeste värvused tegelikult muutunud, vaid need ainult segunesid. Sest vaadates hea mikroskoobiga, on endiselt näha siniseid ja kollaseid osakesi läbisegamini.

Oletame, et eraldasime väga kitsa riba spektrist. See tähendab, et ainult ühel spektrivärvusel paljude hulgast lubasime pilust läbi minna, kuna teised värvused pidas ekraan kinni. Kiir, mis tuli läbi pilu, koosneb homogeenselt valgusest, s. o. valgusest, mida enam edasi komponentideks lagundada ei saa. Seda teooria järeldust saab eksperimendi abil lihtsalt kinnitada. Niisugust ühevärvilist kiirt pole mitte mingil viisil võimalik edasi lahutada. On olemas lihtsaid meetodeid homogeense valguse allikate loomiseks. Näiteks hõõguv naatrium kiirgab homogeenset kollast valgust. Väga sageli on otstarbekohane teostada teatud optikakatseid homogeense valgusega, sest hästimõistetavail põhjusil on tulemused sel juhul palju lihtsamad.

Kujutleme, et äkki juhtub väga veider asi: meie päike

hakkab kiirgama ainult ühe kindla värvusega homogeenset valgust, näiteks kollast. Otsekohe kaoks siis värvide üleküllus maa peal. Iga ese oleks kas kollane või must, sest teised värvid sel juhul tekkida ei saaks. Niisugune on valguse substantsiaalse teooria järeldus, mille tõepärasust võib eksperimendi abil kinnitada: toas, kus ainsaks valgusallikaks on hõõguv naatrium, paistab iga ese kas kollasena või mustana. Värvideküllus maailmas peegeldab valget valgust moodustavate värvuste mitmekesisust.

Kõigil neil juhtudel näib valguse substantsiaalne teooria hiilgavalt toime tulevat, kuigi vajadus kasutada sama palju substantse, kui on värvi, võib meid mõnevõrra rahutuks muuta. Oletus, et kõigil valgusekorpusklitel on tühjas ruumis täpselt ühesugune kiirus, näib samuti väga kunstlik olevat.

Võib kujutleda, et mõni teine oletuste süsteem, täiesti teistlaadi teooria, tuleks sama hästi toime ja seletaks sama edukalt kõike vajalikku. Tõepoolest, varsti näeme teise teooria tekkimist, mis tugineb hoopis erinevatele mõistetele, kuid annab seletuse sellelesamale optikanähtuste valdkonnale. Enne selle uue teooria alusmõistete formuleerimist peame siiski vastama küsimusele, mis pole kuidagi seotud nende optika probleemidega. Me peame pöörduma tagasi mehhaanika juurde ja küsima:

### Mis on laine?

Londonis tekkinud kuulujutt jõuab väga kiiresti Edinburghi, kuigi ükski nendest inimestest, kes võtavad osa tema levitamisest, ei sõida ühest linnast teise. Siin on kaks täiesti erinevat liikumist, üks on kuulujutu liikumine Londonist Edinburghi, teine — kuulujuttu levivate inimeste liikumine. Üle viljapõllu veerev tuulehoog tekitab laine, mis levib põllu ühest äärest teise. Siin peame jällegi vahet tegema laine liikumise ja üksikute kõrte liikumise vahel; viimane seisneb ainult kerges hõljumises. Me kõik oleme näinud laineid, mis levivad üha laienevate ringide kujul tiiki visatud kivi ümber. Laine liikumine erineb täiesti veosakeste liikumisest. Veosakesed liiguvad ainult üles-alla. Laine kulgev liikumine on aine oleku, mitte aine enda liikumine. Lainel ujuv kork

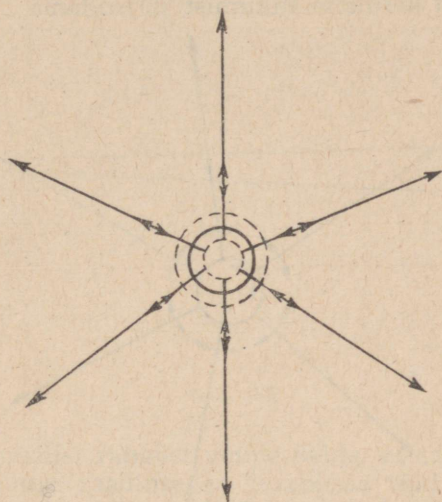
näitab seda selgesti, sest jäljendades vee tõelist liikumist, liigub ta üles ja alla, selle asemel et laine levimise suunas edasi kanduda.

Et paremini mõista laine mehhanismi, vaatleme jälle idealiseeritud katset. Oletame, et suur ruum on ühtlaselt täidetud vee, õhu või mõne teise «keskkonnaga». Kusagil ruumi keskel asetseb kerake. Katse alguses mingisugust liikumist ei ole. Äkki hakkab kerake rütmiliselt «hinggama», tema ruumala suureneb ja väheneb, kusjuures kerake jääb kogu aeg kerakujuliseks. Mis toimub keskkonnas? Alustame vaatlust sel momendil, kui kerake hakkab paisuma. Kerakese vahetus läheduses olevad keskkonnaosakesed tõugatakse eemale, nii et tekib ülemäärase tihedusega vee- või õhukiht, vastavalt sellele, mis suguse ainega on ruum täidetud. Kerakese kokkutõmbumisel seevastu kerakest vahetult ümbritseva keskkonna tihedus kahaneb. Need tiheduse muutused levivad läbi kogu keskkonna. Keskkonnaosakesed on seejuures ainult väikeses võnkliikumises, kuna liikumine tervikuna seisab laine kulgemises. Oluliselt uus on siin see, et esimest korda vaatleme millegi liikumist, mis pole aine, vaid aines leviv energia.

Pulseeriva kera näite abil võime sisse tuua kaks üldist füüsikalist mõistet, mis on olulised lainete iseloomustamiseks. Esimene neist on kiirus, millega laine levib. See oleneb keskkonnast, näiteks vees ja õhus on ta erinev. Teiseks mõisteks on *lainepikkus*. Mere- või jõelainete pikkust mõõdetakse laine põhja kaugusega järgmisest põhjast või laine harja kaugusega järgmisest harjast. Merelainetel on lainepikkus seega suurem kui jõelainetel. Kerakese pulseerimisel tekkinud lainete lainepikkuseks on kaugus mingil kindlal ajamomendil kahe maksimaalse või minimaalse tihedusega kihi vahel. On selge, et see kaugus ei sõltu ainult keskkonnast. Kindlasti mängib siin suurt osa kerakese pulseerimise kiirus: laine muutub lühemaks, kui pulseerimine kiireneb, ja pikemaks, kui pulseerimine aeglustub.

Laine mõiste on osutunud väga vajalikuks mõisteks füüsikas. See on ilmselt mehhaaniline mõiste, sest nähtus taandatakse siin osakeste liikumisele, mis vastavalt kineetilisele teooriale on aine koostisosadeks. Seega iga teooriat, kus kasutatakse laine mõistet, võib üldiselt vaadata kui mehhanistlikku teooriat. Näiteks akustiliste nähtuste

seletus tugineb oma olulises osas sellele mõistele. Võnkuvad kehad, nagu häälepaelad või viiulikeeled, on allikaks häälelainetele, mis levivad läbi õhu selsamal viisil nagu lained pulseeriva kera näites. Laine mõiste lubab kõiki akustikanähtusi taandada mehhaanikale.



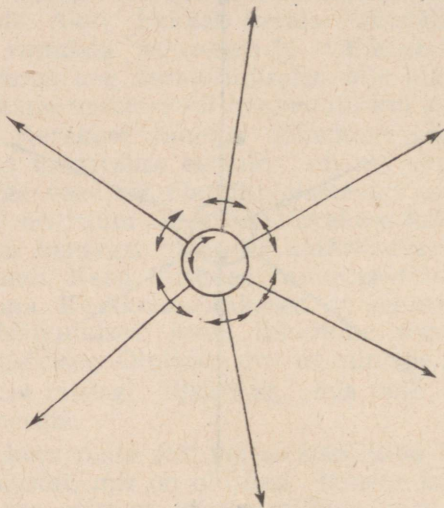
Joon. 36.

Me rõhutasime juba, et osakeste liikumist tuleb eristada laine enda liikumisest, mis on keskkonna olek. Need liikumised on täiesti erinevad, kuid meie pulseeriva kera näites toimuvad nad ilmselt ühe ja sama sirge suunas. Keskkonnaosakesed võnguvad radiaalsirge lühikesel lõigul ja vastavalt sellele liikumisele suureneb ning väheneb perioodiliselt keskkonna tihedus. Laine levimise suund ühtib võnkumiste suunaga. Seda liiki laineid nimetatakse *longitudinaalseteks* laineteks. On see aga ainuvõimalik laineliik? Edaspidise jaoks on meil oluline teada, et võivad esineda ka teist liiki lained, mida nimetatakse *transversaalseteks*<sup>1</sup> laineteks.

Muudame oma eelmist näidet. Olgu meil jälle kerake,

<sup>1</sup> Longitudinaalseid laineid nimetatakse ka pikilaineteks, transversaalseid laineid — ristlaineteks. — *Tõlk.*

mis on õhu või vee asemel pandud mingisse teist liiki keskkonda, näiteks tarretisse. Oletame nüüd, et kerake ei pulseeri, vaid pöördub väikese nurga võrra ühes suunas ja siis jälle vastupidises suunas, kogu aeg ühesuguses rütmis ning ühe ja sama telje ümber. Tarretis kleepub kerakese külge ja seega on külgejäänud tarretiseosakesed sunnitud kerakese liikumist jäljendama. Need osake-



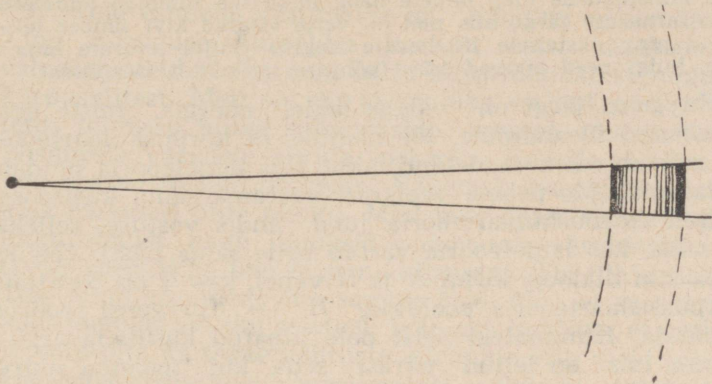
Joon. 37.

sed omakorda sunnivad liikuma veidi kaugemal olevaid tarretiseosakesi jne. Nii tekib keskkonnas laine. Kui me tuletame meelde keskkonna liikumise ja laine liikumise erinevust, näeme, et antud juhul ei toimu need liikumised ühes suunas. Laine levib kerakese raadiuse suunas, kuna keskkonnaosakesed liiguvad risti selle suunaga. Me oleme tekitanud seega transversaalse laine.

Veepinnal levivad lained on transversaalsed lained. Ujuv kork hüpleb ainult üles ja alla, kuna lained kulgevad horisontaaltasapinnas. Häälelained seevastu annavad meile kõige harilikuma näite longitudinaalsetest lainetest.

Veel üks märkus: laine, mis tekib homogeenises keskkonnas pulseeriva või võnkuva kerakese mõjul, on *sfääriline* laine. Niisugust nimetust kannab ta sellepärast, et

igal ajamomendil käituvad kõik lainete allika ümber kujutatud kerade punktid ühtemoodi. Vaatleme niisuguse kerapinna tükki suurel kaugusel allikast (joonis 38). Mida kaugemal allikast ning mida väiksem see kerapinna tükike on valitud, seda rohkem sarnaneb ta tasapinnale.



Joon. 38.

Taotlemata erilist rangust võime öelda, et tasapinna tüki ja küllalt suure raadiusega kerapinna tüki vahel pole olulist erinevust. Allikast küllalt kaugele jõudnud sfäärilise laine väikesest osast räägime tihti kui *tasapinnalisest lainest*. Mida kaugemal kera keskpunktist me viirutatud piirkonna eelmisel joonisel võtame ja mida väiksem on nurk kahe raadiuse vahel, seda paremini kujutab see piirkond tasapinnalist lainet. Nagu paljud teisedki füüsikalised mõisted, nii pole ka tasapinnaline laine midagi muud kui fiktsioon, mida saab realiseerida ainult teatud täpsusega. Sellele vaatamata on ta kasulik mõiste, mida meil hiljem tarvis läheb.

### Valguse laineteooria

Tuletame meelde, miks me katkestasime optikanähtuste käsitlemise. Meie eesmärgiks oli teise valguseteooria sissetoomine, mis erineks küll korpuskulaarteooriast, kuid püüaks seletada sama faktide valdkonda kui viimanegi. Et seda teha, pidime katkestama oma jutustuse ja vaatama laine mõistet. Nüüd võime meie probleemi juurde tagasi pöörduda.

See oli Huygens, Newtoni kaasaegne, kes esitas täiesti uue valguseteooria. Oma traktaadis valgusest ta kirjutas:

Kui valgus peale selle nõuab läbiminemiseks ka aega, mida me just kontrollida tahame, siis järgneb siit, et see materia liikumine on järkjärguline ja levib järelikult nagu hääli kerakujuliste lainepindade ning lainete näol, mida ma nimetan laineteks selle sarnasuse järgi, mis neil on vette visatud kivi ümber tekkinud ning üksteisele järgnevate ringide kujul levivate lainetega, kuigi need tekivad teisel põhjusel ja ainult tasapinnal.

Huygensi järgi on valgus laine, energia, mitte aga substantsi üleandmine. Me nägime, et korpuskulaarteooria seletab palju vaadeldud fakte. Kas laineteooria suudab sedasama? Me peame veelkord vaatama samu küsimusi, millele korpuskulaarteooria juba andis vastuse, selleks et näha, kas laineteooria vastab neile sama hästi. Teeme seda siin dialoogi kujul  $N$  ja  $H$  vahel, kus  $N$  on Newtoni korpuskulaarteooria pooldaja,  $H$  — Huygensi teooria pooldaja. Kummalegi neist pole lubatud kasutada argumente, mis on leitud pärast seda, kui mõlema suure meistri töö oli juba lõppenud.

$N$ . Korpuskulaarteoorias on valguse kiirusel täpne mõte. See on kiirus, millega liiguvad korpusklid tühjas ruumis. Mida tähendab valguse kiirus laineteoorias?

$H$ . See tähendab muidugi valguslaine liikumise kiirust. Igaüks teab, et laine liigub teatud kindla kiirusega, nii peab see olema ka valguslaine korral.

$N$ . Asi ei ole nii lihtne, kui näib. Häälelained levivad õhus, ookeanilained vees. Igal lainel peab olema materiaalne keskkond, milles ta liigub. Kuid valgus läheb läbi vaakuumi, mida hääli näiteks ei tee. Oletus, et tühjas ruumis on laine, tähendab tegelikult seda, et ei oletata mitte mingisugust lainet.

$H$ . Jah, see on raskus, kuigi minu jaoks mitte sugugi uus. Minu õpetaja mõtles väga hoolikalt selle probleemi üle ja jõudis otsusele, et ainukeseks väljapääsuks on oletus hüpotetilisest substantsist, *eetrist*, mis täidab kogu universumi ja kannab edasi laineid. Võiks öelda, et universum on eetrisse uputatud. Kui meil on julgust sisse tuua seda mõistet, siis saab kõik ülejäänud selgeks ja usutavaks.

$N$ . Kuid ma pole niisuguse oletusega nõus. Kõigepealt toob see sisse uue hüpotetilise substantsi, meil on aga füüsikas substantse juba niigi liiga palju. On veel teine

vastuväide. Ta ei kahtle ometi selles, et me peame kõiki asju seletama mehhaanika abil. Mida öelda aga eetri kohta? Kas Te saate vastata lihtsatele küsimustele: kuidas moodustub eeter oma vähimatest koostisosakestest ja kuidas ilmnevad need osakesed teistes nähtustes?

H. Teie esimene vastuväide on muidugi põhjendatud. Kuid niisuguse kunstliku kaalutu eetri sissetoomine vabastab meid ühekorraga palju kunstlikumatest valgusekorpusklitest. Meil on siis ainult üks «salapärane» substants lõpmatu hulga substantside asemel, mis vastavad ülisuurele värvuste arvule spektris. Kas Te ei arva, et just see on tõeline progress? Vähemalt kontsentreeruvad kõik raskused ühte punkti. Meil pole enam tarvis kunstlikku oletust, nagu liiguksid erinevatele värvustele vastavad korpuskliid ühe ja sama kiirusega läbi tühja ruumi. Teie teine argument on samuti õige. Me ei saa eetrile anda mehhanistlikku seletust, pole aga kahtlust, et optika ja võib-olla ka teiste nähtuste uurimine viib meid tulevikus eetri struktuuri avastamisele. Praegu tuleb meil oodata uusi eksperimente ja järeldusi, kuid ma loodan, et lõpuks me oleme suutelised ka eetri mehhaanilist struktuuri välja selgitama.

N. Jätame selle küsimuse praegu kõrvale, sest me ei saa seda lahendada. Ma tahaksin aga näha, kuidas seletab Teie teooria, isegi sel juhul, kui jätame kõrvale kõik raskused, neid nähtusi, mis on korpuskulaarteoorias nii selged ning arusaadavad. Võtame näiteks fakti, et valguskiired liiguvad vaakuumis või õhus sirgjooneliselt. Küünla ette asetatud paberitükk heidab seinale täpse, teravate piirjoontega varju. Kui valguse laineteooria oleks õige, poleks teravad varjud võimalikud, sest lained painduksid paberi äärte taha ja muudaksid varjud ähmaseks. Väike laev ei ole merelainetele takistuseks, sest nagu Te teate, lained lihtsalt painduvad ümber laeva, ilma et tekiks mingisugust varju.

H. See pole veenev argument. Võtke lühikesed lained jõel, mis pörkavad vastu suure laeva külge. Laeva ühel küljel tekkinud laineid pole teisel küljel märgata. Kui lained on piisavalt väikesed ja laev küllalt suur, ilmneb väga selge vari. On ülimalt tõenäoline, et valgus näib levivat sirgjooneliselt ainult selletõttu, et tema laine-pikkus on väga väike, võrreldes harilike tõkete suurusga ja eksperimentides kasutatavate avadega. Võiks

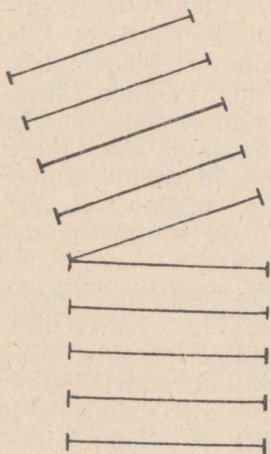
arvata, et juhul, kui saaksime teha küllalt väikese tõkke, mingisugust varju ei tekiks. Me võime kokku puutuda suurte eksperimentaalsete raskustega, kui tahaksime konstrueerida aparati, mis näitaks meile, kas valgus saab painduda. Kui niisugune katse aga sellele vaatamata teostataks, kujuneks see otsustavaks valguse laineteooria ja korpuskulaarteooria vahelises vaidluses.

N. Laineteooria võib tulevikus viia uutele faktidele, kuid praegu me ei tea mingisuguseid eksperimentaalseid andmeid, mis teda veenvalt kinnitaksid. Kuni katse pole kindlalt näidanud, et valgus võib painduda, ei näe ma mingisugust põhjust kahelda korpuskulaarteoorias, mis tundub mulle olevat lihtsam ja seetõttu ka parem kui laineteooria.

Siinkohal võime dialoogi katkestada, kuigi teema pole kaugeltki veel ammendatud.

Nüüd jääb veel näidata, kuidas seletab laineteooria valguse murdumist ja värvuste mitmekesisust. Korpuskulaarteooria, nagu teame, saab sellega hästi hakkama. Alustame murdumisega, kusjuures otstarbekuse huvides peatume kõigepealt näite juures, millel pole optikaga midagi tegemist.

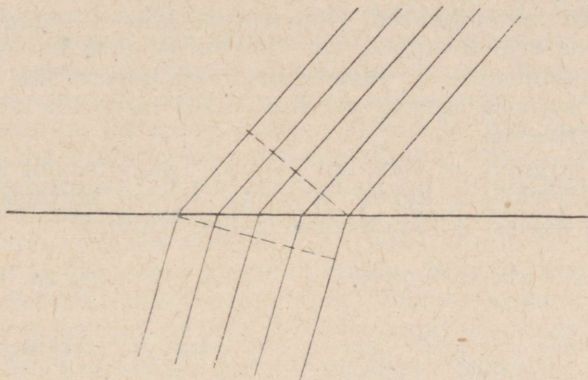
Suures vabas ruumis kõndigu kaks inimest, kes hoiavad enda vahel jäika varrast. Algul liikugu mõlemad ühesuguse kiirusega otse edasi. Niikaua kuni mõlema inimese kiirus on ühesugune, olgu see siis suur või väike, liigub varras nii edasi, et ta jääb kogu aeg oma esialgse asendiga paralleelseks, s. o. varras ei pöördu ega muuda oma orientatsiooni. Varda järjekordsed asendid on omavahel paralleelsed. Kujutleme aga nüüd, et lühikese aja, kas või sekundi murdosa jooksul, ei ole mõlema inimese liikumine ühesugune. Mis juhtub? On ilmne, et selle hetke jooksul varras pöördub, ta ei jää enam paralleelseks oma esialgse asendiga. Kui kiirused jälle võrdsesks muutuvad, toimub liikumine juba teises suunas kui enne. Jooni-



Joon. 39.

selt 39 on see selgesti näha. Suuna muutumine toimub selle aja jooksul, kui kahe kõndija kiirused ei ole võrdsed.

See näide võimaldab meil mõista laine murdumist. Läbi eetri liikuv tasapinnaline laine põrkab vastu klaasplaati. Joonisel 40 näeme lainet, mis liigub edasi võrdlemisi laia frondina. Lainefront on tasapind, millel olevad



Joon. 40.

eetri osakesed käituvad mis tahes kindlal ajamomendil alati täpselt ühtemoodi. Et kiirus oleneb keskkonnast, milles valgus levib, siis on valguse kiirus klaasis erinev valguse kiirusest tühjas ruumis. Väga lühikese aja jooksul, mis kulub lainefrondil klaasi sisenemiseks, on frondi erinevatel osadel erisugune kiirus. On selge, et see osa frondist, mis on juba klaasi jõudnud, liigub niisuguse kiirusega, nagu on valgusel klaasis, kuna ülejäänud osa liigub veel sama kiiresti kui valgus eetris. Kiiruste erinevuse tõttu lainefrondi erinevates osades muutub frondi «sukeldumisel» klaasi ka laine liikumise suund.

Seega näeme, et samahästi kui korpuskulaarteooria, seletab valguse murdumist ka laineteooria. Edasised kaalutlused koos vähese matemaatika rakendamisega näitavad, et laineteooria seletus on lihtsam ja parem ning et selle teooria järeldused on vaatlustega eeskujulikus kooskõlas. Tõepoolest, kvantitatiivsed arutlusmeetodid annavad meile võimaluse arvutada valguse kiiruse murdumist põhjustavas keskkonnas, kui on teada kiire murdu-

mine keskkonda sukeldumisel. Otsesed mõõtmised kinnitavad hiilgavalt neid ennustusi ja seega ka valguse laineteooriat.

Jääb veel värvuse küsimus.

Meenutame, et lainet iseloomustab kaks arvu — tema kiirus ja lainepikkus. Väga tähtsaks oletuseks valguse laineteoorias on see, et *erisugustele värvustele vastavad erinevad lainepikkused*. Homogeense kollase valguse lainepikkus erineb punase või violetse valguse lainepikkusest. Erisugustele värvustele vastavate korpusklite kunstliku eristamise asemel on meil nüüd loomulik lainepikkuste erinevus.

Siit järgneb, et Newtoni valguse dispersiooni katseid võib kirjeldada kahes erinevas keeles, korpuskulaarteooria keeles ja laineteooria keeles. Näiteks:

Korpuskulaarteooria  
keel

Erisugustele värvustele vastavad korpusklid liiguvad vaakuumis ühesuguse kiirusega, klaasis aga erinevate kiirustega.

Valge valgus on erisugustele värvustele vastavate korpusklite segu; spektris on need korpusklid eraldatud.

Laineteooria keel

Erineva lainepikkusega kiired, mis vastavad erisugustele värvustele, liiguvad eetris ühesuguse kiirusega, klaasis aga erinevate kiirustega.

Valge valgus on kõikvõimalike lainepikkustega lainete segu; spektris on need lained eraldatud.

Niisugust kahemõttelisust, mis tuleneb kahe erineva teooria olemasolust ühe ja sellesama nähtuse kohta, näib olevat mõistlik vältida ja pärast seda, kui oleme hoolikalt kaalunud mõlema teooria puudusi ning eeliseid, tuleks langetada otsus ühe kasuks. Dialog  $N$  ja  $H$  vahel näitab, et see pole lihtne ülesanne. Selle küsimuse otsustamine oleks rohkem maitse kui teadusliku veendumuse asi. Newtoni ajal ja rohkem kui saja aasta jooksul pärast teda eelistas enamik füüsikuid korpuskulaarteooriat.

Ajalugu langetas oma otsuse laineteooria kasuks ja korpuskulaarteooria kahjuks alles palju hiljem, üheksateistkümnenda sajandi keskel. Vestluses  $N$  ja  $H$  vahel väitis  $N$ , et otsuse kahe teooria vaidluses võiks põhimõtteliselt leida eksperimendi abil. Korpuskulaarteooria

ei luba valguse paindumist ja nõuab seega teravate varjude olemasolu. Laineteooria järgi, teiselt poolt, pole küllalt väikestel tõketel üldse varju. Niisugune tulemus Youngi ja Fresneli katses saadigi ning tehti sellest ka vastavad teoreetilised järeldused.

Me vaatasime juba väga lihtsat katset, kus avausega varustatud ekraan asetses valguse punktallika ees ja seinale ilmus vari. Lihtsustame seda eksperimenti, oletades, et allikas kiirgab homogeenset valgust. Paremate resultaatide saamiseks olgu valgusallikas tugev. Kujutleme, et avaus ekraanis muutub ikka väiksemaks ja väiksemaks. Kui me kasutame tugevat allikat ja meil õnnestub avautest teha küllalt väikeseks, ilmneb uus üllatav nähtus, mis korpuskulaarteooria seisukohalt on täiesti mõistetamatu. Valguse ja varju vahel pole enam teravat erinevust. Valgus läheb varjuks üle järk-järgult, terve rea heledate ja tumedate ringide kaudu. Ringide ilmumine on laineteooriale väga iseloomulik. Valguse ja varju piirkondade vaheldumine muutub arusaadavaks veidi muudetud eksperimentaalse seadme korral. Oletame, et tumedasse paberilehesse on torgatud nõelaga kaks auku, kust valgus saab läbi minna. Kui augud on teineteise lähedal ja väga väikesed ning kui homogeense valguse allikas on küllalt tugev, ilmub seinale terve rida heledaid ja tumedaid ribasid, mis tumedale foonile lähenedes muutuvad üha nõrgemaks. Seletus on lihtne. Tume riba tekib seal, kus ühest august tulnud laine põhi langeb ühte teisest august tulnud laine harjaga, nii et mõlemad lained kaovad. Hele riba tekib aga neis kohtades, kus satuvad kokku mõlemast august tulevate lainete põhjad või hariad ja lained tugevdavad teineteist. Keerulisem on heledate ja tumedate ringide seletamine meie eelmises näites, kus kasutasime ühe auguga ekraani, kuid põhimõte jääb ka sel juhul samaks. Peame meeles, et kahe augu korral tekkisid varju ja valguse ribad, ühe augu korral aga varju ja valguse ringid, sest hiljem pöördume nende kahe erineva pildi analüüsimise juurde tagasi. Siin kirjeldatud katsed näitavad valguse difraktsiooni, valguse kõrvalekaldumist sirgjoonelise levimise suunast, juhul, kui valguslaine tee on paigutatud väikesed avaused või tõkkes.

Vähese matemaatika rakendamine lubab meid palju kaugemale minna. Võib leida, kui suur, täpsemini öeldes,

kui väike peaks olema valguse lainepikkus, selleks et saaks tekkida niisugune omapärane muster. Seega annab kirjeldatud eksperiment võimaluse homogeense valguse lainepikkuse mõõtmiseks. Et anda kujutlust sellest, kui väikeste arvudega siin tegemist on, toome kaks lainepikkust, mis esitavad päikese spektri äärmiste kiirte, s. o. punase ja violetse valguse lainepikkusi.

Punase valguse lainepikkus on 0,00008 cm.

Violetse valguse lainepikkus on 0,00004 cm.

Pole vaja imestada, et need arvud on nii väikesed. Teravate piirjoontega varju, see tähendab valguse sirgjoonelist levimist näeme looduses ainult seetõttu, et kõik avad ja tõkked, millega me harilikult kokku puutume, on äärmiselt suured, võrreldes valguse lainepikkusega. Ainult sel juhul, kui kasutada väga väikesi tõkkeid ja avasid, ilmutab valgus oma laineiseloomu.

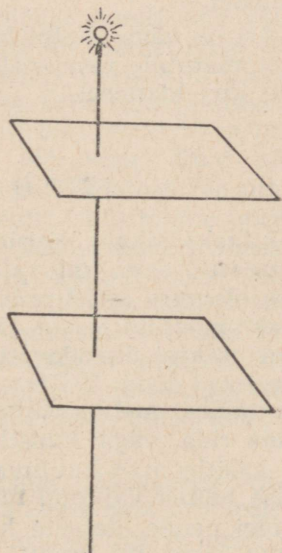
Valguseteooria otsingute lugu ei ole sellega kaugeltki veel lõppenud. Otsus, mille langetas üheksateistkümnnes sajand, ei olnud viimane ega lõplik. Kaasaegse füüsiku ees seisab jällegi korpusklite ja lainete vahel otsustamise probleem, seekord juba palju sügavamale ulatuval ja keerukamal kujul. Seni, kuni me pole mõistnud laineeteooria võidu problemaatilist iseloomu, tunnistame loodusliku valguse korpuskulaarteooria.

### **Longitudinaalsed või transversaalsed valguslained?**

Kõik optikanähtused, mida me eespool käsitlesime, räägivad laineteooria kasuks. Valguse paindumine väikeste tõkete taha ja valguse murdumise seletamine on selle teooria kõige kaalukamad argumendid. Juhindudes mehhanistlikust vaatest, on meil selge, et jääb vastata veel üks küsimus: teha kindlaks eetri mehhaanilised omadused. Selle probleemi lahendamiseks on oluline teada, kas eetris levivad valguslained on longitudinaalsed või transversaalsed. Teiste sõnadega: kas valgus levib samuti kui hääl? Kas valguslaine tekib keskkonna tiheduse muutmise tõttu, nii et osakeste võnkumised toimuvad laine levimise suunas? Või sarnaneb eeter elastsele tarretisele, keskkonnale, milles võivad tekkida ainult transversaalsed lained ja mille osakesed liiguvad risti laine enese kulgemise suunaga?

Enne selle probleemi lahendamist püüame jõuda selgusele, missugust vastust peaksime eelistama. On ilmne, et juhul kui valguslained oleksid longitudinaalsed, tuleks meil rõõmustada. Raskused mehhaanilise eetri kirjeldamisel oleksid sel juhul väiksemad. Meie eetri mudel võiks siis väga tõenäoliselt olla midagi gaasi mehhanistliku mudeli taolist, mis seletab häälelainete levimist. Palju raskem oleks luua kujutlust transversaalseid laineid edasikandvast eestrist. Kujutleda tarretisetaolist keskonda, mis koosneb sel viisil paigutatud osakekestest, et seal võiksid levida transversaalsed lained — see pole kerge ülesanne. Huygens uskus, et eeter on enim «õhutaoline» kui «tarretisetaoline». Kuid loodus hoolib meie poolt etteseatud kitsendustest väga vähe. Kas käesoleval juhul suhtus loodus heatahtlikult füüsikute püüetesse mõista kõiki asju mehhanistlikult? Et leida vastust sellele küsimusele, tuleb meil käsitleda paari uut eksperimenti.

Vaatame üksikasjaliselt ainult ühte paljudest eksperimentidest, mis võiksid anda oodatud vastuse. Oletame, et meil on väga õhuke plaat, mis lõigati välja turmaliinikristallist teatud erilisel viisil, mille täpsemaks kirjeldamiseks siin vajadust ei ole. Plaat olgu nii õhuke, et me võime läbi selle näha valgusallikat. Võtame nüüd kaks niisugust plaati ja asetame nad silma ning valgusallika vahele (joonis 41). Mida võiksime siis näha? Jälle valguspunkti, kui plaadid on ainult küllalt õhukesed. Väljavaated selleks, et eksperiment kinnitab meie ootusi, on väga head. Ilma et hakkaksime kulutama vaeva selle väljaselgitamiseks, millest need väljavaated tegelikult olenevad, oletame, et näeme valguspunkti läbi kahe kristalli. Muudame nüüd järkjärgulise pööramise teel ühe kristalli orientatsiooni. Eelmisel väitel on mõte ainult siis, kui telje asend, mille



Joon. 41.

ümber pööre teostatakse, on täpselt määratud. Võtame pöördeteljeks langeva valguskiirega määratud sirge. See tähendab, et me pöörame teise kohta kõik kristalli punktid peale nende, mis asetsevad teljel. Ilmnevad kummalised asjad! Valgus muutub ikka nõrgemaks ja nõrgemaks, kuni kaob täiesti. Kui kristalli edasi pöörata, ilmub valgus uuesti ja kristalli jõudmisel algasendisse on ka valguse intensiivsus endine.

Ilma et tarvitseks süveneda selle ja teiste taoliste katsete detailidesse, võime küsida: kas on võimalik seletada neid nähtusi juhul, kui valguslained oleksid longitudinaalsed? Longitudinaalsete lainete korral liiguksid eetriosaakesed telje suunas nagu valguskiirgi. Kristalli pööramisel olukord teljel ei muutu, sest telje punktid jäävad liikumatuks, kuna telje lähedal olevad punktid nihkuvad väga vähe. Niisugune suur muutus nagu valguse kadumine ja ilmumine ei oleks longitudinaalsete lainete korral võimalik. Seda ja paljusid teisi taolisi nähtusi saab seletada ainult oletusel, et vaiguslained on transversaalsed, mitte longitudinaalsed! Või, teiste sõnadega, meil tuleb oletada, et eetril on «tarretisetaoline» iseioom.

Asi on väga halb! Me peame olema valmis pörkama ületamatutele raskustele, mis tekivad eetri mehhanistlikul kirjeldamisel.

### Eeter ja mehhanistlik vaade

Läheks pikale käsitleda kõiki neid püüdeid, mis olid suunatud eetri kui valguse levimiskeskonna mehhaanilise olemuse mõistmisele. Nagu teame, koosneb substants mehhanistliku vaate järgi osakekestest, mille vahel mõjuvad osakesi ühendavate sirgete suunas ainult kaugusest olenevad jõud. Selleks et konstrueerida eetrit kui tarretisetaolist mehhaanilist substantsi, tuli füüsikutel püstitada rida väga kunstlikke oletusi. Käesolevas me neid ei käsitle; nad kuuluvad juba peaaegu täielikult unustuse hõlma vajunud minevikku. Kuid tähtis oli tulemus. Kõigi nende oletuste kunstlikust iseloomust, vajadusest tuua sisse nii palju üksteisest sõltumatuid hüpoteese piisas selleks, et purustada usk mehhanistlikku vaatesse.

On olemas ka teisi ja lihtsamaid vastuväiteid eetrile, kui seda on raskused tema konstrueerimisel. Kui tahame seletada optikanähtusi mehhaanika abil, tuleb oletada, et eeter esineb kõikjal. Kui valgus võib levida ainult keskkonnas, siis ei saa olla tühja ruumi.

Kuid mehhaanikast teame, et tähtedevaheline ruum ei avalda materiaalsete kehade liikumisele mingisugust vastupanu. Näiteks planeedid liiguvad läbi eetritarretise, ilma et nad kohtaksid niisugust takistust, mida materiaalne keskkond nende liikumisele peaks avaldama. Kui eeter ei sega aine liikumist, siis ei saa olla vastastikust mõju eetriosa- ja aineosa- vahel. Valgus läheb läbi eetri, samuti ka läbi klaasi ja vee, kuid kahel viimasel juhul tema kiirus muutub. Kuidas seletada seda fakti mehhanistlikust seisukohast? Ilmselt ainult oletusega, et esineb mingisugune vastastikune mõju eetriosa- ja aineosa- vahel. Kuid alles me nägime, et vabalt liikuvate kehade korral tuli oletada niisuguse mõju puudumist. Teiste sõnadega, vastastikune mõju eetri ja aineosa- vahel on olemas optikanähtustes, kuna mehhaanikanähtustes seda ei ole. Ilmselt on see väga paradoksaalne järeldus.

Kõigist neist raskustest näib olevat ainult üks väljapääs. Püüded mõista loodusnähtusi mehhanistlikust vaatekohast nõudsid kuni kahekümnenda sajandini teaduse arendamisel järjest uute kunstlike substantside sissetoomist. Niisugusteks substantsideks olid elektri- ja magnetivedelikud, valgusekorpusklid või eeter. Kuid kõige selle tulemuseks oli ainult raskuste kontsentreerumine paari olulisse punkti, näiteks eetri küsimusse optikanähtuste korral. Kõik viljatuks jäänud katsed konstrueerida lihtsat eetri mudelit, samuti mitmed teised vastuväited, näivad viitavat sellele, et viga on põhioletuses, nagu oleks võimalik kõiki loodusnähtusi seletada mehhanistlikust vaatekohast. Mehhanistliku programmi järjekindlal teostamisel polnud teadusel edu ja tänapäeval ei usu enam ükski füüsik, et see programm üldse teostatav on.

Oma lühikeses ülevaates füüsika tähtsamate ideede arenemisest pörkasime mitmele lahendamata probleemile, sattusime raskustele ja takistustele, mis võtsid meilt julguse taotleda ühtse ja järjekindla vaate formuleerimist kõigi välismaailma nähtuste jaoks. Meil oli tegemist

raske ja inertse massi võrdsusega, juhtniidiga, mis klassikalises mehhaanikas jäi märkamatuks. Me nägime elektri- ja magnetivedelike kunstlikku iseloomu. Lahendamatu raskus kerkis ka elektrivoolu ja magnetnõela vastastikuse mõju küsimuses. Meenutame, et see jõud ei mõjunud seal juheta ja magnetipoolust ühendava sirge suunas ning olenes laengu liikumise kiirusest. Seadus jõu suuna ja suuruse jaoks oli väga keeruline. Ja lõpuks oli tõsine raskus veel eetriga.

Kaasaegne füüsika ründas kõiki neid probleeme ja lahendas nad. Kuid otsingud lahenduste leidmiseks viisid uutele, sisu poolest veelgi sügavamatele probleemidele. Meie teadmised on praegu laiemad ja sügavamad, kui olid üheksateistkümnenda sajandi füüsikul, kuid samuti on laiemad ja sügavamad ka meie kahtlused.

### Teeme kokkuvõtte:

*Vanades elektrivedelike teooriates, samuti valguse korpuskulaarteoorias ja laineteoorias näeme uusi püüdeid mehhanistliku käsitusviisi rakendamiseks. Kuid elektri- ja optikanähtuste valdkonnas pörkame seejuures suurtele raskustele.*

*Liikuv laeng mõjub magnetnõelale. Kuid jõud, selle asemel et sõltuda ainult kaugusest, sõltub ka laengu liikumise kiirusest. Jõud ei ole ei tõuke- ega tõmbejõud, vaid mõjub magnetnõela ja laengut ühendava sirge ristsuunas.*

*Optikas langetasime oma otsuse laineteooria kasuks, korpuskulaarteooria vastu. Lained, mis levivad osakestest koosnevas keskkonnas, kui osakeste vahel valitsevad ainult mehhaanilised jõud, on kindlasti mehhanistlikud mõisted. Missugune on aga valguse levimiskeskond ja missugused on selle keskkonna mehhaanilised omadused? Senikaua kui on vastamata see küsimus, pole mingisugust lootust taandada optikanähtusi mehhaanikale. Kuid raskused niisuguse probleemi lahendamisel on nii suured, et sundisid meid sellest loobuma ja seega lahti ütleva ka mehhanistlikust vaatest.*

## VÄLI. RELATIIVSUS

Väli abimõistena. — Väljateooria kaks alussammast. — Väli kui reaalsus. — Väli ja eeter. — Mehhaaniline taust. — Eeter ja liikumine. — Aeg, pikkus, relatiivsus. — Relatiivsus ja mehhaanika. — Aegruumi-kontiinuum. — Üldine relatiivsus. — Liftis ja väljaspool lifti. — Geomeetria ja eksperiment. — Üldine relatiivsus ja selle kontroll. — Väli ja aine.

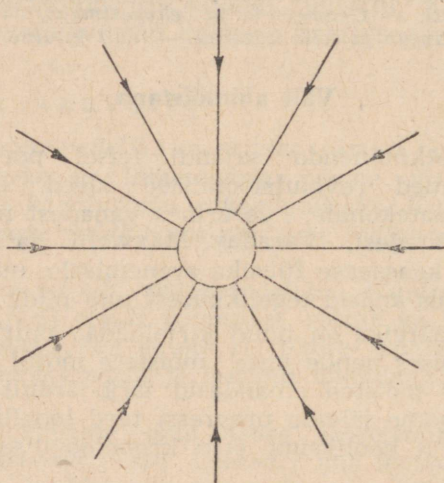
### Väli abimõistena

Üheksateistkümnenda sajandi teisel poolel tungisid füüsikasse uued revolutsioonilised ideed. Need avasid tee uuele vaatekohale, mis erines vanadest mehhanistlikest seisukohtadest. Faraday, Maxwelli ja Hertzi tööd panid aluse kaasaegse füüsika arenemisele, uute mõistete loomisele, mis andsid tegelikkusest uue pildi.

Meie eesmärgiks on nüüd kirjeldada murrangut, mis toimus teaduses nende uute mõistete mõjul ja näidata, kuidas uued mõisted omandasid järk-järgult selguse ja jõu. Me püüame jälgida progressi teed loogilises järgevuses, ilma et hooliksime eriti kronoloogilisest järjestusest.

Uued mõisted tekkisid elektrinähtuste uurimisel, kuid praegu on meil neid mehhaanika kaudu lihtsam sisse tuua. Me teame, et kaks osakest tõmbuvad teineteise poole ja et tõmbejõud nende vahel on pöördvõrdeline kauguse ruuduga. Seda tõsiasja võime esitada ka teisiti, mida me kohe teemegi, sellele vaatamata, et uue esituse eeliseid on raske mõista. Väike ringike joonisel 42 kujutagu mingit keha, näiteks Päikest, mis mõjub teistele kehadele tõmbejõuga. Joonist tuleks tegelikult ette kujutada mitte tasapinnalisena, vaid kui ruumilist mudelit. Väike ringike kujutaks siis ruumis asetsevat kera, näiteks Päikest. Keha, mida nimetame *proovikehaks* ja mis asetseb kusagil Päikese läheduses, tõmbub Päikese poole proovi-

keha ja Päikese keskpunkte ühendava sirge sihis. Sirged meie joonisel näitavad seega Päikese tõmbejõu suunda erinevates kohtades asetsevale proovikehale. Nooleke igal sirgel näitab seda, et jõud on suunatud Päikese poole, see tähendab, et tegemist on tõmbejõuga. Need sirged on *gravitatsioonivälja jõujooned*. Esialgu on see ainult nimetus, millel pikemalt peatuda pole mõtet. Meie joonisel on üks iseloomulik omadus, millest räägime hiljem. Jõujooned on konstrueeritud tühjas ruumis, kus puudub aine. Nende jõujoonte kogu või, lühemalt öeldes, *väli* näitab ainult seda, kuidas käitub proovikeha, kui ta on pandud selle kera lähedusse, mille ümber me välja konstrueerisime.



Joon. 42.

Sirged meie ruumilises mudelis on kerapinnaga alati risti. Et need sirged lähtuvad ühest punktist, siis kera läheduses on nad tihedad ja muutuvad seda hõredamaks, mida rohkem kerast eemalduda. Kui me suurendame kaugust kerast kaks või kolm korda, siis joonte tihedus meie ruumilises mudelis (mitte joonisel!) väheneb neli või vastavalt üheksa korda. Neil joonistel on seega kahe-sugune eesmärk. Nad annavad ühelt poolt Päikeseks nimetatud kera läheduses asetsevale kehale mõjuva jõu suuna, kuna teiselt poolt jõujoonte tihedus ruumis näi-

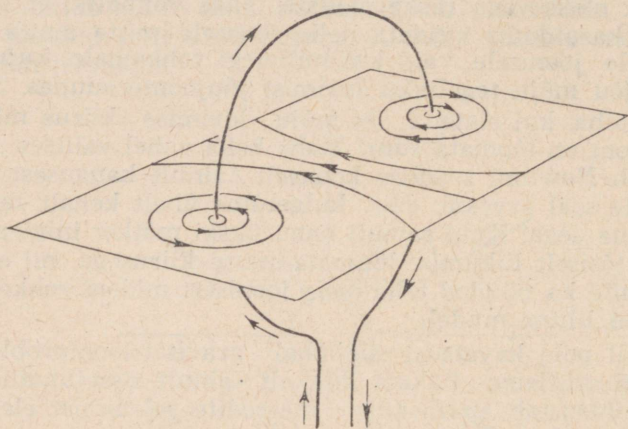
tab seda, kuidas olenevalt kaugusest muutub jõud. Õige tõlgendamise korral annab välja joonis meile gravitatsioonijõu suuna ja sõltuvuse kaugusest. Niisuguselt jooniselt võib gravitatsiooniseaduse sama hästi välja lugeda kui tema sõnalisest kirjeldusest või väljendusest täpselt ning naps matemaatilises keeles. Niisugune kujutlus väljast või *väljaesitus*, nagu me seda nimetame, võib näida küll ülevaatliku ja huvitavana, kuid pole põhjust arvata, et tema tarvituselevõtmine tähendaks mingit reaalselt edu. Kasu, mida toob see kujutlus gravitatsiooni juhul, oleks väga raske näidata. Väga võimalik, et keegi peab kasulikuks vaadata neile joontele mitte ainult kui lihtsale joonisele, vaid kui millelegi rohkemale, kujutledes jõu mõju tegelikku levimist jõujoonte suunas. Seda võib teha, kui oletada, et mõju levimise kiirus mööda jõujoont on lõpmata suur! Kahe keha vahel valitsev jõud oleneb Newtoni seaduse kohaselt ainult kaugusest; aeg ei tule seal arvesse. Jõu kulgemine ühelt kehalt teisele ei nõua aega! Kuid samuti nagu ükski mõtlej inimene ei võta tõsiselt liikumist lõpmata suure kiirusega, nii ei vii kusagile ka püüded teha meie joonisest midagi rohkemat, kui on lihtne mudel.

Meil pole kavatsust siinkohal gravitatsiooniprobleemi uuesti arutlema hakata. See oli ainult sissejuhatuseks, mis lihtsustab analoogiliste meetodite seletamist elektri-teooria põhjendamisel.

Alustame sellest samast eksperimendist, mis tekitas meie mehhanistlikule interpretatsioonile nii suuri raskusi. Olgu meil elektrivool, mis voolab ringikujulises juhtmes. Juhtmekeeru keskel asetsegu magnetnõel. Niipea kui tekib elektrivool, hakkab magnetipoolusele mõjuma uus jõud, mis on risti kõigi juhete ja magnetipoolust ühendavate sirgetega. Rowlandi katse näitas, et ringjoonel tiirlevast elektrilaengust tingitud jõud oleneb laengu liikumise kiirusest. Need eksperimentaalsed faktid on vastuolus filosoofilise vaatega, nagu peaksid kõik jõud mõjuma osakesi ühendava sirge suunas ja olenema ainult kaugusest.

Täpne avaldis selle jõu jaoks, millega vool mõjub magnetipoolusele, on küllaltki komplitseeritud, ta on tegelikult palju keerulisem kui gravitatsioonijõu avaldis. Kuid me võime proovida kujutada ka seda mõju piltlikult, analoogiliselt sellega, mida tegime gravitatsioonijõu kor-

ral. Seega kerkib küsimus: missuguse jõuga mõjub vool oma läheduses olevale magnetipoolusele? Üsna raske oleks kirjeldada seda jõudu sõnade abil. Koguni matemaatiline valem oleks keeruline ja kohmakas. Kõike, mida me teame sellest jõust, on hoopis parem kirjeldada joonise abil, täpsemini öeldes, jõujoonte ruumilise mudeli abil. Teatud raskused tekivad siin sellest, et magnetipoolus esineb ainult koos teise poolusega, moodustades dipooli. Kuid me võime alati kujutleda magnetnõela nii



Joon. 43.

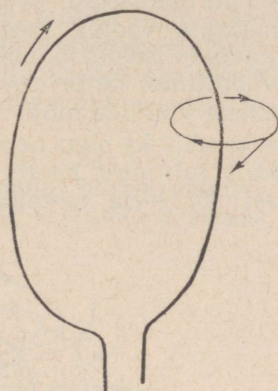
pikana, et on vaja arvestada ainult seda jõudu, mis mõjub voolule lähemal asetsevale poolusele. Teine poolus on küllalt kaugel, nii et temale mõjuv jõud on tühiselt väike. Arusaamatuste vältimiseks lepime kokku, et voolujuhtmele lähemal olev magnetipoolus on *positiivne*.

Positiivsele magnetipoolusele mõjuva jõu iseloomu võib välja lugeda jooniselt 43.

Joonistame kõigepealt juhtme juurde väikesed noolekesed, mis näitavad voolu suunda kõrgema potentsiaali poolt madalama potentsiaali poole. Kõik teised jooned, mis asetsevad kindlal tasapinnal, on sellele voolule vastavad jõujooned. Kui joonistada detailsemalt, siis räägivad need jooned meile ka jõuvektori suunast ja pikkusest, iseloomustades seega voolu mõju positiivsele magnetipoo-

lusele. Jõud, nagu me teame, on vektor, mille määramiseks tuleb anda nii suund kui ka pikkus. Meid huvitab peamiselt poolusele mõjuva jõu suuna probleem. Küsimegi: kuidas määrata selle joonise abil jõu suunda mis tahes ruumipunktis?

Reegel jõu suuna määramiseks niisuguse mudeli abil pole nii lihtne kui eelmises näites, kus jõujooned olid sirged. Et muuta arutlusi arusaadavamaks, on meie järgmisel joonisel (joonis 44) kujutatud ainult üks jõujoon. Jooniselt on näha, et jõuvektor on jõujoonele puutujaks. Jõuvektori nool ja noolekesed näitavad ühes suunas.



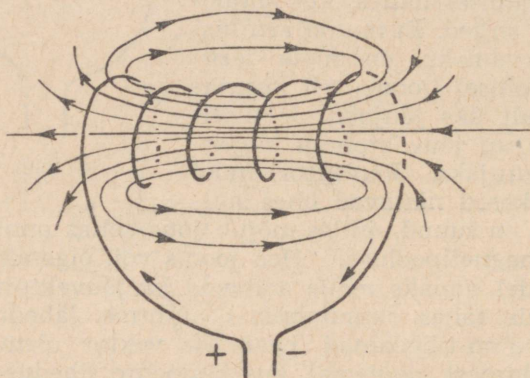
Joon. 44.

See on suund, milles mõjub jõud selles punktis asetsevale magnetipoolusele. Hea joonis või, õigemini öeldes, hea mudel annaks meile andmeid ka jõuvektori pikkuse kohta mis tahes ruumipunktis. Juhtme läheduses, kus jõujooned on tihedamad, peab see vektor olema pikem, kuna juhtmest kaugemal, kus jõujoonte tihedus on väiksem, on ka jõuvektor lühem.

Jõujoonte kogum ehk, teiste sõnadega, väli annab meile võimaluse määrata jõudusid, mis igas ruumipunktis magnetipoolusele mõjuvad. Esialgu on see meile ainukeseks õigustuseks nii keerulise välja konstrueerimisel. Kui me teame juba, mida see väli tähendab, siis uurime voolule vastavaid jõujooni palju sügavamalt huviga. Need jooned on juhete ümbritsevad ringjooned, mis asetsevad juhtmega risti oleval tasapinnal. Kuna ringjoone puutuja on raadiusega alati risti, siis jõu määramisel jooniselt jõuame veelkord järeldusele, et jõud mõjub suunas, mis on risti juhete ja magnetipoolust ühendavate sirgetega. Kõiki neid andmeid, mis meil on mõjuva jõu kohta, võime kokkuvõtlikult arvestada välja konstrueerimisel. Selleks et mõjuvaid jõude lihtsal viisil kujutada, toome lisaks voolu ja magnetipooluse mõistetele sisse veel välja mõiste.

Iga vool on seotud magnetiväljaga, s. o. voolujuhtme lähedusse asetatud magnetipoolusele mõjub alati jõud. Mõõda minnes märgime, et see omadus võimaldab meil

ehitada tundlikku riista, mille abil saab avastada elektrivoolu olemasolu. Et me oleme nüüd juba õppinud, kuidas määrata vooluga seotud välja mudeli abil magnetiliste jõudude iseloomu, siis edaspidi kanname joonisele alati ka voolujuhet ümbritseva välja, eesmärgiga kujutada magnetiliste jõudude mõju mis tahes ruumpunktis. Meie esimeseks näiteks olgu nõndanimetatud solenoid. See on tegelikult juhtmest keeratud mähis, nagu on näidatud joonisel 45. Meie eesmärgiks on eksperimendi abil tundma



Joon. 45.

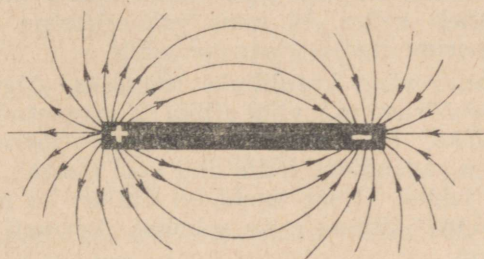
õppida kõike seda, mida võib teada solenoidis kulgeva elektrivoolu magnetilisest mõjust ja kasutada neid teadmisi väljakonstrueerimisel. Joonis näitab meile selle uurimise tulemust. Jõujooned on kinnised kõverad, mis ümbritsevad solenoidi, nii nagu see on iseloomulik voolu magnetiväljale.

Analoogiliselt voolu väljaga võime kujutada ka magnetpulga välja. See on tehtud joonisel 46. Jõujooned suunduvad siin positiivselt pooluselt negatiivsele. Jõuvektor on alati jõujoone puutuajaks, kusjuures pooluste läheduses on ta kõige pikem, sest jõujoonte tihedus on seal maksimaalne. Jõuvektor näitab meile magneti mõju positiivsele magnetipoolusele. Antud juhul pole välja «allikaks» mitte vool, vaid magnet.

Võrdleme hoolikalt kahte viimast joonist. Esimene neist kujutab solenoidi läbiva elektrivoolu välja, teine magnet-

pulga välja. Pöörame oma tähelepanu nüüd solenoidilt ja magnetpulgalt kõrvale ning vaatame ainult välja solenoidi ja magneti ümber. Me märkame otsekohe, et mõlemad väljad on täpselt ühesuguse iseloomuga: jõujooned saavad alguse solenoidi või magnetpulga ühest otsast ja suubuvad teise otsa.

Kujutus väljast kannab esimesi vilju! Oleks väga raske näha märkimisväärset sarnasust solenoidi läbiva elektri-  
voolu ja magnetpulga vahel, kui seda ei aitaks avastada välja konstrueerimine.



Joon. 46.

Välja mõistet võib nüüd rakendada juba palju tõsisemate küsimuste lahendamisel. Varsti näeme, kas välja mõistel on ka sügavam sisu, kui olla ainult mõjuvate jõudude uueks esitusviisiks. Me võiksime küsimusele vaadata ka teisiti: oletame hetkeks, et väli iseloomustab ühesel viisil väljaallika kogumõju. See on ainult oletus, mis sisuliselt tähendab seda, et juhul kui solenoidi väli on samasugune nagu magnetpulga väli, peab solenoid alati samasugust mõju avaldama nagu magnetpulkki. See tähendaks, et kaks voolu all olevat solenoidi käituksid siis kahe magnetpulga taoliselt, s. o. nad tõmbuksid või tõukuksid, olenevalt sellest, missugune on ühe solenoidi asend teise suhtes — täpselt niisamuti, nagu see toimub magnetpulkade korral. Samuti tähendaks see, et solenoid ja magnetpulk tõukuksid või tõmbuksid nii nagu kaks magnetpulka. See tähendaks, lühidalt öeldes, et voolu all oleva solenoidi ja magnetpulga kõik mõjud on ühesugused, sest oluline on siin ainult väli, mis mõlemal juhul on ühesuguse iseloomuga. Eksperiment kinnitab täielikult neid oletusi!

Raske oleks niisuguseid asju ette näha, kui me ei kasu-

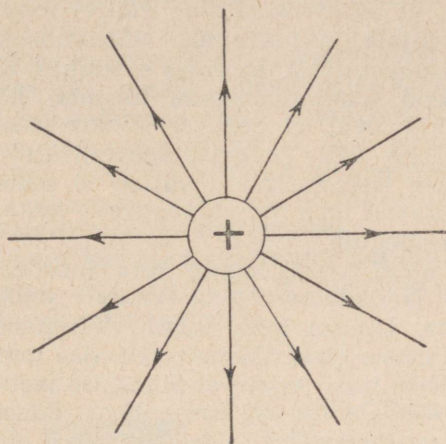
taks välja mõistet! Voolujuhtme ja magnetpooluse vahel valitseva jõu avaldis on väga keeruline. Kahe solenoidi korral tuleks meil uurida jõudusid, millega kaks voolu teineteisele mõjuvad. Kui me oleme aga avastanud sarnasuse solenoidi välja ja magnetpulga välja vahel, siis saame välja abil lihtsalt ennustada, missugune peaks olema mõju kahe solenoidi vahel.

Meil on õigus oletada, et välja mõiste taga võiks peituda midagi rohkemat, kui väitsime algul. Mingi nähtuse kirjeldamisel näivad olevat olulised ainult välja omadused, kuna allika iseloom pole tähtis. Välja mõiste vajalikkus ilmneb selles, et tema rakendamine viib meid uutele eksperimentaalsetele avastustele.

Väli osutub väga kasulikuks mõisteks. Algul oli see midagi ebamäära, mis viidi allika ja magnetnõela vahele ainult selleks, et kirjeldada mõjuvat jõudu. Väljast mõeldi nagu «agendist», mille abil vool teostab oma mõju. Nüüd aga selgus, et see agent on ühtlasi ka tõlgiks, kes tõlgib seadused lihtsasse ja selgesse, kergesti mõistetavasse keelde.

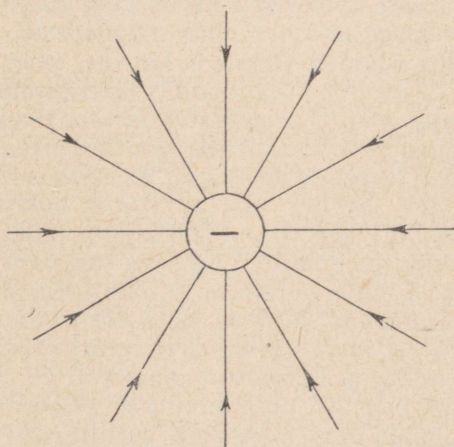
Väljateooria esimesed edusammud viivad mõttele: võib-olla oleks kasulik kõiki voolude, magnetite ja laengute mõjusid vaadata kaudsetena, niisugustena, mis teostuvad ainult välja kui mõju ülekandja vahendusel. Välja võib vaadata kui midagi niisugust, mis käib alati vooluga kaasas. Ta on olemas ka siis, kui puudub magnetipoolus tema avastamiseks. Püüame nüüd selle uue juhtidee poolt näidatud suuna kõrvalkaldumatult edasi sammuda.

Laetud juhi välja saame samal meetodil, nagu me saime gravitatsioonivälja või voolu ehk magneti poolt tekitatud välja. Võtame jälle kõige lihtsama näite. Et joonistada üles positiivselt laetud kera välja, tuleb meil küsida: missugused jõud mõjuvad väikesele positiivselt laetud proovikehale välja allika, s. o. laetud kera läheduses? Et me kasutame positiivselt, mitte aga negatiivselt laetud proovikeha, see on puhas kokkulepe, mis fikseerib ainult noolekeste suuna jõujoontel. Tänu Coulomb'i ja Newtoni seaduste sarnasele kujule tuleb laetud juhi välja mudel samasugune, nagu oli gravitatsioonivälja mudel (joonis 42). Ainuke erinevus on, et noolekesed jõujoontel näitavad vastupidistes suundades. See on loomulik, sest kaks positiivset laengut tõukuvad, kuna kaks massi tõmbuvad. Kuid negatiivselt laetud kera väli on identne gra-



Joon. 47.

vitatsiooniväljaga, sest niisuguses väljas väike positiivne proovilaeng tõmbub allika poole.



Joon. 48.

Kui elektrilaeng ja magnetipoolus mõlemad on paigal, siis nad teineteisele mõju ei avalda, nende vahel pole ei tõuke- ega tõmbejõudu. Väljateooria keeles võime selle

kohta öelda, et elektrostaatiline väli ei mõju magnetostaatiliselle väljale ja vastupidi. «Staatiliseks väljaks» nimetame niisugust välja, mis ajas ei muutu. Magnetid ja laengud võiksid jääda igaveseks üksteise kõrvale, kui mõni välisjõud neid ei segaks. Elektrostaatiline väli, magnetstaatiline väli ja gravitatsiooniväli — igäühel neist on erinev iseloom. Need väljad ei segune kunagi, kõik nad säilitavad oma individuaalsuse, vaatamata teiste väljade juuresolekule.

Pöördume nüüd tagasi laetud kera juurde, mis siiani seisis paigal, ja oletame, et ta hakkab mõne välisjõu mõjul liikuma. Laetud kera liigub. Väljateooria keeles tähendab see lause: elektrilaengu väli ajas muutub. Kuid Rowlandi katsest juba teame, et niisuguse laetud kera liikumine on ekvivalentne elektrivooluga. Edasi, iga vooluga käib kaasas magnetiväli. Meie arutluste ahel on seega järgmine:

laengu liikumine	—————>	elektrivälja muutumine
↓		
vool	—————>	vooluga seotud magnetiväli.

Siit võime järeldada: *laengu liikumisest tingitud elektrivälja muutumisega kaasneb alati magnetiväli.*

See järeldus tugineb Oerstedi katsele, kuid ta sisu on palju laiem. Jõudnud ülaltoodud järeldusele, hakkame taipama, et ajas muutuva elektrivälja seos magnetiväljaga on väga oluline meie edaspidiste arutluste jaoks.

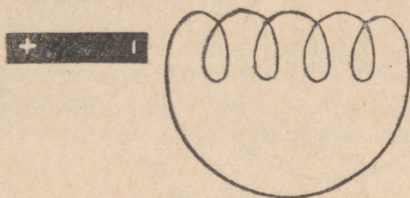
Senikaua kui laeng püsib paigal, on olemas ainult elektrostaatiline väli. Niipea aga kui laeng hakkab liikuma, ilmub magnetiväli. Me võime öelda veel rohkem. Laengu liikumisel tekkiv magnetiväli on seda tugevam, mida suurem on laeng ja mida kiiremini ta liigub. Ka see on järeldus Rowlandi katsest. Minnes jälle üle väljateooria keelele, võime öelda: mida kiiremini muutub elektriväli, seda tugevam on temaga kaasnev magnetiväli.

Meie eesmärgiks oli tõlkida uude, väljateooria keelde kõik faktid, mida seni tundsimme ainult mehhanistlikule vaatele tugineva kaalutute vedelike teooria keeles. Varsti näeme, kui selge, õpetlik ja laiahaardeline on see uus keel.

## Väljateooria kaks alussammast

«Elektrivälja muutumisega kaasneb magnetiväli». Kui me muudame siin sõnade «elektriväli» ja «magnetiväli» järjekorda, siis kõlab see lause järgmiselt: «Magnetivälja muutumisega kaasneb elektriväli». Kas viimane väide on õige või mitte, seda võib ainult eksperiment otsustada. Kuid idee niisuguse väite püstitamiseks võis tekkida ainult väljateooria keele kasutamisel.

Veidi rohkem kui sada kakskümmend aastat tagasi tegi Faraday katse, mis viis tähtsale tulemusele, indutseeritud elektrivoolu avastamisele.

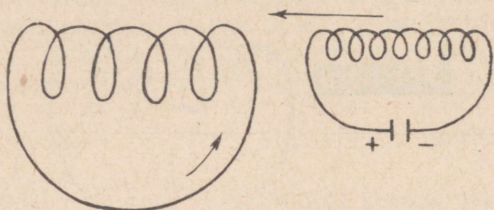


Joon. 49.

Selle katse demonstreerimine on väga lihtne (joonis 49). Selleks on meil tarvis ainult solenoidi või mõnda teist vooluringi, magnetpulka ja ühte neist paljudest aparaatidest, mille abil saab avastada elektrivoolu. Alustame sellega, et lülitame solenoidi kinnisesse vooluringi ja hoiame magnetpulka tema läheduses paigal. Niisugusel juhul juhtmes elektrivoolu ei ole, sest puudub vooluallikas. On olemas ainult magnetpulga magnetostaatiline väli, mis ajas ei muutu. Muudame nüüd äkki magneti asukohta, eemaldades teda solenoidist või viies solenoidile lähemale, kui me seda eelistame. Sel silmapilgul tekib juhtmes lühikeseks ajaks vool, otsekohe jälle kadudes. Iga kord, kui muutub magnetpulga asukoht, ilmub vool, mida saab avastada küllalt tundliku aparaadi abil. Väljateooria seisukohalt tähendab vool seda, et on olemas elektriväli, mis paneb elektrivedelikud juhtmes voolama. Niipea kui magnet jääb paigale, kaob vool ja järelikult ka elektriväli.

Kujutleme hetkeks, et me väljateooria keelt ei tunne

ja kirjeldatud katse resultate tuleks meil kirjeldada nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt vanade mehhaanika mõistete abil. Meie eksperiment näitaks siis seda, et magnetdipooli liikumisel tekib uus jõud, mis paneb elektrivedeliku juhtmes liikuma. Järgmine küsimus oleks siis: millest on see jõud? Sellele oleks väga raske vastata. Me peaksime uurima, kuidas on jõud magneti liikumise kiirusest ning magneti ja vooluringi kujust. Kuid sellest on veel vähe. Kui tõlgendada seda katset vana teooria keeles, ei anna ta meile vähimatki viidet selle kohta, kas indutseeritud vool tekib ka siis, kui liikuv magnetpulk asendada liikuva vooluringiga.



Joon. 50.

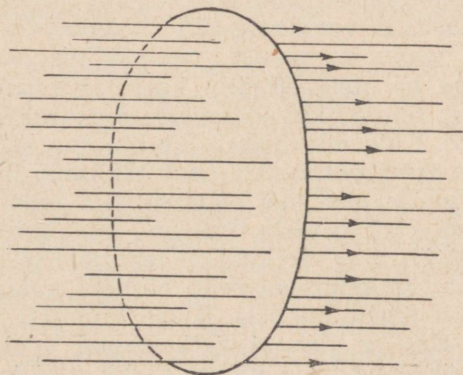
Hoopis teine on olukord väljateooria keele kasutamisel, kus tugineme jälle oma põhiideele, et mõju on väljaga täielikult määratud. Me näeme otsekohe, et voolu all olev solenoid avaldab samasugust mõju nagu magnetpulkki. Joonisel 50 on kujutatud kaks solenoidi: väiksemas neist voolaku elektrivool, kuna suuremas võib esineda ainult indutseeritud vool. Me võime väikest solenoidi liigutada samuti, nagu tegime seda magnetpulgaga. Seejuures näeme, et suuremas solenoidis tekib indutseeritud elektrivool. Väikese solenoidi liigutamise asemel võime tekitada ja kaotada magnetivälja ka voolu sisse- ja väljalülitamisega, s. o. vooluahela avamise ning sulgemisega. Katse kinnitab ka neid väljateooria ennustusi!

Võtame lihtsama näite. Olgu meil kinnine juhe ilma ühegi vooluallikata. Kusagil läheduses olgu magnetiväli. Pole oluline, kas selleks on teine juhe, milles voolab elekter, või magnetpulk. Joonis 51 kujutab kinnist juheta ja magnetivälja jõujooni. Väljateooria keeles on induktiooni nähtust nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt väga lihtne kirjeldada. Jooniselt on näha, et mõned jõujooned

lõikavad juhtmega piiratud pinda. Me vaatame ainult neid jõujooni, mis juhtmega piiratud pinnaosa lõikavad. Ükskõik kui tugev väli ka on, niikaua kui ta muutumatuks jääb, juhtmes elektrivoolu ei ole. Niipea kui muutub aga juhtmega piiratud pinnaosa lõikavate jõujoonte arv, tekib juhtmes vool. Voolu määrab juhtmega piiratud pinnaosa lõikavate jõujoonte arvu muutumine, kusjuures pole oluline, mis selle muutumise esile kutsub. Jõujoonte arvu muutumine on ainuke oluline mõiste, mida tuleb kasutada indutseeritud voolu kvalitatiivsel ja kvantitatiivsel kirjeldamisel. «Jõujoonte arv muutub» — see tähendab, et muutub jõujoonte tihedus. Meenutame, et jõujoonte tiheduse muutumine tähendas omakorda väljatugevuse muutumist.

Tähtsamad sõlmpunktid meie arutluste ahelas on seega järgmised: magnetivälja muutumine  $\rightarrow$  indutseeritud vool  $\rightarrow$  laengu liikumine  $\rightarrow$  elektrivälja olemasolu.

Siit järeldub: *muutuva magnetiväljaga kaasneb elektriväli.*



Joon. 51.

Seega oleme avastanud elektri- ja magnetivälja teooria kaks kõige tähtsat alussammast. Esimene neist seob muutuvat elektrivälja magnetiväljaga. See järeldub magnetnõela kõrvalekaldumisest Oersted'i katses ja viib järeldusele: *muutuva elektriväljaga kaasneb magnetiväli.*

Teooria teine tugisammas, mis seob muutuvat magnetivälja indutseeritud vooluga, järeldub Faraday katses. Need mõlemad kokku moodustavad aluse, millelt lähtu-

des on võimalik elektri- ja magnetinähtusi kvantitatiivselt kirjeldada.

Muutuva magnetiväljaga seotud elektriväli esineb jälle nagu midagi reaalselt. Me oletasime juba, et voolu magnetiväli on alati olemas sõltumatult proovipoolusest. Analoomiliselt tuleb meil väita, et elektriväli on olemas sõltumatult juhtmest, mille abil avastame indutseeritud voolu.

Kahele alusele tugineva väljateooria struktuuri saab tegelikult tagasi viia ainult ühele alussambale, nimelt sellele, mis tuleneb Oerstedi katsest. Faraday katse resultaat tuleneb eelmisest siis energia jäävuse seaduse järel-  
dusena. Väljateooria kahte alust kasutame ainult selguse- ja lühiduse huvides.

Märgime siin veel ühte järeldust väljateooriast. Olgu meil voolukontuur, milles vooluallikaks on näiteks Volta patarei. Äkki katkeb ühendus vooluallika ja juhtme vahel. Vool muidugi lakkab. Kuid lühikese katkemishetke jooksul toimuvad keerulised protsessid, mida võib jällegi ette ennustada väljateooria abil. Niikaua kui juhtmest oli elektrivool, ümbritses voolukontuuri magnetiväli. See väli püsis kuni voolu katkemise momendini; voolu katkemisel kadus ka magnetiväli. Voolukontuuriga piiratud kujuteldavat pinnatükki lõikavate jõujoonte arv muutus väga kiiresti. Kuid niisugune kiire muutus, sõltumata sellest, mis on tema põhjuseks, peab tekitama indutseeritud voolu. Oluline on siin just magnetivälja muutumine, sest indutseeritud vool on seda tugevam, mida kiiremini muutub magnetiväli. See järeldus on teooriale teiseks proovikiviks. Voolu katkemisega peab hetkeks kaasnema tugev indutseeritud voolu impulss. Katse kinnitab jällegi seda ennustust. Kes on kunagi katkestanud vooluahelat, on kindlasti märganud selle juures tekkivat sädet. See säde näitab, et on olemas suur potentsiaalide vahe, mille on põhjustanud magnetvälja kiire muutumine.

Kasutades energia mõistet, võib sama protsessi vaadata ka teisest seisukohast. Magnetiväli kadus ja tekkis säde. Sädemel on olemas energia, järelikult peab olema energia ka magnetiväljal. Kui järjekindlalt kasutada välja mõistet ja väliateooria keelt, siis tuleb meil vaadata magnetivälja kui nähtust, millel on olemas teatud energiavaru. Ainult sel teel saame elektri- ja magnetisminähtusi kirjeldada kooskõlas energia jäävuse seadusega.

Väli oli algul meil ainult abimudeliks, nüüd muutub ta aga järjest rohkem ja rohkem reaalseks objektiks. See aitab meil mõista vanu fakte ja ennustada uusi. Energia omistamine väljale on uus samm edasi teooria arenemises, mis tõstab välja mõistet veel rohkem esile. Substant-side mõisted, mis mehhanistlikus vaates olid nii olulised, jäävad seejuures järjest kaugemale tagaplaanile.

### Väli kui reaalsus

Välja seaduste kvantitatiivseks, matemaatiliseks väljenduseks on Maxwelli võrrandid. Just eelkirjeldatud faktid olid need, mis viisid Maxwelli võrrandite formuleerimisele, kuid nende võrrandite sisu on palju rikkam, kui meil siinkohal oli võimalik näidata. Maxwelli võrrandite lihtne kuju varjab endas sügavust, mis avaneb ainult hoolika uurija silmale.

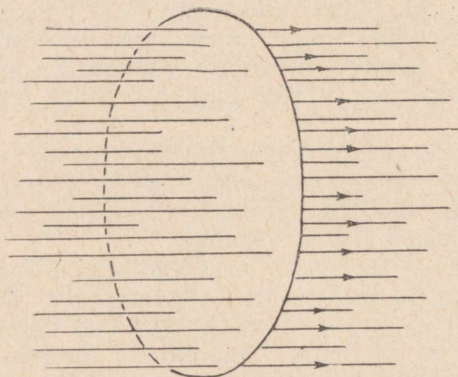
Maxwelli võrrandite koostamine on pärast Newtonit füüsika arenemises kõige tähtsamaks sündmuseks. Seda mitte ainult nende võrrandite väärtusliku sisu poolest, vaid ka sellepärast, et nad olid uut tüüpi seaduste eeskujuks.

Maxwelli võrrandite iseloomulikud jooned, mis on olemas ka kõigil teistel kaasaegse füüsika võrranditel, võib ära öelda ühe lausega: Maxwelli võrrandid on seadused, mis kirjeldavad välja *struktuuri*.

Miks erinevad Maxwelli võrrandid oma kujult ja iseloomult klassikalise mehhaanika võrranditest? Mida tähendab väide, et need võrrandid kirjeldavad välja struktuuri? Kuidas on võimalik Oersteddi ja Faraday katsetele tuginedes formuleerida uut tüüpi seadusi, mis osutuvad füüsika edasises arenemises nii tähtsateks?

Oersteddi katses nägime, kuidas magnetivälja jõujooned ümbritsevad muutuvat elektrivälja. Faraday katse näitas, kuidas elektrivälja jõujooned ümbritsevad muutuvat magnetivälja. Et iseloomustada Maxwelli teooria karaktersemaid jooni, koondame hetkeks kogu oma tähelepanu ainult ühele neist katsetest, näiteks Faraday katsele. Kordame joonist, mis kujutab elektrivälja indutseerimist muutuva magnetivälja poolt (joonis 52). Me teame juba, et indutseeritud vool tekib siis, kui muutub juhtmega piiratud pinda lõikavate jõujoonte arv. Voolu põhjuseks võib seega olla magnetivälja muutumine, juhtme

deformeerumine või liikumine, ühesõnaga, kõik protsessid, mis muudavad juhtmega piiratud pinda lõikavate jõujoonte arvu, ükskõik missugused need protsessid muidu ka ei oleks. Et arvestada kõikvõimalikke voolu indutseerimise viise ja hinnata nende igäühe osatähtsust, oleks vaja väga keerulist teooriat. Kas me ei saaks oma probleemi aga lihtsustada? Püüame kõrvaldada oma käsitlusest kõik, mis iseloomustab juhtme kuju, pikkust ja juhtmega piiratud pinda. Kujutleme, et juhtmekeerud meie viimasel joonisel muutub ikka väiksemaks ja väiksemaks, tõmbudes kokku kindlat ruumipunkti piiravaks üliväikeseks ringikeseks. Kõik juhtme suurusse ja kujusse puutuv pole siis enam oluline. Niisuguses piirprotsessis, kus kinine kõver koondub punktiks, kaovad meie käsitlusest automaatselt juhtme kuju ja suurus ja me saame seadused, mis kirjeldavad magneti- ja elektrivälja muutumist mingis ruumipunktis mingil ajamomendil.



Joon. 52.

See on üks olulisematest sammudest Maxwelli võrrandite tuletamisel. Siin on jällegi tegemist idealiseeritud katsega, mida teostatakse Faraday katse eeskujul, ainult punktiks kokkutõmbunud juhtmekeeruga.

Õieti tuleks meil seda nimetada pigem poolsammuks kui terveks sammuks. Siiani oli meie tähelepanu keskpunktis Faraday katse. Selle eeskujul tuleks meil sama põhjalikult uurida väljateooria teist, Oersted'i katsele toetuvat alussammast. Nimetatud katses magnetivälja jõujooned ümbritsevad voolu. Kui laseme nüüd ringjoo-

nekujulistel magnetivälja jõujoontel üheks punktiks kokku tõmbuda, olemegi teinud teise poolsammu. Terve samm annab seega seose magnetivälja ja elektrivälja muutuste vahel mis tahes ruumpunktis ja mis tahes aja- hetkel.

Nüüd on tarvis teha veel teine väga vajalik samm. Faraday katses peab olema juhe, mille abil elektrivälja kindlaks teha, samuti nagu Oersted'i katses peab olema magnetipoolus või magnetnõel magnetivälja avastamiseks. Maxwelli uus teoreetiline mõte läheb nendest eksperimentaalsetest faktidest aga kaugemale. Elektri- ja magnetiväli või, lühemalt öeldes, *elektromagnetiline* väli on Maxwelli teoorias midagi reaalselt. Elektriväli tekib magnetivälja muutumisel täiesti sõltumatult sellest, kas on olemas juhe elektrivälja avastamiseks; magnetiväli tekib elektrivälja muutumisel olenemata sellest, kas on olemas magnetipoolus, mille abil tema olemasolu kindlaks teha.

Maxwelli võrranditeni jõudmiseks tuleb teha seega kaks olulist sammu. Esimene: voolu ja muutuvat elektrivälja ümbritsevatel magnetivälja jõujoontel Oersted'i ja Rowlandi katses tuleb lasta punktiks kokku tõmbuda; analoogiliselt tuleb lasta punktiks koonduda ka muutuvat magnetivälja ümbritsevatel elektrivälja jõujoontel Faraday katses. Teiseks sammuks on vaadata väljale kui millelegi reaalsele; kord juba tekkinud elektromagnetiline väli eksisteerib, avaldab mõju ja muutub Maxwelli seaduste kohaselt.

Maxwelli võrrandid kirjeldavad elektromagnetilise välja struktuuri. Kui mehhaanikaseadused kehtivad ainult nendes ruumpunktides, kus on olemas mass või laeng, siis Maxwelli seaduste avaldumispiirkonnaks on kogu ruum.

Meenutame korraks mehhaanikat. Teades mingil ajamomendil osakese asukohta, kiirust ja mõjuvaid jõude, võisime ette arvutada osakese kogu tulevase tee. Kui me Maxwelli teoorias teame välja mingil ajamomendil, siis saame võrranditest määrata välja edaspidise käitumise ajas ja ruumis. Maxwelli võrrandite abil saame kindlaks teha välja tulevikku ja minevikku, täpselt samuti nagu mehhaanika võrrandid võimaldasid meil jälgida aineosakeste tulevikku ja minevikku.

Kuid on veel üks oluline erinevus mehhaanikaseaduste ja Maxwelli seaduste vahel. Newtoni gravitatsiooniseaduste ja Maxwelli väljaseaduste võrdlemine toob esile veel teisi iseloomulikke jooni, mida väljendavad need seadused.

Newtoni seaduste abil saame tuletada Maa liikumise Päikese ja Maa vahel valitseva jõu mõjul. Need seadused seovad Maa liikumise kaugeloleva Päikese mõjuga. Maa ja Päike, vaatamata sellele, et nad teineteisest nii kaugel asetsevad, on mõlemad osalised nende vahel valitsevate jõudude mängus.

Maxwelli teoorias ei ole mõjuavaldajad seotud ainega. Selle teooria võrrandid väljendavad seadusi, mis juhivad elektromagnetilist välja. Need võrrandid ei ühenda kahte ruumiliselt teineteisest kaugel olevat sündmust, nagu seda teevad Newtoni seadused. Maxwelli võrrandid ei seo *siintoimuvat* tingimustega, mis on *seal*. Väli *siin* ja *praegu* sõltub ainult väljast *vahetus naabruses eelmisel ajahetkel*. Need võrrandid lubavad ennustada, mis juhtub veidi hiljem veidi kaugemal, kui teame, mis juhtub praegu siin. Nad annavad meile võimaluse laiendada oma teadmisi väljast väikeste sammude kaupa. Selle, mis toimub siin, võime tuletada eemaltoimunust nende väga väikeste sammude summeerimise teel. Newtoni teoorias, vastupidi, on võimalikud ainult suured sammud, mis seovad teineteisest kaugel toimuvaid sündmusi. Oersted'i ja Faraday katsete tulemused võib tuletada Maxwelli teooriast, kuid ainult väikeste sammude summeerimise teel. Iga väike samm on seejuures tehtud kooskõlas Maxwelli võrranditega.

Maxwelli võrrandite põhjalikum matemaatiline analüüs näitab, et nad sisaldavad uusi, tõepoolest ootamatuid järeldusi. Kogu teooriat saab nüüd palju kõrgemal tasemel kontrollida, sest nendel teoreetilistel järeldustel on kvantitatiivne iseloom ja nad tuginevad tervele loogiliste argumentide ahelale.

Kujutleme jälle idealiseeritud katset. Olgu elektriliselt laetud kerake mingisuguste välisjõudude mõjul kiirelt ja rütmiliselt võnkuma pandud, umbes nii, nagu seda teeb pendel. Kuidas kirjeldada siis selle juures toimuvaid nähtusi väljateooria keeles, arvestades ühtlasi juba teadaolevaid andmeid elektromagnetilise välja muutumise kohta?

Laengu võnkumine tekitab muutuva elektrivälja, millega alati kaasneb muutuv magnetiväli. Kui läheduses on kinnine ringikujuline juhe, siis muutuv magnetiväli omakorda kutsub juhtmes esile elektrivoolu. Kõik see on juba tuntud faktide kordamine, kuid Maxwelli võrrandite täpsem uurimine annab võnkuva laengu probleemist sügavama pildi. Maxwelli võrranditest võime matemaatilisel teel tuletada võnkuvat laengut ümbritseva välja iseloomu, tema struktuuri nii allika lähedal kui ka kaugel ja tema muutumise ajas. Niisuguse tuletuskäigu resultaadiks on *elektromagnetiline laine*. Võnkuvast laengust kiirgub energia, mis liigub ruumis kindla kiirusega. Energia liikumine, oleku edasikandumine ruumis on aga iseloomulik kõigile lainetusnähtustele.

Eespool me juba peatusime erinevate lainetüüpide juures. Seal olid longitudinaalsed lained, mis tekkisid pulseeriva kera mõjul. Nende lainete korral levisid ruumis keskkonna tihendused ja hõrendused. Seal olid ka tarretisetaolises keskkonnas levivad transversaalsed lained, tarretise deformatsioonid, mille põhjuseks oli kera pöörlemine. Missugused on elektromagnetilise laine korral levivad muutused? Need on elektromagnetilise välja muutused! Igasugune elektrivälja muutumine tekitab magnetivälja; selle magnetivälja igasugune muutumine tekitab elektrivälja; selle muutumine omakorda tekitab... jne., jne. Kuna väli kannab energiat, siis kõik need ruumis kindla kiirusega levivad muutused moodustavad laine. Teooriast järgneb, et elektri- ja magnetivälja jõujooned asetsevad alati laine levimissuunaga risti oleval tasapinnal. Laine on seega transversaalne laine. Esialgne kujutlus väljast, mis tulenes Oersted'i ja Faraday katsetest ja mida me kasutasime välja kujutamisel, on siiani õigeks jäänud, kuid nüüd veendume selles, et sel on palju sügavam tähendus.

Elektromagnetiline laine levib tühjas ruumis — see on jällegi üks teooria järeldustest. Kui võnkuv laeng jääb äkki paigale, siis muutub tema väli elektrostaatiliseks väljaks. Kuid laengu võnkumisel moodustunud elektromagnetiliste lainete jada jätkab liikumist. Lained eksisteerivad omaette ja nende muutumist ajas võime jälgida samuti nagu iga teise materiaalse objekti muutumist.

Me taipame, et kujutlus elektromagnetilisest lainest, mis levib ruumis kindla kiirusega ja muutub ajas, on

Maxwelli võrrandite järelduseks ainult seetõttu, et need võrrandid kirjeldavad elektromagnetilise välja struktuuri igas ruumpunktis igal ajahetkel.

On veel teine väga oluline küsimus. Missuguse kiirusega levib elektromagnetiline laine tühjas ruumis? Toetudes paarile lihtsale eksperimendile, millel pole midagi ühist lainete levimise probleemiga, annab teooria sellele küsimusele selge vastuse: *elektromagnetilise laine kiirus on võrdne valguse kiirusega.*

Oerstedi ja Faraday katsed moodustasid aluse, millele rajati Maxwelli seadused. Kõik meie kaugeleulatuvad järeldused on väljateooria keeles avaldatud Maxwelli seaduste hoolika uurimise resultaadiks. Valguse kiirusega leviva elektromagnetilise laine avastamine teoreetilisel teel on üks suurematest saavutustest teaduse ajaloos.

Eksperiment kinnitas teooria ennustust. Hertz oli esimene, kes viiskümmend aastat hiljem avastas elektromagnetiliste lainete olemasolu eksperimentaalsel teel ja tegi kindlaks, et nende levimise kiirus langeb ühte valguse kiirusega. Tänapäeval teavad miljonid inimesed, et elektromagnetilisi laineid on võimalik saata ja vastu võtta. Selleks kasutatavad aparaadid on Hertzi katseseadeldisest palju keerukamad ja avastavad elektromagnetilisi laineid tuhandete kilomeetrite kaugusel saatjast, kuna Hertzil oli see kaugus ainult mõni meeter.

## Väli ja eeter

Elektromagnetiline laine on transversaalne laine ja ta levib tühjas ruumis valguse kiirusega. Kuna need kiirused on võrdsed, siis tekib mõte, et elektromagnetiliste ja optiliste nähtuste vahel peab valitsema tihe seos.

Kui meil tuli valida valguse korpuskulaar- ja laineteooria vahel, siis langetasime oma otsuse laineteooria kasuks. Kõige kaalukamaks argumendiks, mis mõjutas meie otsust, oli seejuures valguse difraktsioon. Ent me ei satu vastuollu ühegi optikanähtuse seletusega, kui oletame täiendavalt, et *valguslaine on elektromagnetiline laine.* Vastupidi, selle seisukoha kasuks võib leida veel teisigi argumente. Kui valguslaine on tõesti elektromagnetiline laine, siis peab optiliste ja elektriliste nähtuste

vahel olema mingisugune seos, mida peaks olema võimalik näha juba teoorias. Et teooriast niisuguseid järeldusi tõepoolest teha saab ja et need järeldused peavad vastu eksperimendi kontrollile — see on kaalukaks argumentiks valguse elektromagnetilise teooria kasuks.

See väga oluline tulemus on väljateooria järelduseks. Kaks näiliselt täiesti eraldi seisvat teadusharu ühinesid ühe teooria lipu alla. Ühed ja needsamad Maxwelli võrrandid kirjeldavad nii elektrilist induksiooni kui ka valguse murdumist. Kui me seame oma eesmärgiks kirjeldada ainult ühe teooria abil kõike seda, mis on kunagi juhtunud ja mis võib juhtuda tulevikus, siis on optika ja elektriõpetuse ühendamine kahtlemata väga suureks edusammuks selles suunas. Ainuke füüsikaline erinevus hariliku elektromagnetilise laine ja valguslaine vahel on lainepikkuses: silmaga tajutavatel valguslainetel on lainepikkus väga väike, harilikel raadiolainetel, mida me raadioaparaadiga vastu võtame, on see suur.

Vana mehhanistlik vaade püüdis kõiki loodusnähtusi taandada materiaalsete osakeste vahel valitsevatele jõududele. Sellele mehhanistlikule vaatele tugines esialgne naiivne elektrivedelike teooria. Möödunud sajandi algaastate füüsiku jaoks välja ei eksisteerinud. Temale olid reaalsusteks ainult substants ja selle muutumine. Ta püüdis kirjeldada mõju kahe elektrilaengu vahel ainult nende mõistete abil, mis kuulusid otseselt laengute eneste juurde.

Välja mõistet kasutati algul ainult selleks, et lihtsustada nähtuste mõistmist mehhanistliku vaate kohaselt. Uues väljateooria keeles on kahe laengu mõju kirjeldamiseks oluline väli laengute vahel, mitte enam laengud ise. Füüsikud harjusid uute mõistetega ikka rohkem ja rohkem, kuni lõpuks väli surus substantsi hoopis kõrvale. Hakati taipama, et füüsikas on juhtunud midagi ülitähtsat. Oli loodud uus reaalsus, uus mõiste, millele mehhanistlik vaade kohta ei leidnud. Aegamööda, visas võitluses omandas välja mõiste juhtiva koha füüsikas, muutudes üheks kõige tähtsamaks füüsikaliseks mõisteks. Kaasaegse füüsiku jaoks on elektromagnetiline väli sama reaalne kui tool, millel ta istub.

Pole siiski õige arvata, nagu oleks uus, väljateoreetiline vaatekoht vabastanud teaduse vana elektrivedelike teooria vigadest või nagu oleks uus teooria hävitanud kõik vana

teooria tulemused. Uus teooria tõstab esile nii vana teooria tugevad kui ka nõrgad küljed ja annab meile võimuse vanu seisukohti kõrgemast vaatekohast kaaluda. See on õige mitte ainult elektrivedelike ja väljateooria korral, vaid ka kõigi füüsikaliste teooriate muutumisel üldse, ükskõik kui revolutsioonilised need muutused ka oleksid. Näiteks leiame elektrilaengu mõiste ka Maxwelli teooriast, kuigi laengule tuleb siin vaadata ainult kui elektrivälja allikale. Samuti jääb kehtima Coulomb'i seadus, mis peitub Maxwelli võrrandites; paljude teiste järelduste kõrval saab Maxwelli võrranditest tuletada ka Coulomb'i seaduse. Vana teooria kehtivuspiirkonda kuuluvate faktide uurimisel võime alati kasutada vana teooriat. Kuid samahästi võiksime rakendada ka uut teooriat, sest ta haarab kõiki juba teadaolevaid fakte.

Võrdluseks võib öelda, et uue teooria loomist ei saa võrrelda vana küüni lammutamisega ja pilvelõhkuja ehitamisega tema asemele. See meenutab pigem mäkketõusu, kus avanevad uued ja avaramad vaated, selguvad ootamatud ühenduste meie lähtekoha ja seda ümbritsevate paikade vahel. Kuid meie lähtekoht ei kao, vaid on endiselt nähtav, kuigi ta muutub väiksemaks ja moodustab meid ümbritsevast vaateväljast ainult tillukese osa. Me saavutasime avara vaate, ületades takistusi oma julgel retkel pilvede poole.

Tegelikult möödus hulk aega, enne kui mõisteti Maxwelli teooria täit sisu. Väljale vaadati algul kui millelegi niisugusele, mida võib hiljem eetri abil mehhanistlikult seletada. Aja jooksul taibati, et seda programmi pole võimalik teostada: väljateooria saavutused muutusid juba nii üllatavateks ning tähtsateks, et neid polnud võimalik asendada mehhanistlike dogmadega. Eetri mehhaanilise mudeli väljatöötamine, teiselt poolt, pakkus ikka vähem ja vähem huvi ja tulemused, tänu oletuste kunstlikule iseloomule, andsid sel teel edasisammumiseks üha vähem julgust.

Ainus väljapääs näib olevat järgmises: võtame lihtsalt teatavaks, et ruumil on olemas füüsikalised omadused, mis võimaldavad elektromagnetiliste lainete levimist, ilma et me hakkaksime selle väite tähenduse üle liiga palju mõtlema. Sõna eeter võime ikka veel kasutada, kuid ainult ruumi füüsikaliste omaduste väljendajana. See sõna on teaduse arenemise jooksul mitu korda oma tähendust

muutnud. Praegu teda osakestest koosneva keskkonna tähenduses enam ei kasutata. Eetri ajalugu, mis pole sellega kaugeltki veel lõppenud, jätkub relatiivsusteooriaga.

## Mehhaaniline taust

Jõudnud oma jutustuses siamaani, tuleb meil uuesti tagasi pöörduda algusesse, inertsiseaduse juurde. Tsiteerime veelkord Galileid:

Iga keha säilitab oma paigalseisu või ühtlase sirgliikumise seni, kuni ta seda olekut jõudude mõjul pole sunnitud muutma.

Kui inertsiseaduse mõte on kord iuba selge, võib tunduda uskumatuna, et selles küsimuses saab veel midagi lisada. Kuigi oleme seda probleemi juba küllalt arutlenud, pole ta kaugeltki veel ammendatud.

Kujutleme tõsist teadlast, kes usub, et inertsiseadust saab otseste eksperimentidega kinnitada või ümber lükata. Ta tõukab väikesi kerakesi mööda horisontaalset lauda, püüdes hõõrdumist vähendada, niipalju kui võimalik. Seejuures ta märkab, et liikumine muutub seda ühtlasemaks, mida siledamad on kuulikesed ja laud. Kuid just siis, kui ta on valmis inertsiseadust sõnastama, mängib keegi talle vingerpussi. Meie füüsik töötab akendeta toas, tal ei ole välisilmaga mingisugust sidet. Vembu korraldaja ehitab niisuguse mehhanismi, mille abil ta saab terve toa tema keskpunkti läbiva telje ümber kiiresti pöörlema panna. Niipea kui pöörlemine algab, märkab füüsik uusi ja ootamatuid asju. Kerake, mis siiani liikus ühtlaselt, püüab nüüd, niipalju kui võimalik, eemalduda toa keskpunktist ja seina äärde veereda. Füüsik ise tunneb imeliku jõu mõju, mis tõukab teda seina poole. Tal on samasugune tunne nagu inimesel, kes istub karusellil või rongis ehk autos kurvi ajal. Kõik varasemad tulemused varisevad nüüd pihuks ja põrmuks.

Koos inertsiseadusega tuleks meie füüsikul üle parda visata ka kõik teised mehhaanikaseadused. Inertsiseadus oli tema lähtekohaks; kui muuta lähtepunkti, muutuvad ka kõik edasised järeldused. Vaatleja, kes peab kogu elu veetma pöörlevas ruumis ja teostama seal kõiki oma katseid, saaks mehhaanikaseadused, mis erinevad meie omadest. Teiselt poolt, kui vaatleja läheks ruumi sügavate

teadmiste ja kindla usuga füüsika printsiipidesse, siis seletaks ta mehhaanikaseaduste näivat muutumist oletusega, et ruum pöörleb. Mehhaanikakatsete abil saaks ta isegi kindlaks teha, missugune on see pöörlemine.

Miks pöörame nii palju tähelepanu pöörlevas ruumis olevale vaatlejale? Lihtsalt sellepärast, et meie oma Maakeral oleme teatud määral samasuguses olukorras. Kopernikust alates teame, et Maa pöörleb ümber oma telje ja tiirleb ümber Päikese. Isegi see lihtne mõte, mida mõistab igaüks, ei jäänud teaduse arenemisest puutumata. Kuid praegu asume Koperniku seisukohale ja jätame selle küsimuse kõrvale. Kui meie pöörlev vaatleja ei saanud mehhaanikaseadusi katseliselt kinnitada, siis pole seda võimalik teha ka meil, kuna me asetseme pöörleval Maakeral. Et Maa pöörleb aga võrdlemisi aeglaselt, on Maa pöörlemise mõju vaevalt märgatav. On muidugi palju katseid, kus ilmnevad väikesed kõrvalekaldumised mehhaanikaseadustest, ja kõigi nende katsete kooskõlastatust võib vaadata kui Maa pöörlemise tõestust.

Kahjuks ei saa me minna kusagile maailmaruumi Päikese ja Maa vahel, et kontrollida seal, kui täpselt kehtib inertsiseadus. Samuti ei saa me vaadelda pöörlevat Maad eemalt. Seda võime teha ainult kujutluses. Kõiki oma katseid saame tegelikult teostada ainult Maakeral, millega on seotud meie elu. Seda tõsiasja väljendatakse teaduslikumas keeles tihti järgmiste sõnadega: *meie koordinaatsüsteemiks on Maa.*

Et selgemini välja tuua nende sõnade sisu, võtame lihtsa näite. Me võime ette arvutada, kus peab olema tornist visatud kivi mingil ajamomendil ja kinnitada seda arvutust vaatlustega. Kui torni kõrvale on asetatud mõõdulatt, siis võime ennustada, missuguse mõõdulati jaotuse kohal on langev keha mingil ajamomendil. Torni ja mõõduskaala materjaliks ei tohi muidugi olla kummi ega mõni teine aine, millega võiks katse jooksul mingisuguseid muutusi toimuda. Põhimõtteliselt on selle katse teostamiseks vaja ainult kõvasti maa külge kinnitatud muutumatut skaalat ja head kella. Kui meil need on olemas, siis ei tarvitse me arvestada näiteks torni arhitektuuri ega isegi torni olemasolu üldse. Kõik eeltoodud oletused on nii endastmõistetavad, et taoliste katsete kirjeldamisel nendest üldse ei räägita. Ent see analüüs näitab, kui palju varjatud oletusi sisaldab iga meie väide. Prae-

gusel juhul me näiteks oletasime, et meil on käepärast jäik mõõdupuu ja ideaalne kell, ilma milleta oleks võimatu kontrollida Galilei seadust vabalt langevate kehade kohta. Mõõdupuu ja kella, nende lihtsate, kuid füüsikas väga tähtsate riistade abil, võime Galilei seadust eksperimentaalsel teel teatud täpsuseni kinnitada. Kui vastavaid katseid hoolikalt teostada, siis avastame aga varsti ebakõla teooria ja eksperimendi vahel, mis on tingitud Maa pöörlemisest või, teiste sõnadega, faktist, et siin formuleeritud mehhaanikaseadused Maaga jäigalt seotud koordinaatsüsteemis rangelt ei kehti.

Kõigis mehhaanikakatsetes, ükskõik mis liiki nad ka ei oleks, tuleb alati määrata materiaalsete punktide asukohti mingil ajamomendil, täpselt samuti, nagu tegime seda ülalkirjeldatud katses langeva kehaga. Kuid asukoht tuleb alati määrata mingisuguse teise keha suhtes; eelkirjeldatud juhul tegime seda torni ja mõõteskaala suhtes. Et teha kindlaks kehade asukohta, peab meil olema mehhaaniline taust, *taustsüsteem*, nagu me seda nimetame. Näiteks majade ja inimeste asukoha määramisel linnas toetume striitide ja avenüüde<sup>1</sup> võrgule, mis moodustabki vajaliku tausta. Mehhaanikaseaduste esitamisel me tausta suhtes siiani erilist muret pole tundnud, sest me elame maakeral ja vajaduse korral pole meil raske fikseerida jäigalt Maa külge kinnitatud tausta. Niisugust tausta, mille suhtes me teostame kõiki oma vaatlusi ja mis koosneb jäikadest, muutumatuks jäävatest kehadest, nimetatakse *koordinaatsüsteemiks*.

Siiani on kõigil meie füüsikasse puutuvatel väidetel olnud üks puudus: me ei pööranud tähelepanu sellele, et kõiki vaatlusi tuleb alati teostada kindlas koordinaatsüsteemis. Selle asemel et koordinaatsüsteemi kirjeldada, me hoopis ignoreerisime tema olemasolu. Näiteks, selle asemel et kirjutada «keha liigub ühtlaselt...», me oleksime pidanud kirjutama «keha liigub ühtlaselt meie poolt valitud koordinaatsüsteemi suhtes...» Kogemused pöörleva toaga õpetavad meile, et mehhaanikakatsete tulemused võivad oleneda valitud koordinaatsüsteemist.

---

<sup>1</sup> Paljudes Ameerika linnades jagavad tänavad linna ruudukujulisteks kvartaliteks. Ühes suunas minevaid tänavaid kutsutakse seejuures striitideks, kuna striitidega risti kulgevaid tänavaid nimetatakse avenüüdeks. — *Tõlk.*

Kui kaks koordinaatsüsteemi pöörlevad teineteise suhtes, siis mehhaanikaseadused ei saa neis mõlemas korraga kehtida. Kui ühe koordinaatsüsteemi külge kinnitatud ujumisbasseinis on veepind horisontaalne, siis veepind teise koordinaatsüsteemi külge kinnitatud basseinis on nõgusa kujuga, umbes samasugune nagu kohvil klaasis, kui seda lusikaga segatakse.

Mehhaanika põhiseaduste formuleerimisel jätsime kahe silma vahele ühe olulise asja: me ei rääkinud sellest, missuguses koordinaatsüsteemis need seadused kehtivad. Kogu klassikaline mehhaanika ripub teatud mõttes õhus, sest me ei tea, missugusel taustal teda käsitleda tuleb. Kuid jätame selle raskuse ajutiselt kõrvale. Oletame, teatud määral küll ebakorrektselt, et klassikalise mehhaanika seadused kehtivad kõigis koordinaatsüsteemides, mis on Maaga jäigalt seotud. Niisuguse oletuse eesmärgiks on ainult koordinaatsüsteemi fikseerimine, selleks et anda meie arutlusele konkreetne sisu. Kuigi meie väide, et Maa sobib taustsüsteemiks, pole päris korrektne, jääme praegu siiski selle juurde peatuma.

Me teeme seega oletuse, et on võimalik leida ühte koordinaatsüsteemi, milles kehtivad mehhaanikaseadused. Kas niisuguseid koordinaatsüsteeme on ainult üks? Valime koordinaatsüsteemiks rongi, laeva või lennuki, mis liigub maapinna suhtes. Kas mehhaanikaseadused on õiged ka nendes uutes koordinaatsüsteemides? Me teame juba, et alati see nii ei ole, näiteks siis, kui rong võtab kurvi, kui laeva pillutab torm või kui lennuk teeb surmasõlmi. Alustame lihtsast näitest. Liikugu mingi koordinaatsüsteem ühtlaselt meie «hea» koordinaatsüsteemi suhtes, s. o. selle koordinaatsüsteemi suhtes, milles kehtivad mehhaanikaseadused. Niisuguseks süsteemiks võib olla näiteks ideaalne rong või ka laev, mis liigub sirgjooneliselt ja muutumatu kiirusega, ilma et ta sugugi kõiguks. Igapäevastest kogemustest teame, et mõlemad süsteemid on «head», s. o. et ühtlaselt liikuv rongis või laeval teostatud füüsikakatsed annavad täpselt samasugused resultaadid kui katsed maapinnal. Kui aga rong peatub või järsku kiirendatult liikuma hakkab, samuti siis, kui meri on tormine, ilmnevad kummalised asjad. Rongis langevad kohvrid pakiriiulitelt alla, laeval kukuvad ümber lauad ja toolid ning reisijad jäävad merehaigeks. Füüsika seisukohalt tähendab kõik toimuv liht-

salt seda, et mehhaanikaseadused ei ole nendes koordinaatsüsteemides rakendatavad, et need on «halvad» koordinaatsüsteemid.

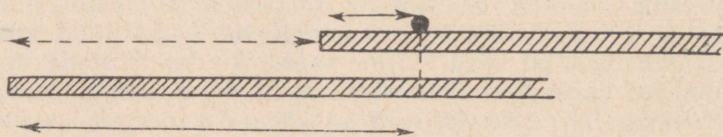
Selle järelduse võime sõnastada nõndanimetatud *Galilei relatiivsuspriintsiibina*: kui mehhaanikaseadused kehtivad ühes koordinaatsüsteemis, siis on nad õiged ka kõigis teistes koordinaatsüsteemides, mis liiguvad esimese süsteemi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Kui meil on kaks koordinaatsüsteemi, mis liiguvad teineteise suhtes mitteühtlaselt, siis mehhaanikaseadused neis mõlemas kehtida ei saa. «Häid» koordinaatsüsteeme, s. o. niisuguseid süsteeme, kus kehtivad mehhaanikaseadused, nimetame *inertsiaalsüsteemideks*. Kas inertsiaalsüsteeme üldse olemas on, pole veel selge. Kui me saame aga leida kas või üheainsa inertsiaalsüsteemi, siis järeldub otsekohe, et neid on lõpmata palju. Iga koordinaatsüsteem, mis liigub selle esimese inertsiaalsüsteemi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, on samuti inertsiaalsüsteem.

Võtame kaks koordinaatsüsteemi, mis lähtuvad mingist punktist ja liiguvad ühtlaselt teatud kiirusega teineteise suhtes. Kes eelistab konkreetseid kujutlusi, võib mõelda siin Maa suhtes liikuvat laeva või rongi. Mehhaanikaseadusi saab eksperimentaalselt ühesuguse täpsusega kinnitada nii maapinnal kui ka ühtlaselt liikuvras rongis või laeval. Teatud raskused tekivad siis, kui erinevatesse süsteemidesse kuuluvad vaatlejad hakkavad võrdlema vaatlusi, mis nad tegid ühe ja sama sündmuse kohta. Kumbki vaatleja tegi vaatlusi oma koordinaatsüsteemi suhtes, kuid nüüd nad tahaksid teise vaatlusi oma koordinaatsüsteemi keelde tõlkida. Lihtne näide: osakese liikumist vaadeldi kahest koordinaatsüsteemist, maapinnalt ja ühtlaselt liikuvalt rongilt. Need mõlemad on inertsiaalsüsteemid. Kas piisab, kui teame, mida nägi vaatleja ühes koordinaatsüsteemis, selleks et öelda, mida võis vaatleja näha teises koordinaatsüsteemis? Seejuures oletame muidugi, et koordinaatsüsteemide omavaheline kiirus ja asend mingil ajamomendil on teada. Sündmuste kirjeldamisel on väga oluline teada, kuidas teostada üleminekut ühest koordinaatsüsteemist teise, sest mõlemad süsteemid on samaväärsed ja sobivad võrdselt loodusahtlaste kirjeldamiseks. Tõepoolest, osutub, et piisab juba sellest, kui teame ühe koordinaatsüsteemi vaatleja

resultaate, sest nendest lähtudes on võimalik ennustada ka teise koordinaatsüsteemi vaatlaja tulemusi.

Käsitleme probleemi abstraktsemalt, ilma rongi ja laevata. Lihtsuse mõttes vaatleme ainult sirgjoonelisi liikumisi. Niisiis, olgu meil mõõteskaalaga varustatud jäik varras ja hea kell. Sirgjoonelise liikumise juhul on varras koordinaatsüsteemiks täpselt samuti, nagu seda oli torni külge kinnitatud mõõdupuu Galilei katses. Selle asemel et rääkida tornidest, seintest, tänavatest jne., on alati lihtsam ja mugavam koordinaatsüsteemi kujutleda sirgliikumise juhul jäiga vardana, meelevaldse liikumise juhul ruumis aga paralleel- ja ristvarrastest moodustatud sõrestikuna. Olgu meil kaks koordinaatsüsteemi, see tähendab antud lihtsal juhul kaks jäika varrast. Asetame ühe varda teise peale ja nimetame neid vastavalt «ülemiseks» ja «alumiseks» koordinaatsüsteemiks. Liikugu need kaks koordinaatsüsteemi kindla kiirusega teineteise suhtes, nii et üks varras libiseb teisel. Igaks juhuks oletame veel, et mõlemad vardad on lõpmata pikad; neil on küll algus, kuid pole lõppu. Kuna aja kulgemine on mõlemas süsteemis ühesugune, siis piisab ühest kellast mõlema süsteemi jaoks. Sel hetkel, kui alustame oma vaatlusi, langegu varraste alguspunktid kokku. Materiaalse punkti asukohta sel momendil iseloomustab mõlemas koordinaatsüsteemis ühesugune arv. Materiaalne punkt on varda mõõteskaala mingi jaotuse kohal; see annab arvu, mis määrab punkti asukoha. Kui aga vardad liiguvad ühtlaselt teineteise suhtes, siis materiaalse punkti asukohta määravad arvud on mõne aja, näiteks ühe sekundi pärast muutunud. Vaatame materiaalselt punkti, mis ülemise varda suhtes on paigal (joonis 53). Arv, mis määrab selle punkti asukoha ülemises koordinaatsüsteemis, jääb siis samuti muutumatuks. Küll aga muutub arv, mis määrab punkti asukoha alumise varda suhtes. Selle asemel et öelda «arv, mis vastab punkti asukohale»,



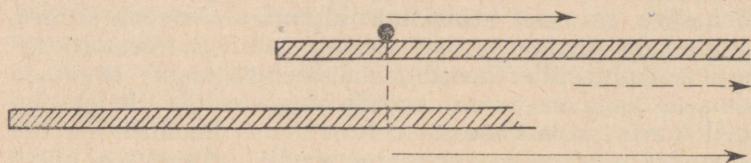
Joon. 53.

ütlemine edaspidi lühidalt *punkti koordinaat*. Lause, mis nüüd järgneb, kõlab küll segaselt, kuid vaadates joonisele on kerge veenduda, et ta on õige ja väljendab midagi väga lihtsat. Et saada punkti koordinaati alumises koordinaatsüsteemis, tuleb liita tema koordinaat ülemises süsteemis ülemise koordinaatsüsteemi alguspunkti koordinaadiga, mis on määratud alumise süsteemi suhtes. Oluline on siinjuures just see, et alati, kui teame osakese asukohta ühes koordinaatsüsteemis, saame arvutada tema asukoha ka teises koordinaatsüsteemis. Selleks on meil tarvis teada kõne all olevate koordinaatsüsteemide omavahelist asendit igal ajamomendil. Kuigi see kõlab hästi targalt ja keerukalt, on tegelikult asi nii lihtne, et kui meil selle arutluse resultaate hiljem tarvis ei tuleks, poleks mõtet selle juures pikemalt peatuda.

Tuleb rõhutada erinevust punkti asukoha ja mingi sündmuse toimumishetke määramise vahel. Igal vaatlejal on oma mõõdupuu, mis moodustab tema koordinaatsüsteemi, kuid kell on kõigil vaatlejatel ühine. Aeg on midagi «absoluutset», mis voolab kõigis koordinaatsüsteemides kõigi vaatlejate jaoks ühesuguselt.

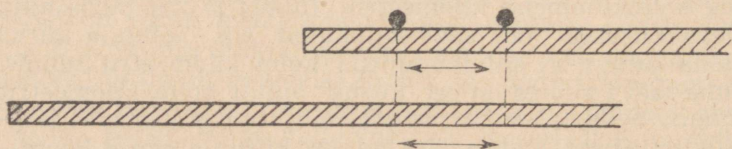
Võtame teise näite. Pika laeva dekil jalutab mees kiirusega kolm kilomeetrit tunnis. See on kiirus laeva suhtes, teisiti öeldes, laevaga jäigalt seotud koordinaatsüsteemi suhtes. Kui laeva kiirus kaldalt mõõdetuna on kogu aeg kolmkümmend kilomeetrit tunnis ja kui mehe ning laeva kiirused on samasuunalised, siis jalutaja kiirus kalda suhtes on kolmkümmend kolm kilomeetrit tunnis, kuna laeva suhtes on see kiirus ainult kolm kilomeetrit tunnis. Selle tulemuse võime üldjuhul sõnastada järgmiselt: liikuva materiaalse punkti kiirus alumise koordinaatsüsteemi suhtes on võrdne kiirusega ülemise süsteemi suhtes, millest on lahutatud või millele on liidetud ülemise koordinaatsüsteemi kiirus alumise süsteemi suhtes; liita või lahutada tuleb vastavalt sellele, kas kiirused on sama- või vastassuunalised (joonis 54). Niipea kui teame kahe koordinaatsüsteemi suhtelist kiirust, võime alati teisendada nii asukoha kui ka kiiruse ühest koordinaatsüsteemist teise. Asukohad ehk koordinaadid ja kiirused on näited niisugustest suurustest, mis erinevates koordinaatsüsteemides on erinevate väärtustega. Need väärtused on omavahel seotud aga kindlate teisenduseeskirjadega, mis antud juhul on väga lihtsad.

On siiski olemas ka suurusi, mis üleminekul ühest koordinaatsüsteemist teise ei muutu, nii et teisenduseeskirju nende suuruste jaoks pole vaja. Võtame üheks niisuguseks näiteks mitte enam ühe, vaid kaks kindlat punkti ülemisel vardal ja vaatame kaugust nende punktide



Joon. 54.

vahel. See kaugus on võrdne punkte määravate koordinaatide vahega. Üleminekul ühest koordinaatsüsteemist teise peame kasutama teisenduseeskirju. Et aga mõlemad koordinaadid muutuvad ühesuguse suuruse võrra, siis koordinaatide vahe moodustamisel see suurus koondub välja, s. o. üleminekul ühest koordinaatsüsteemist teise jääb koordinaatide vahe muutumatuks (joonis 55). Kaugus kahe punkti vahel on seega *invariant*, see tähendab koordinaatsüsteemi valikust sõltumatu suurus.



Joon. 55.

Järgmine näide koordinaatsüsteemist sõltumatu suuruse kohta on kiiruse muutus, hästituntud mõiste mehaanikast. Võtame jälle sirgjooneliselt liikuva materiaalse punkti ja käsitleme teda kahes koordinaatsüsteemis. Kiiruse muutuse arvutamiseks tuleb mõlemas koordinaatsüsteemis olevatel vaatlejatel mõõta kiirust kahel ajamomendil ja moodustada nende mõõtmistulemuste vahe. See osa kiirusest, mis on tingitud ühe koordinaatsüsteemi ühtlasest liikumisest teise suhtes, koondub niisuguse vahe moodustamisel jällegi välja. Kiiruse muutus on

seega invariant, kuid seda ainult tingimusel, et koordinaatsüsteemide omavaheline liikumine on ühtlane. Mitteühtlase liikumise korral on kiiruse muutus igas koordinaatsüsteemis isesugune, sest koordinaatsüsteeme kujutavate varraste kiirus teineteise suhtes muutub.

Nüüd viimane näide. Olgu meil kaks materiaalselt punkti, mis on seotud ainult kaugusest olenevate jõududega. Sirgliikumise korral on kaugus punktide vahel invariantne, järelikult on invariantne ka jõud. Newtoni seadus, mis seob kiiruse muutust jõuga, peab seega kehtima mõlemas koordinaatsüsteemis. Jõudsume veel kord järeldusele, mida kinnitab igapäevane kogemus: kui mehhaanikaseadused kehtivad ühes koordinaatsüsteemis, siis on nad õiged ka kõigis teistes süsteemides, mis liiguvad esimese suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt. See oli muidugi väga elementaarne näide. Me vaatasime ainult sirgliikumise juhtu, mis andis meile võimaluse kujutada koordinaatsüsteemi jäiga vardana. Kuid saadud järeldused on üldkehtivad. Sõnastame nad järgmiselt:

1. Me ei tea ühtki viisi inertsiaalsüsteemi leidmiseks. Kui aga üks inertsiaalsüsteem on antud, saame leida neid lõpmatu hulga, sest kõik üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvad koordinaatsüsteemid on sel juhul inertsiaalsüsteemid, kui üks nendest on seda.

2. Mingile sündmusele vastav aeg on kõigis koordinaatsüsteemides ühesugune, koordinaadid ja kiirused on aga erinevad ja muutuvad vastavalt teisenduseeskirjadele.

3. Üleminekul ühest koordinaatsüsteemist teise muutuvad küll koordinaadid ja kiirused, kuid jõud ja kiiruse muutus jäävad invariantseks. Seetõttu jäävad teisenduste suhtes invariantseks ka mehhaanikaseadused.

Siinsõnastatud teisendusi koordinaatide ja kiiruste jaoks nimetame klassikalise mehhaanika teisendusteks või lühemalt *klassikalisteks teisendusteks*.

## Eeter ja liikumine

Galilei relatiivsuspriintiip on õige mehhaanikanähtuste korral: kõigis üksteise suhtes liikuvates inertsiaalsüsteemides kehtivad ühesugused mehhaanikaseadused. Kas sama priintiipi saab rakendada ka mittemehhaanikaliste nähtuste korral, näiteks neil juhtudel, kus mängib olulist osa välja mõiste? Kõik selle probleemi ümber rühmitu-

vad küsimused viivad meid otsekohe relatiivsusteooria lähtekohtade juurde.

Tuletame meelde, et valguse kiirus vaakuumis või, teisisi öeldes, eetris on 300 000 kilomeetrit sekundis ja et valgus on eetris leviv elektromagnetiline laine. Elektromagnetiline väli kannab energiat, mis pärast valgusallikast kiirgumist eksisteerib iseseisvalt. Kuigi me teame hästi eetri mehhaanilise struktuuri seletamisel tekkivaid raskusi, vaatame eetrile esialgu siiski kui keskkonnale, milles levivad elektromagnetilised lained ja järelikult ka valguslained.

Me viibime kinnises toas, mis on välismaailmast nii hästi isoleeritud, et õhk temast väljuda ei saa, samuti ei saa välisõhk tuppa tungida. Oletame, et istume ühel kohal paigal ja räägime juttu. Füüsika keeles tähendab see, et me tekitame häälelaineid, mis levivad õhus hääle kiirusega paigalseisva hääleallika ümber. Kui suu ja kõrva vahel puuduks õhk või mõni muu keskkond, siis me häält ei kuuleks. Katse näitab, et tuule puudumisel, s. o. juhul, kui õhk valitud koordinaatsüsteemi suhtes ei liigu, on hääle kiirus kõigis suundades ühesugune.

Kujutleme nüüd, et meie tuba liigub ruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Väljaspool asetsev vaatleja näeb läbi liikuva toa (või rongi, kui soovite) klaasseina kõi ke, mis toimub sees. Toas istuva vaatleja mõõtmistulemustest saab ta arvutada hääle kiiruse liikuva toa ümbrusega seotud koordinaatsüsteemi suhtes. See on vana probleem, mille juures me oleme korduvalt peatunud: kiiruse määramine ühes koordinaatsüsteemis, kui see teises süsteemis on teada.

Toas istuv vaatleja kuulutab: hääle kiirus minu suhtes on kõigis suundades ühesugune.

Välimine vaatleja ütleb: liikuv asjas toas leviva hääle kiirus minu koordinaatsüsteemi suhtes ei ole kõigis suundades ühesugune — toa liikumise suunas on see suurem kui harilik hääle kiirus, vastupidises suunas aga väiksem.

Need järeldused tulenevad klassikalistest teisendus-eeskirjadest ja neid on võimalik katse abil kontrollida. Tuba viib oma liikumisel kaasa temas oleva materiaalse keskkonna — õhu, milles levivad häälelained. Hääle liigub seetõttu toas istuja suhtes ühesuguse, välise vaatleja suhtes aga teistsuguse kiirusega.

Teooriast, mis käsitleb häält kui materiaalses keskkon-

nas levivat lainet, võime teha veel mõningaid järeldusi. Kui me näiteks ei taha kuulda seda, mida ütleb kõneleja, siis võime toimida järgmisel, tõi küll, mitte väga lihtsal viisil: hakkame kõnelejast nii väledalt eemalduma, et meie kiirus õhu suhtes on hääle kiirusest suurem. Siis häälelained meie kõrvu kunagi ei jõua. Vastupidi, kui laseme kõrvust mööda mõne tähtsa sõna, mida enam ei korrata, siis võime tormata häälest kiiremini häälelainele järele, püüda ta kinni ja kuulata, mis sõna see oli. Neis võimalustes pole midagi mõistusevastast, probleem on ainult selles, et mõlemal juhul tuleb meil liikuda kiirusega umbes 350 meetrit sekundis. Me võime olla kindlad, et tehnika arenemine annab tulevikus võimaluse niisuguste kiiruste saavutamiseks. Püssist tulistatud kuul liigubki juba kiiremini kui hääli; niisuguses kuulis istuv mees ei kuuleks kunagi lasku ennast.

Kõik need näited kuuluvad puhtalt mehhaanika valdkonda. Meie ees kerkib nüüd väga oluline küsimus: kas kõike seda, mida praegu rääkisime häälelainest, võib öelda ka valguslaine kohta? Kas Galilei relatiivsuspriin- siipi ja klassikalisi teisendusi saab optika- ja elektrinähtuste korral sama edukalt rakendada kui mehhaanika- kaski? Vastata neile küsimustele lihtsalt «jah» või «ei», ilma et sügavamalt nende sisusse tungiksimise, oleks kau- nis riskantne.

Välimise vaateleja suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuv asjus leviva häälelaine juhul olid meil järelduste tegemisel väga olulised järgmised momendid: liikuv tuba viib kaasa õhu, milles levib hääli, kiirused kahes koordinaatsüsteemis, mis liiguvad teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, on seotud klassikaliste teisendus- tega.

Valguse korral tuleb sama probleem sõnastada veidi teisiti. Nüüd toas olevad vaatelejad enam ei vestle, vaid saadavad igas suunas välja valgussignaale. Teeme jällegi oletuse, et valgusallikad on toas kogu aeg paigal. Valgus- lained liiguvad eetris nagu häälelained õhus.

Tuba viib oma liikumisel õhu kaasa. Kas ta teeb seda ka eetriga? Niikaua kui meil puudub eetri mehhaaniline mudel, on sellele küsimusele väga raske vastata. Kui tuba on kinnine, siis peab temas olev õhk kaasa liikuma. On selge, et eetriga see nii ei tarvitse olla, sest kogu materia asetseb eetris ja on eetriga läbi imbunud. Eetri jaoks pole olemas suletud uksi. «Liikuv tuba» tähendab

nüüd ainult liikuvat koordinaatsüsteemi, mille külge on jäigalt kinnitatud valgusallikas. Me võime siiski kujutada, et tuba viib oma liikumisel koos valgusallikaga kaasa ka eetri analoogiliselt sellega, nagu liigub kinnises toas õhk koos hääleallikaga. Kuid samahästi võime kujutada ka vastupidist: tuba liigub läbi eetri nagu laev täiuslikult siledal merel, ta läheb keskkonnaosakeste vahelt läbi, ilma et ta ühtki neist kaasa viiks. Esimesel juhul viib koos valgusallikaga liikuv tuba kaasa ka eetri. Siin võime kasutada analoogiat häälelainelega ja jõuda ka samasugustele järeldustele. Teisel juhul koos valgusallikaga liikuv tuba eetrit kaasa ei vii. Analoogiat häälelainelega siin kasutada ei saa ja järeldused, millele jõudisime häälelaine uurimisel, valguslaine korral ei kehti. Need on kaks äärmist võimalust. Võime muidugi kujutada veel palju keerulisemat juhtu, kus koos valgusallikaga liikuv tuba viib eetri ainult osaliselt kaasa. Kuid keerulisema juhu juures pole mõtet peatuda enne, kui on selge, mida ütleb eksperiment lihtsamate võimaluste kohta.

Algame esimese võimalusega, s. o. oletame korraks, et valgusallikaga jäigalt seotud tuba viib oma liikumisel kaasa ka eetri. Kui me uskusime lihtsate teisenduseeskirjade kehtivusse häälelainele omaste kiiruste korral, siis samahästi võime rakendada saadud järeldusi ka valguslaine puhul. Pole mingisugust põhjust kahelda lihtsas mehhaanika teisenduses, mis ütleb ainult seda, et ühel juhul tuleb kiirused liita, teisel juhul lahutada. Seepärast oletamegi, et koos valgusallikaga liikuv tuba viib kaasa ka eetri ja et klassikalised teisendused on õiged ka valguse korral.

Kui valgusallikas on jäigalt lae külge kinnitatud ja ma süütan toas tule, siis valgussignaali kiirus toas on 300 000 kilomeetrit sekundis, suurus, mida me oma katsetest hästi teame. Välimine vaatleja näeb aga tuba, järelikult ka valgusallikat, liikuvana. Et tuba viib kaasa samuti eetri, siis peab ta järeldama, et valguse kiirus välise koordinaatsüsteemi suhtes oleneb suunast — toa liikumise suunas on see suurem kui harilik valguse kiirus, vastupidises suunas aga väiksem. Siit järeldub: kui koos valgusallikaga liikuv tuba viib kaasa ka eetri ja kui kehtivad mehhaanikaseadused, siis peab valguse kiirus olenema valgusallika liikumise kiirusest. Liikuvast val-

gusallikast silma langeva valguse kiirus on suurem siis, kui allikas meile läheneb, ja väiksem siis, kui ta meist eemaldub.

Kui me liiguksime valgusest kiiremini, siis peaks meil olema võimalik valgussignaali eest ära joosta. Tabades juba varem väljasaadetud valguslaineid, võiksime näha minevikusündmusi. Me püüaksime neid laineid ainult vastupidises järjekorras sellele, kuidas nad välja saadeti ja Maal toimuvaid sündmusi näeksime nagu filmi, mis algab õnneliku lõpuga ja jookseb tagurpidi. Kõik niisugused järeldused tulenevad oletustest, et liikuv koordinaatsüsteem viib kaasa ka eetri ja et mehhaanikaseadused on õiged. Analoogia valguse ja hääle vahel oleks sel juhul täielik.

Kuid pole teada ühtegi fakti, mis kinnitaks neid järeldusi. Vastupidi, kõik vaatlused, mis teostati nende järelduste kontrollimise eesmärgil, andsid just vastupidise tulemuse. Valguse erakordselt suurest kiirusest tingituna esineb niisugustes katsetes küll terve rida tehnilisi raskusi, mistõttu mõõtmisi saab ainult kaudselt teostada, kuid katsetulemuste õigsuses ei saa olla vähimatki kahtlust. *Valguse kiirus on kõigis koordinaatsüsteemides alati ühesugune sõltumata sellest, kas valgusallikas liigub või kuidas ta liigub.*

Me ei hakka siin üksikasjaliselt kirjeldama neid paljusid eksperimente, mis viisid sellele olulisele järeldusele. Kuid me võime esitada mõningaid väga lihtsaid kaalutlusi, mis küll ei tõesta valguse kiiruse sõltumatust valgusallika liikumisest, kuid panevad meid uskuma, et see tõepoolest nii on.

Maa ja teised planeedid meie päikesesüsteemis liiguvad ümber Päikese. Me ei tea, kas on olemas ka teisi päikesesüsteeme, mis sarnaneksid meie omaga. Igal juhul esineb aga väga palju kaksiktähti, kahest tähest koosnevaid süsteeme, kus tähed liiguvad ümber ruumipunkti, mida nimetatakse kaksiktähe masskeskmeks. Kaksiktähtede liikumise vaatlused näitavad, et Newtoni gravitatsiooniseadus kehtib ka siin. Oletame nüüd, et valguse kiirus oleneb valgust kiirgava keha kiirusest. Siis signaal, s. o. valguskiir tähelt, tuleks meieni kiiremini või aeglasemalt, olenevalt sellest, missugune oli tähe liikumise kiirus valguse kiirgamise hetkel. Sel juhul näiks kogu liikumine meile korrapäratuna ja kaugete kaksiktähtede

puhul ei saaks me kuidagi avastada sama gravitatsiooni-seadust, mis juhib meie planeetidesüsteemi.

Vaatame teist katset, mille aluseks on väga lihtne idee. Kujutleme kiiresti pöörlevat ratast. Vastavalt meie oletusele võtab ratta pöörlemisest osa ka ratast ümbritsev eeter. Ratta lähedalt mööduva valguse kiirus peaks siis olenema sellest, kas ratas pöörleb või on paigal. Valguse kiirus seisvas eetris peaks erinema valguse kiirusest pöörleva ratta poolt liikuma pandud eetris, analoogiliselt sellega, nagu erineb hääle kiirus tuulevaiksel päeval hääle kiirusest tuulise ilmaga. Kuid niisugust erinevust pole avastatud! Kuidas me probleemile ka ei läheneks või missuguseid katseid me ka ei korraldaks, ikka satume vastuollu oletusega, et kehad haaravad oma liikumisel kaasa eetri. Nii jõuame järeldusele, mida kinnitavad ka palju üksikasjalisemad ja keerukamad katsed: valguse kiirus ei olene valgusallika liikumisest; pole õige oletada, et liikuv keha viib kaasa teda ümbritseva eetri.

Analoogiast häälelainete ja valguslainete vahel tuleb seega loobuda. Hakkame uurima teist võimalust: materia liigub läbi eetri, ilma et eeter sellest liikumisest mingil määral osa võtaks. See oletus tähendab, et on olemas eetrimeri, mille suhtes kõik koordinaatsüsteemid kas liiguvad või on paigal. Jätame esialgu kõrvale küsimuse, kas eksperiment seda teooriat kinnitab või lükkab ümber. Uurime parem lähemalt selle uue oletuse tähendust ja järeldusi, millele ta viib.

Oletame niisiis, et on olemas eetrimere suhtes liikumatu koordinaatsüsteem. Mehhaanikas me ei saa üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvatest koordinaatsüsteemidest ühtegi eelistada. Kõik niisugused süsteemid on võrdselt «head» või «halvad». Kui meil on kaks teineteise suhtes ühtlaselt liikuvat koordinaatsüsteemi, siis mehhaanika seisukohalt pole mõtet küsida, missugune neist süsteemidest liigub, missugune on paigal. Vastavalt Galilei relatiivsuspriprintsibile saame rääkida ainult suhtelisest ühtlasest sirgliikumisest. Mida mõeldakse väitega, et peale *suhtelise* liikumise on olemas veel *absoluutne* liikumine? Lihtsalt seda, et on olemas üks kindel koordinaatsüsteem, milles mõned loodusseadused avalduvad teisiti kui teistes koordinaatsüsteemides. Võrreldes siis oma koordinaatsüsteemis kehtivaid seadusi seadustega selles süsteemis, mis teiste hulgast ainsana

on esile tõstetud, saab iga vaatleja kindlaks teha, kas tema koordinaatsüsteem liigub või mitte. Olukord oleks siis teistsugune, kui on klassikalises mehhaanikas, kus väljendusel «absoluutne ühtlane sirgliikumine» pole mingit mõtet.

Kui oletame, et liikumine läbi eetri on võimalik, mida võime siis öelda väljaga seotud nähtuste kohta? See tähendaks, et on olemas üks teiste hulgast esile tõstetud koordinaatsüsteem — see on eetrimere suhtes liikumatu süsteem. On selge, et mõned looduseadused peavad selles süsteemis avalduma erinevalt, sest vastasel korral kaotaks väljendus «liikumine läbi eetri» igasuguse mõtte. Kui kehtib Galilei relatiivsuspriintiip, siis liikumisel läbi eetri pole üldse mõtet. Neid kahte asja omavahel kooskõlastada ei saa. Kui peaks aga selguma, et on olemas üks kindel eetriga määratud koordinaatsüsteem, siis väljendused «absoluutne liikumine» või «absoluutne paigalolek» omandavad piiritletud mõtte.

Tegelikult meil siin midagi valida ei olegi. Me oletasime, et süsteemid viivad oma liikumisel eetri kaasa ja püüdsime sel teel päästa Galilei relatiivsuspriintiipi, kuid see viis vastuollu eksperimendiga. Jääb ainult üle loobuda Galilei relatiivsuspriintiibist ja kontrollida teist oletust, et kõik kehad liiguvad läbi liikumatu eetrimere.

Vaatame nüüd, missugustele järeldustele viib Galilei relatiivsuspriintiibile vasturääkiv oletus, et liikumine toimub läbi eetri. Mida ütleb eksperiment nende järelduste kohta? Vastavaid katseid on küll lihtne kujutleda, kuid väga raske teostada. Õnneks huvitavad meid siin ainult ideed, seetõttu tehniliste raskustega kokkupuutumist pole karta.

Pöördume jälle tagasi liikuva toa ja kahe vaatleja juurde. Üks vaatlejatest olgu toas, teine väljas, kusjuures välimine vaatleja esindagu eetrimerega määratud koordinaatsüsteemi. See on eelistatud süsteem, milles valgus levib kõigis suundades ühe ja sellesama standardkiirusega. Kõik valgusallikad, sõltumatult sellest, kas nad liiguvad eetrimeres või on paigal, annavad ühesuguse kiirusega levivat valgust. Tuba liigub koos oma vaatlejaga läbi eetri. Oletame, et toa keskel olev valgusallikas kord süttib, kord kustub. Toa seinad olgu läbipaistvad, nii et valgussignaali kiiruse mõõtmine on võimalik nii sisemisel kui ka välimisel vaatlejal. Kui küsime mõle-

malt vaatlejalt vaatlustulemusi, siis vastused kõlaksid umbes nii:

*Välimine vaatleja:* Minu koordinaatsüsteem on määratud eetrimerega. Valguse kiirus minu süsteemis on kõigis suundades ühesugune. Mulle pole oluline, kas valgusallikas ja teised kehad liiguvad või mitte, sest minu eetrimerd nad endaga seejuures kaasa ei vii. Minu koordinaatsüsteem on kõigi teiste süsteemide hulgast esile tõstetud ja valguse kiirus temas peab alati olema ühesugune, olenemata valguskiire suunast või valgusallika liikumisest.

*Sisemine vaatleja:* Minu tuba liigub läbi eetrimere. Tema eesmine sein eemaldub valgusest, kuna tagumine sein läheneb sellele. Kui tuba liiguks eetrimere suhtes valguse kiirusega, siis toa keskel olevast allikast kiirgunud valgus eesmise seinani kunagi ei jõuaks, sest see eemaldub valgusest sama kiirusega, kui valgus talle järele tuleb. Kui tuba liigub valgusest aeglasemalt, siis toa keskel asetsevast allikast väljunud valgus ei jõua kõigi seinteni üheaegselt. Seinani, mis liigub valguslainele vastu, jõuab valgus varem kui teise seinani, mis tema eest põgeneb. Siit järeldus: kuigi valgusallikas on järgalt seotud minu koordinaatsüsteemiga, ei ole valguse kiirus kõigis suundades ühesugune. See on väiksem eetrimere suhtes toimuva liikumise suunas, sest sein eemaldub, kuna vastupidises suunas on see suurem, sest sein liigub valguskiirele vastu, aidates kaasa kiiremale kohtumisele temaga.

Valguse kiirus on seega kõigis suundades ühesugune ainult ühes koordinaatsüsteemis, mis on määratud eetrimerega. Kõigis teistes, eetrimere suhtes liikuvates koordinaatsüsteemides on valguse kiirus suunast, milles mõõtmisi teostatakse.

Kirjeldatud eksperiment annaks meile lõpliku otsuse teooria kohta, mis tugineb oletusele eetrimere suhtes liikuvatest kehadest. Loodus ongi andnud meie käsutusse küllalt suure kiirusega liikuva süsteemi — ümber Päikese tiirleva Maa. Kui meie oletus on õige, siis peab valguse kiirus Maa liikumise suunas erineva valguse kiirusest vastupidises suunas. Selle kiiruste erinevuse võib arvutada ja siis mõelda välja sobiva eksperimendi, mis annaks võimaluse neid arvutusi kontrollida. Et teooriast järgnev aegade erinevus on väike, tuleb selle mõõtmiseks luua väga teravmeelseid katseseadeldisi. Kuulsas

Michelson-Morley katses seda tehtigi. Tulemuseks oli «surmaotsus» teooriale, mis oletas materia liikumist vaikselt eetrimere suhtes. Mitte mingisugust valguse kiiruse olenevust suunast ei avastatud. Eetrimere teooria kohaselt peaksid liikuvast koordinaatsüsteemis olenema suunast peale valguse kiiruse ka veel teised väljaprotseesid. Kõik katsed, mis võeti ette niisuguste efektide avastamiseks, andsid samuti negatiivse tulemuse nagu Michelson-Morley katsegi. Mitte kõige väiksematki olenevust Maa liikumise suunast ei avastatud.

Olukord muutus järjest tõsisemaks. Oli kontrollitud läbi kaks oletust. Esimene neist rääkis sellest, et liikuvad kehad viivad endaga kaasa ka eetri. See oletus oli vastuolus faktiga, et valguse kiirus ei sõltu valgusallika liikumisest. Teine oletus seisnes selles, et on olemas eelistatud koordinaatsüsteem ja et kehad liiguvad läbi vaikselt eetrimere ilma eetrit kaasa viimata. Sel juhul ei kehtiks Galilei relatiivsuspriintiip ja valguse kiirus ei saaks olla kõigis koordinaatsüsteemides ühesugune. Ka see oletus oli eksperimendiga vastuolus.

Prooviti luua kunstlikuma iseloomuga teooriaid, oletades, et tõde asub kusagil eelkäsitletud kahe võimaluse vahepeal: liikuvad kehad viivad eetri ainult osaliselt kaasa. Kuid kõik niisugused püüded kukkusid läbi! Nurjusid kõik katsed seletada elektromagnetismi nähtusi liikuvast koordinaatsüsteemis, ükskõik kas oletati eetri liikumist, liikumist läbi eetri või mõlemaid samaaegselt.

Nii tekkis üks kõige dramaatilisematest situatsioonidest teaduse ajaloos. Ükskõik missuguseid oletusi eetri kohta ka ei tehtud, ikka lõppes kõik nurjumisega! Eksperimendi kohtuotsus oli alati negatiivne. Kui vaadata tagasi füüsika ajaloole, siis näeme, et varsti pärast oma sündimist muutus eeter füüsikaliste substantside perekonnas «kirstu-naelaks». Kõigepealt selgus, et lihtsat mehhaanilist mudelit eetri jaoks konstrueerida pole võimalik. See mõte tuli varsti kõrvale heita. Just sellest oli suurel määral tingitud mehhanistliku vaate kokkuvarisemine. Teiseks tuli jätta lootus määrata eetri abil ühte eelistatud koordinaatsüsteemi, mis oleks meil lubanud rääkida peale suhtelise liikumise ka absoluutsest liikumisest. Kui mitte arvestada lainete levimise fakti, oleks see olnud ainukeseks võimaluseks, kuidas märgata ja tõestada eetri olemasolu. Kuid

kõik püüded muuta eeter reaalsuseks kukkusid läbi. Eeter ei reetnud meile ei oma mehhaanilist struktuuri ega ka absoluutset liikumist. Kõigist eetri omadustest jäi järele ainult see, mille pärast ta teooriasse toodi, — olla keskkonnaks, kus levivad elektromagnetilised lained. Püüded avastada eetri füüsikalisi omadusi viisid raskustele ja vasturääkivustele. Pärast niisuguseid kurbi kogemusi on aeg eetrit täielikult unustada ja püüda edaspidi tema nime mitte kunagi enam suhu võtta. Selle asemel ütleme lihtsalt: ruumil on füüsikalisi omadusi, mis võimaldavad lainete levimist temas. Sellega oleme vältinud sõna, mille otsustasime unustada.

Tegelikult ühe sõna väljaviskamine sõnastikust ei aita meid veel sugugi. Raskused on selleks liiga sügavale ulatuvad, et neid sel viisil lahendada.

Kirjutame nüüd üles eksperimentaalselt kindlakstehtud faktid, ilma et me enam mõtleks «e. . . ri» probleemist.

1. Valguse kiirus tühjas ruumis on alati ühesugune, sõltumatult valgusallika või valguse vastuvõtja liikumisest.

2. Kahes teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvast koordinaatsüsteemis on kõik looduseadused täpselt ühesugused. Seetõttu pole olemas ühtki võimalust, kuidas määrata absoluutset ühtlast sirgliikumist.

On teada palju katseid, mis kinnitavad eeltoodud printsiipe 1 ja 2. Samal ajal pole teada ühtki katset, mis oleks ükskõik kummaga neist vastuolus. Esimene printsiip väljendab valguse kiiruse konstantset iseloomu, kuna teine üldistab mehhaanikas formuleeritud Galilei relatiivsuse printsiibi kõigile looduses toimuvatele protsessidele.

Mehhaanikas me nägime: kui materiaalse punkti kiirus ühes koordinaatsüsteemis on niisugune ja niisugune, siis teises koordinaatsüsteemis, mis liigub esimese suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, on tema kiirus erinev. See järgneb lihtsatest mehhaanika teisenduseeskirjadest. Seda ütleb meile ka vahetu intuitsioon (inimene, kes liigub laeva ja kalda suhtes), nii et mingisugust viga siin olla ei tohiks. Kuid see teisenduseeskiri on vastuolus valguse kiiruse konstantsusega. Teisiti öeldes, meil tuleks eeltoodud printsiipidele lisada veel kolmas:

3. Üleminekul ühest inertsiaalsüsteemist teise teisevad asukohad ja kiirused vastavalt klassikalistele teisenduseeskirjadele.

Vastuolu on ilmne. Pole võimalik omavahel kooskõlastada printsiipe 1, 2 ja 3.

Klassikalised teisendused näivad olevat selleks liiga endastmõistetavad ja lihtsad, et neid muuta. Me juba proovisime muuta printsiipe 1 ja 2, kuid sattusime vastuollu eksperimendiga. Kõik «e. . . ri» liikumisteteoriat nõuavad kahe esimese printsiibi muutmist, kuid see ei vii meid kuhugi. Me veendume veel kord selles, et raskused on suured. Nende lahendamiseks on tarvis uut juhtideed. Selle leiame oletuses, et *printsübid 1 ja 2 tuleb õigeks lugeda*, kusjuures, nii veider kui see ka ei näi, *peame loobuma printsüübist 3*. Uus juhtidee saab alguse kõige lihtsamate ja põhilisemate mõistete analüüsist. Me näitame, kuidas see analüüs kõrvaldab kõik raskused ja sunnib meid oma vanu vaateid muutma.

### Aeg, pikkus, relatiivsus

Uuteks oletusteks olgu meil siis:

1. *Valguse kiirus vaakuumis on kõigis üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvates koordinaatsüsteemides ühesugune.*

2. *Kõigis üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvates koordinaatsüsteemides avalduvad kõik loodusseadused ühesuguselt.*

Nende kahe oletusega algab *relatiivsusteooria*. Siitpeale me ei kasuta enam klassikalisi teisendusi, sest teame, et nad on vastuolus meie oletustega.

Nagu teaduses alati, nii on ka siin oluline loobuda sügavale juurdunud, tihti ilma igasuguse kriitikata korrutatavatest eelarvamustest. Kuna nägime, et printsiipide 1 ja 2 muutmise viib eksperimendiga vastuollu, siis peab meil olema julgust lugeda need printsiibid õigeteks ja rünnata üht võimalikku nõrka punkti — eeskirju, mis annavad asukohtade ja kiiruste teisenemise ühest koordinaatsüsteemist teise. Meie eesmärgiks on nüüd teha järeldusi oletustest 1 ja 2, vaadata, kus ja kuidas on need oletused vastuolus klassikaliste teisendustega ja leida tulemuste füüsikaline mõte.

Kasutame veel kord näidet liikuvast toast koos sisemise ja välimise vaatlejaga. Kiirgugu jälle toa keskelt valgussignaali ja küsime jälle kahe vaatleja mõõtmisresultaate.

Seejuures peame silmas ainult kahte eeltoodud printsiipi ja unustame kõik, mida räägiti eespool valguse levimiskeskonnast. Vaatlejate vastused oleksid siis järgmised:

*Sisemine vaatleja:* Toa keskelt lähtunud valgussignaal jõuab kõikide seinteni *samaaegselt*, sest kõik seinad on valgusallikast võrdsetel kaugustel ja valguse kiirus on kõigis suundades ühesugune.

*Väliline vaatleja:* Minu süsteemis on valguse kiirus täpselt sama suur kui toaga koosliikuva vaatleja süsteemis. Kas valgusallikas minu koordinaatsüsteemi suhtes liigub või mitte, pole oluline, sest tema liikumine ei muuda valguse kiirust. Kõik, mis ma näen, on valgussignaali liikumine ühesuguse standardkiirusega kõigis suundades. Üks seintest püüab eemalduda valgussignaalist, selle vastassein aga läheneda temale. Eemalduva seinani jõuab valgussignaal seetõttu veidi hiljem kui läheneva seinani. Kui toa kiirus on väike võrreldes valguse kiirusega, siis on see hiline mine küll vaevumärgatav, ent oluline on, et liikumise suunaga risti asetsevatele seintele ei jõua valgussignaalid mingil juhul samaaegselt.

Võrreldes mõlema vaatleja vastuseid, jõuame äärmiselt üllatavale tulemusele, mis on ilmses vastuolus klassikalise füüsika hästi põhjendatud seisukohtadega. Kaks sündmust, s. o. kahe valguskiire jõudmine vastasseintele, on sisemise vaatleja jaoks samaaegsed, kuna välimisele vaatlejale nad seda ei ole. Klassikalises füüsikas oli meil üks kell, ühesugune ajakulg kõigis koordinaatsüsteemides. Aeg ja seega ka niisugused sõnad, nagu «samaaegne», «varem», «hiljem», olid absoluutse tähendusega, s. o. sõltumatud koordinaatsüsteemist. Kaks sündmust, mis olid samaaegsed ühes koordinaatsüsteemis, olid seda tingimata ka kõigis teistes koordinaatsüsteemides.

Oletuste 1 ja 2 vastuvõtmine, s. o. relatiivsusteooria, sunnib meid niisugusest seisukohast loobuma. Me kirjeldasime kahte sündmust, mis toimusid ühes koordinaatsüsteemis samaaegselt, teises koordinaatsüsteemis aga erinevatel ajamomentidel. Meie eesmärgiks on nüüd saada aru, mida see tähendab, s. o. mõista järgmise lause mõtet: «Kaks sündmust, mis on ühes koordinaatsüsteemis samaaegsed, ei tarvitse seda olla teises koordinaatsüsteemis.»

Mida me mõtleme sõnadega «kaks samaaegset sündmust ühes koordinaatsüsteemis»? Igaühele tundub, et ta intui-

tiivselt taipab selle lause tähendust. Kuid oleme ettevaatlikud ja püüame anda ranget definitsiooni. Me teame, kui suureks hädaohuks on intuitsiooni ülehindamine. Vastame kõigepealt lihtsale küsimusele:

Mis asi on kell?

Primitiivne subjektiivne ajatunne võimaldab meil korradada oma muljeid, otsustada selle üle, missugune sündmus toimus varem, missugune hiljem. Kui me tahame aga näidata, et ajavahemik kahe sündmuse vahel on näiteks 10 sekundit, on meil tarvis kella. Kella kasutamine muudab aja mõiste objektiivseks. Kellaks võib olla mis tahes füüsikaline nähtus, kui me teda ainult nii palju kordi järjest korrata saame, kui see meile vajalik on. Võttes ajaühikuks ajavahemiku niisuguse nähtuse alguse ja lõpu vahel, saame kõiki teisi ajavahemikke mõõta selle protsessi kordamise abil. Kõik kellad, alates lihtsast liivakellast ja lõpetades kõige täiuslikumate kronomeetritega, tuginevad sellele ideele. Liivakella kasutamisel on ajaühikuks aeg, mis kulub liival ülemisest klaasist alumisse voolamiseks. Sama füüsikalist protsessi saab korrata, kui pöörame klaasi ümber.

Kahes teineteisest eemal olevas ruumpunktis asetsegu kaks ideaalset kella, mis näitavad täpselt sama aega. Niisugune olukord on võimalik, kuigi ta nõuaks väga hoolikat kontrollimist. Mida see aga tegelikult tähendab? Kuidas saame olla kindlad, et kaks teineteisest eemalolevat kella näitavad alati sama aega? Üheks võimalikuks meetodiks oleks siin televisioon. Tuleb meeles pidada, et televisiooni me kasutame siin ainult kui ühte näidet, millel pole probleemi olemusega midagi ühist. Ma võiksin seista ühe kella juures ja vaadata televiisoris teise kella kujutist. Siis ma saaksin otsustada, kas kellad näitavad samaaegselt ühte ja sama aega. Kuid see meetod poleks hea. Kella kujutis jõudis televiisorisse elektromagnetiliste lainete vahendusel, seega liikus see kujutis valguse kiirusega. Televiisori ekraanil näen ma kujutist, mis lähtus kella juurest veidi aega tagasi, kuna enda juures oleval kellal näen ma seda, mis seal just praegu on. Seda raskust saab lihtsalt vältida. Tuleb asetuda punkti, mis on mõlemast kellast võrdsel kaugusel ja vaadata mõlemat kella televisiooni abil. Kui signaalid on siis kellade juurest lähtunud samaaegselt, jõuavad nad minu juurde samuti ühekorraga. Kui vaadata kahte head kella neid

ühendava sirglõigu keskpunktist ja kui osutub, et need kellad näitavad alati ühte aega, siis kõlbavad nad sündmuste toimumisaja määramiseks kahes teineteisest eemalolevas ruumpunktis.

Mehhaanikas kasutasime ainult ühte kella. See ei olnud aga kuigi mugav, sest me pidime kõiki mõõtmisi teostama kella vahetus läheduses. Vaadates kella kaugelt, näiteks televisiooni abil, tuleb alati meeles pidada, et tegelikult näeme seda, mis juhtus varem. Analoogiline on olukord Päikese loojumisega, mida näeme kaheksa minutit hiljem, kui see tegelikult toimub.<sup>1</sup> Kõigile kellalt loetud ajanäitudele tuleb lisada väike parandus, mis oleneb sellest, kui kaugel kell meist asetseb.

Siit selgub, et ainult ühe kellaga on tülikas läbi ajada. Õnneks teame nüüd, kuidas otsustada selle üle, kas kaks või veelgi rohkem ühtemoodi liikuvat kella näitavad samaaegselt ühte aega või mitte. Seepärast võime väga hästi kujutleda, et antud koordinaatsüsteemis on nii palju kelli kui vaja. Iga kella abil saab määrata nende sündmuste aega, mis toimuvad kella vahetus läheduses. Kõik kellad on koordinaatsüsteemi suhtes paigal. Need on «head» kellad, nad on *sünkroniseeritud*, mis tähendab seda, et nad näitavad samaaegselt ühte aega.

Niisuguses kellade seadmises pole midagi eriti üllatavat või ebatavalist. Ühe kella asemel on meil nüüd mitu sünkroniseeritud kella, mis annab meile võimaluse kergesti otsustada, kas teineteisest kaugel toimuvad sündmused on antud koordinaatsüsteemis samaaegsed või mitte. Sündmused on samaaegsed, kui nende läheduses olevad omavahel sünkroniseeritud kellad näitavad mõlema sündmuse toimumishetkel ühte aega. Kindla mõtte omandab nüüd ka väide, et üks sündmus toimub varem kui teine. Kõiki niisuguseid küsimusi saab lahendada omavahel sünkroniseeritud kellade abil, mis on meie koordinaatsüsteemi suhtes paigal.

Kõik öeldu on kooskõlas klassikalise füüsikaga, mitte

---

<sup>1</sup> Siin on autorid valinud ebaõnnestunud näite. Kaheksa minutit hiljem me näeksime küll Päikese süttimist või kustumist, mitte aga Päikese loojumist ja tõusu. Kui mitte arvestada refraktsiooni, siis võib öelda, et Päikese loojumist näeme silmapilkselt, niipea kui Maa oma pöörlemisel meid Päikese valguse käest ära pöörab. Aeg, mis kulub valgusel Päikeselt Maani levimiseks, pole seejuures üldse oluline. — *Tõlk.*

mingisugust vastuolu klassikaliste teisendustega pole seni veel ilmnenu.

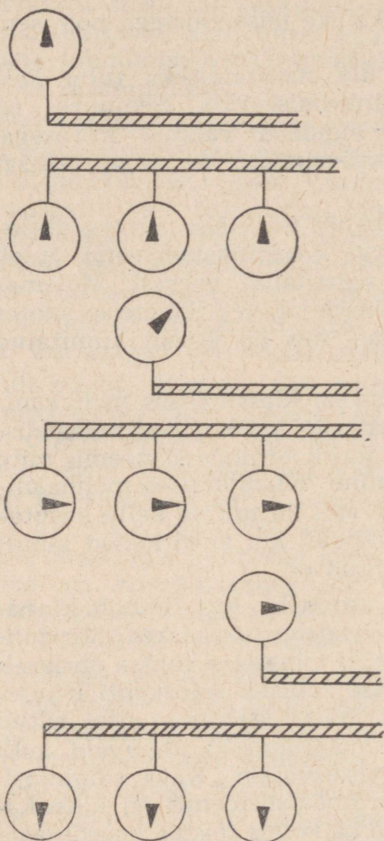
Sündmuste samaaegsuse üle otsustamiseks tulid kellad enne signaalide abil sünkroniseerida. Seejuures on oluline, et need signaalid liiguksid valguse kiirusega, kiirusega, mis mängib relatiivsusteoorias väga tähtsat osa.

Et tahame nüüd uurida kahte teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvat koordinaatsüsteemi, tuleb meil võtta kaks kelladega varustatud varrast. Mõlemas koordinaatsüsteemis oleval vaatelejal, kes teineteise suhtes liiguvad, on nüüd oma kellad, mis on jäigalt kinnitatud oma varraste külge.

Kui me rääkisime mõõtmistest klassikalises mehhaanikas, siis kasutasime ühteainsat kella kõigi koordinaatsüsteemide jaoks. Siin on meil igas koordinaatsüsteemis mitu kella. See erinevus pole oluline. Klassikalises mehhaanikas piisas küll ühest kellast, aga ka mitme kella kasutamisele ei ole mingeid vastuväiteid, kui need kellad ainult omavahel hästi sünkroniseeritud on.

Nüüd läheneme olulisele punktile, kus ilmneb klassikaliste teisenduste vastuolu relatiivsusteooriaga. Mis juhtub, kui kaks rida kelli liiguvad teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt? Klassikalise füüsika seisukohti kaitsev füüsik vastab: mitte midagi, kellad säilitavad oma rütmi ja me võime kasutada aja määramiseks liikuvaid kelli täpselt samahästi kui paigalseisvaidki. Kaks sündmust, mis on samaaegsed ühes koordinaatsüsteemis, on klassikalise füüsika järgi samaaegsed ka kõigis teistes koordinaatsüsteemides.

Kuid see pole ainuvõimalik vastus. Me võime sama hästi kujutleda, et liikuva kella rütm erineb paigalseisva kella rütmist. Vaatame seda võimalust lähemalt, ilma et me praegu hakkaksime lahendamä küsimust, kas kella rütm liikumisel tegelikult muutub või mitte. Mida mõeldakse väitega, et liikuv kell muudab oma rütmi? Lihtsuse mõttes oletame, et ülemises koordinaatsüsteemis on ainult üks kell, alumises koordinaatsüsteemis aga mitu. Kõigil kelladel olgu ühesugune mehhanism, alumised kellad olgu peale selle omavahel veel sünkroniseeritud, s. o. nad näidaku samaaegselt ühte aega. Joonisel 56 on kujutatud kahe teineteise suhtes liikuva koordinaatsüsteemi kolm üksteisele järgnevat asendit. Esimesel joonisel näitavad üle-



Joon. 56.

koordinaatsüsteemiga. Sel juhul peaks ülemises koordinaatsüsteemis olema mitu kella, kuna alumises koordinaatsüsteemis piisaks ainult ühest kellast. Loodusseadused peavad olema ühesugused mõlemas koordinaatsüsteemis, mis teineteise suhtes liiguvad.

Klassikalises mehhaanikas oletati vaikides, et liikuv kell ei muuda oma rütmi. See näis olevat nii iseendastmõistetav, et vaevalt oli mõtet seda mainida. Kuid midagi ei saa olla liiga endastmõistetav. Kui me tahame olla tõeliselt ettevaatlikud, peame analüüsima kõiki oletusi, mis on füüsikas seni tehtud.

mise ja alumiste kellade osutid ühes suunas, sest me oleme nad nii seadnud. Kõik kellad näitavad ühte aega. Teisel joonisel näeme kahe koordinaatsüsteemi suhtelist asendit veidi aega hiljem. Kõik alumise koordinaatsüsteemi kellad näitavad ühte aega, ülemise koordinaatsüsteemi kell on aga teiste rütmist välja läinud. Liikumise tõttu alumise koordinaatsüsteemi suhtes on ülemine kell oma rütmi muutnud ja kellad näitavad erinevat aega. Kolmandal joonisel näeme, et erinevus kellade osutite asendis on ajaga veelgi kasvanud.

Alumise koordinaatsüsteemi suhtes liikumatu vaatleja leiab, et liikuv kell muutis oma rütmi. Samasugusele tulemusele jõuaks muidugi ka vaatleja, kes on paigal ülemise koordinaatsüsteemi suhtes ja vaatab kella, mis liigub koos alumise

Ühtki oletust ei saa lugeda mõttetuks lihtsalt seepärast, et ta pole kooskõlas klassikalise füüsikaga. Me võime väga hästi kujutleda, et liikuv kell muudab oma rütmi, kui rütmi muutumise seadus on ainult kõigi inertsiaalsüsteemide jaoks ühesugune.

Veel üks näide. Võtame meetripuu, see tähendab mõõtelati, mis niikaua kui ta paigal seisab, on üks meeter pikk. Hakaku see latt ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuma, libisedes mööda koordinaatsüsteemi kujutavat varrast. Kas tema pikkus on seejuures endiselt üks meeter? Et vastata sellele küsimusele, peame kõigepealt teadma, kuidas määrata lati pikkust. Niikaua kui latt on paigal, langevad tema otsad ühte kriipsukestega koordinaatsüsteemi kujutaval vardal, mis eraldavad seal meetripikkuse tüki. Sellest järeldame, et paigalseisva lati pikkus on üks meeter. Kuidas tuleks mõõta latti siis, kui ta liigub? Seda võib teha järgmiselt. Kaks vaatlejat teevad samaaegselt kaks momentvõtet, ühe lati algusest, teise lati lõpust. Et fotod on võetud samaaegselt, võime neid vaadates kindlaks teha, missuguste kriipsukestega koordinaatsüsteemi kujutaval vardal ühtivad sel ajamomendil lati otsad. Sel teel määramegi lati pikkuse. Siin peab olema kaks vaatlejat, et registreerida antud koordinaatsüsteemi erinevates punktides toimunud samaaegseid sündmusi. Pole mingit põhjust arvata, et niisuguse mõõtmise tulemus oleks sama kui paigalseisva lati korral. Fotod lati pikkuse mõõtmisel tuleb teha samaaegselt. Kuid me teame, et samaaegsus on koordinaatsüsteemist olenev relatiivne mõiste. Seega on täiesti võimalik, et koordinaatsüsteemides, mis üksteise suhtes liiguvad, annab ka pikkuse mõõtmine erinevad tulemused.

Me võime väga hästi kujutleda, et peale liikuvate kellade rütmi muutub ka liikuva varda pikkus, kui muutumise seadused on ainult kõigi inertsiaalsüsteemide jaoks ühesugused.

Eelnevas me ainult kaalusime mõningaid uusi võimalusi, ilma et me oleksime neid oletusi kuidagiviisi põhjendanud.

Tuletame meelde: valguse kiirus on kõigis inertsiaalsüsteemides ühesugune. Seda fakti pole võimalik viia kooskõlla klassikaliste teisendustega. Vastuolude ring tuleb kusagil mujal murda. Kas seda ei saaks teha just siin? Kas me ei võiks oletada, et liikuva kella rütm ja lii-

kuva varda pikkus muutuvad just nii, et valguse kiiruse konstantsus on nende oletuste otseseks järelduseks? Osutub, et seda on võimalik teha! See on esimene näide, kus relatiivsusteooria erineb põhjalikult klassikalisest füüsikast. Me võime oma väite ka ümber pöörata: kui valguse kiirus on kõigis koordinaatsüsteemides sama, siis peavad liikuvad vardad muutma oma pikkust ja liikuvad kellad oma rütmi. Muutumise seadused on seejuures täpselt määratud.

Selles kõiges pole mitte midagi mõistatuslikku või arusaamatut. Klassikalisel füüsikal oletati alati, et liikuva kella rütm ei erine paigalseisva kella rütmist ja liikuva varda pikkus paigalseisva varda pikkusest. Kui aga valguse kiirus on kõigis koordinaatsüsteemides ühesugune, kui relatiivsusteooria on õige, siis tuleb meil nendest oletustest lahti öelda. On muidugi raske loobuda sügavale juurdunud eelarvamustest, kuid teist teed ei ole. Relatiivsusteooria seisukohalt näivad vanad arusaamad meelevaldsetena. Miks peaksime uskuma absoluutsesse aega, nagu tegime seda mõned leheküljed tagasi, mis kulgeb ühesuguselt kõigis koordinaatsüsteemides kõigi vaatlejate jaoks? Miks peaksime uskuma muutumatusse pikkusesse? Aega määratakse kellaga, ruumilisi koordinaate mõõtelatiga. Mõõtmistulemus võib oleneda liikuva kella ja mõõtelati käitumisest. Pole põhjust arvata, et kell ja mõõtelatt peaksid käituma nii, nagu see meile meeldib. Kaudsed vaatlused, mida on tehtud elektromagnetilise väljaga seotud nähtuste korral, kinnitavad meile, et liikuv kell muudab oma rütmi ja liikuv varras oma pikkust; mehaanikanähtuste uurimisel ei osanud me midagi taolist arvatagi. Nüüd peame tunnistama, et igas koordinaatsüsteemis on oma relatiivne aeg, sest see on parimaks väljapääsuks meie raskustest. Relatiivsusteooriale tugineva teaduse edusammud näitavad, et see uus seisukoht pole mingisugune *malum necessarium*<sup>1</sup> — teooria tugevad küljed on selleks liiga ilmsed.

Siiani oli meie eesmärgiks välja selgitada, mis viis relatiivsusteooria põhioletustele, ja näidata, kuidas see teooria, käsitledes aega ja ruumi uuest seisukohast, sundis meid revideerima ning muutma klassikalisi teisendusi. Püüame nüüd esile tuua neid ideid, mis moodustavad uue

---

<sup>1</sup> *Malum necessarium* — kurb paratamatus (ladina keeles). — Tõlk.

füüsikalise ja filosoofilise vaate aluse. Need ideed on lihtsad, kuid selles kujus, nagu me neid siin formuleerisime, ei piisa neist ei kvalitatiivsete ega ka kvantitatiivsete järelduste tegemiseks. Meil tuleb jälle kasutada oma vana meetodit, kus seletame ainult asja põhimõttelist külge ja võtame aeg-ajalt mõned väited teadmiseks, ilma et me neid tõestaksime.

Et tuua selgelt esile erinevusi klassikalistesse teisen- dustesse uskuva vana füüsiku ja relatiivsusteooriat tundva kaasaegse füüsiku vaadetes, kujutleme dialoogi nende vahel. Klassikalist füüsikut nimetame seejuures *K* ja relatiivsusteooria tundjat *R*.

*K*. Mina usun Galilei relatiivsuspriintiipi mehhaanikas, sest ma tean, et kahes teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvast koordinaatsüsteemis kehtivad ühesugused mehhaanikaseadused. Teiste sõnadega: mehhaanikaseadused on invariantid klassikaliste teisen- duste suhtes.

*R*. Kuid relatiivsuspriintiipi tuleb rakendada kõigi välismaailma sündmuste kohta. Mitte ainult mehhaanika- seadused, vaid kõik looduseadused peavad avalduma üks- teise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvates koor- dinaatsüsteemides ühtemoodi.

*K*. Kuidas on see võimalik, et üksteise suhtes liikuva- tes koordinaatsüsteemides avalduvad kõik looduseadused ühtemoodi? Väljavõrrandid, see tähendab Maxwelli võr- randid, pole ju klassikaliste teisen- duste suhtes invariantid. See ilmneb selgesti valguse kiiruse näites. Klassika- lised teisen- dused ütlevad, et see kiirus ei saaks olla ühe- sugune kahes koordinaatsüsteemis, mis teineteise suhtes liiguvad.

*R*. See näitab ainult seda, et me ei saa kasutada klas- sikalisi teisen- dusi, et koordinaatsüsteemid peavad olema omavahel kuidagi teisiti seotud. Me ei tohi koordinaate ja kiirusi kahes süsteemis nii siduda, nagu seda teevad klas- sikalised teisen- dused. Need teisen- dused tuleb asendada uutega, mis tulevad relatiivsusteooria põhieeldustest. Meil pole praegu mõtet näha vaeva nende uute teisen- duseeskirjade matemaatilise formuleerimisega. Rahuldume teadmise- ga, et nad erinevad klassikalistest teisen- dustest ning et neid kutsutakse lühidalt *Lorentzi teisen- dusteks*. Saab näidata, et Maxwelli võrrandid, s. o. väljaseadu- sed, on invariantid Lorentzi teisen- duste suhtes täpselt

samuti, nagu mehhaanikaseadused on invariantseid klassikaliste teisenduste suhtes. Tuletame meelde, kuidas oli lugu klassikalises füüsikas. Meil oli seal teisenduseeskiri koordinaatide jaoks ja teisenduseeskiri kiiruste jaoks, kuid kahes teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvate koordinaatsüsteemide avaldused mehhaanikaseadused ühtemoodi. Meil olid teisenduseeskirjad ruumi jaoks, kuid aja jaoks neid polnud, sest aeg oli kõigis koordinaatsüsteemides sama. Relatiivsusteoorias on olukord teine. Siin on teisenduseeskirjad ruumi, aja ja kiiruse jaoks, mis kõik erinevad klassikalistest teisenduseeskirjadest. Kuid kõigis üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvates koordinaatsüsteemides peavad looduseadused jällegi avalduma ühtemoodi. Looduseadused peavad olema invariantseid mitte klassikaliste teisenduste suhtes, nagu me varem arvasime, vaid uut tüüpi teisenduste, nõndanimetatud Lorentzi teisenduste suhtes. Kõigis inertsiaalsüsteemides kehtivad ühesugused looduseadused, kusjuures üleminek ühest süsteemist teise on määratud Lorentzi teisendustega.

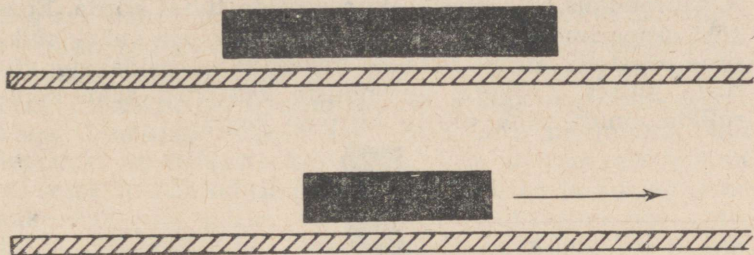
K. Ma usun teid. Kuid oleks huvitav teada, mille poolest erinevad Lorentzi teisendused klassikalistest teisendustest.

R. Teie küsimusele saab kõige paremini vastata sel teel, et teie nimetate klassikalise teisenduse iseloomulike jooni ja mina püüan seletada, kas need jooned on säilinud ka Lorentzi teisenduste juures või kui mitte, siis kuidas neid muudeti.

K. Kui minu koordinaatsüsteemi kindlas ruumpunktis kindlal ajahetkel midagi juhtub, siis vaatleja teises koordinaatsüsteemis, liikudes minu süsteemi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, saab sündmuse asukoha määramisel teise arvu kui mina, ent aeg tuleb tal seesama mis minulgi. Kõigi koordinaatsüsteemide jaoks on meil ainult üks kell, pole oluline, kas see kell liigub või mitte. On see kõik kooskõlas ka teie seisukohtadega?

R. Ei, ei ole. Igas koordinaatsüsteemis peab olema oma kell, mis on selle süsteemi suhtes paigal, sest liikumine muudab kella rütmi. Kahe teineteise suhtes liikuva koordinaatsüsteemi vaatlejad saavad erinevad numbrid asukoha määramisel, kuid peale selle ei lange nende mõõtmistulemused ühte ka siis, kui nad määravad sündmuste toimumishetki.

K. See tähendab, et aeg ei ole enam invariant. Klassikaliste teisenduste kohaselt on kõigis koordinaatsüsteemides üks aeg. Lorentzi teisenduste mõjul aeg muutub, käitudes umbes samuti, nagu käituvad koordinaadid vanade teisenduste korral. Huvitav, kuidas on lugu pikkusega? Klassikalise mehhaanika järgi säilitab jäik varras oma pikkuse, sõltumatult sellest, kas ta liigub või on paigal. Kas see on õige ka nüüd?



Joon. 57.

R. Ei ole. Lorentzi teisendustest järgneb tegelikult, et liikuv varras tõmbub oma liikumise suunas kokku, kusjuures lühenemine kasvab koos kiirusega. Mida kiiremini kepp liigub, seda lühem ta on. Kuid niisugune lühenemine toimub ainult liikumise suunas. Joonisel 57 näete varrast, mis on kokku tõmbunud pooleni oma esialgsest pikkusest, sest ta liigub nüüd kiirusega, mis on ligi 90 protsenti valguse kiirusest. Liikumise ristsuunas kokkutõmbumist ei ole, mida ma püüdsin kujutada joonisel 58.

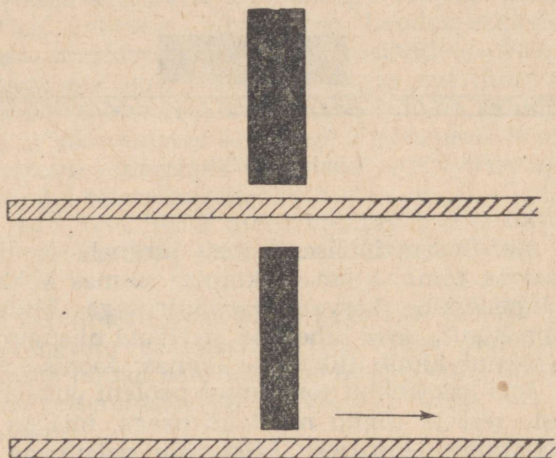
K. See tähendab, et liikuva kella rütm ja liikuva varda pikkus olenevad kiirusest. Aga kuidas?

R. Mida suurem on kiirus, seda suuremaks muutuvad erinevused klassikalise teooria ja relatiivsusteooria vahel. Lorentzi teisendustest järgneb, et kiiruse kasvamisel valguse kiiruseni muutub kepi pikkus nulliks. Analoogiliselt aeglustub liikuva kella rütm, võrreldes nende kelladega, millest ta oma liikumisel möödub. Kui kell liiguks valguse kiirusega, siis jääks ta hoopis seisma, muidugi sel juhul, kui ta on «hea» kell.

K. See näib olevat vastuolus kõigi meie kogemustega. Me teame, et auto ei muutu sõidu ajal lühemaks ja et autojuht võib alati oma «head» kella võrrelda nende kel-

ladega, millest ta möödub. Vastupidiselt teie väitele leiab ta seejuures, et tema kella käik on teiste kellade omaga väga heas kooskõlas.

R. See on kahtlemata õige. Kuid need mehhaanika valdkonda kuuluvad kiirused on väga väikesed, võrreldes valguse kiirusega, seepärast on mõttetut rakendada nende nähtuste uurimisel relatiivsusteooriat. Autojuht võiks rahulikult rakendada klassikalist füüsikat isegi siis, kui ta suurendaks oma masina kiirust sada tuhat korda. Ebakõla eksperimendi ja klassikaliste teisenduste vahel võiksite avastada ainult valguse kiirusega võrreldavate kiiruste juures. Lorentzi teisenduste kehtivust saab kontrollida ainult väga suurte kiiruste korral.



Joon. 58.

K. Kuid siin on veel üks raskus. Vastavalt mehhaanikaseadustele võin ma kujutleda kehi, mille kiirus ületab valguse kiiruse. Kui keha liigub ujuva laeva suhtes valguse kiirusega, siis kalda suhtes liigub ta kiiremini kui valgus. Mis juhtub siis kepiiga, mille pikkus muutus nulliks juba siis, kui tema kiirus sai võrdseks valguse kiirusega? Vaevalt usutav, et valguse kiirusest suuremate kiiruste korral on kepil negatiivne pikkus.

R. Niisuguseks sarkasmiks pole siin tegelikult mingisugust põhjust! Relatiivsusteooria seisukohalt ei saa materiaalse keha kiirus kunagi ületada valguse kiirust.

Valguse kiirus on ülemiseks piiriks kõigile kiirustele, mida võivad omandada materiaalsed kehad. Kui keha kiirus laeva suhtes on võrdne valguse kiirusega, siis kalda suhtes on tema kiirus sama suur. Lihtne mehhaanikaseadus kiiruste liitumisest ja lahutumisest enam ei kehti. Täpsemini öeldes, see seadus on ligikaudu õige ainult väikeste kiiruste korral, kuna valguse kiirusele lähedaste kiiruste jaoks ta enam kehtiv ei ole. Valguse kiirust väljendav arv esineb otseselt Lorentzi teisendustes, kus ta mängib piirjuhu osa analoogiliselt lõpmata suure kiirusega klassikalises mehhaanikas. See üldisem teooria ei ole vastuolus klassikaliste teisenduste ja klassikalise mehhaanikaga. Vastupidi, vanad mõisted saame piirjuhuna, kui tegemist on väikeste kiirustega. Uue teooria seisukohalt on selge, millal kehtib klassikaline füüsika ja kus on tema rakendatavuse piirid. Kasutada relatiivsusteooriat auto, laeva või rongi juhul oleks sama naeruväärne kui rakendada arvutusmasinat seal, kus piisab juba lihtsast ükskordühest.

## Relatiivsus ja mehhaanika

Relatiivsusteooria tekkis, sest tema järele oli vajadus; ta tekkis suurtest ja sügavatest vastuoludest, millest ei leitud väljapääsu. Uue teooria jõud seisab harmoonias ja lihtsuses, millega ta lahendab kõiki neid raskusi. Seejuures kasutatakse ainult väga väheseid ja usutavaid oletusi.

Kuigi teooria sai alguse väljaprobleemist, peab ta haarama kõiki füüsikaseadusi. Siin näib tekkivat raskus. Väljaseadused ühelt poolt ja mehhaanikaseadused teiselt poolt on täiesti erineva iseloomuga. Elektromagnetilise välja võrrandid on invariantssed Lorentzi teisenduste suhtes, kuna mehhaanika võrrandid on invariantssed klassikaliste teisenduste suhtes. Kuid relatiivsusteooria nõuab, et kõik looduseadused peavad olema invariantssed Lorentzi teisenduste, mitte aga klassikaliste teisenduste suhtes. Viimane on ainult Lorentzi teisenduste piirjuhiks, kui kahe koordinaatsüsteemi suhteline kiirus on väga väike. Kui see nii on, siis tuleb klassikalist mehhaanikat muuta, nii et ta oleks kooskõlas invariantssuse nõudega Lorentzi teisenduste suhtes. Teiste sõnadega: klassikaline

mehhaanika ei saa olla õige, kui kiirused on lähedased valguse kiirusele. Ainukesteks teisendusteks, mis viivad ühest koordinaatsüsteemist teise, on Lorentzi teisendused.

Oli lihtne muuta klassikalist mehhaanikat nii, et ta poleks vastuolus ei relatiivsusteooriaga ega selle tohutu vaatlusmaterjaliga, mida seletatakse klassikalise mehhaanika abil. Vana mehhaanika kehtib ainult väikeste kiiruste korral, olles uue mehhaanika piirjuhiks.

Oleks huvitav vaadata mõnda näidet selle kohta, kuidas muudeti klassikalist mehhaanikat relatiivsusteooria mõjul. Arvatavasti viiks niisugune näide meid järeldestele, mida eksperiment võiks kinnitada või ümber lükata.

Kujutleme kindla massiga keha, mis liigub sirgjooneliselt ja millele liikumise suunas mõjub välisjõud. Jõud, nagu teame, on võrdeline kiiruse muutusega. Täpsemini öeldes, pole oluline, kas antud keha suurendab ühe sekundi jooksul oma kiiruse 100 meetrilt sekundis 101 meetrini sekundis, või 100 kilomeetrilt sekundis 100 kilomeetri ja ühe meetrini sekundis, või 280 000 kilomeetrilt sekundis 280 000 kilomeetri ja ühe meetrini sekundis. Et kutsuda esile samasugust kiiruse muutust sama aja jooksul, peab antud kehale mõjuma alati sama suur jõud.

Kas see lause on õige ka relatiivsusteooria seisukohalt? Mitte mingil juhul! See seadus kehtib ainult väikeste kiiruste korral. Missugune on siis relatiivsusteooria järgi vastav seadus valguse kiirusele lähedaste suurte kiiruste puhul? Kui kiirus on suur, siis tema edasiseks suurendamiseks on vaja väga suurt jõudu. Kiiruse suurendamisel sekundi jooksul ühe meetri võrra sekundis pole sugugi ükskõik, kas algkiirus on 100 meetrit sekundis või võrdub peaaegu valguse kiirusega. Mida lähemal on kiirus valguse kiirusele, seda raskem on teda suurendada. Kiirust, mis on võrdne valguse kiirusega, edasi suurendada pole enam võimalik. See uus, mille tõi sisse relatiivsusteooria, polegi midagi üllatavat. Valguse kiirus on kõigi kiiruste ülemiseks piiriks. Ükski lõpliku suurusega jõud, olgu ta nii suur kui tahes, ei saa suurendada kiirust üle selle piiri. Vana seadus klassikalises mehhaanikas, mis seob kiiruse muutust jõuga, asendub nüüd uue ja keerulisema seadusega. Uuelt seisukohalt vaadates on klassikaline mehhaanika lihtne sellepärast, et me peaaegu alati vaatleme liikumisi, mis toimuvad valguse kiirusest palju väiksemate kiirustega.

Paigalseisval kehal on kindel mass, mida nimetatakse *seisumassiks*. Mehhaanikast teame, et iga keha avaldab vastupanu tema liikumise oleku muutmisele; mida suurem on keha mass, seda suurem on ka see vastupanu ja vastupidi, mida väiksem on mass, seda nõrgem on vastupanu. Kuid relatiivsusteooria ütleb rohkem. Keha avaldab tugevamat vastupanu mitte üksi sel juhul, kui tal on suurem mass, vaid ka siis, kui tal on suurem kiirus. Kehad, mille kiirus läheneb valguse kiirusele, avaldaksid välisjõududele väga tugevat vastupanu. Klassikalises mehhaanikas oli iga antud keha vastupanu midagi muutumatut, seda iseloomustas ainult mass. Relatiivsusteoorias oleneb see vastupanu nii massist kui ka kiirusest. Kui kiirus läheneb valguse kiirusele, muutub keha vastupanu lõpmata suureks.

Saadud tulemused annavad võimaluse teooriat eksperimentaalselt kontrollida. Kas valguse kiirusele lähedase kiirusega lendav mürsk avaldab välisjõule suuremat vastupanu, kui ennustab teooria? Et relatiivsusteooria väited on siin kvantitatiivse iseloomuga, on võimalik teooriat eksperimentaalselt kas kinnitada või ümber lükata. Selleks on tarvis ainult mürske, mis liiguksid peaaegu sama kiiresti kui valgus.

Loodusest me tõepoolest leiame niisuguseid mürske. Radioaktiivse aine, näiteks raadiumi aatomid tegutsevad nagu patarei, mis tulistab välja erakordselt suure kiirusega liikuvaid mürske. Süvenemata üksikasjadesse, meenutame siin kaasaegse füüsika ja keemia seisukohtadest ainult ühte ja kõige olulisemat. Kogu aine universumis koosneb *elementaarosake*test, mille eriliike pole kuigi palju. See on analoogiline majadega linnas, mis erinevad üksteisest suuruse, konstruktsiooni ja arhitektuuri poolest, kuid kõik nad, onnist kuni pilvelõhkujani, on ehitatud ainult 3—4 sorti telliskividest, mis on kõigis ehitustes ühesugused. Täpselt samuti on ehitatud ühesugustest tellistest, see tähendab ühesugustest *elementaarosake*test, kõik meie materiaalse maailma tuntud elemendid, alates kõige kergemast elemendist vesinikust ja lõpetades kõige raskema elemendi uraaniga. Kõige raskemad elemendid, s. o. kõige keerulisemad ehitised on seejuures ebastabiilsed ja nad lagunevad. Me ütleme, et need elemendid on *radioaktiivsed*. Mõned aatomite ehituskivid — *elementaarosakesed* — paisatakse seejuures väga suurte kiirus-

tega eemale; nende kiirus võib läheneda valguse kiirusele. Kaasaegsete vaadete kohaselt, mida kinnitavad loendamatud eksperimendid, on mingi elemendi, näiteks radiumi aatom keerulise ehitusega süsteem. Radioaktiivne lagunemine on üks neist protsessidest, kus ilmneb, et aatom koosneb lihtsamatest ehituskividest — elementaarosakestest.

Väga teravmeelsete ja keerukate katseseadeldiste abil saame järele proovida, kuidas osakesed avaldavad vastupanu välisjõule. Katsed näitavad, et see vastupanu on kiirusest ja seejuures täpselt nii, nagu seda ennustab relatiivsusteooria. Ka paljudel teistel juhtudel, kus on võimalik avastada selle vastupanu olenevust kiirusest, ilmneb täielik kooskõla teooria ja eksperimendi vahel. Siin näeme jälle olulisi jooni, mis iseloomustavad loovat teadust: teooria ennustab teatud fakte ja eksperiment kinnitab neid.

See tulemus viib meid edasisele tähtsale üldistusele. Paigaloleval kehal on mass, kuid tal puudub kineetiline energia, s. o. liikumisenergia. Liikuvale kehal on mõlemad, nii mass kui ka kineetiline energia. Niisugune keha avaldab kiiruse muutmisele suuremat vastupanu kui paigalseisev keha. Näib, et see suurem vastupanu tekib liikuva keha kineetilise energia tõttu. Kui kahel kehal on võrdne seisumass, siis suurema kineetilise energiaga keha avaldab välisjõule suuremat vastupanu kui teine.

Kujutleme pallidega täidetud kasti, kusjuures nii kast kui ka pallid olgu meie koordinaatsüsteemis paigal. Et panna seda kasti liikuma, s. o. et suurendada tema kiirust, tuleb rakendada mingisugust jõudu. Oletame nüüd, et pallid hakkavad nagu gaasi molekulid kastis väga kiiresti liikuma, nende keskmine kiirus olgu seejuures lähedane valguse kiirusele. Kas seesama jõud suudab nüüd sama aja jooksul kasti kiirust muuta sama palju, kui ta tegi seda varem? Selleks on nüüd vaja suuremat jõudu, sest pallide kineetiline energia on suurenenud, mis tõstab kasti vastupanuvõimet. Energia, igal juhul kineetiline energia, avaldab liikumisele samasugust vastupanu kui raske mass. Kas see on kõigi energialiikide korral nii?

Lähtudes oma põhieeldustest, annab relatiivsusteooria sellele küsimusele selge ja veenva vastuse, mis on jällegi kvantitatiivse iseloomuga: igasugune energia avaldab

vastupanu liikumise muutmisele; igasugune energia käitub samuti nagu aine; hõõguv rauatükk kaalub rohkem kui sama rauatükk külmalt; ruumis leviv päikesekiirgus sisaldab energiat ja tal on seetõttu olemas ka mass; Päike ja kõik kiirgavad taevakehad kaotavad massi oma kiirgamise tõttu. See oma iseloomult täiesti üldine järeldus on relatiivsusteooria üheks olulisemaks tulemuseks, mida kinnitavad kõik seni teadaolevad faktid.

Klassikaline füüsika võttis kasutusele kaks substantsi — aine ja energia. Esimesel neist oli kaal, teine oli kaalutu. Klassikalises füüsikas oli meil kaks jäävuse seadust, üks aine, teine energia jaoks. Me juba seadsime küsimuse: kas kaasaegne füüsika tunnistab kahte substantsi ja kahte jäävuse seadust? Vastus on «ei». Relatiivsusteooria seisukohalt massi ja energia vahel olulist erinevust ei ole. Energiat on mass ja mass esitab energiat. Kahe jäävuse seaduse asemel on meil nüüd ainult üks, massi-energia jäävuse seadus. See uus seisukoht osutus füüsika edasises arenemises väga edukaks ning viljakaks.

Kuidas võis see füüsikutele nii kauaks kahe silma vahele jääda, et energiast on mass ja mass esitab energiat? Kas kuum rauatükk kaalub rohkem kui samasugune rauatükk külmalt? Vastus sellele küsimusele on nüüd «jah», kuigi leheküljel 34 vastasime «ei». Lehekülgedest nende kahe vastuse vahel on muidugi vähe, et varjata ilmset vastuolu.

Raskus, millele me siin pörkame, on oma iseloomult meile juba tuntud. Relatiivsusteoorias ennustatud massi muutus on mõõtnatult väike, nii et otsese kaalumise teel seda avastada ei saa, ükskõik kui tundlik kaal meil ka oleks. Et energia ei ole kaalutu, seda saab väga veenvalt näidata mitmete kaudsete meetodite abil.

Vahetu ning silmanähtava kontrolli puudumine on tingitud sellest, et «vahetuskurss» energia ja aine vahel on tugevasti viimase kahjuks. Kui massi lugeda kõrge kursiga valuutaks, siis energia sarnaneb inflatsioonivaluutaga. Seda selgitab näide. Soojushulk, mis muudaks auruks kolmkümmend tuhat tonni vett, kaalub umbes üks gramm! Energiat käsitleti nii kaua kaalutuna lihtsalt sellepärast, et mass, mida ta esitab, on liiga väike.

Vana energiasubstants on relatiivsusteooria teine ohver. Esimeseks ohvriks oli keskkond, milles levisid elektromagnetilised lained.

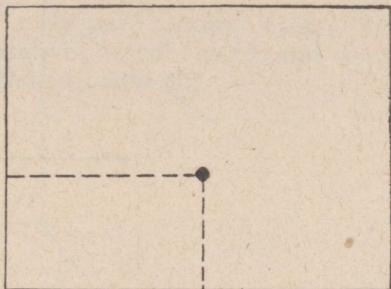
Relatiivsusteooria mõju kasvas kaugele välja oma tekkeprobleemidest. See teooria kõrvaldab väljateooria raskused ja vasturääkivused, annab üldisemad mehhaanikaseadused, asendab kaks jäävuse seadust ühega, muudab klassikalist absoluutse aja mõistet. Relatiivsusteooria kehtivusala ei piirdu ainult füüsikaga; see teooria annab üldise raamistiku kõigi loodusnähtuste jaoks.

### Aegruumi-kontiinum

«Prantsuse revolutsioon algas Pariisis 14. juulil 1789. aastal.» See määrab sündmuse toimumiskoha ja -aja. Kui keegi kuuleb seda lauset esimest korda ja ei tea, mida tähendab «Pariis», siis võib talle seletada: Pariis on linn meie Maakeral koordinaatidega  $2^{\circ}$  idapikust ja  $49^{\circ}$  põhjalaiust. Asukohta iseloomustaks siis kaks arvu, kuna sündmuse toimumisaeg on antud sõnadega «14. juulil 1789. aastal». Määrata täpselt mingi sündmuse toimumiskoht ja -aeg — see on füüsikas väga oluline, veel olulisem kui ajaloos, sest need andmed moodustavad aluse, millest lähtudes saame sündmusi kvantitatiivselt kirjeldada.

Eespool käsitlesime lihtsuse mõttes ainult sirgliikumist. Koordinaatsüsteemi kujutas seejuures varras, millel oli küll alguspunkt, lõpp-punkti aga mitte. Jääme ka praegu selle kitsenduse juurde. Märgime vardal mõned punktid; iga punkti asukohta saame siis iseloomustada ainult ühe arvuga — punkti koordinaadiga. Kui öelda, et punkti koordinaat on 7,586 meetrit, siis tähendab see, et punkt asetseb 7,586 meetri kaugusel varda alguspunktist. Vastupidi, kui keegi annab mulle mingi arvu ja mõõtühiku, saan ma alati leida varda punkti, mis vastab sellele arvule. Võime väita, et igale arvule vastab kindel varda punkt ja igale varda punktile vastab kindel arv. Matemaatikud väljendavad seda fakti järgmise lausega: kõik varda punktid kokku moodustavad *ühedimensioonilise kontiinuumi*. Siin on alati olemas punkt, mis asetseb kui tahes lähedal mingile vabalt valitud varda punktile. Kaks teineteisest eemaldatud varda punkti võime ühendada nii väikeste sammudega, kui ainult soovime. Kahte punkti ühendavate sammude meelevaldne pikkus — see on kontiinuumi iseloomulikuks omaduseks.

Võtame nüüd teise näite. Olgu meil tasapind või, kui te eelistate midagi konkreetsemat, siis nelinurkse laua pealispind (joonis 59). Punkti asukohta sel laual saab iseloomustada kahe arvuga, mitte enam ühega nagu varem. Need kaks arvu on punkti kaugused laua kahest ristservast. Tasapinna igale punktile vastab mitte

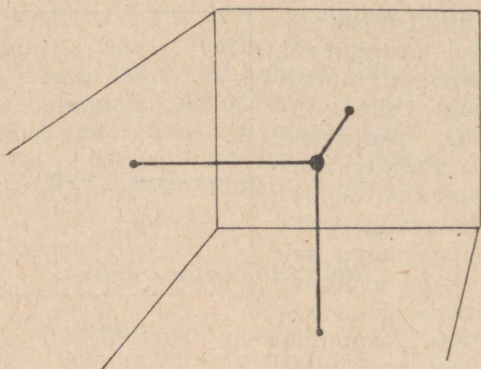


Joon. 59.

enam üks arv, vaid arvupaar; igale arvupaarile vastab kindel tasapinna punkt. Teiste sõnadega: tasapind on *kahe-dimensiooniline kontiinum*. Siin on olemas punktid, mis asetsevad tasapinna vabalt valitud punktile kui tahes lähedal. Kaks teineteisest eemalolevat punkti võib ühendada kõveraga, mille saame jagada kui tahes väikesteks sammudeks. Et kahte arvupaaridega esitatavat punkti ühendavad sammud võivad olla kui tahes väikesed, see on jällegi kahedimensioonilise kontiinuumi iseloomulikuks omaduseks.

Veel üks näide. Kujutlege, et te tahate vaadata oma toale kui koordinaatsüsteemile. See tähendab, et te soovite kõiki asukohti määrata toa jäikade seinte suhtes. Kui lamp on paigal, saab tema asukohta kirjeldada kolme arvuga: kaks neist määravad lambi kauguse kahest omavahel risti olevast seinast, kuna kolmas annab kauguse põrandast või laest (joonis 60). Igale ruumipunktile vastab kolm kindlat arvu; igale arvude kolmikule vastab kindel punkt ruumis. Selle kohta öeldakse: meie ruum on *kolmedimensiooniline kontiinum*. Siin on alati olemas punktid, mis on valitud ruumipunktile väga lähedal. Et kahte arvukolmikuga esitatavat punkti ühendavad sammud võivad olla kui tahes väikesed, see on jällegi kolmedimensioonilise kontiinuumi iseloomulikuks omaduseks.

Kuid sellel kõigel on füüsikaga vähe tegemist. Et pöörduda tagasi füüsika juurde, tuleb meil vaadelda materiaalse osakese liikumist. Looduses toimuvate sündmuste vaatlemiseks ja ennustamiseks on tarvis peale asukoha arvestada veel füüsikaliste protsesside toimumisaega. Võtame jälle väga lihtsa näite.



Joon. 60.

Väike kivi, mida võime käsitleda kui osakest, langeb tornist alla. Oletame, et torni kõrgus on 80 meetrit. Juba Galilei ajast peale oskame ennustada, missugused on langeva kivi koordinaadid mingil ajahetkel pärast lange-

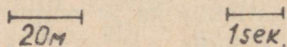
Aeg sekundites	Kõrgus maapinnast meetrites
0	80
1	75
2	60
3	35
4	0

mise algust. Toome siin ära «ajatabeli», mis annab kivi asukoha 0, 1, 2, 3 ja 4 sekundi pärast. Selles ajatabelis on registreeritud viis sündmust, igaühte neist esitab kaks arvu — sündmuse ajakoordinaat ja ruumikoordinaat. Esimeseks sündmuseks on see, et ajahetkel null alustab kivi langemist 80 meetri kõrguselt. Teiseks sündmuseks on kivi jõudmine jäiga mõõtelati (torni)

skaalakriipsuni, mis tähistab kõrgust 75 meetrit maapinnast. See toimub siis, kui langemise algusest on möödunud üks sekund. Viimaseks sündmuseks on kivi jõudmine maapinnale.

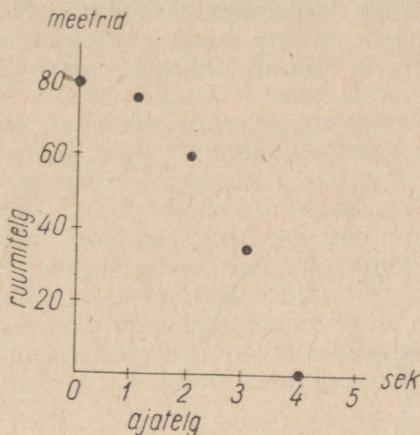
«Ajatabelis» toodud andmeid võib esitada ka teisiti. Seal antud viit arvupaari saab kujutada tasapinna punktidenäiteks nii, nagu seda kujutab joonis 61.

Joonestame nüüd kaks ristjoont ja nimetame ühe neist, näiteks



Joon. 61.

rõhtjoone, ajateljeks ja püstjoone ruumiteljeks. Siis näeme otsekohe, et «ajatabelit» saab aegruumi tasapinnal viie punkti abil esitada (joonis 62).



Joon. 62.

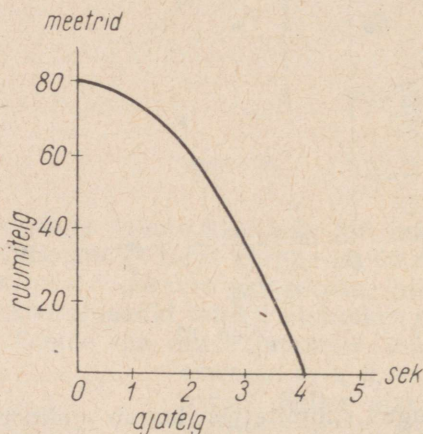
Punkti kaugus ruumiteljest annab ajakoordinaadi, mis on toodud «ajatabeli» esimeses veerus. Punkti kaugus ajateljest määrab punkti ruumikoordinaadi.

«Ajatabel» ja punktid joonise tasapinnal väljendavad ühte ja sedasama asja kahel erineval viisil; ühest esitusviisist saab alati tuletada teise. Kumba esitusviisi eelistada, see on ainult maitse küsimus, sest nad on täiesti samaväärsed.

Astume nüüd ühe sammu edasi. Kujutleme paremat «ajatabelit», mis annab asukohti mitte enam iga sekundi, vaid näiteks iga sajandiku või tuhandiku sekundi järel. Sel juhul saame aegruumi tasapinnal väga palju punkte. Ja lõpuks, kui asukoht on antud iga ajahetke jaoks või, nagu ütlevad matemaatikud, kui ruumikoordinaat on antud aja funktsioonina, moodustavad need punktid pideva joone. Joonis 63 annab seetõttu liikumisest täieliku pildi, mitte enam katkendliku visandi, nagu see oli eespool.

Liikumist piki jääka varrast (torni), s. o. liikumist ühedimensioonilises ruumis esitatakse seega kõverana kahe- või kolme- ja neljendimensioonilises aegruumi-kontiinumis. Igale punktile

selles kontiinuumis vastab arvupaar, milles üks arv tähistab ajakoordinaati, teine — ruumikoordinaati. Vastupidiselt igale arvupaarile, mis iseloomustab mõnda sündmust, vastab kindel punkt aegruumi tasapinnal. Kaks teineteise lähedal olevat punkti kujutavad kahte sündmust, mis toimuvad lähedastes ruumpunktides vahetult teineteise järel.



Joon. 63.

Te võite meie esitusviisile järgmiselt vastu vaielda: pole mingisugust mõtet kujutada ajaühikut sirglõiguna ja aega mehhaaniliselt ühendada ruumiga sel teel, et kahest ühedimensioonilisest kontiinuumist moodustada kahedimensiooniline kontiinum. Kuid sama hästi võiksite protesteerida kõigi graafikute vastu, mis esitavad näiteks temperatuuri muutumist New Yorgis viimase suve jooksul või elatustaseme muutumist viimastel aastatel, sest kõigil neil juhtudel kasutatakse täpselt samasugust meetodit. Temperatuurigraafikutel ühendatakse ühedimensiooniline ajakontiinum ja ühedimensiooniline temperatuurikontiinum kahedimensiooniliseks aegtemperatuurikontiinumiks.

Pöördume tagasi 80 meetri kõrgusest tornist langeva osakese juurde. Liikumise graafiline esitamine on otstarbekohane kokkulepe, sest sel teel saab iseloomustada osakese asukohta mis tahes ajamomendil. Teades nüüd osa-

kese liikumist, võime selle kujutamiseks kasutada kahte erinevat meetodit.

Meenutame, kuidas me kujutasime osakest, mille asukoht ühedimensioonilises ruumis ajaga muutus. Liikumist me esitame sel juhul üksteisele järgnevate sündmustena ühedimensioonilises ruumikontiinuumis. Aega ja ruumi me omavahel ei sega, vaid kasutame *dünaamilist* kujutamisviisi, mille puhul asukohad ajaga *muutuvad*.

Kuid me võime sama liikumist kujutada ka teisiti. Me võime anda *staatilise* kujutuse, s. o. anda kõvera kahe-dimensioonilises aegruumi-kontiinuumis. Liikumist esitame nüüd kui midagi niisugust, mis *on olemas*, mis eksisteerib kahedimensioonilises aegruumi-kontiinuumis, kuna eelmisel juhul käsitlesime liikumist kui muutumist ühedimensioonilises ruumikontiinuumis.

Mõlemad kujutamisi viisid on täiesti samaväärsed, ühe eelistamine teisele on ainult kokkuleppe ja maitse küsimus.

Kõigel sellel, mida me siin rääkisime kahest võimalusest liikumise kujutamisel, pole midagi tegemist relatiivsusteooriaga. Mõlema kujutamisi viisi kasutamine on võrdselt õigustatud, kuigi klassikaline füüsika eelistab liikumise dünaamilist kirjeldamist harilikus ruumis; liikumise kujutamist aegruumis kasutatakse seal hoopis vähem. Relatiivsusteooria vaatab sellele küsimusele teisiti. Selles teoorias eelistatakse kindlalt liikumise staatilist kujutamisi viisi. Liikumise käsitlemine millegi niisugusena, mis eksisteerib aegruumis, on relatiivsusteooria seisukohast õigem ja annab tegelikkusest objektiivsema pildi. On tarvis vastata veel küsimusele: miks need kaks liikumise kujutamisi viisi, mis on klassikalise füüsika seisukohalt ekvivalentsed, ei ole seda relatiivsusteooria seisukohalt?

Vastuse sellele küsimusele leiame siis, kui võtame jälle vaatluse alla kaks teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvat koordinaatsüsteemi.

Klassikalises füüsikas on asi nii, et kahes teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvast koordinaatsüsteemis olevad vaatlejad saavad kindla sündmuse jaoks erinevad ruumikoordinaadid, kuid sama ajakoordinaadi. Nii iseloomustab meie näite korral valitud koordinaatsüsteemis osakese jõudmist maapinnale ajakoordinaat «4» ja ruumikoordinaat «0». Klassikaline füüsika ütleb, et kivi

jõuab maapinnale nelja sekundi pärast ka selle vaatleja arvates, kes liigub valitud koordinaatsüsteemi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Kuid kaugusi mõõdab see vaatleja oma koordinaatsüsteemi suhtes ja kohta, kus kivi põrkab vastu maad, iseloomustab ta üldiselt teistsuguste ruumikoordinaatidega. Ajakoordinaat seevastu on kõigi üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvate vaatlejate jaoks ühesugune. Klassikaline füüsika tunneb ainult aja «absoluutset» voolamist, mis on kõigi vaatlejate suhtes ühesugune. Kahedimensioonilise kontiinuumi võib igas koordinaatsüsteemis lahutada kaheks ühedimensiooniliseks kontiinumiks — ajaks ja ruumiks. Tänu aja «absoluutsele» iseloomule on üleminekul liikumise «staaatilisel» kujutamisel «dünaamilisele» klassikalises füüsikas objektiivne tähendus.

Kuid eespool nägime, et klassikalisi teisendusi füüsikas üldjuhul kasutada ei või. Praktika seisukohalt võime kasutada neid teisendusi küllalt hästi siis, kui on tegemist väikeste kiirustega, ent füüsika põhiküsimuste uurimisel me seda teha ei tohi.

Kivi põrkamine vastu maad ei toimu relatiivsusteooria seisukohalt kõigi vaatlejate jaoks ühel ajal. Kahes koordinaatsüsteemis on erinevad nii aja- kui ka ruumikoordinaadid, kusjuures ajakoordinaatide erinevus on eriti suures juhul, kui koordinaatsüsteemide suhteline kiirus on lähedane valguse kiirusele. Kahedimensioonilist kontiinuumi kaheks ühedimensiooniliseks kontiinumiks lahutada ei saa, nagu seda tegi klassikaline füüsika. Määrates aja- ja ruumikoordinaate teises koordinaatsüsteemis, ei tohi me aega ja ruumi lahutada käsitleda. Kahedimensioonilise kontiinuumi lahutamine kaheks ühedimensiooniliseks kontiinumiks on relatiivsusteooria seisukohalt meelevaldne võte, millel pole objektiivset tähendust.

Kõike öeldut on lihtne üldistada liikumisele, mis pole piiratud ainult ühe sirgjoonega. Et kirjeldada looduses toimuvaid sündmusi, selleks on tegelikult tarvis neli arvu; kahest arvust on siin vähe. Meie füüsikalisel ruumil, mis moodustub meie kujutluses asjade ja nende liikumise kaudu, on kolm dimensiooni. Asukohta ruumis iseloomustab seetõttu kolm arvu. Neljandaks arvuks on sündmuse toimumishetk. Igale sündmusele vastab neli kindlat arvu; igale arvunelikule vastab kindel sündmus. Seepärast võime öelda, et sündmuste maailm moodustab

*neljadimensioonilise kontiinuumi.* Selles kõiges pole midagi salapärast ja viimane lause on ühtemoodi õige nii klassikalises füüsikas kui ka relatiivsusteoorias. Erinevus ilmneb jälle siis, kui vaatame kahte teineteise suhtes liikuvat koordinaatsüsteemi. Olgu meil jälle liikuv tuba ja määraku sisemine ning välimine vaateleja ühe ja selle sama sündmuse aegruumilisi koordinaate. Klassikalise füüsika pooldaja lahutab neljadimensioonilise kontiinuumi jälle kolmedimensiooniliseks ruumiks ja ühedimensiooniliseks ajakontiinumiks. Vana füüsik peab silmas ainult ruumi teisendusi, sest aeg on tema jaoks absoluutne. Ta leiab, et neljadimensioonilise maailmakontiinuumi lõhestamine ruumiks ja ajaks on loomulik ning otstarbekohane. Relatiivsusteooria seisukohalt, seevastu, muutub üleminekul ühest koordinaatsüsteemist teise nii aeg kui ka ruum. Neljadimensioonilise sündmustemaailma, s. o. neljadimensioonilise aegruumi-kontiinuumi teisendusomadused on määratud Lorentzi teisendustega.

Sündmustemaailma võib kirjeldada dünaamiliselt kui teatud pilti kolmedimensioonilise ruumi taustal, mis muutub ajaga. Kuid teda võib kirjeldada ka staatiliselt neljadimensioonilise aegruumi-kontiinuumi taustal. Klassikalise füüsika pooldaja seisukohalt on dünaamiline ja staatiline kujutamiseviis ekvivalentsed. Relatiivsusteooria seisukohalt on aga staatiline kujutamiseviis otstarbekohasem ja objektiivsem.

Kui soovime, võime dünaamilist kujutamiseviisi kasutada ka relatiivsusteoorias. Kuid me ei tohi unustada, et neljadimensioonilise kontiinuumi jaotamisel ajaks ja ruumiks pole objektiivset tähendust, sest aeg ei ole enam «absoluutne». Järgnevatel lehekülgedel kasutame «staatiliselt» keele asemel siiski «dünaamilist» keelt, kuid seejuures peame kogu aeg mees niisuguse käsitluse piiratud iseloomu.

## Üldine relatiivsus

Nüüd jääb välja selgitada veel üks asi. Üks kõige põhilisematest küsimustest on siiani alles lahendamata: kas inertsiiaalsüsteemi on olemas? Me teame üht-teist loodusseadustest, nende invariantsusest Lorentzi teisenduste suhtes ja nende kehtivusest kõigis üksteise suhtes ühtlasi ja sirgjooneliselt liikuvates inertsiiaalsüsteemides.

Meil on olemas seadused, kuid me ei tunne tausta, mille suhtes nad kehtivad.

Et paremini mõista seda raskust, usutleme klassikalise füüsika pooldajat ja esitame talle mõned lihtsad küsimused:

«Mis on inertsiaalsüsteem?»

«See on koordinaatsüsteem, milles kehtivad mehhaanikaseadused. Keha, millele ei mõju välisjõude, liigub niisuguses koordinaatsüsteemis ühtlaselt ja sirgjooneliselt. See omadus võimaldab meil kõigi koordinaatsüsteemide hulgast välja otsida inertsiaalsüsteemi.»

«Kuid mida see tähendab, et kehale ei mõju mingeid jõude?»

«See tähendab lihtsalt, et keha liigub inertsiaalsüsteemis ühtlaselt ja sirgjooneliselt.»

Siin võiksime veelkord küsida: «Mis on inertsiaalsüsteem?» Et aga lootused ülaltoodust erineva vastuse saamiseks on liiga väikesed, püüame küsimuse muutmise teel midagi konkreetsemat teada saada.

«Kas Maaga jäigalt seotud koordinaatsüsteem on inertsiaalsüsteem?»

«Ei ole, sest Maa pöörlemise tõttu mehhaanikaseadused Maal täpselt ei kehti. Päikesega jäigalt seotud koordinaatsüsteemi võib paljude probleemide lahendamisel käsitleda inertsiaalsüsteemina; kui me aga võtame arvesse ka Päikesese pöörlemise, siis on jällegi selge, et Päikesega seotud koordinaatsüsteemi ei saa vaadata kui täpset inertsiaalsüsteemi.»

«Mis on siis konkreetselt teie inertsiaalsüsteem, kuidas peaks ta liikuma?»

«Inertsiaalsüsteem on ainult kasulik väljamõeldis, mille kohta ma ei tea, kuidas seda tegelikkuseks muuta. Ainult siis, kui ma saaksin eemaldada kõigist materiaalsetest kehast ja vabastada end kõigist välismõjudest, oleks minu koordinaatsüsteem inertsiaalsüsteemi omadustega.»

«Kuid mida te mõistate kõigist välismõjudest vaba koordinaatsüsteemi all?»

«Ma mõistan selle all inertsiaalsüsteemi.»

Me jõudsime jälle tagasi oma esialgse küsimuse juurde.

See küsitlus avastas klassikalises füüsikas ühe tõsise raskuse. Meil on olemas seadused, kuid me ei tea tausta, mille suhtes nad kehtivad. Kogu meie füüsika näib olevat liivale ehitatud.

Sellele raskusele võib läheneda ka teisest küljest. Püüame kujutleda, et kogu universumis on ainult üks keha, mis moodustab meie koordinaatsüsteemi. See keha hakkab pöörlema. Klassikalise mehhaanika seisukohalt erinevad füüsikaseadused pöörleval kehal seadustest mittepöörleval kehal. Kui inertsiseadus on õige ühel juhul, siis teisel juhul ta seda ei ole. Kuid kõik see kõlab väga kahtlasena. Kui universumis on ainult üks keha, kas siis on võimalik rääkida tema liikumisest? Liikumise all mõistame alati keha asukoha muutumist teise keha suhtes. Rääkides üheainsa keha liikumisest satume vastuollu sellega, mida me liikumise all harilikult mõistame. Tekib terav ebakõla klassikalise mehhaanika ja terve mõistuse vahel. Newtoni retsept on siin järgmine: kui kehtib inertsiseadus, siis on koordinaatsüsteem paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Kui inertsiseadus ei kehti, siis koordinaatsüsteem ühtlaselt ja sirgjooneliselt ei liigu. Meie otsus liikumise ja paigalseisu kohta oleneb sellest, kas antud koordinaatsüsteemis kõik füüsikaseadused kehtivad või mitte.

Võtame kaks keha, näiteks Päikese ja Maa. Liikumine, mida me siin näeme, on jällegi *suhtelise* iseloomuga. Selle liikumise kirjeldamisel võime siduda koordinaatsüsteemi kas Maaga või Päikesega. Kui nii vaadata, siis seisneb Koperniku suur saavutus selles, et ta viis koordinaatsüsteemi Maalt Päikesele. Et aga liikumine on suhteline ja kasutada võib mis tahes taustsüsteemi, siis näib, et ühe koordinaatsüsteemi eelistamiseks teisele pole siin mingisugust põhjust.

Jälle segab end vahele füüsika ja muudab meie vaateid, millega oleme juba harjunud. Päikesega seotud koordinaatsüsteem sarnaneb inertsiaalsüsteemiga rohkem kui Maaga seotud koordinaatsüsteem. Koperniku koordinaatsüsteemis saab füüsikaseadusi paremini rakendada kui Ptolemaiose koordinaatsüsteemis. Koperniku avastuse tähtsust on võimalik hinnata ainult siis, kui vaadata seda füüsika seisukohalt. See avastus näitab, et planeetide liikumise kirjeldamisel on Päikesega jäigalt seotud koordinaatsüsteemil suured eelised.

Klassikaline füüsika ei tunne ühtlast sirgliikumist, mis oleks absoluutne. Kui kaks koordinaatsüsteemi liiguvad teineteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, siis pole mingisugust mõtet öelda, et «see koordinaatsüsteem on pai-

gal ja teine liigub». Kui aga kaks koordinaatsüsteemi liiguvad teineteise suhtes mitteühtlaselt, siis on täielik põhjus öelda, et «see keha liigub ja teine on paigal (või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt)». Absoluutsel liikumisel on siin väga konkreetne mõte. Loomuliku mõistuse ja klassikalise füüsika vahel on selles küsimuses lai kuristik. Need raskused inertsiaalsüsteemi ja absoluutse liikumise küsimustes on omavahel tihedalt seotud. Absoluutsest liikumisest saame rääkida ainult siis, kui meil on olemas inertsiaalsüsteem, milles looduseadused kehtivad. Võib näida, et väljapääsu neist raskustest ei olegi, et ükski füüsikaline teooria neid raskusi vältida ei saa. Raskuste allikas peitub väites, et looduseadused on õiged ainult teatud liiki koordinaatsüsteemides, nimelt inertsiaalsüsteemides. Kas neid raskusi saab kõrvaldada või mitte, see oleneb vastusest järgmisele küsimusele. Kas me saame väljendada füüsikaseadusi nii, et nad kehtiksid kõigis koordinaatsüsteemides, mitte üksnes neis, mis liiguvad üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, vaid kõigis süsteemides, millede omavaheline liikumine võib olla täiesti meelevaldne? Kui seda on võimalik teha, siis oleme raskustest jagu saanud. Looduseadusi võime siis rakendada igas koordinaatsüsteemis. Võitlus Ptolemaiose ja Koperniku pooldajate vahel, mis oli nii äge teaduse varasematel aastatel, muutuks siis täiesti mõttetuks. Mõlemat koordinaatsüsteemi võiks siis ühteviisi põhjendatult kasutada. Laused «Päike on paigal ja Maa liigub» või «Päike liigub ja Maa on paigal» tähendaksid siis lihtsalt kahte erinevat kokkulepet erinevate koordinaatsüsteemide valiku kohta.

Kas me saaksime üles ehitada tõeliselt relativistliku füüsika, mis oleks õige kõigis koordinaatsüsteemides? See füüsika räägiks ainult relatiivsest liikumisest, kuna absoluutse liikumise jaoks temas kohta ei leiduks. See on tõepoolest võimalik!

Kuidas seda uut füüsikat konstrueerida, selle kohta on meil olemas vähemalt üks, kuigi väga ebamäärane viide. Tõeliselt relativistlik füüsika peab olema kasutatav kõigis koordinaatsüsteemides, erijuhuna teiste hulgas ka inertsiaalsüsteemis. Seaduste kuju inertsiaalsüsteemides me juba teame. Üldised seadused, mis kehtivad kõigis koordinaatsüsteemides, peavad inertsiaalsüsteemi erijuhul taanduma vanadeks, juba tuntud seadusteks.

Kõigis koordinaatsüsteemides kehtivate füüsikaseaduste formuleerimise probleemi lahendas niinimetatud *üldine relatiivsusteooria*; eelmist teooriat, mida sai kasutada ainult inertsiaalsüsteemides, nimetatakse *erirelatiivsusteooriaks*. Need kaks teooriat ei saa teineteisega muidugi vastuolus olla, sest vanad seadused sisalduvad uues teoorias kui uute seaduste erijuht inertsiaalsüsteemi korral. Kui inertsiaalsüsteem oli varem ainsaks süsteemiks, kus kehtisid füüsikaseadused, siis nüüd on nad ainult erikujuliseks piirjuhiks, sest lubatud on kõik koordinaatsüsteemid, ükskõik kuidas nad ka ei liiguks.

See on üldise relatiivsusteooria programm. Kuid visandas teid selle programmi täitmiseks, peame olema veelgi vähem konkreetseid, kui olime siiani. Uued raskused, mis tekivad teaduse arenemise käigus, sunnivad teooriat ikka abstraktsemaks ja abstraktsemaks muutuma. Meie ees seisab veel palju ootamatusi. Kuid lõppeesmärgiks jääb ikka tegelikkuse parem mõistmine. Teooriat ja vaatlust ühendavale loogilisele ahelale lisanduvad järjest uued lülid. Et puhastada teooriast eksperimendini viivat teed mittevajalikest ja kunstlikest oletustest, et haarata veelgi suuremat faktide hulka, selleks tuleb meil seda ahelat üha pikendada. Mida lihtsamaks ja põhilisemaks muutuvad meie oletused, seda keerulisem on rakendatav matemaatika; tee teooriast vaatluseni muutub pikemaks, kitsamaks ja keerulisemaks. Kuigi see kõlab paradoksaalselt, võib siiski öelda: kaasaegne füüsika on lihtsam kui vana füüsika, seetõttu näib ta olevat raskem ja keerulisem. Mida lihtsam on meie välismaailma pilt ja mida rohkem fakte ta haarab, seda paremini peegeldab ta meie teadvuses universumi harmooniat.

Meie uus idee on väga lihtne: konstrueerida füüsika, mis kehtiks kõigis koordinaatsüsteemides. Selle idee teostamine viib formaalsetele raskustele ja nõuab meilt niisuguse matemaatika rakedamist, mida füüsikas seni veel kasutatud pole. Käesolevas näitame ainult seda, kuidas selle programmi teostamine on seotud kahe tähtsa probleemiga — gravitatsiooni ja geomeetriaga.

## Liftis ja väljaspool lifti

Inertsiseadus märgib esimest tösist edusammu füüsikas, see on õieti füüsika tegelikuks alguseks. Inertsiseaduse formuleerimisele viisid mõtisklused idealiseeritud eksperimendi üle, kus keha liigub igavesti, ilma et talle mõjuks hõõrdumine või teised välisjõud. Selle ja hiljem ka paljude teiste näidete varal hakkasime aru saama, kui tähtsad on mõttes teostatud idealiseeritud eksperimendid. Vaatame ka siin idealiseeritud eksperimente, mis võivad näida küll väga fantastilistena, kuid mis aitavad meil relatiivsusest siiski nii palju taibata, kui seda meie lihtsad meetodid lubavad.

Eespool me käsitlesime idealiseeritud eksperimente ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuva toaga. Olgu siin vahelduse mõttes tegemist langeva liftiga.

Kujutleme suurt lifti tavalisest palju kõrgema pilvelõhkuja tipul. Lifti hoidev tross katkeb äkki ja lift hakkab vabalt maa poole langema. Liftis olevad vaatlejad teostavad langemise ajal katseid. Nende katsete kirjeldamisel me ignoreerime ohutakistust ja hõõrdumist, sest oma idealiseeritud tingimustes me neid ei tarvitse arvestada. Üks vaatlejatest võtab taskust taskurätiku ja kella ning pillab need käest. Mis juhtub? Välimine vaatleja, kes vaatab sisse lifti aknast, näeb, et taskurätik ja kell langevad maa poole ühteviisi, ühesuguse kiirendusega. Tuletame meelde, et langeva keha kiirendus massist üldse ei olene ja et just see fakt viis meid raske ja inertse massi võrdsuse avastamisele (lk. 30). Meenutame veel, et klassikalise mehhaanika seisukohalt oli raske ja inertse massi võrdsus täiesti juhuslik; see fakt ei mänginud mehhaanika struktuuris mingisugust osa. Relatiivsusteoorias on asi teisiti. Inertse ja raske massi võrdsus, mis avaldub kõigi langevate kehade ühesuguses kiirenduses, on siin väga oluline ja moodustab kõigi meie arutluste aluse.

Pöördume tagasi taskurätiku ja kella juurde, mis välimise vaatleja suhtes langesid ühesuguse kiirendusega. Kuid samasuguse kiirendusega liigub ka lift koos oma seinte, lae ja põrandaga. Siit järgneb, et kaugus langevate kehade ja lifti põranda vahel ei muutu. Sisemise vaatleja suhtes jäävad mõlemad kehad täpselt sinna, kus nad käest lahti lasti. Sisemine vaatleja võib gravitatsiooni-välja arvestamata jätta, sest selle allikas on väljaspool

tema koordinaatsüsteemi. Ta leiab, et liftis ei mõju langevatele kehadele mingisuguseid jõude; kehad seisavad paigal, nagu oleksid nad inertsiaalsüsteemis. Veidrad asjad toimuvad liftis! Kui vaatleja tõukab mingit keha näiteks ülespoole või allapoole, siis liigub see keha alati ühtlaselt ja sirgjooneliselt, kuni ta lifti lae või põrandaga kokku põrkab. Lühidalt öeldes: lifti sees oleva vaatleja jaoks kehtivad klassikalise mehhaanika seadused. Kõik kehad käituvad seal nii, nagu seda väidab inertsiseadus. Vabalt langeva liftiga jäigalt seotud koordinaatsüsteem erineb inertsiaalsüsteemist ainult ühes suhtes. Keha, millele ei mõju ühtegi jõudu, liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt lõpmatuseni. Klassikalises füüsikas käsitletav inertsiaalsüsteem on piiramatult nii ajas kui ruumis. Meie liftis oleva vaatleja olukord on teine. Tema koordinaatsüsteemi inertsiaalne iseloom on nii ruumis kui ka ajas piiratud. Ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuv keha põrkab varem või hiljem vastu lifti seina, mis rikub liikumise ühtlase ja sirgjoonelise iseloomu. Varem või hiljem põrkab ka lift ise maaga kokku ja teeb sellega lõpu nii vaatlejatele kui ka nende katsetele. See koordinaatsüsteem on ainult tõelise inertsiaalsüsteemi «taskuväljaanne».

Koordinaatsüsteemi niisugune lokaalne iseloom on väga oluline. Kui kujutleme lifti, mis ulatuks põhjapoolusest ekvaatorini, kusjuures taskurätik oleks põhjapooluse ja kell ekvaatori juures, siis liiguksid need kehad välimise vaatleja suhtes erinevate kiirendustega; kell ja taskurätik ei oleks teineteise suhtes paigal. Kogu eelnev arutus kukuks siis läbi! Lifti mõõtmed peavad olema niisugused, et oleks õige meie oletus kõigi kehade võrdsest kiirendusest välimise vaatleja suhtes.

Tingimusel, et liftis olev vaatleja seda kitsendust ei unusta, võib ta liftiga seotud koordinaatsüsteemi lugeda inertsiaalsüsteemiks. Me saame vähemalt näidata koordinaatsüsteemi, milles kehtivad kõik füüsikaseadused, kuigi see süsteem on ajaliselt ja ruumiliselt piiratud. Kui me kujutleme veel teist koordinaatsüsteemi, teist lifti, mis liigub vabalt langeva lifti suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, siis on need mõlemad koordinaatsüsteemid lokaalselt inertsiaalsed. Kõik seadused on neis mõlemas täpselt ühesugused. Üleminek ühest süsteemist teise on määratud Lorentzi teisendustega.

Vaatame nüüd, kuidas kirjeldavad liftis toimuvaid sündmusi välimine ja sisemine vaatleja.

Välimine vaatleja näeb lifti ja kõigi liftis olevate kehade liikumist ning leiab, et see toimub kooskõlas Newtoni gravitatsiooniseadusega. Maa gravitatsioonivälja tõttu pole liikumine selle vaatleja suhtes ühtlane, vaid kiirendatud.

Liftis sündinud ja üleskasvanud füüsikute põlvkond saaks kõigest hoopis teisiti aru. Nad oleksid veendunud, et nende süsteem on inertsiaalsüsteem; nad kirjeldaksid kõiki loodusseadusi lifti suhtes, väites õigusega, et neil seadustel on selles koordinaatsüsteemis eriti lihtne kuju. Loomulikult oletaksid nad, et nende lift on paigal ja nende koordinaatsüsteem on inertsiaalsüsteem.

On võimatu leida mingisugust põhimõttelist erinevust välimise ja sisemise vaatleja vahel. Neil mõlemal on õigus vaadelda kõiki sündmusi oma koordinaatsüsteemi taustal ja mõlema poolt antud sündmuste kirjeldused võivad olla võrdselt järjekindlad.

Sellest näitest selgub, et füüsikalisi nähtusi saab ühte viisi järjekindlalt kirjeldada kahes koordinaatsüsteemis isegi sel juhul, kui nende koordinaatsüsteemide suhteline liikumine ei ole ühtlane ja sirgjooneline. Kuid niisugusel kirjeldamisel peame arvestama ka gravitatsiooni, mis moodustab niiöelda «silla» üleminekuks ühest koordinaatsüsteemist teise. Välimise vaatleja suhtes on olemas gravitatsiooniväli, kuna sisemise vaatleja süsteemis see puudub. Välimise vaatleja jaoks on olemas lifti kiirendatud liikumine gravitatsiooniväljas, sisemise vaatleja arvates on lift aga paigal ja gravitatsioonivälja temas ei ole. Kuid see gravitatsioonivälja näol antud «sild», mis võimaldab sündmusi kirjeldada mõlemas koordinaatsüsteemis, toetub ise väga olulisele alusele — raske ja inertse massi võrdsusele. Kui poleks seda klassikalises mehhaanikas märkamatuks jäänud juhtideed, oleksid kõik meie praegused arutlused alusetud.

Võtame nüüd vaatluse alla eelmisest veidi erineva ideaaliseeritud eksperimendi. Oletame, et meil on koordinaatsüsteem, milles kehtib inertsiseadus. Mis juhtub liftis siis, kui lift on niisuguse inertsiaalsüsteemi suhtes paigal, seda me juba kirjeldasime. Muudame nüüd katset. Keegi on kinnitanud lifti külge väljastpoolt trossi ja tõmbab lifti konstantse jõuga joonisel 64 näidatud suunas. Pole olu-

line, kuidas ta seda täpselt teeb. Et välimise vaatelejaga seotud koordinaatsüsteemis kehtivad mehhaanikaseadused, siis liigub kogu lift konstantse kiirendusega ülespoole. Kuulame jälle, mida ütlevad liftis toimuvate sündmuste kohta välimine ja sisemine vaateleja.

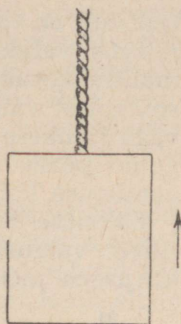
*Välimine vaateleja:* Minu koordinaatsüsteem on inertsiaalsüsteem. Lift liigub selles süsteemis konstantse kiirendusega, sest talle mõjub konstantne jõud. Et liftis olevate vaatelejate suhtes mehhaanikaseadused ei kehti, siis on nende liikumine absoluutse iseloomuga. Nad ei leia, et kehad, millele ei mõju ühtki jõudu, püsiks paigal. Vabaks lastud keha põrkab varsti vastu lifti põrandat, mis liigub keha suunas. See juhtub taskurätikuga täpselt samuti kui kellagagi. Mulle näib väga iseloomulikuna, et liftis olev vaateleja toetub alati «põrandale», sest niipea kui ta üles hüppab, jõuab põrand talle kohe järele.

*Sisemine vaateleja:* Ma ei näe ühtki põhjust, mis sunniks mind arvama, et minu lift on absoluutses liikumises. Ma olen nõus, et minu liftiga jäigalt seotud koordinaatsüsteem ei ole tegelikult inertsiaalsüsteem, kuid ma ei usu, et tema liikumisel oleks midagi tegemist absoluutse liikumisega. Minu kell, taskurätik ja kõik teised kehad langevad sellepärast, et lift tervikuna asetseb gravitatsiooniväljas. Ma näen täpselt samasugust liikumist nagu Maakeral olev inimene. Tema seletab seda väga lihtsalt gravitatsioonivälja mõjuga. Sama seletus sobib hästi ka mulle.

Ühteviisi järjekindlad on mõlemad kirjeldused, üks välimise, teine sisemise vaateleja oma. Pole võimalik otsustada, kumb neist on õige. Liftis toimuvate nähtuste kirjeldamisel võime lugeda õigeks nii ühte kui ka teist. Me võime koos välimise vaatelejaga rääkida mitteühtlasest liikumisest ja gravitatsioonivälja puudumisest või koos sisemise vaatelejaga lugeda õigeks, et lift on paigal ja asetseb gravitatsiooniväljas.

Välimine vaateleja võib oletada, et lift on «absoluutses» mitteühtlasest liikumises. Kuid liikumist, mida võib kõrvaldada oletusega, et mõjub hoopis gravitatsiooniväli, ei saa lugeda absoluutseks liikumiseks.

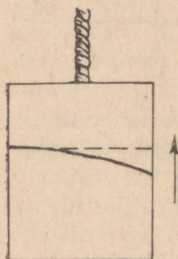
Võimalik, et siiski on olemas väljapääs nendest raskus-



Joon. 64.

test, mis on tingitud sellest, et me ei tea, kumba kirjeldamisviisi valida. Võimalik, et me saame otsustada ühe võimaluse kasuks ja lükata teise kõrvale. Kujutleme horisontaalset valguskiirt, mis tungib külgaknast lifti ja jõuab väga lühikese aja jooksul vastasseinani. Vaatame, missugune peaks olema valguskiire tee mõlema vaatleja ennustuse kohaselt.

*Välimine vaatleja* näeb lifti kiirendatud liikumist ja ütleb: valguskiir langeb läbi akna ja liigub konstantse kiirusega mööda horisontaalset sirget vastasseina poole.



Joon. 65.

Kuid lift liigub ülespoole ja selle aja jooksul, mis valguskiirel kulub vastasseinani jõudmiseks, muutub ka lifti asukoht. Seetõttu ei lange valguskiir vastasseinale täpselt samale kõrgusele, nagu oli tema sissetuleku koht, vaid veidi allapoole (joonis 65). Erinevus on küll väga väike, kuid ta on siiski olemas. Valguskiire tee lifti suhtes ei ole sirgjoon, vaid sirgest õige veidi erinev kõverjoon. Nimetatud erinevus tuleb sellest, et aja jooksul, mis kulub kiirel lifti läbimiseks, liigub ka lift teatud vahemaa võrra edasi.

*Sisemine vaatleja*, kes usub, et tema liftis mõjub kõigile objektidele gravitatsiooniväli, ütleb: siin pole midagi tegemist lifti kiirendatud liikumisega, vaid ainult gravitatsioonivälja mõjuga. Valguskiir on kaalutu, temale gravitatsiooniväli mõju ei avalda. Kui saata välja horisontaalne kiir, siis peab see jõudma lifti seinale täpselt selle koha vastaspunktis, kust ta sisse tuli.

Et nähtus kulgeb kummagi vaatleja jaoks erinevalt, siis näib siin peituvat võimalus valiku tegemiseks kahe vastandliku vaatekoha vahel. Kui kummagi vaatleja arutluses midagi ebaloogilist ei ole, siis variseb kokku kogu meie eelnev argumentatsioon. See tähendab, et me ei saa kasutada kahte võrdõiguslikku ja järjekindlat kirjeldamisviisi, ühte, kus gravitatsioonivälja ei ole, ja teist, kus esineb ka gravitatsiooniväli.

Õnneks on aga sisemise vaatleja arutluses jäme viga. See päästab järelduse, millele me eespool jõudsim. Sisemine vaatleja ütles: «Valguskiir on kaalutu, temale gravitatsiooniväli mõju ei avalda.» See ei saa olla õige! Valguskiir kannab energiat, kuid energial on olemas mass. Et aga inertne ja raske mass on ekvivalentsed, siis tõm-

bab gravitatsiooniväli kõiki inertseid masse enda poole. Valguskiir muudab gravitatsiooniväljas oma suunda täpselt samuti, nagu seda teeb horisontaalsuunas valguse kiirusega visatud keha. Kui sisemine vaatleja oleks arutlenud korrektselt ja arvestanud valguskiire paindumist gravitatsiooniväljas, oleks ta jõudnud täpselt samale tulemusele nagu välimine vaatlejagi.

Maa gravitatsiooniväli on selleks liiga nõrk, et kutsuda esile valguskiire nii suurt paindumist, mida saaks tegelikult mõõta. Kuid kuulsad vaatlused, mida on tehtud päikesevarjutuste ajal, näitavad veenvalt, kuigi kaudselt, et gravitatsioonivälja mõju valguskiire teele on olemas.

Nendest näidetest ilmneb, et lootus luua relativistlikku füüsikat on küllaltki põhjendatud. Kuid selleks tuleb meil kõigepealt käsile võtta gravitatsiooniprobleem.

Lifti näites selgus mõlema kirjeldamisviisi järjekindlus. Me võime oletada, et tegemist on mitteühtlase liikumisega, kuid me võime seda ka mitte teha. Gravitatsioonivälja abil võime oma näidetest «absoluutse» liikumise välja lülitada. Kuid see tähendab, et mitteühtlases liikumises pole midagi absoluutset, sest gravitatsioonivälja abil saab teda täielikult kõrvaldada.

Absoluutse liikumise ja inertsiaalsüsteemi viirastused võime füüsikast rahulikult välja visata ja üles ehitada tõeliselt relativistliku füüsika. Meie idealiseeritud katsed näitavad, kuidas üldise relatiivsusteooria probleem on tihedalt seotud gravitatsiooniprobleemiga ja miks inertse ja raske massi võrdsus mängib selle juures nii olulist osa. On selge, et gravitatsiooniprobleemi lahendus üldises relatiivsusteoorias peab erinema Newtoni lahendusest. Analooiliselt teiste looduseadustega tuleb ka gravitatsiooniseadused nii formuleerida, et nad kehtiksid kõikvõimalikes koordinaatsüsteemides, kuna Newtoni poolt formuleeritud klassikalise mehhaanika seadused on õiged ainult inertsiaalsüsteemides.

### Geomeetria ja eksperiment

Järgmine näide on lifti näitest veelgi fantastilisem. Me peame leidma tee uue probleemi juurde: kuidas on üldine relatiivsusteooria seotud geomeetriaga. Alustame sellest, et kirjeldame maailma, kus elavad ainult kahedimensioonilised olendid, mitte kolmedimensioonilised nagu meie maailmas. Kahedimensioonilisi olendeid, kes tegutsevad

kahedimensioonilisel ekraanil, oleme harjunud nägema kinos. Kujutleme nüüd, et need varjukujud, s. o. ekraanil tegutsevad näitlejad, on tegelikult olemas, et neil on mõtlemisvõime, et nad võivad luua oma teadust ja et kahedimensiooniline ekraan on nende jaoks geomeetriseliseks ruumiks. Need olendid pole võimelised konkreetsetelt kujutlema kolmedimensioonilist ruumi, samuti nagu meie ei oska kujutleda maailma, millel on neli dimensiooni. Nad võivad painutada sirgjoont; nad teavad, mis on ringjoon, kuid nad pole võimelised konstrueerima kera, sest selleks peaksid nad lahkuma oma kahedimensiooniliselt ekraanilt. Meie oleme analoogilises olukorras. Me võime painutada ja pöörata jooni ja pindu, kuid vaevalt küll võime kujutleda painutatud ja pööratud kolmedimensioonilist ruumi.

Elades, mõeldes ja eksperimenteerides võiksid meie varjukujud lõpuks tundma õppida kahedimensioonilist eukleiidilist geomeetriat. Nad võiksid näiteks tõestada, et kolmnurga sisenurkade summa on 180 kraadi. Nad võiksid konstrueerida kaks ühise keskpunktiga ringjoont, ühe väikese ja teise suure. Nad leiaksid, et nende ringjoonte ümbermõõtude suhe on võrdne raadiuste suhtega — resultaat, mis iseloomustab jällegi eukleiidilist geomeetriat. Kui ekraan oleks lõpmata suur, siis veenduksid need varjud selles, et kui nad alustavad sirgjoonelist teekonda ühes suunas, siis ei jõua nad enam kunagi tagasi oma lähtepunkti.

Kujutleme nüüd, et need kahedimensioonilised olendid elavad muutunud tingimustes. Oletame näiteks, et keegi väljastpoolt, «kolmandast dimensioonist», viib nad ekraanilt üle väga suure raadiusega kera pinnale. Kui need varjud on kera pindalaga võrreldes väga väikesed, kui neil ei ole vahendeid sidepidamiseks suurtel kaugustel ja kui nad ei saa liikuda väga kaugele, siis nad mingisugust muutust ei märka. Nurkade summa väikestes kolmnurkades on ikka 180 kraadi. Kahe ühise keskpunktiga ringjoone raadiuste suhe on ikka veel võrdne ümbermõõtude suhtega. Sirgjooneline teekond ei vii neid olendeid kunagi lähtepunkti tagasi.

Kuid oletame, et need varjud arendavad aja jooksul oma teoreetilisi ja tehnilisi teadmisi. Leiutagu nad näiteks liiklusvahendid, mis annavad võimaluse kiiresti katta pikki distantse. Siis avastaksid nad varsti, et sõites kogu

aeg sirgjooneliselt edasi, jõutakse lõpuks lähtepunkti tagasi. «Sirgjooneliselt edasi» tähendab siin kera suurringi suunda. Samuti leiaksid need varjud, et juhul, kui ühe ringjoone raadius on suur ja teise oma väike, ei ole ühise keskpunktiga ringjoonte raadiuste suhe võrdne ümbermõõtude suhtega.

Kujutleme nüüd, et meie kahedimensioonilised olendid on minevikus põlvest põlve ainult eukleidilist geomeetria õppinud, sest neil puudusid võimalused kaugemale sõitmiseks ja see geomeetria oli vaadeldud faktide seletamiseks küllalt hea. Kui nad oleksid konservatiivsed, siis teeksid nad nüüd kindlasti kõikvõimalikke pingutusi vana geomeetria säilitamiseks, vaatamata oma mõõtmistulemustele. Nad püüaksid sundida füüsikat taluma seda vastuolude koorimat. Nad püüaksid leida mõnda füüsikalist põhjust, näiteks temperatuuride erinevust, mis deformeeriks jooni ja põhjustaks kõrvalekaldumist eukleidilisest geomeetriast. Kuid varem või hiljem peaksid nad leidma, et samade nähtuste kirjeldamiseks on olemas palju loogilisem ja järjekindlam tee. Nad taipaksid viimaks, et nende maailm on lõplik maailm, mille geomeetria alused erinevad sellest, mida nad on õppinud. Nad saaksid aru, et nende maailm on kahedimensiooniline kerapind, kuigi nad seda endale ette kujutada ei oskaks. Varsti õpiksid nad tundma uue geomeetria aluseid, mis erinevad küll eukleidilise geomeetria omadest, kuid mida saab nende kahedimensioonilise maailma kirjeldamisel sama loogilise järjekindlusega rakendada. Uuele põlvkonnale, kes on õppinud kerapinna geomeetria, näiks vana eukleidiline geomeetria kunstliku ja keerulisemana, sest see ei seleta vaatlustest saadud fakte.

Pöördume tagasi meie oma maailma kolmedimensiooniliste elanike juurde.

Mida tähendab väide, et meie kolmedimensiooniline ruum on eukleidiline ruum? See tähendab, et kõiki eukleidilise geomeetria loogilisel teel tuletatud väiteid saab kinnitada ka tegeliku eksperimendiga. Kasutades jäiku kehi või valguskiiri, saame ehitada kujundeid, mis vastavad eukleidilise geomeetria idealiseeritud kujundeile. Joonlaua serv või valguskiir vastab sirgele; peenikestest jäikadest varrastest ehitatud kolmnurga nurkade summa on 180 kraadi; peenikesest traadist ühe keskpunkti ümber kujundatud kahe ringjoone raadiuste suhe on võrdne

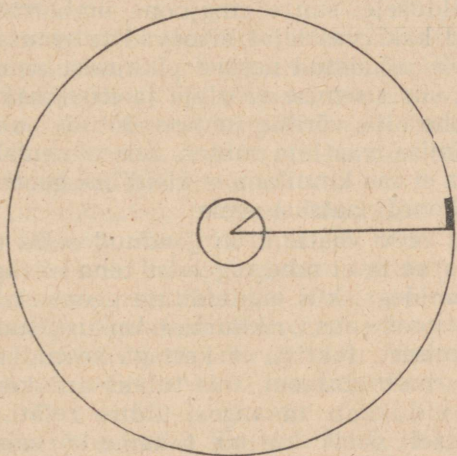
ümbermõõtude suhtega. Niisuguse tõlgendamise korral muutub eukleidiline geomeetria üheks peatükiks füüsikas, tõsi küll, väga lihtsaks peatükiks.

Kuid me võime kujutleda, et ilmnesid ebakõlad: selgus näiteks, et nurkade summa suures kolmnurgas ei ole 180 kraadi, kuigi kolmnurk on konstrueeritud varrastest, mille lugemine jääkadeks on küllaltki põhjendatud. Et me oleme juba omaks võtnud mõtte esitada eukleidilise geomeetria kujundeid jääkade kehade abil, siis me tõenäoliselt hakkame otsima mingit füüsikalist jõudu, mis võiks olla meie varraste ootamatu ebatavalise käitumise põhjuseks. Me püüaksime avastada selle jõu füüsikalist olemust ja tema mõju teistele nähtustele. Eukleidilise geomeetria päästmiseks süüdistaksime kujundeid selles, et nad pole jäigad, et nad ei vasta täpselt eukleidilise geomeetria kujundeile. Me püüaksime leida jääkade kehade paremaid esindajaid, mis käituksid nii, nagu seda nõuab eukleidiline geomeetria. Kui aga eukleidilise geomeetria ja füüsika ühendamine ühte lihtsasse ning loogilisse süsteemi ei õnnestu, siis peame loobuma mõttest, nagu oleks meie ruum eukleidilise iseloomuga. Tuginedes üldisematele oletustele meie ruumi geomeetriliste omaduste kohta, tuleks meil siis otsida tegelikkuse jaoks usutavamat kujutamisi.

Vajadust selleks võib illustreerida idealiseeritud eksperimendiga, mis näitab, et tõeliselt relativistlik füüsika ei saa tugineda eukleidilisele geomeetriaile. Selles arutluses kasutame andmeid, mida saime teada juba inertsiaalsüsteemi ja spetsiaalse relatiivsusteooria käsitlemisel.

Kujutleme suurt ketast, millele on joonistatud kaks ühise keskpunktiga ringjoont, üks väga suur ja teine hästi väike (joonis 66). Ketas pöörleb kiiresti. Ta pöörleb välimise vaatleja suhtes, kuna sisemine vaatleja asetseb ketastal. Oletame veel, et välimise vaatleja koordinaatsüsteemiks on inertsiaalsüsteem. Välimine vaatleja võib joonistada oma inertsiaalsüsteemis kaks samasugust ringjoont, ühe suure ja teise väikese, mis tema koordinaatsüsteemi suhtes on paigal ja langevad kokku pöörlevate ringjoontega. Selle vaatleja koordinaatsüsteemis kui inertsiaalsüsteemis kehtib eukleidiline geomeetria. Vaatleja leiab järelikult, et ringide ümbermõõtude suhe on võrdne raadiuste suhtega. Mida võime öelda aga kettal oleva vaatleja kohta? Klassikalise füüsika ja spetsiaalse relatiivsus-

teoria seisukohalt ei kuulu tema koordinaatsüsteem üldse lubatud süsteemide hulka. Kui me aga püüame määrata füüsikaseaduste uut kuju, mis kehtiks kõigis koordinaatsüsteemides, siis peame võtma kettal olevat vaatlejat sama tõsiselt kui välimistki vaatlejat. Jälgime nüüd väljastpoolt, kuidas sisemine vaatleja püüab oma mõõtmiste abil määrata pöörleval kettal kujutatud ringjoonte übermõõte ja raadiusi. Ta kasutab selleks samasugust väikest mõõdupulka nagu välimine vaatlejagi. «Samasugune» tähendab kas sedasama mõõdupulka, mida kasutas välimine vaatleja ja andis siis sisemisele vaatlejale üle, või kahte mõõdupulka, mis on ühepikkused sel juhul, kui nad kumbki koordinaatsüsteemi suhtes ei liigu.



Joon. 66.

Kettal asetsev sisemine vaatleja hakkab mõõtma väikese ringjoone raadiust ja übermõõtu. Tema mõõtmiste tulemused peavad kokku langema välimise vaatleja omadega. Ketta pöörlemistelg läbib mõlema ringi keskpunkti. Tsentrilähedastel ketta osadel on kiirused väga väikesed. Kui ringjoon on küllalt väike, siis võime spetsiaalse relatiivsusteooria rahulikult kõrvale jätta ja rakendada klassikalist mehhaanikat. See tähendab, et mõõdupulk on välimise ja sisemise vaatleja jaoks ühepikkune ja et mõlemad vaatlejad saavad ühesugused mõõtmistulemused. Nüüd mõõdab kettal olev vaatleja suure ringjoone

raadiust. Raadiuse suunas asetatud mõõdupulk liigub välimise vaatleja suhtes. Et aga liikumise suund on pulgaga risti, siis pulk ei tõmbu kokku — ta on mõlema vaatleja jaoks ühepikkune. Kolm mõõtmist — kahe raadiuse ja väikese ringjoone übermõõdu mõõtmised — annavad seega mõlema vaatleja korral sama tulemuse. Kuid neljanda mõõtmisega on asi teisiti! Suure ringjoone übermõõt tuleb kummalgi vaatlejal erinev. Ringjoonele paigutatud mõõdupulk on nüüd liikumise suunaga paralleelne, seetõttu on ta välimise vaatleja suhtes ilmselt lühem kui mõõdupulk, mis vaatleja suhtes paigal seisab. Välimise ringjoone kiirus on sisemise ringjoone omast palju suurem, seetõttu tuleb seda lühenemist siin arvestada. Rakendades spetsiaalse relatiivsusteooria tulemusi, jõuame järeldusele: suure ringjoone übermõõdu mõõtmisel saavad kaks vaatlejat erinevad tulemused. Et kahe vaatleja poolt mõõdetud neljast pikkusest ainult üks tuli neil erinev, siis sisemise vaatleja jaoks ei saa ringjoonte raadiuste suhe olla võrdne übermõõttude suhtega, nagu see on välimise vaatleja suhtes. See tähendab, et kettal olev vaatleja ei saa kinnitada eukleidilise geomeetria kehivust oma koordinaatsüsteemis.

Kui kettal olev vaatleja on jõudnud selle tulemuseni, võib ta öelda, et ta ei taha tegemist teha niisuguste koordinaatsüsteemidega, kus eukleidiline geomeetria ei kehti. Eukleidilise geomeetria rikkumine on tingitud absoluutsest pöörlemisest, faktist, et kettaga seotud koordinaatsüsteem on halb süsteem, mis tuleks ära keelata. Kuid selle väitega lükkab ta tagasi üldise relatiivsusteooria põhiidee. Teiselt poolt, kui me tahame kõrvaldada absoluutset liikumist ja säilitada üldise relatiivsusteooria ideid, siis tuleb kogu füüsika üles ehitada eukleidilisest geomeetriast üldisema geomeetria alusel. Kõikide koordinaatsüsteemide lubamine viib meid paratamatult eespool toodud järeldusele.

Muudatused, mida tõi kaasa üldine relatiivsusteooria, ei saa piirduda ainult ruumiga. Spetsiaalses relatiivsusteoorias kasutasime mingi koordinaatsüsteemi suhtes liikumatuid kelli, mis käisid ühesuguse rütmiga ja olid omavahel sünkroniseeritud, s. o. nad näitasid korraga ühte aega. Mis juhtub kellaga mitteinertsiaalses koordinaatsüsteemis? Vaatame jälle idealiseeritud eksperimenti pöörleva kettaga. Välimisel vaatlejal on oma koordinaat-

süsteemis eeskujulikud kellad, mis käivad kõik sama rüt- miga ja on omavahel sünkroniseeritud. Sisemine vaatleja võtab kaks ühesugust kella ja asetab ühe neist väikesele sisemisele ja teise suurele välimisele ringjoonele. Väike- sel ringjoonel asetseva kella kiirus välimise vaatleja suhtes on väga väike. Siit võime julgelt järeldada, et selle kella rütm on samasugune nagu välimise vaatleja kel- lalgi. Kuid suurel ringjoonel olev kell liigub küllalt suure kiirusega, mis muudab tunduvalt tema rütmi võrreldes välimise vaatleja kellaga ja järelikult ka väikesel ring- joonel oleva kellaga. Kahel pöörleval kellal on seega eri- nevad rütmid. Kasutades spetsiaalse relatiivsusteooria tulemusi, näeme jälle, et pöörlevas koordinaatsüsteemis pole võimalik kelli nii seada, nagu seda sai teha inert- siaalsüsteemis.

Et välja selgitada järeldusi, mis tulenevad sellest ja eelmisest idealiseeritud eksperimendist, toome veel kord dialoogi klassikalisse füüsikasse uskuva vana füüsiku *K* ja üldist relatiivsusteooriat pooldava kaasaegse füüsiku *R* vahel. *K* olgu inertsiaalsüsteemis asetsev välimine vaat- leja, kuna *R* seisku pöörleval kettal.

*K*. Teie koordinaatsüsteemis eukleidiline geomeetria ei kehti. Ma jälgisin teie mõõtmisi ja olen nõus, et teie koordinaatsüsteemis kahe ringjoone übermõõtude suhe ei ole võrdne raadiuste suhtega. Kuid see näitab, et teie süsteem kuulub keelatud koordinaatsüsteemide hulka. Minu koordinaatsüsteem seevastu on inertsiaalsüsteemi omadustega, ma võin eukleidilist geomeetriat rahulikult rakendada. Teie ketta liikumine on absoluutne lii- kumine. Ketas moodustab klassikalise füüsika seisukohalt keelatud koordinaatsüsteemi, milles mehhaanikaseadused ei kehti.

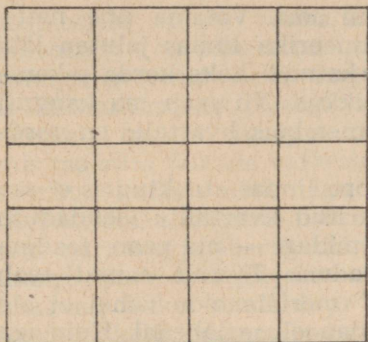
*R*. Ma ei taha absoluutsest liikumisest midagi teada. Minu koordinaatsüsteem on sama hea kui teie oma. See, mida mina tegelikult nägin, oli teie pöörlemine minu ketta suhtes. Keegi ei saa mulle keelata seda, et ma vaat- tan kõiki liikumisi oma ketta taustal.

*K*. Kuid kas te ei tunne kummalise jõu mõju, mis püüab teid ketta keskpunktist eemale viia? Kui teie ketas ei oleks kiiresti pöörlev karussell, kindlasti ei saaks siis esineda kahte fakti, mille olemasolus te tegelikult veen- dusite: te poleks märganud jõudu, mis teid ketta äärele tõukab, ja teie ei oleks saanud jõuda järeldusele, et

eukleidilise koordinaatsüsteemi rakendamine teie koordinaatsüsteemis on võimatu. Kas nendest faktidest on veel vähe teie veenmiseks, et teie koordinaatsüsteem on absoluutses liikumises?

R. Kuidas nii! Ma muidugi märkasin mõlemaid fakte, mida te siin nimetasite, kuid ma oletan, et need on tingitud kettal valitsevast veidrakujulisest gravitatsiooniväljast. Ketta keskpunktist äärtele suunatud gravitatsiooniväli deformeerib minu jäigad vardad ja muudab minu kellade rütmi. Gravitatsiooniväli, mitte-eukleidiline geometria ja erinevate rütmidega kellad on minu jaoks omavahel tihedalt seotud nähtused. Kui ma eelistan mõnda koordinaatsüsteemi, siis pean samal ajal oletama, et on olemas ka vastav gravitatsiooniväli, mis mõjub jäikadele varrastele ja kelladele.

K. Kuid kas te teate ka neid raskusi, mida põhjustab teie üldine relatiivsusteooria? Ma püüaksin selgitada teile oma seisukohta lihtsa mittefüüsikalise näite abil. Kujutleme idealiseeritud Ameerika linna, mille moodustavad omavahel paralleelsed striidid ja nendega risti suunduvad, omavahel paralleelsed avenüüd. Kaugus striitide, samuti kaugus avenüüde vahel olgu igal pool ühesugune. Niisugusel juhul on kõik kvartalid täpselt ühesuurused. Mis tahes kvartali asukohta on nüüd lihtne iseloomustada. Kuid ilma eukleidilise geometriata oleks niisugune süsteem võimatu. Me ei saa näiteks katta kogu Maakera üheainsa ideaalse Ameerika linnaga. Pilk gloobusele veenab teid selles. Samuti ei saa me katta niisuguse «Ameerika tüüpi linnaga» ka teie ketast. Te väidate, et teie mõõdulatte deformeerib gravitatsiooniväli. Et te ei saa kinnitada Eukleidese teoreemi raadiuste ja übermõõtude suhete võrdsusest kahel ringjoonel, siis on selge, et niisuguse striitide ja avenüüde võrgu jätkamine kui tahes kaugele on võimatu. Varem või hiljem satute raskustesse ja leiate, et teie kettal seda teha ei saa. Geomeetria teie pöörleval kettal sarnaneb kõvera pinna geometriaga, kus, nagu teada, kui tahes suure pinnatüki katmine striitide ja avenüüde võrguga ei õnnestu. Et võtta rohkem füüsikalist näidet, kujutleme ebaühtlaselt soojendatud plaati, s. o. plaati, millel pinna erinevates osades on erinevad temperatuurid. Kas te võite soojenemisel pikenevatest peenikestest raudvarrastest kujundada joonisel 67 kujutatud «paralleel-ristvõrgu»? Muidugi mitte! Teie

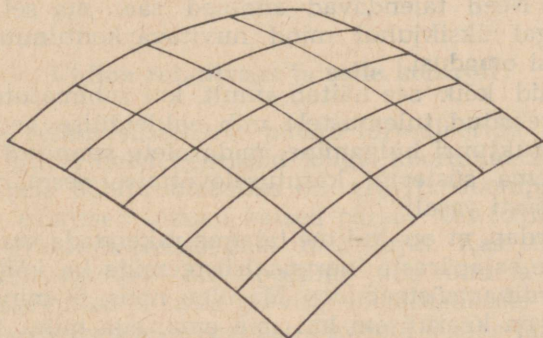


Joon. 67.

«gravitatsiooniväli» mängib mõõdupuudega sama viguri kui temperatuurimuutumine peenikeste raudvarras- tega.

R. See kõik mind ei kogu- ta. Striitide ja avenüüde võrk on vajalik punktide asukohtade määramiseks, kella abi kasutame sünd- muste järjestamisel. Linn ei tarvitse sugugi olla Ameerika linn, sama hästi võiks ta olla vanade Eu- roopa linnade taoline. Ku-

jutleme, et valmistasime plastilisest materjalist ideaalse linna ja seejärel deformeerisime teda (joonis 68). Ka selles linnas saan ma loendada kvartaleid ja eristada striite ning avenüüsid, kuigi need pole enam sirged ega asetse üksteisest võrdsel kaugusel. Analoogiliselt määrab geograafiline pikkus koos laiuselga punkti asukoha meie Maakeral, kuigi meridiaanide ja paralleelide võrk ei ole «Ameerika linna» struktuuriga.



Joon. 68.

K. Kuid ma näen veel ühte raskust. Te olete sunnitud kasutama «Euroopa linna struktuuri». Ma olen nõus, et ruumipunkte või sündmusi te saate järjestada, kuid kau- guste mõõtmisel tekivad niisuguse konstruktsiooni korral raskused. See konstruktsioon ei anna teile ruumi *meetri-*

*lisi omadusi*, nagu annab minu oma. Võtame ühe näite. Ma tean, et kui mina oma Ameerika linnas jalutan läbi kümme kvartalit, siis olen katnud kaks korda pikema tee, kui on viie kvartali pikkus. Nii saan ma kaugusi otseselt määrata, sest ma tean, et kõik kvartalid on võrdsed.

R. See on õige. Oma «Euroopa linna» struktuuris ei saa ma mõõta kaugusi deformeeritud kvartalite loendamise kaudu. Ma pean teadma veel midagi — ma pean teadma oma pinna geomeetrilisi omadusi. Täpselt samuti teab igaüks, et kaugus  $0^\circ$  ja  $10^\circ$  meridiaanide vahel ei ole ekvaatoril sama suur kui põhjapooluse lähedal. Kuid iga meremees teab, kuidas määrata kaugust kahe niisuguse punkti vahel meie Maakeral, sest ta tunneb Maa pinna geomeetrilisi omadusi. Ta võib seda kaugust määrata kas arvutuste teel, kasutades oma teadmisi sfäärilisest trigonomeetriast, või katseliselt, sõites oma laeval ühesuguse kiirusega läbi mõlemad möödetaavad distantsid. Teie juhul on see probleem triviaalne, sest kõik striidid ja avenüüd on üksteisest võrdsel kaugusel. Maakeral on asi keerulisem;  $0^\circ$  ja  $10^\circ$  meridiaanid lõikuvad poolustel, kuna ekvaatoril on nad teineteisest kõige kaugemal. Analoogiliselt sellega pean ma kauguste määramisel oma «Euroopa linnas» teadma midagi rohkem kui teie oma «Ameerika linnas». Need täiendavad andmed saan ma sel teel, et uurin igal üksikjuhul mind huvitava kontiinuumi geomeetrilisi omadusi.

K. Kuid kõik see näitab ainult, kui sobimatutele ning komplitseeritud tulemustele viib eukleidilise geomeetria lihtsa struktuuri hülgamine, mida olete sunnitud tegema keerulisema süsteemi kasutuselevõtmise eesmärgil. Kas see on tõesti vajalik?

R. Kardan, et on, kui me tahame rakendada oma füüsikat peale salapärase inertsiaalsüsteemide ka kõigis teistes koordinaatsüsteemides. Ma olen nõus, et minu matemaatika on keerulisem kui teie oma, aga minu füüsikalised oletused on lihtsamad ja loomulikumad.

Diskussioon piirdus seni kahedimensioonilise kontiinumiga. Vaidlusprobleem üldises relatiivsusteoorias on veel palju keerulisem, sest seal on tegemist mitte enam kahedimensioonilise, vaid neljadimensioonilise aegruumikontiinumiga. Kuid ideed on seal samasugused, nagu visandasime kahedimensioonilisel juhul. Üldises relatiiv-

susteoorias ei ole võimalik kasutada paralleel- ja ristvarrastest moodustatud mehhaanilist sõrestikku ega sünkroniseeritud kelli, nagu seda võib teha spetsiaalses relatiivsusteoorias. Mingi sündmuse toimumiskohta ja -hetke ei saa me siin igas meelevaldses koordinaatsüsteemis määrata jääkade varraste ja rütmiliste ning sünkroniseeritud kellade abil, nagu seda tehakse spetsiaalse relatiivsusteooria inertsiaalsüsteemides. Kuid mitteeuclidiliste varraste ja ebarütmiliste kellade abil saame määrata ikkagi sündmuste järjestust. Ent tegelikke mõõtmisi, mis nõuavad jäiku vardaid ja täpse rütmiga ning sünkroniseeritud kelli, saame teostada ainult lokaalses inertsiaalsüsteemis. Selles süsteemis kehtib kogu spetsiaalne relatiivsusteooria. Kuid niisugused «head» koordinaatsüsteemid on ainult kohaliku tähtsusega, nende inertsiaalne iseloom on ajas ja ruumis piiratud. Iga meelevaldse koordinaatsüsteemi vaatlejad saavad ennustada lokaalses inertsiaalsüsteemis teostatud mõõtmiste tulemusi, selleks on neil tarvis teada aegruumi-kontiinuumi iseloomu.

Meie idealiseeritud katsed viitavad ainult uue relativistliku füüsika üldistele omadustele ja näitavad meile, et põhiprobleemiks on gravitatsiooniprobleem. Peale selle näitavad need katsed, et üldine relatiivsusteooria viib aja ja ruumi mõistete edasisele üldistamisele.

## Üldine relatiivsus ja selle kontroll

Üldine relatiivsusteooria püüab formuleerida füüsikaseadusi nii, et need kehtiksid kõigis koordinaatsüsteemides. Teooria põhiprobleemiks on gravitatsiooniprobleem. Need on esimesed tõsised katsed pärast Newtonit formuleerida gravitatsiooniseadust uuel kujul. Kas selleks on tegelikult vajadust? Me õppisime juba tundma Newtoni teooria saavutusi ja tema gravitatsiooniseadusele tugineva astronoomia hoogsat arenemist. Newtoni seadus jääb ikkagi kõigi astronoomiliste arvutuste aluseks. Kuid me õppisime tundma ka vastuväiteid vanale teorialle. Newtoni seadus on õige ainult klassikalise füüsika inertsiaalsüsteemides. Nagu me mäletame, määrati inertsiaalsüsteemid tingimusega, et neis süsteemides pidid kehtima mehhaanikaseadused. Jõud kahe massi vahel oleneb nende masside vahelisest kaugusest. Me teame, et seos jõu ja kauguse vahel

on klassikaliste teisenduste suhtes invariantne. Kuid spetsiaalse relatiivsusteooria struktuuriga see seadus kooskõlas ei ole. Kaugus ei ole Lorentzi teisenduste suhtes invariant. Me võiksime taotleda gravitatsiooniseaduse üldistamist, et viia ta kooskõlla spetsiaalse relatiivsusteooriaga, nagu me seda nii edukalt tegime liikumiseseadustega. Teiste sõnadega: meie eesmärgiks võiks olla gravitatsiooniseaduse avaldamine niisugusel kujul, et ta oleks invariantne Lorentzi teisenduste, mitte aga klassikaliste teisenduste suhtes. Kuid Newtoni gravitatsiooni-seadus paneb kangekaelselt vastu kõigile meie püüetele muuta teda lihtsamaks ning sobitada spetsiaalse relatiivsusteooria skeemi. Isegi siis, kui see oleks õnnestunud, tulnuks meil ikkagi teha ka järgmine samm: samm spetsiaalse relatiivsusteooria inertsiaalsüsteemidest üldise relatiivsusteooria meelevaldsetesse koordinaatsüsteemidesse. Kuid teiselt poolt näitavad idealiseeritud eksperimendid langeva liftiga meile selgesti, et senikaua kui on lahendamata gravitatsiooniprobleem, pole mingeid välja-vaateid üldise relatiivsusteooria formuleerimiseks. Oma arutlustest näeme, miks erineb gravitatsiooniprobleemi lahendus klassikalises füüsikas gravitatsiooniprobleemi lahendusest üldises relatiivsusteoorias.

Meie eesmärgiks oli veel kord näidata seda teed, mis viis üldisele relatiivsusteooriale, ja neid põhjusi, mis nõudsid meilt vanade seisukohtade muutmist. Teooria formaalsesse struktuuri süvenemata iseloomustame nüüd uue gravitatsiooniteooria mõningaid tüüpilisi jooni, võrreldes teda vana teooriaga. Arvestades kõike seda, millest me eespool rääkisime, pole kuigi raske näha nende teooriate erinevuste sisu.

1. Üldise relatiivsusteooria gravitatsioonivõrrandeid võib rakendada mis tahes koordinaatsüsteemides. Mõne konkreetse süsteemi eelistamine erijuhul on tingitud ainult otstarbekohasusest. Teoreetiliselt võib kasutada kõiki koordinaatsüsteeme. Jättes gravitatsiooni kõrvale oma tähelepanuorbiidist, läheme automaatselt tagasi spetsiaalse relatiivsusteooria inertsiaalsüsteemidesse.

2. Newtoni gravitatsiooniseadus seob keha liikumise siin ja praegu suurel kaugusel asetseva teise keha samaaegse mõjuga. See seadus oli eeskujuks kogu mehhanistlikule vaatele. Kuid mehhanistlik vaade varises kokku. Maxwelli võrrandite näol saime uue eeskuju loodussea-

duste jaoks. Maxwelli võrrandid on struktureadused. Nad ühendavad siin ja praegu toimuvaid sündmusi teiste sündmustega, mis juhtuvad vahetus läheduses veidi hiljem. Need on seadused, mis kirjeldavad elektromagnetilise välja muutumisi. Meie uued gravitatsioonivõrrandid on samuti struktureadused, nad kirjeldavad gravitatsioonivälja muutumist. Skemaatiliselt rääkides võiksime öelda: üleminek Newtoni gravitatsiooniseaduselt üldisele relatiivsusteooriale on mõnevõrra analoogiline üleminekul elektrivedelike teooria Coulomb'i seaduselt Maxwelli teooriale.

3. Meie maailm ei ole eukleidiline, tema geomeetria iseloom on määratud massidega ja nende kiirustega. Üldise relatiivsusteooria gravitatsioonivõrrandid püüavad väljendada maailma geomeetrilisi omadusi.

Oletame korraks, et meil õnnestus üldise relatiivsusteooria programmi järjekindlalt lõpuni viia. Kuid kas ei varitse meid siin reaalsusest liiga kaugele mineva spekulatsiooni hädaoht? Me teame, kui hästi seletab vana teooria astronoomilisi vaatlusi. Kas on võimalik ehitada silda ka uue teooria ja vaatluste vahele? Iga arutlust tuleb kontrollida eksperimendiga ja kõik tulemused, olgu nad kui tahes huvitavad, tuleb otsekohe kõrvale heita, kui nad ei vasta faktidele. Kuidas pidas uus gravitatsiooniteooria vastu eksperimendi kontrollile? Sellele küsimusele saab vastata ühe lausega: vana teooria on uue teooria erikujuliseks piirjuhiks. Kui gravitatsioonijõud on suhteliselt nõrgad, siis on Newtoni vana seadus uuele gravitatsiooniseadusele heaks lähenduseks. Seega kõik vaatlused, mis kinnitavad klassikalist teooriat, on kooskõlas ka üldise relatiivsusteooriaga. Lähtudes uue teooria kõrgematest seisukohtadest, jõuame jälle vana teooria juurde tagasi.

Kui meil ka ei oleks mingeid vaatlusandmeid, mis räägiksid uue teooria kasuks, kui faktide seletamine uues ja vanas teoorias toimuks võrdse eduga, isegi siis tuleks meil valikut tehes eelistada uut teooriat. Uue teooria võrrandid on vormilt küll keerulisemad, kuid põhiprintsiipide seisukohalt hinnates osutuvad nad lihtsamaks. On kadunud kaks hirmuäratavat viirastust — absoluutne aeg ja inertsiaalsüsteem. Raske ja inertse massi ekvivalentuse idee ei ole siin enam unarusse jäetud. Pole vaja mingeid oletusi gravitatsioonijõudude olemuse ja nende olemuse kohta kaugusest. Gravitatsioonivõrranditel on

struktuurseaduste kuju. Pärast väljateooria suuri edusamme nõutakse niisugust kuju kõigilt füüsikaseadustelt.

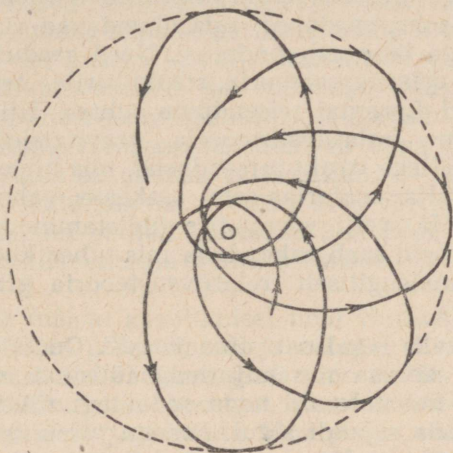
Uutest gravitatsiooniseadustest saab teha mõningaid järeldusi, mida Newtoni gravitatsiooniseadus ei sisalda. Ühte neist, valguskiire paindumist gravitatsiooniväljas, me juba käsitlesime. Vaatame siin veel kahte järeldust.

Kui vanad seadused järelduvad uutest ainult nõrkade gravitatsioonijõudude juhul, siis erinevused Newtoni gravitatsiooniseadusest peaksid olema vaadeldavad ainult suhteliselt tugevates gravitatsiooniväljades. Võtame meie päikesesüsteemi. Planeedid, teiste hulgas ka meie Maa, liiguvad ellipsikujulistel teedel ümber Päikese. Merkuur on Päikesele kõige lähem planeet. Tõmbejõud Päikese ja Merkuuri vahel on tugevam kui Päikese ja mõne teise planeedi vahel, sest kaugus on esimesel juhul väiksem. Kui üldse on lootust avastada kõrvalekaldumist Newtoni seadusest, siis kõige paremad väljavaated selleks võiksid olla Merkuuri juures. Klassikalisest teoriast järgneb, et Merkuuri orbiit on samasugune nagu mis tahes teise planeedi oma, ainult selle erinevusega, et ta kulgeb Päikesele lähemal. Üldise relatiivsusteooria järgi peaks Merkuuri liikumine olema veidi teistsugune. Peale selle, et Merkuur tiirleb ümber Päikese, peaks tema poolt kujutatav ellips Päikesega seotud koordinaatsüsteemi suhtes väga aeglaselt pöörlema (joonis 69). Selles ellipsi pöörlemises avaldub uus efekt, mida ennustab üldine relatiivsusteooria. Uus teooria annab ka selle efekti suuruse. Merkuuri ellips teeb täispöörde kolme miljoni aasta jooksul! Siit näeme, kui väike on see efekt ja kui vähe on lootusi avastada teda Päikesest kaugemal liikuvate planeetide juures.

Et Merkuuri orbiit erineb ellipsist, see oli teada enne üldise relatiivsusteooria loomist. Seletada seda ei osatud. Üldine relatiivsusteooria, omalt poolt, arenes nii, et ta niisugusele spetsiaalsele probleemile mingisugust tähelepanu ei pööranud. Alles hiljem jõuti uute gravitatsioonivõrrandite alusel järeldusele, et planeedi liikumisel ümber Päikese peab tema ellipsikujuline orbiit pöörlema. Teooria seletas edukalt kõik kõrvalekaldumised Newtoni seadusest, mis ilmnevad Merkuuri liikumises.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hiljem on samasuguseid kõrvalekaldumisi Newtoni seadusest avastatud ka teiste planeetide juures, kus kooskõla vaatluste ja teooria vahel on samuti hea. — *Tõlk.*

On olemas veel kolmas järeldus, mis tulenes üldisest relatiivsusteooriast ja mis on leidnud katselist kinnitust. Eespool nägime, et pöörleva ketta suurel ringjoonel asetseva kella rütm erineb väikesel ringjoonel oleva kella rütmist. Analoogiliselt sellega järgneb relatiivsusteooriast, et Päikesel paikneva kella rütm on erinev maapealse kella rütmist, sest gravitatsiooniväli on Päikesel tugevam kui Maal.



Joon. 69.

Leheküljel 74 märkasime, et hõõguv naatrium kiirgab kindla lainepikkusega homogeenset kollast valgust. Selles kiirguses näitab aatom ühte oma rütmidest. Võiksime öelda, et aatom on nagu kell, mille ühte rütmist kajastab aatomist kiirgunud valgus. Üldise relatiivsusteooria järgi on näiteks Päikesel asetsevast naatriumi aatomist kiirgunud valgus veidi suurema lainepikkusega kui valgus, mis pärineb maapealsest naatriumi aatomist.

Üldise relatiivsusteooria järelduste kontrollimine vaatluste kaudu on keeruline, seni veel lõplikult lahendamata probleem. Meil pole siiski mõtet sellesse probleemi süveneda, sest me käsitleme ainult põhiideid. Ütleme ainult niipalju, et esialgsete andmete kohaselt näib katse kinnitavat üldisest relatiivsusteooriast tulenevaid järeldusi.

## Väli ja aine

Me nägime juba, kuidas ja mispärast varises kokku mehhanistlik vaade. Oli võimatu seletada kõiki nähtusi lihtsate jõudude kaudu, mis pidid mõjuma muutumatute osakeste vahel. Meie esimesed katsed hüljata mehhanistlikku vaadet ja tuua sisse väljaga seotud mõisteid osutusid kõige edukamateks elektromagnetiliste nähtuste valdkonnas. Formuleeriti struktuurseadused elektromagnetilise välja jaoks, seadused, mis ühendavad ruumiliselt ja ajaliselt väga lähedasi sündmusi. Need seadused vastasid spetsiaalse relatiivsusteooria struktuurile, sest nad olid invariantseid Lorentzi teisenduste suhtes. Hiljem formuleeris üldine relatiivsusteooria gravitatsiooniseadused. Need olid jällegi struktuurseadused, mis kirjeldavad gravitatsioonivälja materiaalseste osakeste vahel. Lihtsaks osutus ka Maxwelli võrrandite üldistamine niisugusesse kujusse, et neid saab rakendada mis tahes koordinaatsüsteemides analoogiliselt relatiivsusteooria gravitatsiooni-võrranditega.

Meil on kaks reaalsust: *aine ja väli*. On selge, et käesoleval ajal ei saa me kujutleda füüsikat, mis toetuks ainult aine mõistele, nii nagu seda tegi füüsika üheksateistkümnenda sajandi algul. Praegu tuleb meil kasutada mõlemat mõistet. Kas me saame lugeda ainet ja välja kaheks eraldi seisvaks, kaheks erinevaks reaalsuseks? Kui on tegemist väikese aineosakesega, siis võiksime naiivselt kujutleda, nagu oleks olemas kindel pind, kust alates lakkab eksisteerimast osake ja algab gravitatsiooniväli. Selles käsitluses on väljaseaduste kehtivuspiirkond tervalt eraldatud aine esinemispiirkonnast. Kuid missugused on need füüsikalised kriteeriumid, mis eristavad ainet ja välja? Kui me relatiivsusteooriat veel ei tundnud, siis oleksime võinud teha katset vastata sellele küsimusele järgmiselt: ainel on mass, kuna väljal seda ei ole. Väli esitab energiat, aine esitab massi. Kuid uute teadmiste valgusel on selge, et niisugusest vastusest ei piisa. Relatiivsusteooria õpetab meile, et aine esitab suuri energia-varusid ja et energia esitab ainet. Nii pole meil võimalik teha kvalitatiivset vahet aine ja välja vahel, sest erinevus massi ja energia vahel ei ole kvalitatiivse iseloomuga. Kaugelt suurem osa energiast on kontsentreerunud ainesse, kuid osakest ümbritsev väli esitab samuti ener-

giat, kuigi võrratult väiksemas hulgas. Seetõttu võiksime öelda: kus energia kontsentratsioon on suur, seal on tegemist ainega, kus energia kontsentratsioon on väike, seal on väli. Kuid sel juhul oleks erinevus aine ja välja vahel pigem kvantitatiivset, mitte kvalitatiivset laadi. Siis poleks mõtet käsitleda ainet ja välja kahe täiesti erineva kvaliteedina. Me ei saa kujutleda kindlat pinda, mis teravalt eraldaks välja ja ainet.

Samad raskused tekivad laengu ja tema välja puhul. Näib olevat võimatu leida selget kvalitatiivset kriteeriumi aine ja välja või laengu ja välja eristamiseks.

Meie struktuurseadused, see tähendab Maxwelli seadused ja gravitatsiooniseadused, lakkavad kehtimast seal, kus energia kontsentratsioonid on väga suured või, teisiti öeldes, kus on olemas välja allikad — elektrilaengud või aine. Kuid kas me ei saaks oma võrrandeid veidi modifitseerida, nii et nad kehtiksid igal pool, ka nendes piirkondades, kus energia kontsentratsioon on ebaharilikult suur?

Ainult aine mõiste kasutamisel pole võimalik füüsikat üles ehitada. Kuid pärast massi ja energia ekvivalentsuse tundmaõppimist on reaalsuse jaotamine aineks ja väljaks midagi kunstlikku ning ebaselget. Kas me võiksime loobuda aine mõistest ja ehitada üles puhta väljafüüsika? See, mis mõjub meelele ainenähtena, on tegelikult suur energia kontsentratsioon suhteliselt väikeses ruumiosas. Me võiksime vaadata ainet kui niisuguseid ruumipiirkondi, kus väli on erakordselt tugev. Nii saaksime luua uue filosoofilise tausta, kusjuures meie lõppeesmärgiks oleks kõigi loodusnähtuste seletamine struktuurseaduste abil, mis kehtiksid alati ja igal pool. Sellest seisukohast vaadates oleks visatud kivi lihtsalt muutuv väli, mille kõige suurema intensiivsusega koht liigub ruumis kivi kiirusega. Meie uues füüsikas ei oleks kohta mõlemal mõistel — väljal ja ainel. Ainsaks reaalsuseks oleks väli. Seda uut vaatekohta sisendavad meile väljafüüsika suured edusammud, silmapaistvad tulemused elektri-, magnetismi- ja gravitatsiooniseaduste avaldamisel struktuurseaduste kujul ning lõpuks massi ja energia ekvivalentsus. Meie põhiprobleemiks oleks modifitseerida välja kirjeldavaid seadusi nii, et nad ei lakkaks kehtimast piirkondades, kus energia kontsentratsioon on ebaharilikult suur.

Kuid selle programmi järjekindel ning veenev teosta-

mine pole seni õnnestunud. Otsus selle kohta, kas see programm üldse teostatav on, langetatakse tulevikus. Praegu tuleb meil kõigis oma teoreetilistes arutlustes kasutada tegelikult kahte reaalsust: välja ja ainet.

Põhiprobleemid seisavad veel meie ees. Me teame, et kogu aine koosneb ainult mõnda liiki osakekestest. Kuidas moodustub nendest elementaarosakekestest aine tema mitmesugustes avaldumisvormides? Kuidas teostub vastastikune mõju elementaarosakeste ja väljade vahel? Otsingud vastuste leidmiseks nendele küsimustele tõid füüsikasse uued ideed, kvantteooria ideed.

### Teeme kokkuvõtte:

Füüsikasse ilmus uus mõiste, kõige tähtsam avastus pärast Newtonit: väli. Oli tarvis suurt teaduslikku kujutlusvõimet selle taipamiseks, et füüsikaliste nähtuste kirjeldamisel pole olulised mitte laengud või osakesed, vaid laengute ja osakeste vahelises ruumis olev väli. Välja mõiste toomine füüsikasse osutus erakordselt õnnestunud sammuks, mis viis Maxwelli võrrandite koostamisele. Need võrrandid kirjeldavad elektromagnetilise välja struktuuri ja neile alluvad nii elektri- kui ka optikanähtused.

Relatiivsusteooria saab alguse väljaga seotud probleemidest. Vanade teooriate vasturääkivused ja ebakõlad nõudsid meilt uute omaduste omistamist aegruumi-kontinuumile, sellele areenile, kus toimuvad kõik meie füüsikalise maailma sündmused.

Relatiivsusteooria areneb kahes etapis. Esimene etapp viib selleni, mida tuntakse spetsiaalse relatiivsusteooria nime all. See teooria on rakendatav ainult inertsiiaalsüsteemides, see tähendab koordinaatsüsteemides, kus kehtib inertsiiseadus Newtoni poolt formuleeritud kujul. Spetsiaalne relatiivsusteooria toetub kahele põhioletusele: füüsikaseadused on ühesugused kõigis koordinaatsüsteemides, mis liiguvad üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt; valguse kiirus on alati üks ja seesama. Nendest oletustest, mis on eksperimendiga täielikus kooskõlas, tuleatakse liikuvate varraste ja kellade omadused, varda pikuse ning kella rütmi muutumine sõltuvalt kiirusest. Relatiivsusteooria muudab mehhanikaseadusi. Kui liikuva osakese kiirus läheneb valguse kiirusele, muutuvad vanad

mehhaanikaseadused kehtetuks. Keha liikumise uued seadused, mis tulevad relatiivsusteooriast, on eksperimendiga väga heas kooskõlas. Üheks kaugemale ulatuvaks järelduseks (spetsiaalses) relatiivsusteoorias on seos massi ja energia vahel. Mäss on energia ja energial on mass. Relatiivsusteooria ühendab kaks jäävuse seadust — massi jäävuse seaduse ja energia jäävuse seaduse — üheks, massi-energia jäävuse seaduseks.

Üldine relatiivsusteooria analüüsib aegruumi-kontinuumi veel sügavamalt. Teooria kehtivusala ei ole siin enam piiratud ainult inertsiiaalsüsteemidega. Üldine relatiivsusteooria võtab vaatluse alla gravitatsiooniprobleemi ja formuleerib gravitatsioonivälja jaoks uued, struktuur-seaduste iseloomuga seadused. Ta sunnib meid analüüsima küsimust geomeetria osatähtsusest füüsikalise maailma kirjeldamisel. Ta käsitleb inertse ja raske massi võrdsust kui väga olulist fakti, mitte enam kui juhuslikku nähtust, nagu seda tehakse klassikalises mehhaanikas. Üldise relatiivsusteooria katseliselt kontrollitavad järeldused erinevad ainult õige vähe klassikalise mehhaanika omadest. Igal pool, kus võrdlemine on võimalik, kannatavad need järeldused eksperimentaalset kontrolli. Kuid teooria peamine jõud seisneb siiski tema sisemises järjekindluses ja põhioletuste lihtsuses.

Relatiivsusteooria rõhutab välja mõiste vajalikkust füüsikas. Kuid puhta väljafüüsika konstrueerimisel pole seni olnud edu. Praegu peame oletama veel mõlema, nii välja kui ka aine olemasolu.

## KVANDID

*Pidevus, pidetus. — Aine ja elektri elementaarkvandid. — Valguskvandid. — Valgusspektrid. — Mateerialained. — Tõenäosuslained. — Füüsika ja tegelikkus.*

### Pidevus, pidetus

Meie ette on laotatud New Yorgi linna ja tema ümbruse kaart. Küsime: missugustesse sellele kaardil märgitud punktidesse on võimalik sõita rongiga? Kui me oleme need punktid raudtee sõiduplaani abil kindlaks teinud, kanname nad kaardile. Muudame nüüd oma küsimust ja nõuame: missugustesse punktidesse saab sõita autoga? Kui me joonestame kaardile jooned, mis kujutavad kõiki New Yorgist lähtuvaid teid, siis igasse punkti nendel joontel võib tegelikult sõita autoga. Mõlemal juhul saame terve rea punkte. Esimeses näites on need punktid üksteisest eraldatud ja kujutavad üksikuid raudteejaamu. Teises näites on meid huvitavateks punktideks kõik autoteid kujutavad punktid. Meie järgmine küsimus puudutab iga niisuguse punkti kaugust New Yorgist või, täpsemini öeldes, mingist kindlast kohast linnas. Esimesel juhul vastavad meie kaardile märgitud punktidele kindlad arvud. Need arvud muutuvad küll korrapäratult, kuid alati lõpliku suuruse võrra, hüpetena. Me ütleme: kaugused New Yorgist nende punktideni, kuhu saame sõita rongiga, muutuvad ainult *pidetult*. Kaugused neisse punktidesse, kuhu saame sõita autoga, võivad muutuda aga ükskõik kui väikeste sammude kaupa, nad võivad muutuda *pidevalt*. Sõites autoga, võime edasi liikuda kui tahes vähe, kuna rongiga sõites seda teha ei saa.

Söekaevanduse toodang võib muutuda pidevalt. Kaevandatud söe hulk võib väheneda või kasvada kui tahes väikeste koguste võrra. Kuid kaevanduses töötavate kae-

varite hulk saab muutuda ainult pidetult. Oleks lausa mõttetud öelda: «Eilsest peale on tööliste hulk kasvanud 3,783 inimese võrra.»

Mees, kellelt küsiti, kui palju on tal raha taskus, saab vastata ainult arvuga, millel on kõige rohkem kaks kümnendkohta. Rahasumma saab muutuda ainult pidetult, portsjonite kaupa. Ameerikas on kõige väiksemaks võimalikuks muutuseks üks sent või, nagu me ütleme, Ameerika raha elementaarkvandiks on üks sent. Inglise raha elementaarkvandiks on veerandpennine, mille väärtus on ainult pool Ameerika raha elementaarkvandi väärtusest. Siin on meil näide kahest elementaarkvandist, millede erinevaid väärtusi saab omavahel võrrelda. Nende väärtuste suhtel on kindel mõte, sest üks neist on kaks korda suurema väärtusega kui teine.

Me võime öelda, mõned suurused võivad muutuda pidevalt, kuna teised saavad muutuda ainult pidetult, portsjonite kaupa, mida ei saa enam väiksemaks teha. Neid jagamatuid portsjoneid nimetatakse vastava suuruse *elementaarkvantideks*.

Me võime kaaluda suurt liivahulka ja vaadata tema massi pidevalt muudetava suurusena, kuigi liiva teraline struktuur on ilmne. Kui aga liiv oleks väga hinnaline ja kaalud väga tundlikud, siis tuleks meil arvestada, et liiva mass muutub alati ainult ühe liivatera massi täisarvkordsest. Elementaarkvandiks võiksime võtta ühe liivatera massi. Sellest näitest selgub, kuidas suurus, mida seni käsitleti pidevana, võib mõõtmistäpsuse kasvamisel osutada pidetuks.

Kui peaksime iseloomustama kvantteooria põhiideed ühe lausega, siis võiksime öelda: *tuleb oletada, et mõned füüsikalised suurused, mida seni käsitleti pidevatena, koosnevad tegelikult elementaarkvantidest.*

Kvantteooriaga haaratavate faktide valdkond on väga suur. Need faktid avastati tänu kaasaegse eksperimendi kõrgelt arenenud tehnikale. Et me ei saa näidata ega kirjeldada isegi peamisi eksperimente, siis peame nende tulemusi tihti lihtsalt hea usu peale teatavaks võtma. Meie eesmärgiks on ainult tähtsamate põhiideede selgitamine.

## Aine ja elektri elementaarkvandid

Pilt, mille annab aine ehitusest kineetiline teooria, seisab selles, et kõik elemendid koosnevad molekulidest. Võtame kõige lihtsamaks näiteks kergeima elemendi vesiniku. Leheküljel 51 me nägime, kuidas Browni liikumise uurimine andis võimaluse määrata ühe vesiniku molekuli massi. Selle väärtuseks tuli

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 grammi.

See tähendab, et mass on pidetu suurus. Mingi vesiniku hulga mass võib muutuda ainult kindlate portsjonite võrra, kusjuures minimaalseks portsjoniks on vesiniku molekuli mass. Kuid keemilised protsessid näitavad, et vesiniku molekuli saab lõhkuda kaheks osaks. Teiste sõnadega: vesiniku molekul koosneb kahest aatomist. Keemilistes protsessides on aatom see, mis mängib elementaarkvandi osa. Jagades eeltoodud arvu kahega, leiame vesiniku aatomi massi. See on umbes

0,000 000 000 000 000 000 000 001 7 grammi.

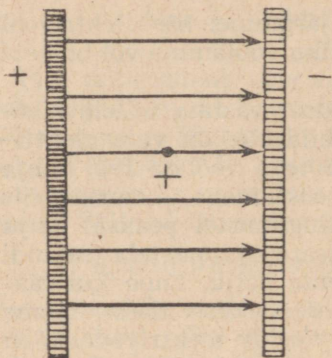
Mass on pidetu suurus. Kaalumisel ei tarvitse me sellele muidugi mõelda. Isegi kõige tundlikumad kaalud on kaugel sellest täpsuse astmest, mida oleks vaja massi pidetuse avastamiseks.

Vaatleme veel kord ühte hästituntud nähtust. Juhe on ühendatud vooluallikaga. Elektrivool läheb juhtmes kõrgema potentsiaali poolt madalama potentsiaali poole. Tuletame meelde, et juba lihtne teooria juhtmes voolavatest elektrivedelikest seletas palju eksperimentaalseid fakte. Meenutame veel (lk. 60), et oli ainult kokkuleppe küsimus, kuidas rääkida, kas positiivne vedelik voolab kõrgemalt potentsiaalilt madalamale või negatiivne vedelik madalamalt potentsiaalilt kõrgemale. Unustame hetkeks kõik hilisemad väljateooria edusammud. Isegi siis, kui me arutleme lihtsa elektrivedelike teooria tasemel, jäävad mitmed küsimused lahtiseks. Juba nimetus «vedelik» näitab, et elektrit vaadati vanasti pideva suurusena. Selle vana vaate kohaselt võis laeng muutuda kui tahes väikese suuruse võrra. Polnud mingisugust vajadust oletada elektri elementaarkvantide olemasolu. Aine kineetilise teooria edusammud seadsid meie ette uue küsimuse: kas on olemas elektrivedelike elementaarkvante? Teine

küsimus, mis meid huvitab, on järgmine: kas elektrivool on positiivse või negatiivse vedeliku voolamine või on seal tegemist nii ühe kui teisega?

Kõik eksperimendid, mis püüdsid vastata sellele küsimusele, toetuvad järgmisele põhiideele: on vaja elektrivedelik eraldada juhtmest, lasta teda voolata läbi tühja ruumi, võtta temalt igasugune seos ainega ja uurida siis tema omadusi, mis niisugustel tingimustel peaksid palju selgemal kujul ilmnema. Üheksateistkümnenda sajandi lõpul tehti selletaolisi eksperimente palju. Enne kui rääkida kas või ühe niisuguse katseseadeldise ideest, toome ära katsete tulemused. Juhtmes voolav elektrivedelik on negatiivselt laetud, ta voolab seega madalama potentsiaali poolt kõrgema poole. Kui me oleksime teadnud seda alguses, elektrivedelike teooria loomise ajal, kindlasti oleksime me siis muutnud sõnu ja nimetanud kautšukpulga elektrit positiivseks, klaaspulga elektrit negatiivseks. Sel juhul oleks olnud otstarbekohasem lugeda juhtmes voolavat elektrivedelikku positiivseks. Et oletus, mille tegime algul, oli vale, siis tuleb meil nüüd kannatada ebamugavusi. Järgmine tähtis küsimus seisneb selles, kas negatiivne vedelik on «teralise» ehitusega, kas ta koosneb elektrikvantidest või ei. Terve rida sõltumatuid katseid näitavad jälle, et negatiivse elektri elementaarkvandi olemasolu ei saa kahelda. Negatiivne elektrivedelik koosneb osakestest nii nagu supelrand liivateradest või maja telliskividest. Kõige selgemalt väljendas seda seisukohta J. J. Thomson umbes 60 aastat tagasi. Negatiivse elektri elementaarkvante hakati nimetama *elektronideks*. Seega koosneb iga negatiivne elektrilaeng suurest hulgast elementaarlaengutest, elektronidest. Nagu mass nii ka negatiivne laeng võib muutuda ainult pidetult. Elektri elementaarlaeng on aga nii väike, et paljude küsimuste uurimisel võime seda vabalt lugeda pidevaks suuruseks ja mõnikord on isegi kasulik seda teha. Aatomi- ja elektroni-teooria toovad teadusesse seega pidetuid füüsikalisi suurusi, mis saavad muutuda ainult hüppeliselt.

Kujutleme kahte paralleelset metallplaati, mis asetsevad õhutühjas ruumis. Ühel plaadil on positiivne, teisel negatiivne laeng. Kahe plaadi vahele asetatud positiivsele proovilaengule mõjub positiivselt laetud plaat tõukejõuga, negatiivselt laetud plaat tõmbejõuga. Elektrivälja jõujooned suunduvad seega positiivselt laetud plaadilt negatiiv-



Joon. 70.

selt laetud plaadile (joonis 70). Negatiivsele proovikehale mõjuks vastassuunaline jõud. Kui plaadid on küllalt suured, siis jõujooned plaatide vahel on igal pool ühesuguse tihedusega; pole oluline, kus asetseb proovikeha, temale mõjuv jõud ja seega ka jõujoonte tihedus on alati üks ja seesama. Plaatide vahele paigutatud elektronid käituvad samuti nagu vihmapiisad Maa gravitatsiooni väljas, nad liiguvad ükstei-

sega paralleelselt negatiivselt laetud plaadi poolt positiivselt laetud plaadi suunas. On olemas palju seadeldisi elektronide kimbu viimiseks niisugusesse välja, mis juhib kõiki elektrone ühes suunas. Üheks lihtsamaks neist on hõõguva traadi asetamine laetud plaatide vahele. Niisugusest hõõguvast traadist väljuvad elektronid, mis siis välise välja jõujoonte suunamisel edasi liiguvad. Näiteks kõigile tuntud raadiolambid töötavad sellel põhimõttel.

Elektronide kimbuga on teostatud palju teravmeelseid eksperimente. On uuritud elektronide trajektoori muutumist mitmesugustes välistes elektri- ja magnetiväljades. Osutus isegi võimalikuks isoleerida üksikut elektroni ja määrata tema elementaarlaengut ja massi, see tähendab tema inertsist tingitud vastupanu välisjõule. Käesolevas toome ära ainult elektroni massi suuruse. See on umbes *kaks tuhat korda väiksem* kui vesiniku aatomi mass. Vesiniku aatomi mass, nii väike kui ta ise ka on, osutub elektroni massiga võrreldes siiski suureks. Järjekindla väljateooria seisukohalt on kogu elektroni mass, see tähendab kogu elektroni energia, võrdne tema välja energiaga; enamuse sellest väljast on koondunud väga väikesesse kerakesse, kuna elektroni «keskpunkti» kaugel on väli nõrk.

Eespool rääkisime sellest, et mingi elemendi aatom on tema kõige väiksemaks elementaarkvandiks. Seda usuti väga kaua aega. Praegu enam nii ei arvata! Teaduses on tekkinud uued seisukohad, mis näitavad vanade vaadete

piiratust. Vaevalt on füüsikas teist nii hästi põhjendatud seisukohta kui see, mis räägib aatomi keerulisest struktuurist. Kõigepealt jõuti arusaamisele, et elektron, see negatiivse elektrivedeliku elementaarkvant, on ka aatomi koostisosaks, üheks elementaarkivikeseks, millest on ehitatud kogu aine. Eeltoodud katse hõõguvast traadist kiirgivate elektronidega on ainult üks paljudest näidetest selle kohta, kuidas neid osakesi ainst eraldatakse. See tulemus, mis ühendab aine struktuuri probleemi elektri probleemiga, järeldeb ilma igasuguse kahtluseta väga paljudest, sõltumatult avastatud eksperimentaalsetest faktidest.

Eraldada aatomist mõnda tema koostiselektroni on võrdlemisi lihtne. Seda võib teha kuumutamise, nagu meie hõõguva traadi näites, või mõnel teisel teel, näiteks aatomite pommitamisega teiste elektronide abil.

Oletame, et peenike punaselt hõõguv metalltraat on asetatud hõrendatud vesinikku. Traat saadab elektrone välja kõigis suundades. Väline elektriväli annab elektronidele kindla kiiruse. Elektroni kiirus suureneb seejuures samuti nagu gravitatsiooniväljas langeval kivil. Nii võime saada elektronkiire, mis liigub kindlas suunas kindla kiirusega. Mõjutades elektrone väga tugevate väljadega, võime tänapäeval saada kiirusi, mis on lähedased valguse kiirusele. Mis juhtub, kui teatud kiirusega liikuvate elektronide kimp põrkab kokku hõrendatud vesiniku molekulidega? Küllalt kiire elektroni põrge, peale selle, et purustab vesiniku molekuli kaheks aatomiks, lööb ühest aatomist lisaks välja veel elektroni.

Võtame teatavaks, et elektronid on aine koostisosadeks. Aatom, millest on välja löödud elektron, ei saa siis olla enam elektriliselt neutraalne. Kui ta varem oligi neutraalne, siis, jäänud vaesemaks ühe elementaarlaengu võrra, ei saa ta seda enam olla. Järelejääv osa peab kandma positiivset laengut. Edasi, et elektroni mass on ka kõige kergema aatomi massist palju väiksem, siis võime julgelt järeldada, et kaugelt suurem osa aatomi massist ei ole mitte elektronides, vaid järelejäävates elementaarosakestes, mis on elektronidest palju raskemad. Seda rasket osa aatomist nimetame *tuumaks*.

Kaasaegne eksperimentaalfüüsika on välja töötanud meetodeid aatomituuma lõhkumiseks, ühe elemendi aatomi muutmiseks teise elemendi omaks ja tuuma moo-

dustavate raskete elementaarosakeste eraldamiseks tuumast. See peatükk füüsikas, mida tuntakse «tuumafüüsika» nime all ja mille arendamisele Rutherford palju kaasa aitas, on eksperimentaatori seisukohalt kõige huvitavam. Kuid tänapäevani ei ole meil põhiideede poolst lihtsat teooriat, mis ühendaks tuumafüüsika rikkalikku faktilist materjali. Et käesolevas raamatus huvitavaid meid ainult üldised füüsikalised ideed, siis tuumafüüsika probleeme me siin ei käsitle, vaatamata nende suurele tähtsusele kaasaegses füüsikas.

### Valguskvandid .

Vaatame merekaldale ehitatud müüri, mille vastu veevad lained. Iga laine võtab kaasa teatud osakese müüri pinnast ja voolab tagasi, jättes tee vabaks järgmistele lainetele. Müüri mass kahaneb ja me võime küsida: kui suur osa müürist uhuti ära näiteks ühe aasta jooksul. Kirjeldame nüüd teist protsessi. Me tahame vähendada müüri massi sama palju kui eelmisel juhul, seekord aga teisel teel. Tulistame müüri kuulipildujast, lüües temast kuulidega tükke välja. Müüri mass väheneb ja me võime väga hästi kujutleda, et mõlemal juhul on see vähene mine ühesuurune. Kuid seinä välimuse järgi saame lihtsalt kindlaks teha, kas siin mõjusid pidevad merelained või üksikutest kuulidest koosnev valang. Seda erinevust merelainete ja kuulide valangu vahel on kasulik mees pidada järgnevate lehekülgede mõistmiseks.

Eespool oli meil juttu sellest, et hõõguvast traadist väljuvad elektronid. Esitame nüüd teise meetodi elektronide väljalöömiseks metallist. Langegu metalli pinnale homogeenne, näiteks violetne valgus, millel on, nagu me teame, kindel lainepikkus. See valgus lööb metallist elektrone välja. Metallist lahkunud elektronid hakkavad kindla kiirusega laviinina edasi liikuma. Energia jäävuse seaduse põhjal võime öelda: osa valguse energiast muutus metallist väljunud elektronide kineetiliseks energiaks. Kaasaegne katsetehnika võimaldab meil neid elektronkuule registreerida ja määrata nende kiirust ning energiat. Elektronide eraldumist metallist valguse toimel nimetatakse *fotoelektriliseks efektiks*.

Me lähtusime kindla intensiivsusega homogeense valguslaine mõjust. Nagu igas eksperimendis, nii tuleb ka

siin varieerida katsetingimusi, et teha kindlaks, missugune on nende mõju vaadeldavale efektile.

Alustame sellest, et muudame metallplaadile langeva homogeense violetse valguse intensiivsust ja vaatame, mil määral on eb metallist väljunud elektronide energia valguse intensiivsusest. Püüame siin saada vastust ilma eksperimentidita, ainult loogiliste kaalutluste abil. Me võiksime arutleda järgmiselt: fotoelektrilise efekti korral muutub kindel osa kiirgusenergiast elektronide liikumisenergiaks. Kui me valgustaksime metalli nüüd valgusega, millel on küll sama lainepikkus, kuid mis tuleb võimsamast allikast, siis peaks elektronide energia olema suurem, sest kiirgus on energiarikkam. Järelikult võiksime oodata, et koos valguse intensiivsusega kasvab ka metallist väljunud elektronide kiirus. Kuid ka seekord pole katse kooskõlas meie ennustusega. Me veendume veel kord selles, et loodusseadused ei ole niisugused, nagu meie neid näha tahaksime. Me vaatlesime ühte katset, mis oli vastuolus meie ennustustega ja purustas seega teooria, millele need ennustused toetusid. Laineteooria seisukohalt on katsetulemused tõepoolest hämmastavad: kõigil elektronidel on sama kiirus ja sama energia, mis ei muutu valguse intensiivsuse kasvamisel.

Valguse laineteooria niisugust tulemust ennustada ei osanud. Ja jällegi tekkis uus teooria vastuoludest vana teooria ja katse vahel.

Oleme nüüd laineteooria vastu korraks sihilikult ebaõiglasel ja unustame tema suured saavutused, unustame selle, kuidas ta hiilgavalt seletas valguse paindumist väikeste tõkete taha. Et oleme oma tähelepanu koondanud fotoelektrilisele efektile, siis nõuame teoorialt täpset seletust sellele nähtusele. On ilmne, et laineteooria põhjal ei saa me kuidagi järeldada elektronide energia sõltumatust selle valguse intensiivsusest, millega elektrone metallplaadist välja lüüakse. Proovime siis teist teooriat. Tuletame meelde, et Newtoni valguse korpuskulaarteooria, mis seletas ära palju nähtusi, ei osanud kirjeldada valguse paindumist, nähtust, mida me praegu meelega ignoreerime. Newtoni ajal energia mõistet veel ei olnud. Newton arvas, et valguskorpused on kaalutud ja et igal värvusel on oma substantsiaalne iseloom. Hiljem, kui oli loodud juba energia mõiste ja kui sai selgeks, et ka valgus kannab energiat, ei tulnud keegi mõttele rakendada energia

mõistet ka valguse korpuskulaarteoorias. Newtoni teooria oli surnud ja kuni käesoleva sajandini ei mõelnud keegi tõsiselt sellele, et teda võiks veel ellu äratada.

Newtoni teooria põhiidee säilitamiseks tuleb meil oletada, et homogeenne valgus koosneb energiakübemeketest. Sellega asendame vanad valguskorpusklid valguskvantidega, väikeste energiaportsjonitega, mida nimetatakse *footoniteks* ja mis liiguvad tühjas ruumis valguse kiirusega. Newtoni teooria elustamine selles uues kujus viib *valguse kvantteooriale*. Teraline struktuur on peale aine ja elektrilaengu ka kiirgusenergia, mis koosneb valguskvantidest. Lisaks aine- ja elektrikvantidele on seega olemas ka energiakvandid.

Energiakvandi idee võttis esmakordselt kasutusele Planck käesoleva sajandi algul. Tema eesmärgiks oli seletada teatud nähtusi, mis on palju keerulisemad kui fotoelektriline efekt. Kuid vanade mõistete muutmise vajadust näitab kõige selgemini ning lihtsamalt just fotoefekt.

Otsekohe on selge, et valguse kvantteooria annab seletuse fotoelektrilisele efektile. Metallplaadile langeb footonite voog. Vastastikune mõju kiirguse ja aine vahel koosneb siin väga paljudest üksikprotsessidest, kus footon põrkab vastu aatomit ja rebib sealt välja elektroni. Kõik need üksikprotsessid on üksteisega sarnased ja väljalöödud elektronidel on kõigil ühesugune energia. Samuti taipame, et valguse intensiivsuse suurenemine tähendab meie uues keeles langevate footonite arvu suurenemist. See tähendab, et pärast valguse intensiivsuse suurendamist lüüakse metallplaadist välja rohkem elektrone, kuid iga üksiku elektroni energia on sama suur nagu varemgi. Näeme, et see teooria on vaatlustega väga heas kooskõlas.

Mis juhtub siis, kui metalli pinnale langeb teist värvi homogeenne valgus, violeti asemel näiteks punane? Vastuse leidmise sellele küsimusele jätame eksperimendi hoolde. Selleks tuleb mõõta metallist väljunud elektronide energiat ja võrrelda seda violetse valguse abil väljalöödud elektronide energiaga. Punase valguse mõjul väljunud elektronide energia osutub väiksemaks kui nende elektronide energia, mis väljuvad metallist violetse valguse toimel. See tähendab, et erinevatele värvustele vastavate valguskvantide energia ei ole ühesugune. Punase valguse footoni energia on ainult pool sellest, mida kannab violetse valguse footon. Täpsemini öeldes: homogeense val-

guse kvandi energia kahaneb võrdeliselt lainepikkuse suurenemisega. See on kõige olulisem erinevus energia-kvandi ja elektrikvandi vahel. Valguskvandi suurus ole-  
neb lainepikkusest, kuna elektrikvant on alati ühesuu-  
rune. Kui me kasutaksime ühte eelmistest võrdlustest, siis  
tuleks valguskvanti võrrelda kõige väiksema rahakvan-  
diga, mis igal maal on isesugune.

Jätkame valguse laineteooria ignoreerimist ja oletame,  
et valgus on teralise struktuuriga, see tähendab, et valgus  
koosneb valguskvantidest või footonitest, mis liiguvad  
ruumis valguse kiirusega. Meie uue kujutluse järgi on  
valgus siis footonite voog, kusjuures iga footon on val-  
gusenergia elementaarkvandiks. Kui aga laineteooriast  
loobuda, kaob ka lainepikkuse mõiste. Missugune uus  
mõiste seda asendab? Valguskvandi energia! Laineteooria  
terminoloogia kaudu avaldatud väiteid võib ümber kirju-  
tada kiirguse kvantteooria väideteks. Näiteks:

#### Laineteooria terminoloogia

Homogeensel valgusel on  
kindel lainepikkus. Spektri  
punases otsas on valguse lai-  
nepikkus kaks korda suurem  
kui spektri violetses otsas.

#### Kvantteooria terminoloogia

Homogeenne valgus sisal-  
dab kindla energiaga footo-  
neid. Spektri punases otsas  
on footonite energia kaks  
korda väiksem kui spektri  
violetses otsas.

Kokkuvõttes võib olukorda iseloomustada järgmiselt:  
on olemas nähtusi, mida seletab kvantteooria, laineteoo-  
ria aga mitte. Teiste nähtuste hulgas kuulub siia näiteks  
fotoefekt. On olemas ka nähtusi, mida seletab laineteoo-  
ria, kvantteooria aga mitte. Tüüpiliseks näiteks on siin  
valguse paindumine väikeste tōkete taha. Lõpuks, on ole-  
mas nähtusi, nagu näiteks valguse sirgjooneline levimine,  
mida võib võrdselt hästi seletada nii valguse laineteooria  
kui ka kvantteooria abil.

Mis valgus siis tegelikult on? Kas ta on laine või footo-  
nite voog? Analoogilise probleemi püstitasime juba  
varem, kui küsisime: kas valgus on laine või valguskor-  
pusklite voog? Sel ajal oli küllalt põhjusi valguse kor-  
puskulaarteooria kõrvaleheitmiseks ja laineteooria eelis-  
tamiseks, sest viimane seletas kõiki nähtusi. Nüüd on  
probleem palju keerulisem. Näib olevat selge, et lugedes  
kahest võimalusest vastuvõetavaks ainult ühe, pole või-

malik järjekindlalt kirjeldada kõiki valgusega seotud nähtusi. Kord tuleks meil kasutada ühte teooriat, teinekord teist ja vahel koguni mõlemat teooriat korraga. Me sattusime silm silma vastu uut tüüpi raskusega. On olemas kaks omavahel vastuolulist kujutlust tegelikkusest, kuid me peame neid korraga kasutama, sest kumbki kujutlus üksinda ei seleta valgusega seotud nähtusi, kuna koos nad seda teevad.

Kuidas saaks neid kujutlusi ühendada? Kuidas saada aru valguse kahest täiesti erinevast aspektist? Pole lihtne selle uue raskusega toime tulla. Jälle oleme kokku põrganud ühe põhiprobleemiga.

Oletame korraks, et õige on valguse footonteooria ja püüame tema abil tõlgendada neid fakte, mida seni seletati ainult laineteooria abil. Sel teel saame rõhutada neid raskusi, mis esimesel pilgul näivad põhjustavat teooriate vastandlikkuse.

Tuletame meelde, et homogeense valguse kiir, minnes läbi nõelaugu, annab heledad ja tumedad rõngad (lk. 85). Kuidas seletada seda nähtust valguse kvantteoorias laineteooriat appi võtmata? Footon läheb läbi nõelaugu. Kui footon august tõepoolest läbi läks, siis võiksime oodata, et ekraan muutub valgeks, kui aga footon august läbi ei läinud, siis peaks ekraan jääma pimedaks. Selle asemel avastame aga heledad ja tumedad rõngad. Me võiksime teha katsed seletada seda järgmiselt: tõenäoliselt on augu äärte ja footoni vahel mingisugune vastastikune mõju, mis põhjustabki difraktsioonrõngaste ilmumise. Kuid vaevalt küll saame seda lauset pidada mingisuguseks seletuseks. Kõige paremal juhul visandab see meile ainult seletamise programmi ja annab teatud lootust tõlgendada tulevikus difraktsiooni kui aine ja footonite vastastikuse mõju efekti.

Kuid teiste eksperimentide analüüs purustab isegi selle nõrga lootuse. Olgu meil kaks nõelaauku. Läbi nende aukude langev homogeenne valgus annab ekraanil heledad ja tumedad triibud. Kuidas mõista seda nähtust valguse kvantteooria seisukohalt? Me võiksime arutleda nii: footon läbib ainult ühe nõelaugu, ükskõik kumma. Kui homogeense valguse footon esindab elementaarset valgusosakest, siis vaevalt küll võime kujutleda, et ta jaguneb ja läbib mõlemad nõelaugud korraga. Kuid siis peaks

tulemus olema täpselt samasugune nagu esimesel juhul, s. o. ekraanil peaksid ilmuma heledad ja tumedad rõngad, mitte aga triibud. Kuidas on see võimalik, et teise augu olemasolu muudab efekti täielikult? Auk, millest footon läbi ei lähe, muudab rõngad triipudeks isegi siis, kui ta on küllalt kaugel! Kui footon käituks nagu klassikalise füüsika osake, siis peaks ta läbima ainult ühe augu. Kuid sel juhul jääks difraktsiooninähtus meile täielikuks mõistatuseks.

Teadus nõuab meilt uusi ideid ja uusi teooriaid. Nende eesmärgiks on purustada vastuolude müür, mis sageli tõkestab teed teaduslikule progressile. Kõik tähtsamad ideed teaduses on sündinud dramaatilises konfliktis tege-  
likkuse ja meie püüete vahel seda tegelikkust mõista. Siin on meil jällegi probleem, mille lahendamiseks vajame uusi ideid. Enne aga kui räägime sellest, kuidas püütakse seletada vastuolu valguse kvantiseloomu ja lainiseloomu vahel kaasaegses füüsikas, näitame, et täpselt samasugune raskus tekib ka siis, kui meil valguskvantide asemel on tegemist ainekvantidega.

### Valgusspektrid

Me teame juba, et kogu aine koosneb ainult mõnda liiki osakestest. Esimesteks elementaarosakesteks, mis avastati, olid elektronid. Elektronid on samal ajal ka negatiivse elektri elementaarkvantideks. Edasi nägime, et mõnede nähtuste seletamiseks tuleb ka valgusele omistada elementaarkvantidest koosnev struktuur, kusjuures valguse elementaarkvandid on iga lainepikkuse korral isesugused. Enne kui edasi minna, tuleb meil korraks peatuda paaril füüsikalisel nähtusel, kus peale kiirguse mängib olulist osa ka aine.

Päike saadab välja valgust, mida prisma abil on võimalik jagada koostisosadeks. Nii võib saada Päikese pideva spektri, kus esinevad kõik lainepikkused nähtava spektri kahe otsa vahel. Võtame teise näite. Eespool me juba rääkisime sellest, et hõõguv naatrium kiirgab homogeenset valgust, s. o. ühevärvuselise või, teisiti öeldes, ühe lainepikkusega valgust. Kui me asetame hõõguva naatriumi prisma ette, siis näeme ainult ühte kollast joont. Kiirgava keha valgus laguneb prisma läbimisel

alati komponentideks, andes kiirgavat keha iseloomustava spektri.

Elektrilahendus gaasiga täidetud torus on samasuguseks valgusallikaks nagu reklaamiks kasutatavad neon-torud. Oletame, et niisugune toru asetseb spektroskoobi ees. Spektroskoop on riist, mis toimib samuti nagu prisma, ta on ainult palju täpsem ja tundlikum. Spektroskoop lahutab valguse tema koostisosadeks, see tähendab, ta analüüsib valgust. Päikeselt tulev valgus annab spektroskoobis pideva spektri, milles esinevad kõik lainepikkused. Kui valgusallikaks on aga gaas, mida läbib elektrivool, on spektril hoopis teistsugune iseloom. Päikese pideva mitmevärvilise spektri asemel ilmuvad nüüd eraldiseisvad jooned pideval tumedal tagapõhjal. Iga küllalt kitsas joon vastab kindlale värvusele või, laineteooria keeles rääkides, kindlale lainepikkusele. Kui spektris on näiteks kakskümmend nähtavat spektrijoont, siis igäühte neist võib tähistada teatud arvuga, mis väljendab vastavat lainepikkust. Erinevate elementide aurudel on erinevad spektrijoonte süsteemid, järelikult vastavad neile ka erinevad arvud, mis iseloomustavad valguse koostisosade lainepikkusi. Kahe elemendi spektrid pole kunagi identsed joontesüsteemid, samuti nagu kahel inimesel pole täpselt ühesuguseid sõrmejälgi. Kui füüsikud töötasid välja spektrijoonte kataloogi, sai järk-järgult selgeks, et siin valitsevad teatud seaduspärasused. Nii osutus võimalikuks siduda lihtsa matemaatilise valemi abil näivalt sõltumatuid arvuridasid, mis väljendasid erinevate lainete pikkusi.

Kõik selle, millest me siin praegu rääkisime, võib tõlkida footonkeelde. Spektrijooned vastavad kindlatele lainepikkustele või, teiste sõnadega, kindla energiaga footonitele. Helendavad gaasid kiirgavad seega mitte ükskõik missuguse energiaga footoneid, vaid ainult niisuguseid footoneid, mis iseloomustavad antud gaasi. Jällegi valib tegelikkus kõigist võimalustest ainult mõned.

Antud elemendi, näiteks vesiniku aatom võib kiirata ainult kindlate energiatega footoneid. Lubatud on ainult kindlate energiakvantide kiirgamine, kuna kõik teised kvandid on keelatud. Lihtsuse mõttes kujutleme, et mingi element kiirgab ainult ühte spektrijoont, see tähendab, ainult ühe kindla energiaga footoneid. Enne kiirgusakti on aatomil energiat rohkem kui pärast seda. Energia-

printsiihist peab nüüd järgnema, et aatomi energiatase on enne footoni kiirgamist kõrgem kui pärast seda akti ja et kahe energiataseme vahe peab võrduma kiiratud footoni energiaga. Seega fakti, et teatud elemendi aatom kiirgab ainult ühe kindla lainepikkusega valgust, s. o. ühe kindla energiaga footoneid, võib väljendada ka teisiti: selle elemendi aatomis on lubatud ainult kaks energiataset, kusjuures footoni kiirgamisele vastab aatomi üleminek kõrgemalt energiatasemelt madalamale.

Kuid reeglina on spektris alati rohkem kui üks joon. Kiiratud footonid vastavad mitte ühele, vaid paljudele energiatele. Teiste sõnadega: meil tuleb oletada, et aatomis on lubatud palju energiatasemeid ja et footoni kiirgamine vastab aatomi üleminekule kõrgemalt energiatasemelt madalamale. Kuid oluline on seejuures, et iga energiatase ei saa olla lubatud tasemeks, sest elemendi spektris ei ole kõikvõimalikke lainepikkusi, kõikvõimalike energiatega footoneid. Selle asemel et rääkida mingitest kindlatest spektrijoontest või kindlatest lainepikkustest, mis esinevad mingi aatomi spektris, võime öelda, et igal aatomil on oma kindlad energiatasemed ja et valguskvandi kiirgamine on seotud aatomi üleminekuga ühelt energiatasemelt teisele. Energiatasemed on reeglina pidetud, mitte pidevad. Siin me näeme jällegi, et tegekkuses on võimalused piiratud.

Bohr oli esimene, kes näitas, kuidas ilmuvad spektris just need ja mitte teised spektrijooned. Tema nelikümmend seitse aastat tagasi loodud teooria andis aatomi ehitusest pildi, mille abil saab arvutada elementide spektreid — vähemalt lihtsamatel juhtudel — ja mis muudab tuimadena ning sõltumatutena näivad arvud äkki omavahel seotuks.

Bohri teooria oli vahejaamaks teel sügavamale ja üldisemale teorialele, mida nimetati laine- või kvantmehaanikaks. Raamatu viimastel lehekülgedel püüame iseloomustada selle teooria põhiideid. Enne tuleb meil aga peatuda korraks ühe spetsiaalsema iseloomuga eksperimenditaalse ja teoreetilise tulemuse juures.

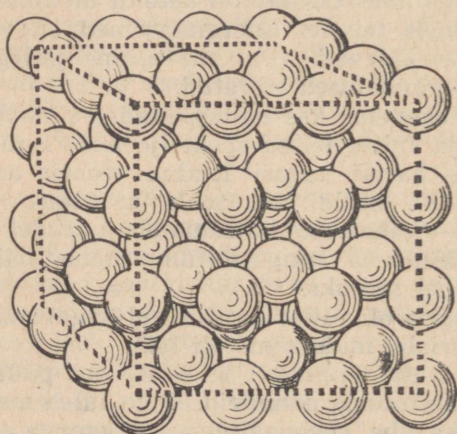
Nähtav spekter algab kindla lainepikkusega violetse värvusega ja lõpeb kindla lainepikkusega, mis vastab punasele värvusele. Teiste sõnadega: nähtava spektri footonite energiad jäävad alati piiridesse, mis on määratud violetse ja punase valguse footonite energiatega. See kit-

sendus on muidugi tingitud ainult inimsilma omadustest. Kui erinevus mõne energiataseme vahel on küllalt suur, siis kiirgub *ultravioletse* valguse foton, mis annab spektrijoone väljaspool nähtavat spektrit. Seda joont lihtsalt silmaga avastada ei saa, vaid selleks tuleb kasutada fotoplaati.

Röntgenikiired koosnevad samuti fotonitest, ainult neil on palju suurem energia kui nähtava valguse fotonitel. Teiste sõnadega: röntgenikiirte lainepikkused on palju väiksemad, tegelikult tuhandeid kordi väiksemad kui nähtaval valgusel.

Kuid kas nii väikesi lainepikkusi on võimalik määrata ka eksperimentaalselt? Seda oli küllalt raske teha isegi hariliku valguse korral. Siin oleks meil tarvis väikesi tõkkeid või väikesi avasid. Kaks kõrvuti olevat nõelaauku, mis annavad difraktsiooni hariliku valguse puhul, peaksid olema teineteisele tuhandet korda lähemal ja väiksemad, enne kui nad põhjustaksid röntgenikiirte difraktsiooni.

Kuidas saame siis mõõta nende kiirte lainepikkust? Loodus ise tuleb siin meile appi.



Joon. 71.

Kristall koosneb aatomitest, mis asetsevad kindla plaani kohaselt väga väikestel kaugustel üksteisest. Joonis 71 näitab kristalli struktuuri lihtsat mudelit. Üliväikeste avade asemel on siin äärmiselt väikesed tõkked

üksteise lähedal absoluutse korrapärasusega paiknevate aatomite näol. Kristallide struktuuri teooria näitab, et kaugused aatomite vahel on kristallis nii väikesed, kui on vaja röntgenikiirte difraktsiooni tekitamiseks. Katse näitab, et röntgenikiirte difraktsiooni on tõepoolest võimalik saada nende tihedalt paiknevate tõkete abil, mis korrapäraselt asetsevad kristalli kolmedimensioonilises ruumvõres.

Oletame, et kristallile langeb röntgenikiirte kimp, mis pärast kristalli läbimist registreeritakse fotoplaadil. Plaadile ilmub difraktsioonipilt. Et uurida röntgenikiirte spektrit, et tuletada difraktsioonipildist lainepikkust, selleks kasutati mitmesuguseid meetodeid. Kui me esitaksime kõik teoreetilised ja eksperimentaalsed üksikasjad, siis see, millest siin on räägitud paari sõnaga, täidaks terveid köiteid. Pilditahvil III esitame ainult ühe foto röntgenikiirte difraktsioonist, mis on saadud ühe teatud meetodiga paljude olemasolevate meetodite hulgast. Fotol näeme jällegi heledaid ja tumedaid rõngaid, mis on nii iseloomulikud laineteooriale. Keskel on näha paindumata kiirte jälg. Kui röntgenikiirte allika ja fotoplaadi vahele ei oleks paigutatud kristalli, siis oleks näha ainult see keskmine jälg. Niisuguste fotode abil saab arvutada röntgenikiirte spektri lainepikkusi ja, teiselt poolt, kui kiirte lainepikkus on teada, võimaldab foto teha järeldusi kristalli struktuuri kohta.

## Materiaalained

Kuidas mõista fakti, et elementide spektrites esinevad ainult kindlad, neile elementidele iseloomulikud lainepikkused?

Füüsikas on sageli juhtunud, et järjekindel analoogia, mida rakendatakse näivalt täiesti sõltumatute nähtuste korral, viib suurtele edusammudele. Neil lehekülgedel oleme tihti näinud, kuidas ühes teadusharus sündinud ning arenenud ideid rakendatakse hiljem edukalt ka mujal. Mehhanistlike vaadete ja väljateooria arenemine pakub meile palju niisuguseid näiteid. Lahendatud probleemide võrdlemine lahendamata probleemidega võib anda meile uusi ideid ja heita raskustele uut valgust. Lihtne on leida pinnapealset analoogiat, mis tegelikkuses midagi ei

tähenda. Kuid avastada väliste erinevuste taga ühiseid olulisi jooni ja neile tuginedes luua uus edukas teooria — see on loov töö, mille tähtsust ei saa alahinnata. Nõnda nimetatud lainemehhaanika arenemine, millele umbes nelikümmend aastat tagasi panid aluse de Broglie' ja Schrödingeri tööd, on tüüpiliseks näiteks selle kohta, kui palju on teorial kasu sügavatest ja õnnestunud analoogiatest.

Meie lähtepunktiks on klassikaline näide, millel pole midagi tegemist kaasaegse füüsikaga. Võtame kätte vedru või väga pika ja painduva kummitoru ühe otsa ning liigutame seda rütmiliselt üles-alla, nii et toru ots on võnkliikumises. Paljudest analoogilistest näidetest teame, et kummitoru otsa võnkumine tekitab laine, mis kulgeb

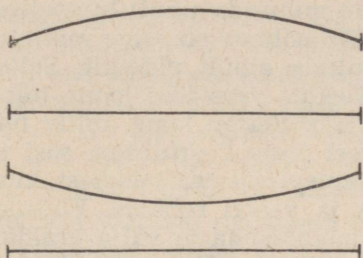


Joon. 72.

kindla kiirusega mööda toru edasi (joonis 72). Kui kujutleme, et toru on lõpmata pikk, siis tekkinud lainete rühmad jätkavad oma lõputut teekonda, ilma et nad omavahel interfereeruksid.

Võtame teise juhu. Toru mõlemad otsad on kinnitatud. Kui soovite, võib siin kasutada ka viulikeelt. Mis juhtub siis, kui kummitoru või viulikeele ühes otsas tekitatakse laine? Laine algab oma teekonda samuti nagu eelmisel juhul, kuid varsti peegeldub ta toru teisest otsast tagasi. Meil on nüüd kaks lainet: ühe tekitab toru otsa võnkumine, kuna teine on peegeldunud laine. Need lained liiguvad vastupidistes suundades ja interfereeruvad omavahel. Poleks raske jälgida kahe laine liitumist ja avastada ühte lainet, mis selle tagajärjel tekib. See on *seisev laine*. Sõnad «seisev» ja «laine» näivad olevat teineteisega vastuolus, kuid sellele vaatamata kirjeldab nende ühendmidagi niisugust, mille olemasolu kahe laine liitumise tulemusena on tõestatud.

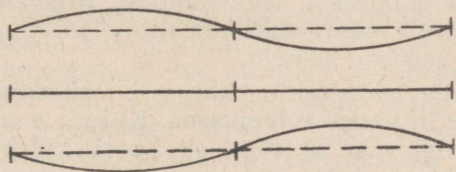
Seisva laine kõige lihtsamaks näiteks on kahest otsast kinnitatud keel, mis võngub üles ja alla, nagu näitab joonis 73. Niisugune liikumine tekib kahe laine liitumisel, kui need lained liiguvad vastupidistes suundades. Niisu-



Joon. 73.

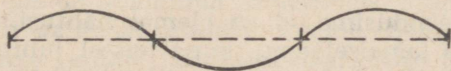
gust liikumist iseloomustab see, et paigal on ainult kaks otspunkti. Neid punkte nimetatakse *sõlmedeks*. Võiks öelda, et laine seisab kahe sõlme vahel paigal, kusjuures maksimaalne või minimaalne kõrvalekalle tasakaaluasendist on kõigil keele punktidel korruga.

Kuid see on ainult kõige lihtsam näide seisvast lainest. Vaatame teisi võimalusi. Seisval lainel võib olla näiteks kolm sõlme, üks sõlm kummaski otsas ja üks sõlm keskel.



Joon. 74.

Sel juhul on paigal alati kolm keele punkti. Pilk joonisele 74 näitab, et lainepikkus on nüüd kaks korda väiksem kui eelmisel juhul, kus oli ainult kaks sõlme. Analoogiliselt



Joon. 75.

eelmisega võib seisval lainel olla neli (joonis 75), viis ja veelgi rohkem sõlmi. Lainepikkus oleneb iga kord sõlmede arvust. Sõlmi võib olla ainult täisarv, see tähendab, et

sõlmede arv saab muutuda ainult hüppeliselt. Lause «seisval lainel on 3,576 sõlme» on selge mõttetus. Lainepikkus saab seega muutuda ainult pidetult. Selles kõige klassikalisemas probleemis avastame jooni, mis on iseloomulikud kvantteooriale. Seisev laine, mille tekitab viuldaja, on tegelikult veel palju keerulisem, sest ta koosneb paljudest erineva lainepikkusega lainetest, kus sõlmi on kaks, kolm, neli, viis ja veelgi rohkem. Füüsika on suuteline niisugust segu analüüsima ja välja eraldama lihtsad lained, mis moodustavad selle segu. Kasutades eeltoodud terminoloogiat, võime öelda, et võnkuval keelel on oma spekter nagu kiirgaval elemendilgi. Ja samuti nagu elemendi spektris on ka siin lubatud ainult kindlad lainepikkused, kuna kõik teised lainepikkused on keelatud.

Me avastasime seega teatud sarnasuse võnkuva keele ja kiirgava aatomi vahel. Kui veidrana niisugune analoogia ka näiks, teeme temast siiski uüsi järeldusi ja et me kord juba alustasime, siis püüame seda võrdlust ka jätkata. Iga elemendi aatomid koosnevad elementaarosakestest — raskematest osakestest, mis moodustavad aatomituuma, ja kergematest osakestest, elektronidest. Niisugune osakeste süsteem käitub nagu väike akustiline instrument, milles tekitatakse seisvaid laineid.

Kuid seisev laine tekib kahe või, üldisemalt rääkides, mitme laine liitumise tulemusena. Kui meie analoogias on mingisuguselgi määral tõtt, siis peab kulgevale lainele vastama midagi veelgi lihtsamat, kui on aatom. Mis on looduses kõige lihtsam? Meie materiaalses maailmas ei saa olla midagi lihtsamat kui vaba elektron, elementaarosake, millele ei mõju ühtki jõudu, s. o. paigalseisev või ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuv elektron. Me võiksime oma analoogiaahelasse lisada uue lüli: ühtlaselt sirgjooneliselt liikuv elektron → kindla lainepikkusega lained. See oligi de Broglie' uueks ning julgeks ideeks.

Eespool veendusime, et on olemas nähtusi, kus valgus avaldab oma lainesiseloomu, kuna teistel juhtudel ilmneb tema korpuskulaariseloom. Pärast harjumist mõttega valgusest kui lainest avastasime oma suureks imestuseks, et mõnel juhul, näiteks fotoelektrilise efekti korral, käitub valgus nagu footonite voog. Elektronidega on olukord täpselt vastupidine. Me harjutasime end mõttega, et elektronid on osakesed, elektri ja aine elementaarkvandid. Määrati elektroni laeng ja mass. Kui aga de Broglie'

idees peitub mingisugunegi tõetera, siis peab olema ka nähtusi, kus aine ilmutab oma lainesiseloomu. See järeldus, millele meid viis analoogia akustikaga, tundub algul veidra ja arusaamatuna. Mis saab liikoval osakesel olla ühist lainega? Kuid see pole esimene kord, kus põrkame füüsikas kokku seda laadi raskustega. Samasuguse probleemiga oli meil tegemist juba valgusnähtuste juures.

Füüsikalise teooria loomisel mängivad kõige olulisemat osa põhiideed. Füüsikaraamatud on täis keerulisi matemaatilisi valemeid. Kuid iga füüsikalise teooria alguseks on mõte ja ideed, mitte kunagi valemid. Hiljem peavad ideed saama kvantitatiivse matemaatilise teooria vormi, selleks et võimaldada teooria võrdlemist eksperimendiga. Seletuseks võiks siin tuua näite sellest probleemist, mida me praegu arutleme. Meie peamine oletus seisneb selles, et ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuv elektron peab mõnel juhul käituma nagu laine. Oletame, et elektron või ühesuguse kiirusega liikuvate elektronide voog kulgeb ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Iga üksiku elektroni mass, laeng ja kiirus on teada. Kui me tahame ühele või mitmele ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuvale elektronile kuidagiviisi vastavusse seada lainet, siis tuleb meil kohe küsida: misugune on lainepikkus? See küsimus nõuab arvulist vastust ja temale vastamiseks tuleb luua enam või vähem kvantitatiivse iseloomuga teooria. Tegelikult on see kerge probleem. Üllatavalt lihtne on matemaatika de Broglie' töös, mis annab vastuse sellele küsimusele. Sel ajal kui ta kirjutas oma tööd, oli teiste füüsikaliste teooriate matemaatiline tehnika suhteliselt väga teravmeelne ja keerukas. Materiaalainete probleemi matemaatiline käsitlus on äärmiselt lihtne ja elementaarne, kuid teooria alusidee ise on sügavad ja kaugeleulatuvad.

Varem, valguslainete ja footonite juhul näitasime, et iga väidet, mis on avaldatud lainekeeles, saab tõlkida ka footonite või valguskorpusklite keelde. Sama kehtib ka elektronlainete kohta. Korpuskulaarkeelt ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuva elektroni jaoks me juba teame. Kuid iga väidet, mis on väljendatud korpuskulaarkeeles, võib tõlkida lainekeeles, samuti nagu seda tehakse footonite puhul. Tõlkimisel tuleb arvestada kahte põhiideed. Üheks neist on analoogia valguslainete ja elektronlainete, footonite ja elektronide vahel. Püüame kasutada aine korral sama tõlkimismeetodit kui valguse puhulgi. Teise idee

annab spetsiaalne relatiivsusteooria. Loodusseadused peavad olema invariantised Lorentzi, mitte klassikaliste teisenduste suhtes. Need kaks ideed määravad liikuvale elektronile vastava lainepikkuse. Teooria alusel teostatud lihtne arvutus näitab, et elektronil, mis liigub näiteks kiirusega 16 000 kilomeetrit sekundis, on lainepikkus umbes sama suur kui röntgenikiirte. Siit järeldub, et kui üldse on võimalik avastada aine lainelist iseloomu, siis tuleb seda teha röntgenikiirtega analoogiliste eksperimentide abil.

Kujutleme elektronkiirt, mis liigub kindla kiirusega ühtlaselt ja sirgjooneliselt või, lainekeeles väljendades, kujutleme homogeenset elektronlaine. Oletame, et see laine langeb väga õhukesele kristallile, mis mängib difraktsioonivõre osa. Kaugused paindumist tekitavate tõkete vahel on nii väikesed, et siin saaks tekkida röntgenikiirte difraktsioon. Analoogilist efekti võib oodata ka elektronlainete korral, millede lainepikkus on lähedane röntgenikiirte omale. Fotoplaat peaks siis registreerima õhukest kristallikihti läbinud elektronlainete difraktsiooni. Tõepoolest, eksperiment näitabki elektronlainete difraktsiooni, mis kahtlemata on teooria üheks suurimaks saavutuseks. Elektronlainete difraktsiooni sarnasus röntgenikiirte difraktsiooniga paistab eriti hästi silma, kui võrrelda fotosid pilditahvil III. Me teame, et niisugused fotod annavad meile võimaluse röntgenikiirte lainepikkuse määramiseks. Sama kehtib ka elektronlainete korral. Difraktsioonipilt annab materjalainete pikkuse, kusjuures eeskujulik kvantitatiivne kooskõla teooria ja eksperimendi vahel on meie argumentide ahelale hiilgavaks kinnituseks.

See tulemus laiendab ja süvendab eespool kirjeldatud raskusi. Seda võib selgitada näitega, mis on analoogiline valguslaine näitega. Väikese augu läbimisel kaldub elektron kõrvale samuti nagu valguslainegi. Fotoplaadil ilmuvad heledad ja tumedad rõngad. On teatud lootus seletada seda nähtust elektroni ja augu ääre vastastikuse mõjuga, kuigi niisugune seletus ei näi eriti paljutootavana. Mis toimub aga kahe augu juhul? Rõngaste asemel ilmuvad jooned. Kuidas on võimalik, et teise augu olemasolu muudab efekti täielikult? Elektron on jagamatu, seepärast tundub loomulikuna, et ta võib läbida kahest august ainult ühte. Kuidas võiks ühest august läbilendav elektron teada, et teatud kaugusel asetseb teine auk?

Eespool küsisime: mis on valgus? On ta korpusklite voog või laine? Nüüd küsime: mis on aine, mis on elektron? On ta osake või laine? Kui elektron liigub välises elektri- või magnetiväljas, käitub ta nagu osake. Läbides kristalli käitub ta lainetaoliselt. Aine elementaarkvandid viivad meid samadele raskustele nagu valguskvandidki. Üks põhiküsimustest, mis püstitati teaduse viimaste saavutuste valgusel, seisneb järgnevas: kuidas sobitada kokku kahte vastandlikku vaatekohta lainetest ja ainest. See on üks neist põhiraskustest, mis pärast formuleerumist viivad teadust edasi progressi poole, kuigi see tee võib olla pikk. Füüsikud on püüdnud lahendada seda probleemi. Tulevik peab otsustama, kas lahendus, mille andis kaasaegne füüsika, on lõplik või ajutine.

### Tõenäosuslained

Kui me klassikalises mehhaanikas teame antud ainepunkti asukohta ja kiirust, samuti temale mõjuvaid välisjõude, siis mehhaanikaseaduste abil on võimalik ennustada osakese kogu tulevast teed. «Ainepunktil on niisugusel ja niisugusel ajahetkel niisugune ja niisugune asukoht ning kiirus» — sellel lausel on klassikalises mehhaanikas kindel mõte. Kui see nii ei oleks, siis osutuksid vaeleks kõik leheküljel 27 toodud arutlused masspunkti trajektoori määramisest tulevikus.

Üheksateistkümnenda sajandi algul püüdsid teadlased kogu füüsikat taandada aineosakeste vahel valitsevatele lihtsatele jõududele, kusjuures osakeste asukohad ja kiirused olid igal ajamomendil määratud. Meenutame, kuidas kirjeldasime liikumist siis, kui me oma uurimisretke füüsika probleemidesse alustasime mehhaanikaga. Me joonistasime üles punktid, mis näitasid meile keha täpseid asukohti kindlatel ajamomentidel, kuna kiiruste suunad ja suurused anti puutevektoritega. Nii oli lihtne ja otstarbekohane. Kuid aine elementaarkvantide — elektronide — või energiakvantide — footonite — korral sama meetodit rakendada ei saa. Footoni või elektroni trajektoori pole võimalik kujutada nii, nagu tegime seda liikumise kirjeldamisel klassikalises mehhaanikas. Näide kahest nõelaugust ütleb seda selgesti. Elektron ja footon näivad läbivat siin korraga kahte auku. Kui kujutleda elektroni või

footoni teed vanal klassikalisel viisil, siis on seda efekti võimatu seletada.

Meil tuleks muidugi oletada, et on olemas elementaarprotsessid, nagu näiteks augu läbimine elektronide või footonite poolt. Aine ja energia elementaarkvantide olemasolu ei tohiks me kahelda. Kuid on kindel, et elementaarprotsesside seadusi ei tohiks nii formuleerida, et seejuures oleks vaja asukohtade ja kiiruste määramist mingil ajamomendil, nagu seda lihtsalt tehakse klassikalises mehhaanikas.

Proovime siis kuidagi teisiti. Kordame järjest ühte ja sedasama elementaarprotsessi. Saadame nõelaaugu suunas välja ühe elektroni teise järel. Sõna «elektron» kasutame siin ainult konkretiseerimiseks; kogu arutlus kehtib ka footonite korral.

Sama eksperimenti korratakse üha uuesti, alati täpselt ühtemoodi; kõigil elektronidel on sama kiirus ja kõik nad suunduvad nõelaaugu poole. Vaevalt on vaja märkida, et see on idealiseeritud eksperiment, mida tegelikult teostada ei saa, kuid mida võib väga hästi kujutleda. Meil pole võimalik üksikuid footoneid või elektrone kindlatel ajamomentidel lendu paisata, nagu seda tehakse näiteks kuulidega püssist tulistamisel.

Korduvate katsete tulemusena peame jällegi saama ühe augu korral tumedad ja heledad rõngad, kahe augu korral — tumedad ja heledad triibud. Kuid siin on üks oluline erinevus. Üksiku elektroni korral polnud selle katse tulemust võimalik mõista. Kui aga eksperimenti mitu korda järjest teostatakse, on seda palju lihtsam teha. Me võime nüüd öelda, et heledad triibud tekivad seal, kuhu langeb palju elektrone. Seal, kuhu langeb elektrone vähem, on ka triibud tumedamad. Täiesti tume koht tähendab seda, et sinna ei satu ühtki elektroni. Me ei tohi muidugi oletada, et kõik elektronid läbivad ühte ja sedasama auku. Kui see nii oleks, siis teise augu kinnikatmisel ei tohiks midagi muutuda. Kuid me teame juba, et teise augu katmisel annab eksperiment hoopis erineva resultaadi. Et osake on jagamatu, siis ei saa me kujutleda, et ta läheb korraga läbi mõlemast august. Et katset teostati mitmed korrad järjest, see näitab meile teise väljapääsu. Osa elektronidest võib läbida ühe augu, teine osa aga teise augu. Me ei tea, miks antud elektron valib just selle augu, kuid korduvate katsete lõpptulemus peab

olema niisugune, et elektronide liikumisel allikast ekraanile on kasutatud mõlemat auku. Kui meid huvitab ainult see, mis kordub katses toimub elektronide hulgaga tervikuna, ilma et me üldse mõtleksime üksikutest elektronidest, siis muutub erinevus rõngakujulise ja vöödilise difraktsioonipildi vahel arusaadavaks. Suure hulga järjest teostatavate eksperimentide uurimine andis meile uue idee. See on idee kollektiivist, kus üksiku indiviidi käitumist pole võimalik ette ennustada. Me ei saa ette öelda üksiku elektroni liikumist, kuid me saame ennustada, et paljude elektronide mõju lõppresultaadina ilmuvad ekraanile heledad ja tumedad triibud.

Jätame korraks kvantfüüsika kõrvale.

Klassikalises füüsikas nägime, et juhul, kui teame ainepunkti asukohta ja kiirust kindlal ajamomendil ning temale mõjuvaid jõude, siis saame ennustada punkti tulevast trajektoori. Me nägime ka seda, kuidas rakendati mehhanistlikku vaadet aine kineetilises teoorias. Kuid selle teooria mõttekäikude alusel tekib ka uus idee. Järgnevate arutluste mõistmiseks on kasulik see idee enne täielikult omandada.

Olgu meil gaasiga täidetud anum. Kui me tahaksime jälgida seal iga üksiku osakese liikumist, tuleks meil alustada kõigi osakeste algoleku, s. o. algpositsiooni ja algkiiruse määramisest. Kuid isegi siis, kui see oleks võimalik, kuluks kõigi andmete paberile panemiseks rohkem kui üks inimiga, sest vaadelda tuleks väga suurt hulka osakesi. Kui me siis püüaksime osakeste lõppolekute määramiseks kasutada klassikalise mehhaanika tuntud meetodeid, tekiksid ületamatud raskused. Põhimõtteliselt võiks siin kasutada sama meetodit nagu planeetide liikumise uurimisel, kuid praktiliselt ei ole see meetod antud juhul üldse rakendatav ja ta peab loovutama oma koha *statistilisele meetodile*. Viimane ei nõua algolekute täpset tundmist. Me teame süsteemist mingil antud ajamomendil vähem ja seetõttu saame ka vähem öelda tema mineviku ja tuleviku kohta. Üksiku gaasiosakese saatus meid ei huvita, meie probleem on teistsugune. Me näiteks ei küsi: «Kui suur on praegu iga osakese kiirus?» Me küsime hoopis: «Kui palju on neid osakesi, mille kiirus on 1000 ja 1100 meetri vahel sekundis?» Üksikud indiviidid meid ei huvita, vaid me püüame määrata kogu gaasihulka iseloomustavaid keskmisi väärtusi. On selge, et

statistilist meetodit saab rakendada ainult siis, kui süsteemi kuulub väga palju indiviide.

Kasutades statistilist meetodit, ei saa me ennustada kollektiivi kuuluva üksiku indiviidi käitumist. Me võime ennustada ainult väljavaateid, ainult *tõenäosust* selleks, et see indiviid käituks teatud kindlal viisil. Kui meie statistika seadused ütlevad, et ühel kolmandikul osakestest on kiirus 1000 ja 1100 meetri vahel sekundis, siis see tähendab, et suure osakeste kollektiivi korduv vaatlemine annab meile tõepoolest selle arvu. Teiste sõnadega, me leiame, et tõenäosus osakese kiiruse sattumiseks nimetatud kiiruste vahemikku on üks kolmandik.

Analoogiliselt, kui teame näiteks sündivust suures ühiskonnas, ei ütle see meile midagi selle kohta, missuguseid perekondi just lastega õnnistatud on. Me teame ainult statistilisi andmeid, kus üksikud inimesed mingit osa ei mängi.

Vaadeldes suure hulga vagunite registreerimisandmeid, märkame varsti, et üks kolmandik vagunite numbreid jagub kolmega. Kuid me ei saa ennustada, kas järgmisel hetkel mööduva vaguni numbril on see omadus või mitte. Statistilised seadused on rakendatavad ainult suurtele kollektiividele, mitte kunagi aga kollektiivi moodustavatele üksikutele indiviididele.

Nüüd võime pöörduda tagasi kvantteooria probleemide juurde.

Kvantfüüsika seadused on statistilise iseloomuga. See tähendab, et nad ei kuulu mitte üksikule süsteemile, vaid identsete süsteemide kollektiivile. Neid seadusi ei saa kinnitada üksiku mõõtmisega, vaid ainult terve korduvate mõõtmiste seeriaga.

Elementide radioaktiivne lagunemine on üks paljudest protsessidest, kus tuleb rakendada kvantfüüsikat. Kvantfüüsika püüab formuleerida seadusi, mis juhivad ühe elemendi spontaanset muundumist teiseks. Me näiteks teame, et ühest grammist raadiumist laguneb umbes 1600 aasta jooksul pool, kuna teine pool jääb alles. Me võime ligikaudu ennustada, kui palju aatomeid laguneb järgmise poole tunni jooksul, kuid isegi meie teooriad ei ütle midagi selle kohta, mispärast lagunesid just need, mitte aga teised aatomid. Meie praegused teadmised ei anna meile võimalust ette ära märkida neid aatomeid, mis on määratud lagunemisele. Aatomi saatus ei olene tema east.

Meil pole olemas kõige väiksemaidki viiteid seaduse kohta, mis juhiks üksiku aatomi individuaalset käitumist. Formuleerida saab ainult statistilisi seadusi, mis juhivad suurt aatomite kollektiivi.

Võtame teise näite. Mingi elemendi helendav gaas annab spektroskoobi ette paigutatuna kindla lainepikkusega spektrijooned. Üksikute kindlate lainepikkuste esinemine on iseloomulik atomaarsetele nähtustele, kus on tegemist elementaarkvantidega. Kuid sellel probleemil on veel teine külg. Mõned spektrijooned on väga heledad, teised aga nõrgad. Hele spektrijoon tähendab seda, et footoneid, mis vastavad sellele lainepikkusele, kiiratakse suhteliselt palju. Nõrk spektrijoon räägib aga seda, et tema lainepikkusele vastavaid footoneid kiiratakse vähe. Teooria väited on siin jällegi ainult statistilist laadi. Iga spektrijoon vastab üleminekule kõrgemalt energiatasemelt madalamale. Teooria räägib meile ainult iga niisuguse ülemineku tõenäosusest, mitte midagi aga kindla üksiku aatomi tegelikust üleminekust. Et kõigist niisugustest protsessidest võtavad osa suured aatomite kollektiivid, mitte üksikud indiviidid, siis osutub statistiline teooria siin väga sobivaks.

Näib, nagu sarnaneks uus kvantfüüsika mõnevõrra aine kineetilise teooriaga, sest mõlemad nad kannavad statistilist iseloomu ja kirjeldavad suuri kollektiive. Kuid nii see ei ole. Peale sarnaste joonte on väga oluline mõista selles analoogias ka erinevusi. Aine kineetilise teooria ja kvantfüüsika sarnasus seisneb peamiselt nende statistilises iseloomus. Missugused on aga erinevused nende vahel?

Soovides teada, kui palju on linnas mehi ja naisi, kes on vanemad kui kakskümmend aastat, peame andma igale elanikule täitmiseks ankeedi lahtritiga: «mees», «naine», «vanus». Kui siis oletada, et kõik vastused on õiged, võime ankeetide süstematiseerimise ja loendamise teel saada statistilise iseloomuga andmeid. Ankeeditäitjate nimesid ja aadresse me seejuures ei arvesta. Statistilise pildi saime tänu sellele, et teadsime üksikjuhte. Analooiliselt saame indiviide kirjeldavate seaduste baasil kollektiivi statistilised seadused ka aine kineetilises teoorias.

Kvantfüüsikas on olukord aga hoopis teine. Siin on statistilised seadused antud vahetult, kuna individuaalsea-

dusi üldse ei ole. Näiteks kahest nõelaaugust ja footonist ehk elektronist nägime, et elementaarosakese võimalikku liikumist ruumis ja ajas ei saa nii kirjeldada, nagu tegime seda klassikalises füüsikas. Kvantfüüsika loobub elementaarosakeste individuaalseadustest ja püstitab *otseselt* kollektiive kirjeldavad statistilised seadused. Kvantfüüsikas on võimatu kirjeldada ühe elementaarosakese asukohti ja kiirusi või ennustada tema tulevast teed, nagu seda saab teha klassikalises füüsikas. Kvantfüüsika tegeleb kollektiividega, tema seadused on õiged ainult suure kollektiivi, mitte kunagi aga üksiku indiviidi korral.

See polnud spekulatsioon ega püüe uudsuse järele, vaid karm vajadus, mis nõudis meilt vana klassikalise seisukoha muutmist. Nendest raskustest, mis tekkisid vanade seisukohtade rakendamisel, rääkisime ainult difraktsiooninähtuste kirjeldamisel. Kuid võiks tuua veel palju teisi, sama sobivaid näiteid. Meie seisukohtade muutmise põhjuseks on kogu aeg olnud püüded mõista tegelikkust. Kuid otsustada küsimust, kas oleme välja valinud ainukese võimaluse või kas võiksimme oma raskustele ka paremat lahendust leida — see jääb alati tuleviku ülesandeks.

Me pidime loobuma individuaaljuhtude niisugusest kirjeldamisest, mis käsitleb neid ruumis ja ajas objektiivselt toimuvatena, kusjuures meil tuli kasutusele võtta statistilise iseloomuga seadused. Just niisugused seadused iseloomustavad kaasaegset kvantfüüsikat.

Kui me eespool tõime sisse uued füüsikalised reaalsused, nagu elektromagnetilise või gravitatsioonivälja, siis püüdsime üldjoontes kirjeldada ka neid võrrandeid, mida kasutatakse vastavate ideede matemaatiliseks fomuleerimiseks. Teeme nüüd sedasama kvantfüüsikaga, rääkides ainult väga lühidalt Bohri, de Broglie', Schrödingeri, Heisenbergi, Diraci ja Borni tööddest.

Vaatleme ühte elektroni. Elektron võib olla kas vaba või ükskõik missuguse välise elektromagnetilise välja mõju all. Ta võib liikuda näiteks aatomituuma väljas, ta võib ka muuta oma liikumissuunda, põrgates kristallilt. Kvantfüüsika õpetab meile, kuidas koostada matemaatilisi võrrandeid iga niisuguse probleemi jaoks.

Me viitasime juba analoogiale võnkuva keele, trummi kattenaha, puhkpilli või mõne akustilise riista vahel ühelt poolt ja kiirgava aatomi vahel teiselt poolt. On olemas

teatud sarnasus ka akustika probleeme ja kvantfüüsika probleeme kirjeldavate matemaatiliste võrrandite vahel. Kuid võrranditega määratud suuruste füüsikaline tõlgendus on kummalgi juhul täiesti erinev. Vaatamata võrrandite formaalsele sarnasusele, on füüsikalistel suurustel, mis kirjeldavad võnkuvat keelt või mis kirjeldavad kiirgavat aatomit, täiesti erinev tähendus. Keele puhul huvitab meid iga tema punkti kõrvalekalle normaalasendist mis tahes ajamomendil. Teades võnkuva keele kuju mingil hetkel, teame juba kõike, mis vaja. Keele matemaatilistest võrranditest saame siis arvutada keele kõrvalekalde normaalasendist mis tahes ajahetke jaoks. Et igale keele punktile vastab teatud kindel kõrvalekalle normaalasendist, seda võib täpsemalt väljendada järgmiselt: keele kõrvalekalle normaalasendist on igal ajamomendil *funktsioon* keele koordinaatidest. Kõik keele punktid kokku moodustavad ühedimensioonilise kontiinuumi, kusjuures keele kõrvalekalle on selles ühedimensioonilises kontiinumis määratud funktsioon. See funktsioon tuleb leida võnkuva keele võrranditest.

Analoogiliselt on määratud kõigis ruumpunktides igal ajahetkel teatud funktsioon ka elektroni jaoks. Seda funktsiooni nimetame *tõenäosuslaine*ks. Kui kasutada analoogiat, siis tõenäosuslaine vastab kõrvalekaldele normaalasendist akustika probleemis. Antud ajahetkel on tõenäosuslaine kolmedimensioonilise kontiinuumi funktsioon, kuna keele hälve antud ajahetkel oli funktsioon ühedimensioonilisest kontiinumist. Tõenäosuslaine on nagu kataloogiks teadmiste, mis meil on vaadeldavast kvantsüsteemist; ta annab meile võimaluse vastata kõigile mõistlikult püstitatud statistilist laadi küsimustele, mis puudutavad seda süsteemi. Tõenäosuslaine ei räägi meile midagi elektroni asukohast ja kiirusest mingil ajamomendil, sest niisugusel küsimusel pole kvantfüüsikas mõtet. Kuid ta annab meile tõenäosuse leida elektroni mingis ruumpunktis või ütleb seda, kus on väljavaated elektroni leidmiseks kõige suuremad. Tulemus ei käi seega mitte ühe, vaid paljude korduvalt teostatud mõõtmiste kohta. Kvantfüüsika võrrandid määravad seega tõenäosuslaine, samuti nagu Maxwelli võrrandid määravad elektromagnetilise välja ja gravitatsioonivõrrandid gravitatsiooni välja. Kvantfüüsika seadused on jällegi struktuurseadused. Kuid nende võrranditega määratud füüsikalised

mõisted on palju abstraktsemad kui elektromagnetilise ja gravitatsioonivälja juhul; nad on ainult matemaatiliseks vahendiks vastamisel statistilist laadi küsimustele.

Seni oleme uurinud mingis välises väljas asetsevat elektroni. Kui tegemist ei oleks aga elektroniga, kõikvõimalikest laengutest kõige väiksemaga, vaid biljoneid elektrone sisaldava suure laenguga, siis ei tarvitseks me enam arvestada kvantteooriat, vaid võiksime probleemi käsitleda nii, nagu seda tehti enne kvantteooria loomist. Rääkides elektrivoolust juhtmes, laetud juhust või elektromagnetilistest lainetest, võime rakendada oma vana lihtsat füüsikat, mis sisaldab Maxwelli võrrandites. See pole aga lubatud siis, kui meil on tegemist fotoelektrilise efekti, spektrijoonte intensiivsuse, radioaktiivsuse, elektrilainete difraktsiooni ja paljude teiste nähtustega, kus ilmneb aine ja energia kvantiseloom. Niisugustel juhtudel tuleb meil, piltlikult öeldes, ühe korruse võrra kõrgemale tõusta. Kui me klassikalises füüsikas rääkisime ühe osakese asukohtadest ja kiirustest, siis nüüd tuleb meil vaadata tõenäosuslaineid kolmedimensioonilises kontiinuumis, mis vastab samale ühe osakese probleemile.

Kui me varem õppisime probleemi käsitlemist klassikalise füüsika vaatekohast, siis kvantfüüsika annab meile analoogiliste probleemide käsitlemiseks oma eeskirja.

Ühe elementaariosakese, elektroni või footoni jaoks on meil tõenäosuslained kolmedimensioonilises kontiinuumis. Need iseloomustavad süsteemi statistilist käitumist korduvates eksperimentides. Kuidas on lugu aga mitte ühe, vaid kahe omavahelises mõjustuses oleva osakesega, näiteks kahe elektroniga, elektroni ja footoniga või elektroni ja tuumaga? Vastastikuse mõju tõttu osakeste vahel ei saa me neid käsitleda eraldiseisvatena, kumbagi neist ei saa me kirjeldada tõenäosuslainega kolmedimensioonilises ruumis. Kuidas kirjeldada kvantfüüsikas kahest teineteisele mõjuvast osakesest koosnevat süsteemi, seda pole tegelikult kuigi raske taibata. Laskume korruse võrra allapoole, et pöörduda korraks tagasi klassikalise füüsika juurde. Kahe ainepunkti asukohta ruumis iseloomustab igal ajamomendil kuus arvu, kolm kummagi punkti jaoks. Kahe ainepunkti kõikvõimalikud asendid moodustavad kuuedimensioonilise kontiinuumi, mitte enam kolmedimensioonilise, nagu see oli ühe punkti puhul. Kui tõusta nüüd jälle ühe korruse võrra ülespoole, tagasi kvantfüüsikasse, siis on

meil siin tõenäosuslained kontiinumis, millel on kuus dimensiooni, mitte kolm, nagu see on ühe osakese korral. Analoogiliselt on kolme, nelja ja veelgi suurema arvu osakeste korral tõenäosuslained funktsioonideks vastavalt üheksadimensioonilises, kaheteistkümnedimensioonilises jne. kontiinumis.

See näitab selgesti, et tõenäosuslained on midagi palju abstraktsemat kui elektromagnetiline või gravitatsiooniväli, mis eksisteerivad ja levivad meie kolmedimensioonilises ruumis. Tõenäosuslainete tagapõhjaks on üldiselt paljudimensiooniline kontiinum, ainult ühe osakese juhul langeb selle dimensioonide arv ühte füüsikalise ruumi dimensioonide arvuga. Tõenäosuslaine ainukeseks füüsikaliseks tähenduseks on see, et ta võimaldab meil vastata mõistlikult püstitatud statistilist laadi küsimustele nii ühe kui ka mitme osakese juhul. Näiteks ühe elektroni kohta võiksime küsida, kui suur on tõenäosus elektroni leidmiseks mingis kindlas kohas. Kahe osakese korral võiks meie küsimus kõlada järgmiselt: kui suur on tõenäosus leida kahte osakest teatud ajahetkel kindlatest ruumipunktidest.

Meie esimeseks sammuks klassikalisest füüsikast eemaldumisel oli see, et lakkasime kirjeldamast individuaaljuhte nagu ruumis ja ajas toimuvaid objektiivseid sündmusi. Meil tuli kasutada tõenäosuslainetega määratud statistilist meetodit. Et me sellele teele kord juba asusime, oleme sunnitud edasi minema veelgi suuremate abstraktsioonide suunas. Tuli kasutusele võtta tõenäosuslained paljudimensioonilistes ruumides, mis vastavad mitme osakese probleemidele.

Lihtsuse mõttes nimetagem kogu füüsikat, mis ei ole kvantfüüsika, klassikaliseks füüsikaks. Klassikaline ja kvantfüüsika on teineteisest radikaalselt erinevad. Klassikalise füüsika eesmärgiks on ruumis asetsevate objektide kirjeldamine ja seaduste formuleerimine, mille kohaselt need objektid ajas muutuvad. Kuid nähtused, kus ilmneb aine ja kiirguse korpuskulaar- ning laineiseloorm, samuti ilmselt statistilist laadi elementaarsündmused, nagu radioaktiivne lagunemine, difraktsioon, spektrijoonte kiirgamine ja palju teisi, nõuavad meilt klassikalisest vaatest loobumist. Kvantfüüsika eesmärgiks ei ole kirjeldada üksikut objekti ruumis ning tema muutumist ajas. Kvantfüüsikas pole kohta niisugustele väidetele, nagu

näiteks: «See objekt on niisugune ja niisugune ning tal on need ja need omadused.» Selle asemel on seal taolised väited nagu: «On olemas nii ja nii suur tõenäosus selleks, et üksik objekt on niisugune ja niisugune ning et tal on need ja need omadused.» Kvantfüüsikas pole kohta seadustele, mis juhivad üksiku objekti käitumist ajas. Selle asemel on seal seadused, mille järgi toimub tõenäosuse muutumine ajas. Ainult see põhilise tähtsusega muudatus, mida tõi füüsikasse kvantteooria, andis võimaluse seletada ilmselt pidetuid ja statistilist laadi sündmusi, nagu on sündmused, kus esinevad aine ja kiirguse elementaarkvandid.

Kuid nüüd tekivad veelgi raskemad, lõplikult alles lahendamata probleemid. Märgime siin ainult mõnda neist. Teadus ei ole lõpetatud raamat ja ei saa selleks ka kunagi. Iga suurem edusamm toob endaga kaasa uusi küsimusi. Iga edasiarendus viib lõpuks jälle uutele ja veelgi suurematele raskustele.

Me teame juba, et lihtsal juhul, kus on tegemist ühe või mitme osakesega, tuleb meil klassikaliselt kirjeldamisviisilt üle minna kvantteooria kirjeldamisviisile. Teiste sõnadega: sündmuse objektiivselt kirjeldamiselt ruumis ja ajas peame siirduma tõenäosuslainetele. Kuid meenutame välja mõistet, mis oli klassikalises füüsikas väga oluline. Kuidas saaksime kirjeldada vastastikust mõju aine ja välja elementaarkvantide vahel? Kui kümne osakese kirjeldamiseks on kvantteoorias vaja tõenäosuslainet kolmekümnedimensioonilises kontinuumis, siis välja kirjeldamiseks kvantteoorias läheks tarvis lõpmatudimensioonilist tõenäosuslainet. Üleminek klassikaliselt välja mõistelt vastavale tõenäosuslainete probleemile kvantfüüsikas on väga raske samm. Tõusta ühe korruse võrra kõrgemale on siin väga keeruline ja kõik senitehtud katsed selle probleemi lahendamiseks on andnud ebarahuldavaid resultate. On olemas veel teine põhiprobleem. Kõigis oma arutlustes, mille abil teostasime ülemineku klassikalise füüsikast kvantfüüsikasse, kasutasime relatiivsusteooriale eelnenud kirjeldamisviisi, kus ruumi ja aega käsitletakse eraldiseisvatena. Kui me aga püüame alustada niisugusest klassikalise kirjeldusest, mis on kooskõlas relatiivsusteooriaga, siis tõusmine ühe korruse võrra kõrgemale kvantteooriasse näib olevat veel palju raskem. See on teine probleem, millega tegeleb kaasaegne füüsika, kuid

mille täielikust ning rahuldavast lahendusest on ta veel kaugel. Edasi on veel raskusi järjekindla teooria loomisel aatomituuma moodustavate raskete osakeste jaoks. Vaatamata paljude eksperimentide andmetele ja paljudele püüetele heita valgust aatomituuma probleemidele, kobame sellesse valdkonda kuuluvates põhiküsimustes ikka veel käsikaudu.

Pole kahtlust, et kvantfüüsika, mis seletab ära väga palju fakte, on enamikel juhtudel viinud teooria kooskõlla vaatlusega. Uus kvantfüüsika juhtis meid mehhanistlikust vaatest veelgi kaugemale, nii et tagasipöördumine vanade seisukohtade juurde näib olevat vähem tõenäoline kui kunagi varem. Kuid teiselt poolt on ka selge, et kvantfüüsika peab praegu veel tuginema kahele mõistele: ainele ja väljale. Selles mõttes on ta dualistlik teooria, mis ei lähenda meid sammu võrragi meie vanale eesmärgile — taandada kõike välja mõistele.

Kas edasine arenemine toimub samas suunas, mille valis kvantfüüsika, või on tõenäolisem, et füüsikasse tuuakse uued revolutsioonilised ideed? Kas füüsika arenemisteel seisab jälle ees järsk kurv, nagu seda minevikus nii sageli juhtus?

Viimastel aastatel on kvantfüüsika raskused kontsentreerunud paari printsiipiaalse tähtsusega küsimuse ümber. Füüsika ootab kannatamatult nende lahendamist. Kuid pole mingisugust võimalust ette näha, millal ja kus need raskused ületatakse.

## Füüsika ja tegelikkus

Missuguseid üldisi järeldusi võime teha füüsika arenemisest, mille kõige tähtsamaid ideid me selles raamatus üldjoontes skitseerisime?

Teadus ei ole seaduste kogu, omavahel seostamata faktide kollektsioon. Ta on inimhõimuse looming meelevaldselt kasutusele võetud ideede ja mõistetega. Füüsikateooriad püüavad luua pilti tegelikkusest ja määrata kindlaks selle pildi seost meeleliste tajude avara maailmaga. Ainukeseks õigustuseks meie mõistuse konstruktsioonidele, meie teooriatele on see, kas ja kui palju aitavad nad kaasa selle seose loomisele.

Me nägime uusi reaalsusi, mis loodi füüsika arenemiskäigus. Kuid niisugust loomisahelat võib jälgida ka kaugele tagasi, kuni füüsika algpäevini välja. Üks kõige lihtsamatest mõistetest on objekt. Puu, hobuse või mingi materiaalse keha mõisted on loodud kogemuste alusel, kuigi tajumused, millele seejuures tuginetakse, on füüsikaliste nähtuste endiga võrreldes primitiivsed. Hiirega mängiv kass loob mõttes samuti oma primitiivse reaalsuse. Et kass reageerib alati ühesuguselt, kui mõni hiir tema teele satub, siis see näitab, et ta loob mõisteid ja teooriaid, mis juhivad teda tema meeleliste tajude maailmas.

«Kolm puud» on midagi muud kui «kaks puud». Ja «kaks puud» pole seesama mis «kaks kivi». Abstraktsed arvud 2, 3, 4, ... on mõisted, mis tekkisid mõtlevas, meie reaalses maailmas kirjeldavas inim mõistuses, kuid mis enam ei sõltu nendest objektidest, mille alusel nad tekkisid.

Psühholoogiline subjektiivne ajatunne võimaldab meil korrastada oma muljeid, teha kindlaks, et üks sündmus eelneb teisele. Kuid seada kella abil igale ajamomendile vastavusse arv, s. o. käsitleda aega ühedimensioonilise kontiinuumina — see on juba väljamõeldis. Samasugune on lugu eukleidilise ja mitteeukleidilise geomeetria mõistetega ja meie käsitleusega ruumist kui kolmedimensioonilisest kontiinuumist.

Füüsika algab tegelikult massi, jõu ja inertsiaalsüsteemi mõistete sissetoomisest. Kõik need mõisted on vabad väljamõeldised. Nad viivad mehhanistliku vaate formuleerimisele. Üheksateistkümnenda sajandi algusperioodi füüsiku jaoks seisnes reaalsus osakestes, mille vahel mõjusid ainult kaugusest olenevad lihtsad jõud. Nii kaua kui võimalik, püüdis ta hoida alal usku, et nende reaalsuse põhimõistete abil õnnestub tal seletada kõiki loodusnähtusi. Magnetnõela kõrvalekaldumisega seotud raskused, samuti raskused, mis sisaldasid eetri struktuuri probleemid, sundisid meid looma teravmeelsemat reaalsust. Järgnes väga oluline samm — elektromagnetilise välja mõiste loomine. Oli tarvis julget teaduslikku kujutlusvõimet selle fakti täielikuks mõistmiseks, et sündmuste süstematiseerimisel ja nendest arusaamisel ei tarvitse määravat osa etendada kehade endi käitumine, vaid oluline on, kuidas käitub see «midagi», mis paikneb kehade vahel, s. o. kuidas käitub väli.

Hilisemas arenemiskäigus hävinesid vanad mõisted, kuid loodi ka uusi. Relatiivsusteooria heitis kõrvale absoluutse aja ja inertsiaalsüsteemi. Kõigi sündmuste taustaks ei olnud enam ühedimensiooniline aja- ja kolmedimensiooniline ruumikontiinum, vaid uute teisenemisomadustega neljadimensiooniline aegruumi-kontiinum, jällegi vaba väljamõeldis. Inertsiaalsüsteeme ei olnud enam tarvis. Kõik koordinaatsüsteemid olid looduse kirjeldamiseks võrdset sobivad.

Kvantteooria omakorda omistab meie reaalsusele uusi ning olulisi jooni. Pidetus asendas pidevuse. Indiviide juhtivate seaduste asemele ilmusid tõenäosusseadused.

Reaalsus, mille lõi kaasaegne füüsika, on varasemate aegade reaalsusest küll kaugemale läinud, kuid kõigi füüsikaliste teooriate eesmärk on jäänud samaks.

Füüsikalise teooria abil püüame leida teed vaatlustest saadud faktide labürindis ja korrastada ning mõista oma meeleliste tajude maailma. Me tahame vaadeldud fakte loogiliselt tuletada, lähtudes oma reaalsuse mõistest. Kui me ei usuks, et tegelikkust on võimalik haarata teoreetiliste konstruktsioonidega, kui me poleks veendunud, et meie maailmal on olemas seesmine harmoonia, siis ei oleks ka teadust. See usk on ja jääb alati kogu teadusliku loomingu põhimotiiviks. Kõigis meie pingutustes, igas draamatilises võitluses vanade ja uute vaadete vahel näeme igavest püüt arusaamise poole, vankumatut usku meie maailma harmooniasse, mis tunnetamisprotsessi ees olevate tõkete kasvamisega ainult tugevneb.

### Teeme kokkuvõtte:

*Atomaarsete nähtuste maailma kuuluvate faktide äärmine mitmekesisus sunnib meid jällegi kasutusele võtma uusi füüsikalisi mõisteid. Ainel on teraline struktuur; ta koosneb elementaarosakestest, aine elementaarkvantidest. Nii on teraline struktuur elektrilaengul ja, mis on kvantteooria seisukohalt kõige tähtsam, ka energial. Footonid on energiakvandid, millest koosneb valgus.*

*Kas valgus on laine või footonite voog? Kas elektronkiir on elementaarosakeste voog või laine? Need põhiküsimused tekkisid füüsikas eksperimendi tulemusena. Otsides neile vastust, tuli meil loobuda atomaarsete sündmuste*

kirjeldamisest ruumis ja ajas toimuvatena. Me pidime vanast mehhanistlikust vaatest veelgi kaugemale minema. Kvantfüüsika annab seadused, mis juhivad kollektiive, mitte enam indiviide. Ei kirjeldata enam omadusi, vaid tõenäosusi, ei formuleerita enam seadusi, mis avavad süsteemi tuleviku, vaid seadusi ajas muutuvate tõenäosuste jaoks, mis kehtivad indiviidide kollektiivides.

## JÄRELSÕNA

Huvitav on selle raamatu saamisluгу.

Albert Einsteinil oli seljataga juba rohkem kui kolmkümmend aastat pingelist teaduslikku tööd. Teda tunti erakordse eruditsiooniga füüsikuna, spetsiaalse ja üldise relatiivsusteooria loojana ning kvantide teooria aluste rajajana. Lahkunud 1933. aastal Saksamaalt, töötas ta Ameerika Ühendriikides Princetoni Teadusliku Uurimise Instituudis (Institute for Advanced Studies). Juba mõned head aastad oli ta teaduslikus kirjavahetuses noore poola füüsiku Leopold Infeldiga. See andis viimasele julgust ka oma isikliku elu muredega Einsteini poole pöörduda. Infeld ise kirjutab sellest järgmiselt<sup>1</sup>:

«Oli 1936. aasta. Poolas võttis fašism üha rohkem maad. Ma sain aru, et niisuguses Poolas ei saa ma kunagi kateedrit; olin siis Lvovis dotsendiks. Ma kirjutasin olukorrast Einsteinile, mõistes muidugi, et see oli üks nendest arvukatest abipalvetest, mis temale adresseeriti. Varsti tuli suurepärase vastus. Princetoni Teadusliku Uurimise Instituut, mille professoriks oli Einstein, määrab mulle väikese stipendiumi ja kirja autor on rõõmus, et me varsti kohtume.»

See kohtumine toimuski peatselt, juba 1936. aasta septembris. Einsteini esimesed sõnad peale tervitamist olid: «Ma räägin Teile, mille kallal ma praegu töötan.» See oli liikumisvõrrandite probleem üldises relatiivsusteoorias, millele Einstein oli pühendanud juba 15 aastat. Ka Infeld asub Einsteini juhatusel otsekohe tööle. Pingutusi kroonib esialgne edu. Lähtudes üldise relatiivsusteooria gravitatsioonivõrranditest, õnnestus tuletada liikumisvõrrandeid kaksiktähe jaoks. See oli alles lahenduse algus,

<sup>1</sup> Л. Инфельд, «Мои воспоминания об Эйнштейне», Сборник «Эйнштейн и современная физика», Москва, 1956.

Sealtsamast on võetud ka kõik järgmised tsitaadid. — Tõlk.

kuid Infeldile määratud stipendiumi tähtaeg hakkas lõppema. «Oli aeg mõelda, mis saab algaval, 1937/38. akadeemilisel aastal,» kirjutab L. Infeld. Ja edasi:

«Poola kohale kogunesid pilved. Lvovi Jan Kazimiri nimelise Ülikooli assistentide ühing võttis vaevaks saata mulle tähitud kirja teatega, et ma olen nende auväärsest ringist välja arvatud. Väljavaated töö leidmiseks kodumaal võrdusid nulliga.»

Taotlused stipendiumi pikendamiseks ei andnud samuti mingeid tulemusi. Otsides väljapääsu raskest olukorrast, tuli Infeldil mõte kirjutada koos Einsteiniga populaarne raamat füüsikast. Einsteinile see plaan meeldis. Ta lükkas tagasi Infeldi kava kirjutada raamatut relatiivsusteooriast ja tegi selle asemel ettepaneku anda ülevaade füüsika põhiideedest nende arnemises.

«See on draama, ideede draama,» rääkis ta. «Meie raamat peab olema huvitav ja haarav igaühele, kes armastab teadust.»

Algul oli Einsteinil ja Infeldil kavatsus kirjutada hariilik populaarteaduslik raamat. Arutluste käigus esialgne plaan aga muutus. Jõuti üksmeelsele otsusele, et see raamat peab olema midagi rohkemat, midagi niisugust, mis annaks uusi vaatekohti ja ideid ka füüsikutele.

Raamat otsustati kirjutada nii, et see ei segaks peamist — tööd liikumisvõrrandite probleemi lahendamisel. Raskusi oli keelega. Einsteini aktiivne ingliskeelne sõnavara oli sel ajal «umbes 300 sõna». Ka Infeldile oli see esimene raamat inglise keeles kirjutada. Kuid sõprade abiga saadi raskustest üle. Infeld kirjutas iga päev umbes tuhat sõna. Kord nädalas luges ta kirjutatu Einsteinile ette, kes tegi siis vajalikke parandusi. Pärast seda mindi harilikult ühisele jalutuskäigule, kus arutati läbi järgmise osa plaan.

Nii tekkis raamat «Füüsika evolutsioon» kahe silmapaistva teoreetiku tihedas koostöös, samal ajal kui nad lahendasid ühte huvitavamat probleemi füüsikas — liikumise probleemi. 1938. aasta aprillis ilmus ajakirjas «Annals of Mathematics» Einsteini ja Infeldi ühine töö liikumisvõrrandite kohta, ja samal kuul ilmus New Yorgis ka käesoleva raamatu «Evolution of Physics» esimene trükk. Õige kiiresti järgnesid kordustrukid ja tõlked väga paljudesse keeltesse.

Ajajärgule oli iseloomulik ka tõlgete saatus autorite

emakeeltes — saksa ja poola keeles. Saksakeelne tõlge ilmus küll kiiresti, kuid Hollandis. Fašistlikul Saksamaal, kus isegi Einsteini nime nimetamine võis füüsikule eba-meeldivusi tuua, ei saanud «Füüsika evolutsiooni» tõlkest midugi juttugi olla. Veelgi kurvem oli poolakeelse tõlke saatus. Tõlge tehti kiiresti ja valmis raamat jõudis lattu, kust see 1939. a. septembrikuus müügile pidi saadetama. Fašistliku Saksamaa kallaletung purustas Poola riigi ja muutis tuhaks ka kogu «Füüsika evolutsiooni» trüki. Alles paar aastat tagasi avastati üksainuke juhuslikult säilinud eksemplar sellest trükist. Selleks ajaks oli aga uus tõlge juba tehtud ja 1959. a. ka poola lugejate kätte jõudnud — 21 aastat pärast ingliskeelse originaali ilmumist.

Kui ajalehe «New York Times» korrespondent raamatu ilmumise päeval helistas Einsteinile ja palus teda öelda mõni sõna raamatu kohta, vastas Einstein: «Kõik, mida ma võin öelda raamatu kohta, on juba olemas raamatus endas.»

Kuigi see lause väljendab selgelt autori seisukohta igasuguste järel- ja eessõnade suhtes, julgeb allakirjutanu, arvestades vahepeal möödunud kahte aastakümnet, paari raamatus käsitletud probleemi juures siiski lähemalt peatuda.

A. Einsteini ja L. Infeldi «Füüsika evolutsioon» ei ole mõeldud füüsika ajaloon. Autorid seadsid endale hoopis teise ülesande: visandada üldistes joontes kõige tähtsamate füüsikaliste ideede arenemislugu ja «näidata neid aktiivseid jõude, mis sunnivad teadust looma meie maailma tegelikkusele vastavaid ideid» (vt. käesolev raamat lk. 5). Kuid raske on alahinnata ka selle raamatu metoodilist väärtust, samuti pakuvad igale lugejale huvi kaasaja suurima füüsiku A. Einsteini filosoofilised vaated, mis selle raamatu lehekülgedel küllaltki üksikasjaliselt kajastuvad.

Nagu juba öeldud, ilmus «Füüsika evolutsiooni» esimene trükk rohkem kui kakskümmend aastat tagasi. Hili-semates trükkides autorid mingisuguseid täiendusi või parandusi teinud ei ole. Nii mõnigi probleem, mis selles raamatus alles oma esialgses kujus esineb või koguni puudub, on vahepeal läbi teinud pika arenemistee.

Kõigepealt tuleks siin kahtlemata nimetada liikumis-

võrrandite probleemi, sama probleemi, mille juures Einstein ja Infeld raamatu kirjutamise ajal töötasid.

Newtoni gravitatsiooniteooria tugineb kahele teineteisest täiesti sõltumatule võrrandile. Esimene neist, väljavõrrand, võimaldab ruumis olevate masside paigutuse ja liikumise järgi arvutada gravitatsioonivälja tugevust kõigis ruumipunktides. See võrrand määrab Newtoni gravitatsiooniseaduse. Teine võrrand, nn. liikumisvõrrand, kirjeldab aga antud gravitatsiooniväljas oleva massi liikumist. See võrrand on Newtoni teise seaduse matemaatiliseks väljenduseks. Einsteini ja Infeldi uurimused näitasid aga, et üldisele relatiivsusteooriale tuginevas gravitatsiooniteoorias on olukord põhimõtteliselt palju lihtsam, sest siin määrab gravitatsioonivälja võrrand nii väljatugevuse igas ruumipunktis kui ka masside liikumise väljas. Newtoni teise seaduse täpsustatud kujus saame gravitatsioonivälja võrrandite lahendamisel kui kõrvaltulemuse. Lähtudes teistest füüsikalistest kaalutlustest relativistlikus gravitatsiooniteoorias, jõudis iseseisvalt samadele tulemustele ka nõukogude füüsik akadeemik V. A. Fok.

Käesoleva raamatu lehekülgedel 214—215 märgivad autorid kolme selleaegse füüsika põhiprobleemi. Need olid: aatomituuma teooria loomine, kvantteooria käsitlemine nii, et see oleks kooskõlas relatiivsusteooriaga, ja lõpuks üleminek klassikaliselt välja mõistelt vastavale tõenäosuslainete probleemile kvantfüüsikas. Teiste sõnadega, kasutades tänapäeva terminoloogiat, olid peamisteks probleemideks tuumateooria, relativistliku kvantmehhanika ja väljade kvantteooria väljaarendamine. Kõigis neis küsimustes on teooria viimase kahekümne aasta jooksul suure sammu edasi astunud.

Kõige väiksem on olnud edu aatomituuma teoreetilisel käsitlemisel. Vaatamata sellele, et aatomi tuumaenergia rakendamine loovas töös hakkab võtma juba massilist iseloomu, pole meil siiani olemas sisemiselt terviklikku tuumateooriat. Mahukad köited, mis on pühendatud aatomituuma teoreetilisele käsitlemisele, meenutavad konglomeraati, mis koosneb teiste füüsikaliste teooriate fragmentidest. Isegi siis, kui Einstein ja Infeld kirjutaksid oma raamatut füüsika põhiideede arenemisest praegu, ei loeks nad arvatavasti tuumateoorias kasutuselolevaid ideid nii olulisteks, et neist selles raamatus rääkida.

Relativistliku kvantmehhaanika loomist, seevastu, on krooninud täielik edu. See on teooria, mida võime tänapäeval juba enam-vähem lõpetatuks lugeda.<sup>1</sup>

Kõige huvitavamatele tulemustele on viinud Einsteini ja Infeldi poolt märgitud kolmanda suuna arendamine, üleminek klassikaliselt väljateoorialt väljade kvantteooriasse. Väärrib märkimist, et just see uurimissuund andis lõpuks vastuse ka probleemile aine ja välja vahekorras looduses, probleemile, mille juures raamatus mitmel korral peatutakse. Autorid püüavad ainet, s. o. elementaarosakesi vaadata kui niisuguseid kohti väljas, kus väljatugevus on erakordselt suur. Nende taotluste kohaselt oleks siis erinevus aine ja välja vahel ainult kvantitatiivset laadi. Väljade kvantteooria arenemine näitas tõepoolest, et puhta väljafüüsika formuleerimine on võimalik, kuid kvalitatiivselt uuel tasemel. Vahekord välja ja osakeste vahel on palju keerulisem, kui seda arvasid autorid raamatu kirjutamise ajal.

Kõigepealt teame praegu, et looduses olevate väljade hulk on väga suur. Elektromagnetilisele ja gravitatsiooni-väljale liituvad veel elektron-positronväli, neutriinoväli, mitmesugused mesonväljad, prooton-antiprootonväli jt. Kõik need väljad on alati igas ruumpunktis olemas, harilikult on nad aga nn. vaakuumolekus, s. o. minimaalse energiaga olekus. See on olek, kus välja ühegi mõõteaparaadiga avastada ei saa, sest väljal pole energiat, mida aparaadile loovutada. Niipea aga, kui väli neelab energiat, tekib väljale vastav elementaarosake. Nii võib tekkida elektromagnetilisest väljast footon, mesonväljast meson, elektron-positronväljast elektronist ja positronist koosnev osakeste paar jne. Kui väli energiat teisele väljale loovutab, siis esimesele väljale vastav osake kaob ja tekib teise välja osake. Seega kaasaegses füüsikas hästituntud elementaarosakeste tekkimise, kadumise ja muundumise protsessid pole midagi muud kui energiavahetus vastavate väljade vahel. Niisugused protsessid toimuvad muidugi energia, elektrilaengu, impulsi jt. jäävuse seaduste kohaselt. Osake pole seega midagi väljale vastandlikku, vaid ta

---

<sup>1</sup> Einstein tegelikult ei mõelnud kvantteooria kooskõlastamist relatiivsusteooriaga nii, nagu see relativistlikus kvantmehhaanikas teostati. Ta lootis, et aatomitemaailma nähtusi saab kirjeldada relatiivsusteooriale tugineva klassikalise teooriaga. Need lootused ei täitunud. — *Tõlk.*

ilmub siis, kui väli neelab energiat, ja kaob, kui väli energiat ära annab.

Elementaarosakestega toimuvate protsesside kirjeldamisel kasutame praegu puhast väljafüüsikat, kuid mitte klassikalist, nagu soovisid raamatu autorid kakskümmend aastat tagasi, vaid välja kvantfüüsikat, s. o. teooriat, kus, autorite terminoloogia kohaselt, on teostatud «üleminek klassikaliselt välja mõistelt vastavale tõenäosuslainete probleemile kvantfüüsikas».

Väljade kvantteooria on praegu hoogsalt arenev teooria, temas peituvad võimalused pole veel kaugeltki ammendatud. Märgime siin kas või neid võimalusi, mida pakub väljade kvantteooria meetodite rakendamine tahke keha teoreetilisel uurimisel — jälle üks näide selle kohta, kui headele tulemustele võib viia otstarbekohase analoogia kasutamine teaduses. Kuid väljade kvantteoorias on ka veel palju lahendamata probleeme ja matemaatilist laadi raskusi.

Ainukese erandi kõigi väljade hulgas näib moodustavat gravitatsiooniväli. Gravitatsioonivälja võrrandid on tänapäevani jäänud klassikalisteks struktureseadusteks, nii nagu nad seda olid käesoleva raamatu kirjutamise ajal. Tõsi küll, on tehtud katseid käsitleda ka gravitatsioonivälja teiste väljade taoliselt kvantfüüsika probleemina, kuid gravitatsioonivälja mittelineaarsest iseloomust tingituna pole need katsed seni täisväärtuslikku vilja kandnud. On alles probleem, kas gravitatsiooniväljale vastavusse seatud osakesed — gravitonid — looduses üldse esinevad või on nad lihtsalt teoreetikute väljamõeldiseks.

Pärast relatiivsusteooria ja kvantide teooria loomist pole teoreetilises füüsikas õieti ühtegi põhimõtteliselt uut teoreetilist üldistust tehtud. Füüsikute jõupingutused on olnud suunatud rohkem sellele, et lähtudes juba olemasolevatest põhiideedest, leida lahendusi füüsika konkreetsetele probleemidele ja suurendada antud ideedele tugineva matemaatika võimsust. Selles mõttes on käesoleva raamatu sisu praegu täpselt sama aktuaalne, nagu ta oli kakskümmend aastat tagasi. Et uued teoreetilised üldistused siiski varem või hiljem tulevad, selles pole kahtlust. Kaasaegsest füüsikast võiks märkida kahte eksperimentaalselt avastatud fakti, mis nähtavasti peidavad endas lähtekohti uutele üldistustele. Need on sisemise struk-

tuuri avastamine prootonil ja neutronil 1956. aastal<sup>1</sup> ja seose leidmine elementaarosakese laengu märgi ja ruumi peegelduslike omaduste vahel aastatel 1956—1957<sup>2</sup>.

«Füüsika evolutsioon» on oma vormilt tihe ja kompaktne, sisult terviklik ja erakordselt rikka teadusliku alltekstiga raamat. Väliselt lihtsad laused peidavad endas sageli väga sügavaid mõtteid, mida mittespetsialistil on vahel isegi raske märgata või mida ta võib teinekord ka hoopis valesti tõlgendada, eriti relatiivsusteooriat ja kvantmehhaanikat puudutavates küsimustes. Kvantmehhaanika interpretatsiooni küsimusi on pärast käesoleva raamatu kirjutamist pealegi tunduvalt edasi arendatud, seda eriti viimastel aastatel. Kvantmehhaanika kaas-aegse interpretatsiooniga võib lugeja tutvuda akadeemik V. A. Foki tööde kaudu<sup>3</sup>. Relatiivsusteooria tõlgendamiseiga seotud probleemidest annab ülevaate aja-kirja «Вопросы философии» veergudel arendatud diskussioon<sup>4</sup>.

Mõne sõnaga tuleks siin siiski peatuda Koperniku ja Ptolemaiose süsteemide nn. samaväärsuse probleemil, millest räägitakse raamatus lehekülgedel 157—158. Pealiskaudsel lugemisel võib siin tekkida arvamus, nagu oleks kogu omaaegne võitlus Koperniku maailmasüsteemi eest olnud asjatu, sest see süsteem on Ptolemaiose süsteemiga samaväärne. Paljudel juhtudel on üldisest relatiivsus-

<sup>1</sup> Д. И. Блохинцев и др. «Структура нуклонов», «Успехи Физических Наук», том 68, вып. 3, 1959.

Д. И. Блохинцев, «Книга В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» и современные представления о структуре элементарных частиц», «Успехи Физических Наук», том 69, вып. 1, 1959.

Populaarse ülevaate elementaarosakeste struktuuri probleemist võib leida ka ajakirjast «Eesti Loodus» nr. 5, 1959. a.

<sup>2</sup> Чжень-нин Янг, «Закон сохранения четности и другие законы симметрии», «Успехи Физических Наук», том 64, вып. 1, 1958.

Цзян-дао Ли, «Слабые взаимодействия и несохранение четности», «Успехи Физических Наук», том 64, вып. 1, 1958.

<sup>3</sup> Vt. näiteks В. А. Фок, «Об интерпретации квантовой механики», «Успехи Физических Наук», том. 62, вып. 4, 1957.

Ülevaate samast küsimusest annab ka kokkuvõtte üleliidulisest nõupidamisest kaasaegse loodusteaduse filosoofilistes küsimustes.

Vt. Ю. В. Сачков, «Обсуждение философских вопросов квантовой механики», «Вопросы философии» № 2, 1959.

<sup>4</sup> Diskussioon algas artikliga Г. И. Наан, «К вопросу о принципе относительности в физике», «Вопросы философии» № 2, 1951.

Vt. eelnimetatud nõupidamise materjalidest ka Н. Ф. Овчинников, «Обсуждение философских вопросов теории относительности», «Вопросы философии» № 2, 1959.

teoriast ja ka käesolevast raamatust niisuguseid järeldusi tõepoolest tehtud.<sup>1</sup> Süvenemine küsimusse näitab selgesti, kui vähe niisugused järeldused paika peavad.

Üldise relatiivsusteooria suureks teeneks on see, et tema valemid kehtivad mis tahes koordinaatsüsteemides, kuna Newtoni gravitatsiooniteooria ja mehhaanika on õiged ainult inertsiaalsüsteemides. See ei tähenda aga seda, et me ühe või teise konkreetse ülesande lahendamisel üldise relatiivsusteooria taustal võiksime kasutada mis tahes koordinaatsüsteemi. Kui me tahame uurida näiteks planeetide liikumist meie Päikesesüsteemis, siis võime teiste Linnutee süsteemi kuuluvate tähtede mõju arvestamata jätta, sest see on väga väike. Seega küllalt kaugel Päikesesüsteemist loeme selle ülesande lahendamisel gravitatsioonivälja tugevuse praktiliselt nulliks. Gravitatsioonivälja võrrandite lahendamisel peame seda lisatingimust arvestama, mis viib meid järeldusele, et planeetide liikumise kirjeldamisel peame eelistama Koperniku süsteemi.

L. Infeld kirjutab selle kohta<sup>2</sup>: «Üheks süüdistuseks, niivõrd rumalaks, et raske on temale isegi vastata, oli see, nagu oleksime Koperniku teooria vastu välja astunud, nagu oleks Koperniku ja Ptolemaiose teooriad üks ja seesama, sest kõik oleneb siin taustsüsteemist, aga taustsüsteem on relatiivsusteoorias meelevaldne.» Ja edasi: «Kui me räägime relatiivsusteooria matemaatilisest struktuurist, siis seal tähendab invariantsus tõepoolest seda, et taustsüsteemi mõistet pole vaja ja et Ptolemaiose ja Koperniku süsteemide vahel pole erinevust. Niipea aga kui räägime füüsikalisest sisust, on asi hoopis teisiti.»

Veel mõned aastad tagasi võis siin ja seal kuulda etteheiteid, nagu oleks relatiivsusteooria idealistlik teooria. Muidugi loeti läbi ja läbi idealistlikuks siis ka raamatut «Füüsika evolutsioon». Niisuguse ebateadusliku vaate kõrvaldamisele aitas olulisel määral kaasa eespool nimetatud diskussioon relatiivsusteooria küsimustes. L. Infeld, kes 1950. aastast peale töötab jälle oma kodumaal Poolas, kirjutab selle kohta<sup>3</sup>:

«Mida ma arvan etteheidetest, et see raamat on idea-

<sup>1</sup> Vt. näiteks S. Suvorovi sissejuhatus käesoleva raamatu venekeelsele tõlkele (А. Эйнштейн и Л. Инфельд, «Эволюция физики», Москва, 1956).

<sup>2</sup> Vt. eespool tsiteeritud Infeldi artikkel.

<sup>3</sup> Vt. sealsamas.

listlik? See süüdistus näib mulle ainult väga vähesel määral õigustatud olevat. Rohkem kui 99 protsenti raamatust käsitleb füüsikat. Nii Einstein kui ka mina lugesime end materialistideks, kuigi kumbki meist ei uurinud sel ajal dialektilise materialismi teoreetikuid. Oma praeguste vaadete kohaselt võin öelda, et selles ühes protsendis, mis puudutab filosoofia küsimusi, on mõned formuleeringud, mida võiks tõlgendada idealistlikult. Kuid see Einsteini «idealism» on palju huvitavam kui mõnede raamatulekallaletungivate sektantide dialektiline materialism. Mulle näiteks räägiti, et X. ütles avalikul loengul: «Einstein on idealist, kuna Infeld levitab tema mõtteid Poolas.» Saades sellest teada, ma vastasin: «Eelistan, et mind sõimataks koos Einsteiniga, selle asemel et kiidetaks koos härra X-ga.»»

Ja edasi:

«Kõige teravamate kallaletungide ohvriks said meie raamatu kolm viimast lehekülge. Viimases peatükis «Füüsika ja tegelikkus» me kirjutame, et teadus seisneb novaatorlikes ideedes ja mõistetes, mis on inim mõistuse vaba looming.

Mõnedele kriitikutele tundus see arutus puhta baakliiaanlusena. Mida meie sellega mõtlesime, see on selgitatud meie raamatus eespool, peatükis «Liikumise mõistatus».

On nähtavasti selge, et meie poolt kirjeldatavate tegelikkuse fragmentide ja kirjeldamisel kasutatavate mõistete vahel ei ole ühest seost. See hakkab kohe silma, kui mõtleme erinevusele kõnekeele ja teadusliku keele vahel... Kuid peale selle erinevuse tekivad koos teaduse arenemisega erinevused ka teaduslikus keeles endas. Muutuvad mõisted, mida me kasutame tegeliku maailma kirjeldamisel. Mõelge näiteks Huygensi ning Newtoni valguseteooriale ja Einsteini footonitele. Kuid koos tegelikkuse üha parema tunnetamisega läheneme ikka enam ja enam materiaalse maailma ühesele kirjeldamisele, s. o. me läheneme üha rohkem objektiivsele tõele. Marsi elanikel oleks lõpuks samasugune füüsika nagu meilgi.

On võimalik, et see, mida ma kirjutasin siin ja mida me kirjutasime raamatus, ei ole avaldatud dialektilise materialismi terminoloogia kaudu, kuid süüdistada autoreid puhtas idealismis — see on lihtsalt kas rumalus, õelus või segu neist mõlemaist, sageli kooskäivatest iseloomujoontest inimesel.»

Mõnevõrra ebatäpset terminoloogiat võib käesolevale raamatule tõepoolest ette heita. Kõige teravamalt hakkab see silma kvantfüüsikat käsitlevas peatükis. Näiteks leheküljel 210 võime lugeda:

«Me pidime loobuma individuaaljuhtude niisugusest kirjeldamisest, mis käsitleb neid ruumis ja ajas objektiivselt toimuvatena.»

Tähelepanelik lugeja märkab aga kohe, et Einstein ja Infeld ei taha sellega sugugi öelda, nagu oleks mikromaailma objektid ainult teorias kasutatavad mõisted, nagu poleks neid looduses üldse olemas. Millest tekkis see vastuolu toodud tsitaadi vormi ja raamatu sisu vahel? On teada, et Einstein, olles küll üks kvantide teooria rajajatest, muutis hiljem oma seisukohti ja jäi elu lõpuni selle teooria vastaseks. Tema arvates ei olnud kvantteooria statistilised seadused kooskõlastatavad põhjuslikkusega looduses. Näiteks 1947. aastal kirjutas ta Max Bornile<sup>1</sup>: «Ma olen kindlalt veendunud selles, et lõppude lõpuks jõutakse teooria juurde, mis seob seadustega mitte tõenäosusi, vaid fakte.» Sama seisukoht peegeldub ka ülaltoodud tsitaadis. Tegelikult ei olnud Einsteinil õigus. Tema viga seisnes selles, et ta mõistis põhjuslikkust ainult puhtmehhanistlikult. Akadeemik V. A. Fok kirjutab sama küsimuse kohta<sup>2</sup>:

«Aatomite maailma uurimine näitab, et klassikaline determinism mitte ainult ei vasta looduseseadustele, vaid see ei luba neid ka küllaldase täpsusega formuleerida... Uute meetodite olulised jooned seisnevad... kirjelduse tõenäosuslikus iseloomus, mistõttu tuleb eristada potentsiaalselt võimalikku teostunust, ... ja põhjuslikkuse printsiibi uues mõistmises, mille kohaselt see printsiip käib otseselt tõenäosuste kohta, s. o. potentsiaalselt võimalike, mitte aga teostunud sündmuste kohta.»

Einsteini suhtumine kvantide teoriasse on huvitavaks näiteks, mis kinnitab veel kord õige maailmavaate ja meetodika tähtsust teaduslikus uurimistöös. Oma relatiivsusteooriaga andis Einstein meile esimese detailselt läbitöötatud, erakordselt sügava näite dialektilise meetodi rakendamise kohta füüsika probleemide lahendamisel. Kuid ta

<sup>1</sup> Макс Борн, «Альберт Эйнштейн и световые кванты». Сборник «Эйнштейн и современная физика», Москва, 1956.

<sup>2</sup> Vt. eespool tsiteeritud V. A. Foki artiklit.

ei näinud seejuures kaugemale konkreetsest füüsikalisest teoriast, ta ei näinud siin jooni üldisest meetodist kõigi loodusnähtuste teoreetiliseks käsitlemiseks. Nii juhtuski, et näiteks kvantide teooria küsimustele ei osanud ta enam dialektiliselt läheneda, mille tulemuseks oli kvantide teooria mittemõistmine ja muuhulgas ka käesolevas raamatus lk. 210 toodud lause ebaõnnestunud sõnastus.

Vääriti võib mõista ka raamatus lk. 183 toodud lauset: «Mass on energia ja energial on mass.» Näib, et selles lauses kasutatakse kõnekeelele omast lakoonilisust ja kujundlikkust (näiteks «aeg on raha»). Leheküljel 147 on sama mõte väljendatud täpsemini: «Relatiivsusteooria seisukohalt massi ja energia vahel olulist erinevust ei ole. Energial on mass ja mass esitab energiat.»

Tähelepanematut lugejat võib viia segadusse ka see, kui leheküljel 137 kirjutatakse, et «liikuv kell muudab oma rütmi». Või samal leheküljel: «Me võime väga hästi kujutleda, et peale liikuvate kellade rütmi muutub ka liikuva varda pikkus.» Taolisi väljendusi võib leida käesolevast raamatust mujaltki. Tuleb silmas pidada, et siin ei mõelda seda, nagu muutuks liikuvate kellade rütm või vastavalt liikuvate varraste pikkus aja jooksul. Niisuguse lausega tahetakse öelda, et kaks kella, mis teineteise suhtes paigalseisvatena käiksid ühesuguse rütmiga, ei tee seda enam siis, kui üks neist kelladest teise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt liigub. Analoogiliselt tuleb mõista liikuva varda lühenemist.

Relatiivsusteoorias kasutatakse termini «taustsüsteem» kõrval sageli samaväärsena ka terminit «koordinaatsüsteem», mis on tingitud sellest, et relatiivsusteooria matemaatilisel käsitlemisel rakendatakse väga palju geomeetriat. Käesoleva raamatu autorid on kasutanud eelistatult just terminit «koordinaatsüsteem». Kuigi see võib lugejat mõnes kohas ebaõigele kujutlusele viia, nagu oleks tegemist puhtgeomeetrilise koordinaatsüsteemiga, ei pidanud tõlkija siiski võimalikuks nimetatud terminit igal pool «taustsüsteemiga» asendada, osaline asendamine oleks aga võinud kergesti viia autorite mõtte moonutamisele. Küll on siiski originaali lühendi «c. s.» asemel kasutatud tõlkes igal pool tervet sõna «koordinaatsüsteem».

Veel mõni sõna käesoleva tõlke kohta. Tõlge on tehtud raamatu 1938. aasta Cambridge'i väljaande järgi, kusjuu-

res on sisse toodud mõningad mitteolulised muudatused. Need oleksid:

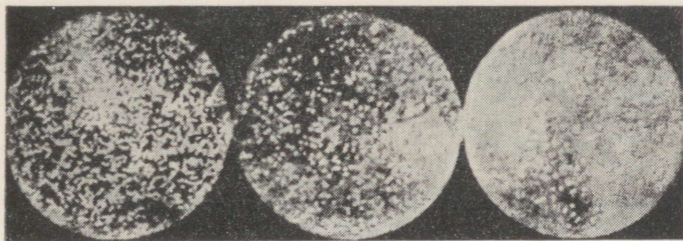
originaalis on joonised nummerdamata, kuna tõlkes on nad lugemise hõlbustamiseks nummerdatud;

originaalis kasutatud mõõtühikud (nagu jalg, miil, nael jt.) on tõlkes asendatud meie vastavate ühikutega, välja arvatud ilmselt ajaloolise iseloomuga tekstid. Samuti on Fahrenheiti temperatuuriskaala asendatud Celsiuse skaalaga.

Raamatus on mitmes kohas viiteid «nii ja nii mitu aastat tagasi». Arvestades seda, et originaali kirjutamisest on möödunud juba veidi üle 20 aasta, on niisugustes viidetes igal pool aastate arvu originaaliga võrreldes 20 võrra suurendatud.

Tahaks loota, et need väikesed muudatused ei ole vastuolus raamatu üldise vaimuga ning et nad hõlbustavad meie lugejal raamatu väärtusliku sisu omandamist.

*Tõlkija*

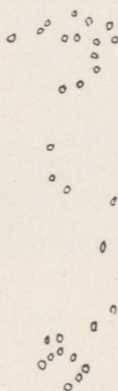


1. Browni osakesed läbi mikroskoobi vaadatuna.

(J. Perrini foto)

2. Pika valgustusajaga fotografeeritud Browni osake, mis on katnud selle aja jooksul terve pinnaosa.

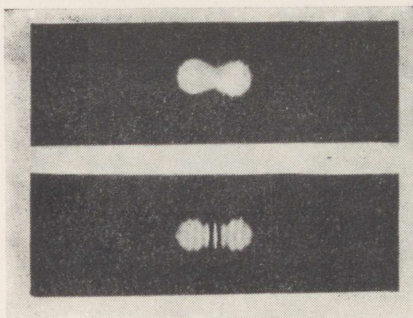
(Brumbergi ja Vavilovi foto)



3. Ühe Browni osakese üksteisele järgnevad asendid.

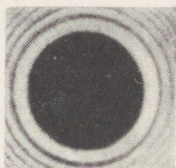


4. Osakese tee, mis on leitud, lähtudes eelmisel joonisel antud asenditest.



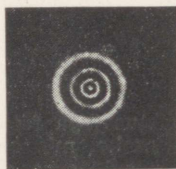
5. Ülal näeme fotot valgus-  
laikudest, mis tekkisid kahte  
nõelaauku teineteise järel  
läbinud valguskiirest (algul  
oli avatud ainult üks auk,  
seejärel see kaeti ja avati  
teine). Selle all näeme fotot,  
mis saadi siis, kui valgus läbis  
mõlemad augud korraga.

(V. Arkadjevi fotod)



6. Valguse di-  
fraktsioonipilt,  
mis tekib kiirte  
paindumisel  
väikese tõkke  
taha.

(V. Arkadjevi foto)



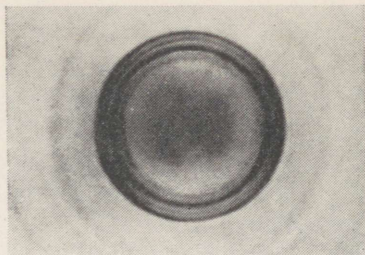
7. Valguse di-  
fraktsioonipilt,  
mis tekib kiirte  
läbiminekul  
väikesest avast.

(V. Arkadjevi foto)



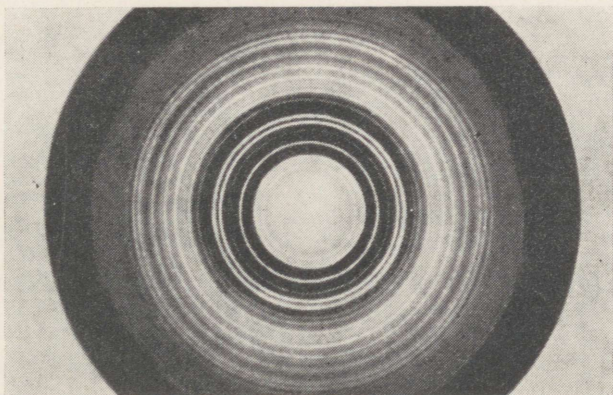
8. Spektrijooned.

(A. G. Shenstone'i foto)



9. Röntgenikiirte difraktsioonipilt.

*(Lastowiecki ja Gregori foto)*



10. Elektronlainete difraktsioonipilt.

*(Loria ja Klingeri foto)*

## AINEREGISTER

- Absoluutne liikumine 126, 157  
 Aine ja energia 43  
 Aine ja väli 180  
 Aine radioaktiivne lagunemine 145  
 Aristoteles 9  
 Black 32, 40  
 Bohr 197, 210  
 Born 210  
 de Broglie 200, 202, 210  
 Brown 48, 49  
 Browni liikumine 48—51  
 Coulomb 58, 63  
 Demokritos 44  
 Dipool:  
   elektriline 62  
   magnetiline 62  
 Dirac 210  
 Dispersioon 74, 84  
 Eeter 80, 83, 86, 88—90, 123, 124, 125, 126, 127—129  
 Elektrilaeng 59—60  
 Elektriline potentsiaal 58—60  
 Elektripatarei elemendid 60—65  
 Elektrivedelikud 54  
 Elektrivool 64  
 Elektromagnetiline laine 109  
 Elektromagnetiline väli 107  
 Elektromagnetilise laine kiirus 110  
 Elektronid 187  
 Elektroni mass 188  
 Elektronlaine 203  
 Elektronlainete difraktsioon 204  
 Elektroskoop 52  
 Elementaarkvant 185  
 Elementaarosakesed 145  
 Elementaarsed magnetdipoolid 62—63  
 Energia:  
   kineetiline 39, 40  
   mehhaaniline 41  
   potentsiaalne 38, 39, 40  
 Energiatase 197  
 Erisoojus 33  
*Experimentum crucis* (otsustav eksperiment) 35  
 Faraday 91, 101  
 Fizeau 70  
 Footonid 192  
 Fotoelektriline efekt 190  
 Fresnel 85  
 Galilei 9, 10, 11, 12, 32, 44, 68, 69, 70  
 Galilei relatiivsuspriintiip 117  
 Galvani 64  
 Gravitatsiooniseadus 26  
 Heisenberg 210  
 Helmholtz 45, 46  
 Hertz 91, 110  
 Homogeenne valgus 110  
 Huygens 80  
 Indutseeritud elektrivool 101  
 Inertne mass 29, 160, 162  
 Inertsiaalsüsteem 117, 155, 156  
 Inertsiseadus 11, 113  
 Invariant 120  
 Isolaatorid 52, 55  
 Joule 40, 41, 41—42  
 Juht 55  
 Jõud 12, 17, 21, 23—24  
 Jõud ja aine 44  
 Jõujooned 92  
 Kaalutud substantsid 34, 58

- Kiiruse muutus 12, 17, 20—21, 23—24  
 Kiirusvektor 20  
 Kineetiline teooria 46—51  
 Klassikaline teisendus 121  
 Kontiinum:  
   ühedimensiooniline 148  
   kahedimensiooniline 149  
   kolmedimensiooniline 149  
   neljadimensiooniline 155  
 Koordinaatsüsteem 114, 115  
 Kopernik 114, 157, 158  
 Kristall 198
- Laine: 88  
   longitudinaalne 77, 86  
   seisev 200  
   sfääriline 78  
   tasapinnaline 79  
   transversaalne 77, 87  
 Laine levimise kiirus 76  
 Lainepikkus 76, 84  
 Leibniz 22  
 Liikumise dünaamiline kujutamine 153  
 Liikumise staatiline kujutamise 153  
 Liikumiskonstant 39  
 Lokaalne inertsiaalsüsteem 161, 162  
 Lorentzi teisendused 139—143
- Magnetipoolus 61  
 Mass 28  
 Mass ja energia 147  
 Maxwell 91  
 Maxwelli võrrandid 105, 106, 107, 108  
 Mayer 40  
 Mehhanistlik vaade (maailmakäsitlus, maailmavaade, vaatekoht) 45, 64, 67, 86, 88, 111  
 Merkuur 178  
 Michelson 70, 129  
 Molekulid 46  
 Molekulide arv ühes grammis vesinikus 50  
 Morley 129  
 Muutumise määr 41
- Naatrium 75  
 Newton 9, 11, 22, 58, 67, 73  
 Oersted 66, 67
- Planck 192  
 «Printsiibid» 12  
 Proovikeha 91  
 Ptolemaios 157, 158  
 Punkti koordinaat 110
- Raadium 146  
 Radioaktiivsus 145, 208  
 Raske mass 29, 160, 162  
 Refraktsioon (murdumine) 71, 72, 82, 83  
 Relatiivne ühtlane sirgliikumine 126  
 Relatiivsusteooria: 131  
   spetsiaalne 159  
   üldine 30, 159  
 Rowland 67  
 Rumford 36, 37, 40  
 Rutherford 190  
 Ruumi meetrilised omadused 173—174  
 Röntgenikiired 198—199  
 Röntgenikiirte difraktsioon 198—199  
 Rømer 70
- Schrödinger 200, 210  
 Seisumass 145  
 Sirgliikumine 13  
 Solenoid 96  
 Soojust 31, 33, 34  
 Soojuse mehhaaniline ekvivalent 42  
 Soojusenergia 40—43  
 Soojusmahtuvus 33  
 Soojussubstants 34  
 Spekter, nähtav 74, 197  
 Spektrihood 195, 196  
 Spektroskoop 196  
 Statistiline meetod 207  
 Sõlmed 201  
 Sünkroniseeritud kellad 134, 135
- Taustsüsteem 115  
 Teisenduseeskirjad 110  
 Temperatuur 31—34  
 Thomson, J. J. 187  
 Turmalinikristall 87  
 Tuum 189  
 Tuumafüüsika 190  
 Tõenäosus 208  
 Tõenäosuslaine 211

- Ultravioletse valguse footonid  
198
- Valge valgus 73
- Valguse difraktsioon 85
- Valguse elektromagnetiline  
teooria 110
- Valguse kiirus 70
- Valguse laineteooria 80
- Valguse peegeldumine 72
- Valguse sirgjooneline levimine  
71, 72, 85
- Valguskiire paindumine gravi-  
tatsiooniväljas 164, 178
- Valguskorpusklid 72, 192
- Valguskvant 192
- Valgussubstants 74
- Vektorid 13—17
- Vesinikuaatomi mass 186
- Vesinikumolekuli mass 51, 186
- «Vestlused kahest uuest teadu-  
sest» 12, 68—69
- Volta 64, 65
- Volta patarei 64—65
- Väli: 92  
staatiline 100
- Väljaesitus 93
- Välja struktuur 105, 107
- Ühtlane sirglikumine 11
- Üldistamine 18
- Young 85

## SISUKORD

Eessõna . . . . .	5
-------------------	---

### I. Mehhanistliku vaate edukäik

Suurte saladuste romaan . . . . .	7
Esimene juhtidee . . . . .	9
Vektorid . . . . .	13
Liikumise mõistatus . . . . .	18
Veel üks juhtidee . . . . .	28
Kas soojus on substants? . . . . .	31
Lõbus raudtee . . . . .	37
Muutumise määr . . . . .	40
Filosoofiline taust . . . . .	43
Aine kineetiline teooria . . . . .	46

### II. Mehhanistliku vaate taandumine

Kaks elektrivedelikku . . . . .	52
Magnetivedelikud . . . . .	60
Esimene tõsine raskus . . . . .	64
Valguse kiirus . . . . .	68
Valgus kui substants . . . . .	70
Värvuse mõistatus . . . . .	73
Mis on laine? . . . . .	75
Valguse laineteooria . . . . .	79
Longitudinaalsed või transversaalsed valguslained? . . . . .	86
Eeter ja mehhanistlik vaade . . . . .	88

### III. Väli, relatiivsus

Väli abimõistena . . . . .	91
Väljateooria kaks alussammast . . . . .	101
Väli kui reaalsus . . . . .	105
Väli ja eeter . . . . .	110
Mehhaaniline taust . . . . .	113
Eeter ja liikumine . . . . .	121
Aeg, pikkus, relatiivsus . . . . .	131
Relatiivsus ja mehhaanika . . . . .	143
Aegruumi-kontiinum . . . . .	148
Üldine relatiivsus . . . . .	155
Liftis ja väljaspool lifti . . . . .	160

Geomeetria ja eksperiment . . . . .	165
Üldine relatiivsus ja selle kontroll . . . . .	175
Väli ja aine . . . . .	180

#### IV. Kvandid

Pidevus, pidetus . . . . .	184
Aine ja elektri elementaarkvandid . . . . .	186
Valguskvandid . . . . .	190
Valgusspektrid . . . . .	195
Mateerialained . . . . .	199
Tõenäosuslained . . . . .	205
Füüsika ja tegelikkus . . . . .	215
Järelsõna . . . . .	219
Aineregister . . . . .	231

А Эйнштейн, Л. Инфельд

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ

На эстонском языке

Оформление В. Варе

Эстонское Государственное Издательство  
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

Toimetaja H. Heinoja

Kunstiline toimetaja H. Tikand

Tehniline toimetaja I. Vahtre

Korrektor S. Ridala

Ladumisele antud 3. XI 1961. Trükkimisele antud  
23. I 1962. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid  
14,75+2 lisa. Formaadile 60×92 kohaldatud trüki-  
poognaid 12,25. Arvutuspoognaid 13,03. Trükiarv  
6000. Tellimise nr. 9605. Hans Heidemanni nim.  
trükkikoda, Tartu, Olükooli 17/19. III.

Hind 95 kop.

2-3

### Trükivigu

Lk.	Rida	On trükitud	Peab olema
45	22. alt	lõppudelõpuks	lõppude lõpuks
209	20. ülalt	aatomite	aatomite
210	1. ülalt	Näiteks	Näites
220	15. ülalt	arnemises	arenemises
228	2. alt	Эйнштейн	Эйнштейн

Tellimise nr. 9605

Sarjas  
«Teaduse teedelt»  
on seni ilmunud:

Agur, U.

**Mõtlevad masinad**

Alschner, A.

**Loomade ränded**

Bauer, H.

**Seiklusrikas süvameri**

Plavilštšikov, N.

**Homunkulus**

Šternfeld, A.

**Tehiskaaslased**

Tõllasepp, A.

**Meteoroloogia kõigile**

Üksvärav, R.

**Turvas**

Järgnevalt  
ilmuvad:

Antrušin, A.

**Ammendamatu aatom**

Peierls, R.

**Looduse seadused**

Studitski, A.

**Elavad piisad**

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00367890 3

95 kop.

A

24414

3678903

rot l

div l