H. Õiglane:

Vestlus relatiivsusteoorist

Arh.ens.

A-22349 F

HARRY ÕIGLANE

VESTLUS RELATIIVSUS-TEOORIAST

[illegible]

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1958

Kaane kujundanud
Ene Pikk

Eesti Riiklik Kirjastus palub hinnangud ja arvamused käesoleva teose kohta saata aadressil: Tallinn, Pärnu mnt. 10.

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
43995

EESSÕNA

Relatiivsusteooria on oma 53-aastase olemasolu jooksul kujunenud vundamendiks füüsikalisele maailmapildile, mida tunnevad, tõsi küll, ainult teadlased ja üsna tagasihoidlik arv asjast huvitatuid.

Enamiku inimeste füüsikaline maailmapilt on samasugune nagu see oli nende isadel ja vanaisadel aastal 1900. Meenutame võrdluseks, missuguse tohutu hoo on viimase poole sajandi jooksul omandanud ühiskonnateaduste tulemuste juurdumine paljudesse miljonitesse ulatuvate masside teadvuses ja praktikas. Ka kaasaegse teaduse tehnilistele rakendustele, mis ümbritsevad meie inimesi igal sammul, vaadatakse juba nagu igapäevastele asjadele. Kõige selle taustal hakkab valusa dissonantsina silma aegunud mõtteviis füüsikalise maailma mõistmisel. On aeg, et meie inimesed õpiksid ka looduses toimuvaid protsesse dialektiliselt mõistma. Suurel määral aitab selleks kaasa relatiivsusteooria tundmine.

Eesti keeles on autorile teadaolevail andmeil ilmunud ainult üks populaarne relatiivsusteooria käsitlus: J. Nuut «Millest kõneleb Einsteini relatiivsuseõpetus» (1930). Vahepeal möödunud veerandsajand ei ole nimetatud raamatu väärtust küll kahandanud, kuid on muutnud ta laiadele hulkadele raskesti kättesaadavaks. Pealegi puuduvad selles raamatus relatiivsusteooria rakendused viimase kolme aastakümne jooksul, ja neid pole vähe. Autor loodab, et käesolev raamat suudab osalt täita seda tühja kohta eesti lugeja raamaturiiulis.

Käesolevas raamatus ei ole relatiivsusteooriat esitatud selle ajaloolises arengus, vaid on püütud populaarselt põhjendada selle teooria seisukohti kaasaegsete teadmiste tasemel. Samuti on haaratud võimalikult palju rakendusi ning seoseid teiste teooriatega. See muudab käsitluse võib-olla veidi laialivalguvaks, kuid teiselt poolt aitab kindlasti kaasa relativistliku mõtteviisiga harjumiseks. Ja see on peamine. Osa lõike on trükitud peenema kirjaga. Matemaatikast vähem huvituv lugeja võib need vahele jätta, ilma et järgnevast arusaamine selle all kannataks.

Käesoleva raamatu käsikirja redigeerimisel ning parandamisel olid autorile suureks abiks dots. P. Kardi märkused ja näpunäited. Kasutaksin siinkohal juhust, et teda abi eest tänada.

AUTOR

26. detsembril 1957. a.

LUGEJALE

Kindlasti on igaüks tundnud, kuidas kutsuvad kauged teed ja matkarajad. Sammuda, sõita ja ronida, olgu see siis halastamatu lõunapäikese all, põhja polaarhingusega segatud õhus või kesklaiuste pastellvärvidega looduses — kõike seda oleme valmis tegema jõudu säästmata, et ainult näha uusi maid ja inimesi, tundma õppida seda, millest on küll võib-olla kuuldud, kuid mida pole oma silmaga nähtud.

Täna alustame omapärast retke, mille eesmärk on aga sama mis kõigil teistelgi matkadel: tundma õppida seda, mis on huvitavat meie maailmas. See on ekskursioon suurte kiiruste maailma. Te pole seal veel kunagi olnud! Te sõidate rongiga, autoga, võib-olla isegi reaktiivlennukiga, kuid kõige paremal juhul ulatub sõiduki kiirus paari tuhande kilomeetrini tunnis. Meie ekskursioon läheb aga maale, kus lennukid sõidavad kiirusega sada tuhat kilomeetrit sekundis ja veelgi enam. Alustage kõhklemata meie marsruuti, siis näete, et siin on palju üllatavat, esimesel pilgul isegi uskumatuna näivat. Tuusikuks ja teejuhiks on teile käesolev raamat.

Olete kindlasti kuulnud Albert Einsteinist ja relatiivsusteooriast. Relatiivsusteooria ongi see tundmatu maa, mida me uurima hakkame, Einstein aga üks pioneere selle maa avastamisel. Geograafide traditsioonide kohaselt tuleks sellele maale täie õigusega anda Albert Einsteini nimi.

Nüüd matkavarustuse küsimus. Meie ekskursioonile

ei tarvitse kaasa võtta seljakotti ega telki, samuti pole olulised mugavad jalanõud. Mida ei tohi aga unustada, see on hea tahe ja püsivus, kindel soov inimkonna teadmiste varamust midagi enda jaoks saada. Samuti on vajalik kaasa võtta mõned elementaarsed teadmised füüsikast, muidu võib matk kohati raskeks kujuneda.

Nagu igal matkal, nii tuleb ka siin vahetevahel ennast pingutada. Suured need raskused ei ole, sest teid kui ekskursante viiakse ainult mööda kõvasti sissetallatud radu. Kui teil aga isegi siin esineb aeg-ajalt raskeid kohti, siis mõelge seda suurema lugupidamisega nendele, kes selle tee rajasid.

Lugeja! Kui käesolev raamat suudab äratada Sinu lugupidamist loova ja uuriva inimvaimu jõu vastu ning kui Sa mõtled, et ka Sinusse on peidetud osake sellest jumalikust sädemest, mille püsiva ning sihikindla tööga võid muuta mõjuvaks vahendiks uute looduse saladuste avastamisel, siis on ta oma ülesande täitnud.

I

UUT IGAPÄEVASES

Mõni õpib alevist läbi minnes
rohkem kui teine tervest maailmast.

Eesti rahva vanasõna

1. REAALNE JA EBAREAALNE FANTAASIA

Ei saa nimetada ühtegi suuremat leiutist, millest poleks ühel või teisel viisil juba palju sajandeid tagasi rääkinud rahva fantaasia. Inimesed unistasid lendamisest. Oma muinaslugude kangelastele andsid nad imepärase oskuse maapinnalt õhku tõusta ja kiiresti ühest kohast teise liikuda, kasutades selleks küll vaipa, küll luuda või isegi ahju. Rahvas jutustas põlvest põlve lugusid rääkivatest peeglitest ja kirstudest. Raske töö vaheaegadel mõlgutati mõtteid tarkade kivist, mille abil saaks kõiki metalle kullaks muuta. Kuld — see tähendas vabanemist üle jõu käivast orjusest. Rahvas fantaseeris, kuid rahvas ka õppis. Ebateaduste hulgast hakkas üha kindlapiirilisemalt välja kujunema teadus kaasaegses mõttes. Nii muutusid üksteise järel reaalsuseks rahva kõige julgemad unistused. Lennuk ei ole enam ammugi mingisuguseks imeasjaks. Kauplusest ei saa küll osta rääkivat peeglit, kuid võime osta televiisori. Ka kulla valmistamise küsimus on lahendatud. Niisuguste täitunud unistuste loetelu võiks jätkata paljudel lehekülgedel. Teadus osutus selleks nõiakepiks, mis muudab rahva fantastilised kujutlused tegelikkuseks.

Ei tule siiski arvata, nagu juhinduksid teadlased oma töös ainult muinaslugude fantaasiast. Keskajal püüti nii toimida, kuid need katsed jäid tulemusteta. Kuipalju keskaja targad ka maagilisi vormeleid koostasid, ükski vaip nende mõjul õhku ei tõusnud. Kuipalju ka alkeemikud kõikvõimalikke aineid segasid, tarkade kivi või kulda valmistada ei õnnestunud neist ühelgi. Selles mõttes on rahva fantaasia ebareaalne, sest ta ei näita teid oma unistuste realiseerimiseks ja paljud neist ei olegi elluviidavad. Ainult põhjalik loodusseaduste tundmine koos t e a -

dusliku fantaasiaga võimaldab teha uusi avastusi ja leiutisi ning teostada rahva salajasemaid unistusi.

Ka teadlase fantaasias sisaldub tihti ebareaalseid elemente. Üksnes loodusseaduste põhjalik tundmine, uute seaduste avastamine ning vanade täpsustamine annab tunnusmärgid, mis võimaldavad eristada reaalset fantaasiat ebareaalsest. Igaüks on mõlgutanud mõtteid mitmesugustest ümberkorraldustest ning täiendustest oma töös. Kas need on alati teostatavad? Kas on tegemist reaalse või ebareaalse fantaasiaga? Ainult loodusseaduste tundmine annab siin vastuse. Teostatav on kõik, mis ei ole loodusseadustega vastuolus.

Laskume ka meie korraks fantaasiamaailma ja töötame välja metoodika maakera kauge mineviku uurimiseks. Seejuures katsume jääda teaduslikule pinnale, see on, püüame arendada oma fantaasiat kooskõlas meile tuntud loodusseadustega.

Eemal toimuvat sündmust näeme seetõttu, et sündmuse toimumiskohast lähtuvad valguskiired tulevad meie silma. Võime öelda, et valguskiired kannavad sündmuse pildi meieni. Nii lähtub igast Maal toimunud sündmusest pilt ja hakkab maailmaruumis valguse kiirusega edasi liikuma. Näiteks Marsil olev vaatleja näeks Maal toimunut alles siis, kui pilt sellest on temani jõudnud. Samuti ei näe meie Päikese pinnal toimuvaid protsesse enne, kui valguskiired protsessi pildiga Maani on jõudnud. Kuigi valguse kiirus on väga suur — ligi 300 000 kilomeetrit sekundis —, võtab see aega umbes 8,3 minutit. Kui Päikesel toimub praegusel hetkel näiteks hiigelplahvatus, siis saame sellest teada alles 8,3 minuti pärast.

Eelöeldu on teaduslik alus, millele rajame oma fantaasia. Oletame, et me liigume täpselt valguse kiirusega Maast eemale. Siis näeme tagasi vaadates kogu aeg ühte ning sedasama pilti: näeme iseenda lahkumist Maalt. Pildid hilisematest sündmustest liiguvad maailmaruumis meie järel, kuid meieni ei jõua nad kunagi, sest liigume eest ära sama kiirusega, millega nad meile järgnevad. Me näeme Maad tardununa ning elutuna. Aeg näib olevat seal seisma jäänud.

Läheme veelgi edasi. Oletame, et me eemaldume Maast suurema kiirusega kui valguse kiirus. Siis jõuame järele piltidele elust, mis on lähtunud sealt enne meie

lahkumist.[1] Mida kauem lendame, seda enam jõuame järele varem lähtunud piltidele. Seega näeme kõiki Maal toimunud sündmusi kulgevat tavalisele vastupidises järjekorras. Päevad algavad õhtuga ja lõpevad hommikuga. Inimesed muutuvad üha nooremaks. Suurele Isamaasõjale järgneb Oktoobrirevolutsioon ja mõne aja pärast tuleb Põhjasõda. Kaovad aatomireaktorid ja elektrijaamad, neid asendavad aegamööda aurumasinad, vesirattad ja lõpuks nuiad ning kivikirved. Inimesed kaovad ja nende asemele astuvad saurused ning teised eelajaloolised koletised. Aeg näib voolavat Maal vastupidises suunas, kui seda arvavad sealsed inimesed ise. Kas on veel ideaalsemat võimalust Maa ning inimkonna ajaloo uurimiseks kui niisugune kosmiline lend?

See kõik on fantaasia, kuid, nagu esialgu näib, reaalne fantaasia. Niisuguste katsete raskused näivad olevat ainult tehnilist, mitte aga põhimõttelist laadi. Kui meil on küllalt võimsad reaktiivmootorid, mis suudavad raketi valgusest kiiremini liikuma panna, siis peaks ettepanek teostatav olema. Põhimõttelisi raskusi ei näi siin esinevat...

Järgnevatel lehekülgedel siiski selgub, et niisugune fantastiline kosmiline lend on vastuolus loodusseadustega. Need on seadused, mis ei hakka meile igapäevases elus nii teravalt silma kui teised, koolifüüsika kursusest tuntud seadused. Sellele vaatamata on nad niisama ranged kui viimasedki ega luba ühtegi kõrvalekaldumist. Ajaloolastel tuleb endist viisi jätkata ürikute ja muinsuste uurimist ning loobuda lootusest ajaloolisi sündmusi oma silmaga näha.

Meie raamatu üheks eesmärgiks on nende loodusseaduste tutvustamine, mis ülikiire kosmilise lennu fantaasiale kriipsu peale tõmbavad. Matka uute seaduste maailma pole võimalik aga otsekohe alustada. On ju teada, et vööral maal mõistad eelkõige seda, mis on omane ja tuttav juba kodukandist, ja alles siitkaudu saad aru uuest. Nii tuleb ka meil alustada igapäevase ning ammutuntud nähtusega — liikumisega. Selgub, et siingi on veel palju seda, mis igapäevases elus kahe silma vahele kipub jääma.

---

[1] Et Maalt lähtunud valguskiirtel oleks võimalik valgusest suurema kiirusega liikuva inimese silma sattuda, tuleks inimesel nägu liikumise suunas hoida. See tähendab, et ta näeks Maad asuvat vastassuunas.

Alles siis, kui teame liikumisest kõike hädavajalikku, saame minna uute seaduste maailma — relatiivsusteooria juurde.

2. LIIKUMISEST JA PAIGALOLEKUST

Räägitakse, et on olemas küsimus, millele ei saa jaatavalt vastata. See on: «Kas sa magad?» On aga olemas ka küsimus, millele ei saa vastata ei jaatavalt ega eitavalt. Niisuguseks küsimuseks on: «Kas sa liigud?»

«Kuidas nii,» vaidles mulle vastu üks sõber. «Praegu ma istun oma toas tugitoolis ja võin küsimusele vastata lühikese «ei». Kui ma istuksin rongi kupees, vastaksin «jah». Mingisugust raskust ma vastamisel ei näe.»

«Aga mille järgi sa otsustad, et oled praegu paigal?»

«Tean, et maja on kindlalt maapinnale ehitatud, ja kui ma oma toas ringi ei kõnni, olen liikumatu.»

Kaalukad argumendid, kuid sõber unustas, et maapind, millele ta maja on ehitatud, ei ole sugugi paigal. Maa liigub ümber Päikese kiirusega umbes 30 kilomeetrit sekundis, järelikult liigub mu sõber koos oma tooli ja majaga samuti ümber Päikese. Päike omakorda koos Maa ja teiste planeetidega nihkub sekundi jooksul naabertähtede suhtes 20 kilomeetrit, Linnutee süsteemi keskme suhtes aga koguni 250 kilomeetrit edasi. Nii võime lõputult edasi arutleda. Liiguvad kinnistähed ja galaktikad. Kõiges selles liikumiste virvarris satub mu tugitoolis istuv sõber naeruväärsesse olukorda, kui kinnitab, et just tema on paigal.

Küsimusele «Kas sa liigud?» ei saa anda absoluutselt õiget vastust. Vastus sõltub sellest, mille suhtes me liikumist vaatame. Ühe keha suhtes võime me liikuda, teise suhtes aga paigal olla. Näiteks maapinnal paigal olev inimene liigub kogu aeg Kuu suhtes, s. o. tema kaugus Kuust muutub pidevalt. Tekib küsimus: kuidas peaksime maapinna suhtes liikuma, et Kuult vaadatuna oleksime liikumatud?

Kuu nihkub taevavõlvil idast lääne kiirusega umbes 14,5 nurgakraadi tunnis. Liikudes maapinnal samas suunas ja sama kiirusega, näemegi Kuud taevasse naelutatuna, s. o. ta ei tõuse, ei looju, ei liigu üldse horisondi suh-

tes.[2] Et liikuda kiirusega 14,5 kraadi tunnis, tuleb ekvaatoril katta minuti jooksul ligi 27 kilomeetrit, Tartu laiusel aga 14 kilomeetrit. Lennates mööda ekvaatorit idast läände kiirusega 27 kilomeetrit minutis, näeme Kuud kogu aeg pea kohal.

Kiirus 20 kilomeetrit minutis on kaasaegsel reaktiivlennukil kergesti saavutatav, kuna kiirusrekord on sellest üle kahe korra suurem (2565 kilomeetrit tunnis). Siit on näha, et «Kuu peatamine» on tehniliselt teostatav. Lennates maapinna suhtes sobivalt valitud kiirusega idast läände (see kiirus sõltub lennutee geograafilisest laiusest), oleme Kuu suhtes liikumatud (vt. joon. 1).[3]

Eelnevast on selge, et ka liikumise kiirus oleneb kehast, mille suhtes me kiirust mõõdame. Kui mu sõber istub Tartus oma tugitoolis, siis maapinna suhtes on tema kiirus null, Päikese suhtes liigub ta aga igas sekundis umbes 30 kilomeetrit edasi.[4] Jalutades 60-kilomeetrise tunnikiirusega liikuvas rongis veduri poole kiirusega 3 kilomeetrit tunnis (see on kiirus rongi suhtes), liigume tegelikult maapinna suhtes kiirusega 63 kilomeetrit tunnis. Kiirusest rääkimisel tuleb alati lisada, missuguse keha suhtes me kiirust mõõdame. Kiirus on selles mõttes relatiivne mõiste: tema väärtus ei olene ainult liikuvast kehast endast, vaid ka mingisugusest teisest kehast, mille suhtes kiirust mõõdetakse.

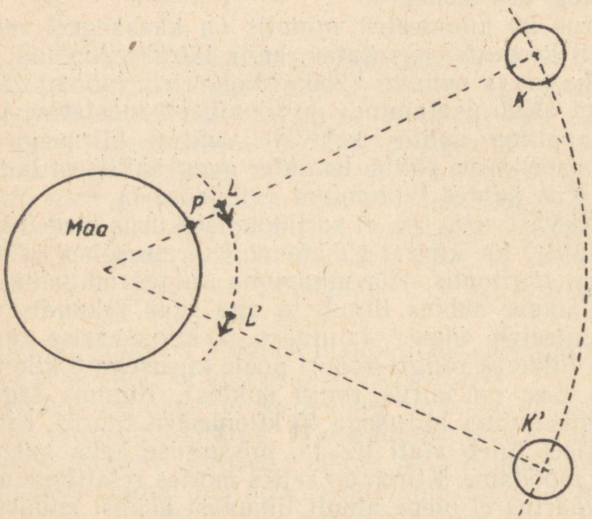
Juba vanadel kreeklastel oli selge, et keha asendist või liikumisest saab rääkida ainult kui mõne teise keha suhtes määratud suurusest. Aristoteles näiteks käsitles keha liikumist ümbritseva materiaalse substantsi suhtes. Lõputud vaidlused tekkisid selle ümber, kas nimetatud substants peab keha vahetult puudutama või mitte. Nii ei suudetud lahendada küsimust ankrusolevast laevast: kas ta liigub või ei? Vesi laeva ümber vahetub kogu aeg (s. o. laev justkui liiguks), kaldalt vaadates aga ei ole märgata mingisugust liikumist.

[2] Kuna tähistaeva näiva pöörlemise kiirus on 15 kraadi tunnis (täpsemalt õige veidi rohkem), siis kinnistähtede suhtes näib Kuu ikkagi liikuvat kiirusega 0,5 kraadi tunnis. Liikumatu on ta ainult horisondi suhtes.

[3] Et Kuu kaugus Maast on muutuv, siis täieliku liikumatuse saavutamiseks Kuu suhtes peaks lennuki kõrgus maapinnast aegamööda muutuma.

[4] Tegelikult on see kiirus öösel veidi suurem ja päeval veidi väiksem. Selle kohta vt. J. I. Perelman «Huvitav füüsika» I osa, lk. 19—21 (RK «Teaduslik Kirjandus», Tartu 1948).

Igapäevases elus huvitavad meid enamikel juhtudel kiirused maapinna suhtes. See peegeldub isegi kõnes. «Mööduva auto kiirus on 70 kilomeetrit tunnis» — igaüks mõistab, et siin on mõeldud kiirust maapinna suhtes. Maa-



Joon. 1. Kuu liikumine maapinnalt vaadatuna. *K* — Kuu algasend, *K'* — Kuu asend kolme tunni pärast, *L* — kiirusega 14,5 kraadi tunnis ümber Maa lendava lennuki algasend ning *L'* — sama lennuki asend kolme tunni pärast; *P* — liikumatu punkt Maa pinnal (joonisel tõelisi kauguste vahekordi arvestatud ei ole). On näha, et punkt *P* on maapinna suhtes paigal, Kuu suhtes liikuv; lennuk seevastu on maapinna suhtes liikuv, kuid Kuu suhtes paigal.

pinna lugemine iseendastmõistetavaks taustaks kiiruste mõõtmisel on tingitud sellest, et inimkonna praktiline tegevus piirdub seni ainult Maaga. Kujutleme hetkeks inimesi, kes on sõitnud Marsile (see võib teostuda juba lähema saja aasta jooksul) ja hakkavad seal kõiki kiirusi Maa pinna suhtes mõõtma. Ainult kilplased võiksid nii toimida. Marsil viibivad inimesed mõõdavad kiirusi kindlasti Marsi pinna suhtes — nii on kõige lihtsam ja otstarbekam.

Kuid Maal ei huvita meid alati kiirus maapinna suhtes. Oletame, et tahate hüpata ühe liikuva veoauto kastist teise.

Seejuures ei ole te huvitatud autode kiirusest maapinna suhtes, vaid ainult ühe auto kiirusest teise suhtes (nn. autode omavahelisest kiirusest). Kui autode omavaheline kiirus on null, võib üleminekut ilma igasuguse riskita teostada. Seejuures ei ole sugugi oluline, kas autod liiguvad maapinna suhtes kiirusega 10, 20 või 80 kilomeetrit tunnis.

Või oletame, et merel liikuva laeva tekil on korraldatud võidujooks: üks madrustest peab jooksma ahtrist vööri, teine aga vöörist ahtrisse. Kumb võistlejatest on soodsamas olukorras? Ei kumbki. [5] Kuigi esimese madruse kiirus eemaloleva kalda suhtes on suurem kui teisel madrusel, ei aita see kaasa võidu saavutamiseks. Võidab see, kes jookseb kiiremini teki suhtes.

Enne kui asume järgmiste küsimuste juurde, rõhutame veelkord: keha kiirust saab mõõta ükskõik missuguse teise keha suhtes. Praktiliselt valitakse see teine keha aga alati nii, et mõõtmistulemused oleksid kõige lihtsamini kasutatavad.

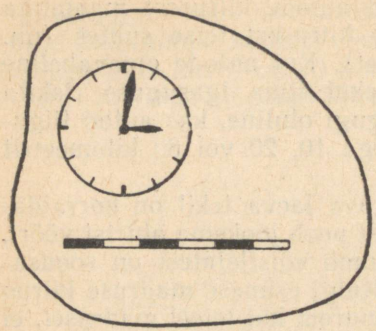
3. TAUSTSÜSTEEMI VALIK

Nägime, et keha liikumise kirjeldamiseks tuleb alati enne kindlaks määrata mõni teine keha, mille suhtes me liikumist uurime. Teiste sõnadega: keha liikumist saab kirjeldada ainult mõne teise keha taustal. Püstitame nüüd küsimuse: kas liikumise kirjeldamiseks piisab juba taustkeha (s. o. keha, mille taustal me liikumist uurime) andmisest, või on lisaks veel midagi tarvis?

Tuletame meelde, et kiirust mõõdetakse ajaühikus läbitud tee pikkusega. Kui näiteks auto katab 3 tunni jooksul 240 kilomeetrit, on tema kiirus 80 kilomeetrit tunnis. Siit nähtub, et kiiruse mõõtmiseks tuleb tegelikult mõõta tee pikkust ja ajavahemikku. Järelikult peab taustkeha olema varustatud mõõdupuu ning kellaga. Kella ja mõõdupuuga varustatud taustkeha nimetame edaspidi taustsüsteemiks. Igasugust kehade liikumist on võimalik uurida ainult varem kindlaksmääratud taustsüsteemi suhtes. Keha liikumist taustsüsteemi suhtes nimetame edaspidi lihtsalt liikumiseks taustsüsteemis.

Taustsüsteemi moodustamisel kasutatud mõõdupuu ja kella konkreetne konstruktsioon meid ei huvita. Ainukeseks

[5] Kuna uurime liikumise üldisi omadusi, siis toodud näidetes õhutakistuse olemasolu me ei arvesta.



Joon. 2. Taustsüsteemi näitlik kujutus. Taustsüsteemiks võib olla igasugune kella ja mõõdupuuga varustatud keha. Taustsüsteemiks võib olla ka kujuteldav keha koos kujuteldava kella ja mõõdupuuga.

noudeks on see, et kell käigu ideaalselt täpselt ning mõõdupuu olgu absoluutselt jäik, s. o. mõõdupuu pikkus jäägu kogu aeg muutumatuks. Tegelikult meie käsutuses ideaalseid kelli või absoluutselt jäiku mõõdupuid ei ole. See tähendab, et tegelikul mõõtmisel saame kõik mõõtarvud alati teatud veaga. Mida enam areneb tehnika, seda täpsemaks muutuvad mõõtmisvahendid ning seda täpsemaid mõõtmistulemusi saame mõõtmisel. Kaasaegse füüsikalaboratooriumi varustuse hulka kuuluvad kvartskellad, mis eksivad ööpäeva jooksul ainult 0,0001 sekundi võrra, kusjuures lühikeste ajavahemike mõõtmisel on nende täpsus veel kuni 10 korda suurem.[6] Pikkuste mõõtmisel on saavutatud täpsus 0,00000005 osa mõõdetavast suurusest. See tähendab, et poolemeetrise varda mõõtmisel tehtav viga on ainult 2,5 miljondikku sentimeetrit.

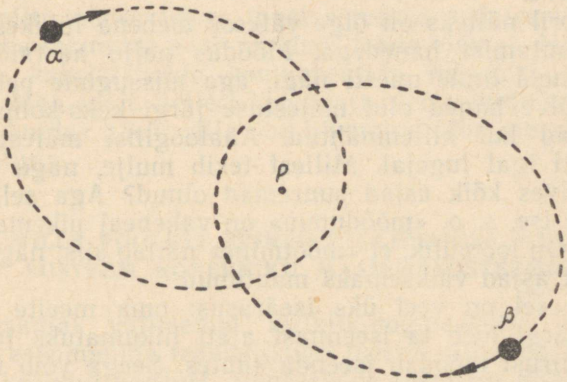
Inimeste käsutuses olevate kellade ja mõõdupuude tegelik täpsus määrab piirid, milledes on võimalik teooria järeldusi kontrollida. Mida täpsemad on mõõtmisvahendid, seda täpsemini saame teooria õigsust looduses teostatavate mõõtmiste abil proovida. Teooria enda loomisel oletame aga, et ajavahemikke ning pikkusi on võimalik ideaalselt täpselt mõõta.

Mistahes liikumise uurimisel tuleb eelkõige kindlaks määrata taustsüsteem, mis ei tarvitse alati olla mõni reaalne keha reaalse kella ja reaalse mõõdupuuga. Taustsüsteem võib olla ka ettekujutatav, oluline on ainult see, et ta oleks täpselt määratud. Ettekujutatavat taustsüsteemi kasutatakse tihti näiteks kaksiktähtede liikumise uurimisel.

---

[6] Viimasel ajal on konstrueeritud nn. aatomkellad, kus kella käiku reguleeritakse molekulides toimuvate võngete abil. Niisuguste aatomkellade täpsus ületab kvartskellade oma rohkem kui 1000 korda.

Kaksiktäht on kahest tähest koosnev süsteem (vt. joon. 3). Selle süsteemi kumbagi tähte eraldi nimetatakse kaksiktähe komponendiks. Osutub, et komponendi liikumise tee on kõige lihtsam kaksiktähe masskeskmega [7] seo-



Joon. 3. Kaksiktäht. Punktiirjoontega on märgitud kaksiktähe komponentide α ja β teed ümber masskeskme *P*.

tud taustsüsteemis: mõlemad komponendid liiguvad ümber masskeskme ellipsikujulist [8] teed mööda. Kaksiktähe masskese pole aga mingisugune materiaalne keha, vaid ainult mõeldav punkt ruumis. See näitab, et mõnikord on otstarbekas kasutada ka mõeldavat taustsüsteemi.

Looduse vaatlemine tähendab alati ka alateadlikku mõõtmist. Iga asja kohta, mida oleme näinud, võime öelda, kui suur ta ligikaudu oli, samuti võime öelda, kui kaua üks või teine sündmus umbkaudu kestis. Niisugune hindamine on küll väga ebatäpne, kuid oma olemuselt on ta

[7] Kui kaks keha massidega m ja M asetsevad teineteisest kaugusel r, siis nende masskese on punkt, mis asetseb masside ühendussirgel kaugusel $R = \frac{mr}{m+M}$ massist M.

[8] Ellips on kõver, mis tuletab meelde lapikuks vajutatud ringjoont. On olemas väga lihtne meetod igasuguse lapikusega ellipsite saamiseks. Selleks tuleb asetada tasane pind risti päikesekiirtele. Pinna ette paigutatud rõnga vari on siis alati ellipsikujuline, kusjuures vastavalt rõnga erinevatele asenditele saame erineva lapikusega ellipsid. Kui rõnga tasapind on risti päikesekiirtele, tuleb vari ringjoonekujuline. See näitab, et ringjoon ei ole midagi muud kui erikujuline ellips (niisugune ellips, mille lapikus on null).

mõõtmine. Mõõdupuuks, millega alateadlikult võrreldakse vaadeldavaid esemeid, on inimese kehakasv, kellaks aga organismis toimuvad rütmilised protsessid (näiteks pulss). Et öeldus veenduda, on kõige kohasem meelde tuletada lapsepõlve.

Autoril näiteks oli õige väikese mehena lühikest aega kokkupuutumist hanedega. Möödus palju aastaid, enne kui ta neid linde uuesti nägi, aga missugune pettumus! Lapsepõlve haned olid mälestuse järgi kaks-kolm korda suuremad kui hiljemnähtud. Analoogilisi mälestusi on kindlasti igal lugejal. Millest tekib mulje, nagu oleksid lapsepõlves kõik asjad suuremad olnud? Aga sellest, et inimene ise, s. o. «mõõdupuu» on vahepeal pikemaks sirgunud. On loomulik, et «mõõtmine» näitab siis, nagu oleksid kõik asjad väiksemaks muutunud.

Inimesel on veel üks iseärasus: oma meelte vahetu mulje järgi loeb ta iseennast alati liikumatuks ja kõigi teiste kiirust mõõdab iseenda suhtes. Seega võib inimest täie õigusega taustsüsteemiks lugeda: kõikide kehade kiirust loeb ta iseenda suhtes mõõdetuiks, samuti teostab ta pikkuste ning ajavahemike mõõtmist. Tuginedes sellele võimegi öelda: keha liikumise kirjeldamine mingis taustsüsteemis annab liikumisest täpselt samasuguse pildi, nagu seda näeks taustkehal olev vaatleja. Kaksiktähe kirjeldamine tema masskeskmega seotud taustsüsteemis tähendab siis kaksiktähe komponentide liikumise kirjeldamist nii, nagu seda näeks tähe masskeskmes asuv vaatleja.

On ilmne, et erinevalt liikuvad vaatlejad saavad ühest ning samast nähtusest erineva pildi. Teiste sõnadega: liikumise pilt sõltub sellest, missuguses taustsüsteemis me liikumist kirjeldame. Näiteks joonisel 1 on Kuu liikumist kirjeldatud maapinna suhtes, s. o. Kuu liikumist on kirjeldatud nii, nagu seda tegelikult näeb maapinnal olev inimene, kes iseennast koos Maaga loeb liikumatuks, Kuud aga ümber Maa tiirlevaks. Päikese asukohast vaadates saaksime aga Maa ja Kuu liikumisest teistsuguse pildi.

Maa pöörleb oma telje ümber läänest itta kiirusega 15 kraadi tunnis (täistiir, s. o. 360 kraadi 24 tunni jooksul), Kuu aga tiirleb ümber Maa ida suunas kiirusega 0,5 kraadi tunnis. Kuu jääb maapinnast igas tunnis 14,5 kraadi maha. Päikese asukohas olev vaatleja otsustab, et maapinnalt vaadatuna peab Kuu liikuma idast läände

kiirusega 14,5 kraadi tunnis, nii nagu see joonisel 1 ongi kujutatud. Päikese asukohas olev vaatleja teab täpselt, kuidas näeb Kuu liikumist maapealne vaatleja. Siin ilmneb oluline tõsiasi: kui on antud liikumise pilt ühes taustsüsteemis, siis on alati võimalik kindlaks teha sama liikumise pilti mõnes teises taustsüsteemis (süsteemide omavaheline liikumine peab muidugi teada olema). Nii näiteks saame kaksiktähtede komponentide liikumist vaadelda ainult Maa pealt. Sellest hoolimata oleme suutelised otsustama, kuidas näeb välja see liikumine tähe masskeskmest vaadatuna.

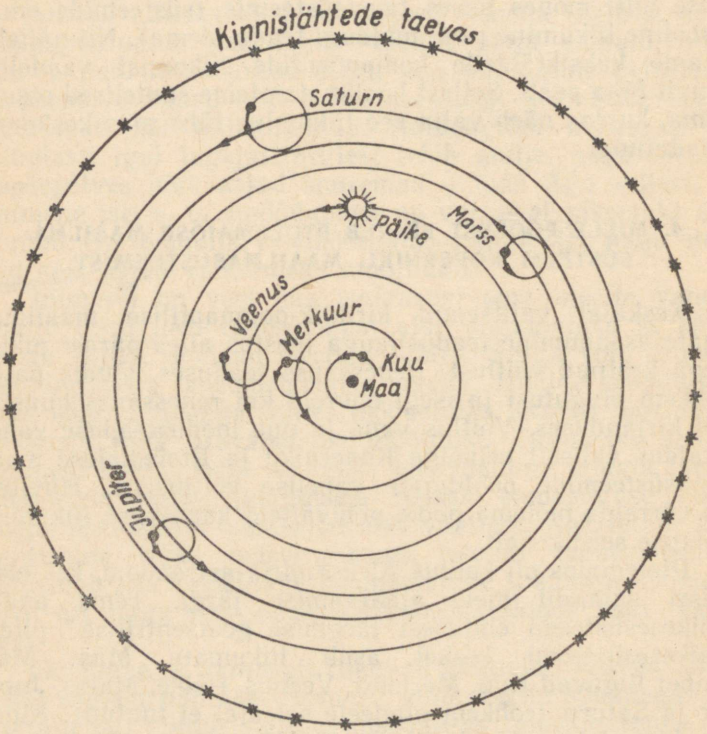
4. MILLE POOLEST ERINEB PTOLEMAIOSE MAAILMASÜSTEEM KOPERNIKU MAAILMASÜSTEEMIST

Keskajal valitsenud kiriklik-dogmaatilise maailmavaate asendumine teaduslikuga teostus alles pärast pikka aega kestnud võitlust. Renessanss teaduses nõudis palju rohkem pingutusi ja isegi ohvreid kui renessanss kunstis või kirjanduses. Võitlus vana ja uue loodusteaduse vahel avaldus väliselt eelkõige Koperniku ja Ptolemaiose maailmasüsteemide pooldajate vahelise võitlusena. Huvitav on võrrelda mõlema poole põhiväiteid kaasaegse liikumisõpetuse seisukohalt.

Ptolemaios oli kuulus Aleksandria astronoom, kes elas teisel sajandil meie ajaarvamise järgi. Tema andis Päikesesüsteemi ehitusest järgmise geotsentrilise[9] pildi: Päikesesüsteemi keskel asub liikumatu Maa. Maa ümber liiguvad Kuu, Merkuur, Veenus, Päike, Marss, Jupiter ja Saturn (rohkem planeete sel ajal ei tuntud). Kuna kreeklased lugesid ideaalseks jooneks ringjoont, siis näis tolle aja astronoomidele loomulikuna, et taevakehad võivad liikuda ainult ringikujulistel orbiitidel. Ptolemaiose süsteemi kooskõlastamiseks vaatlustega tuli oletada, et planeet liigub mööda ringjoont, mida nimetati epitsükliks. Epitsükli keskpunkt liigub aga omakorda teisel ringjoonel (nn. deferendil) ümber Maa. Mida täpsemaks muutusid vaatlusandmed, seda keerulisemaks läks Ptolemaiose süsteem. Planeetide liikumise seletamiseks tuli appi võtta ikka

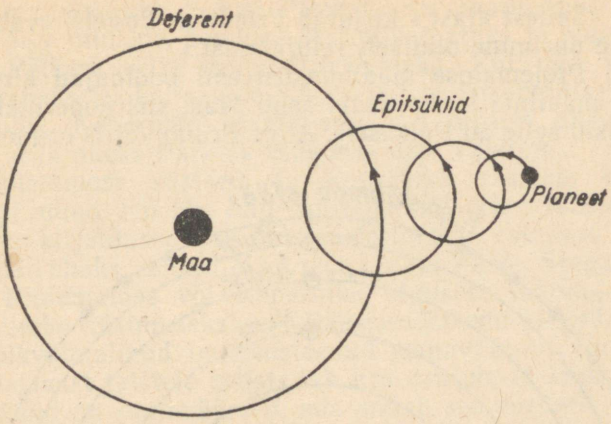
[9] «Ge» tähendab kreeka keeles «maa». Geotsentriliseks nimetatakse seega süsteemi, mille keskpunktis asub Maa.

rohkem ja rohkem epitsükleid — nende arv ulatus lõpuks mitmekümneni (joon. 5). Hoolimata keerukusest jäi geotsentriline maailmasüsteem tegelikult kuni XVII sajandi alguseni üldtunnustatuks.



Joon. 4. Ptolemaiose maailmasüsteem keskaegse kujutluse järgi.

1530. aastal kirjutas poola astronoom Mikolaj Kopernik väikese brošüüri: «Nicolaus Copernicus taevaste liikumiste hüpoteesidest». Siin väitis ta, et Maa ning kõik teised planeedid tiirlevad ümber Päikese. Seda brošüüri trükis ei avaldatud, kuid ümberkirjutatuna levis ta käest kätte. Koperniku õpetuse pooldajate arv kasvas iga päevaga. Mõni päev enne Koperniku surma, s. o. 1543. aastal, ilmus trükist tema peatöö: «Taevasfääride pöörlemisest». Selle



Joon. 5. Epitsüklite süsteem. Deferenti mööda liigub esimese epitsükli keskpunkt, esimest epitsüklit mööda liigub teise epitsükli keskpunkt, teist epitsüklit mööda liigub kolmanda epitsükli keskpunkt jne., kuni lõpuks viimasel epitsüklil liigub planeet ise.

raamatu lehekülgedel on uus õpetus esitatud koos matemaatiliste põhjendustega.

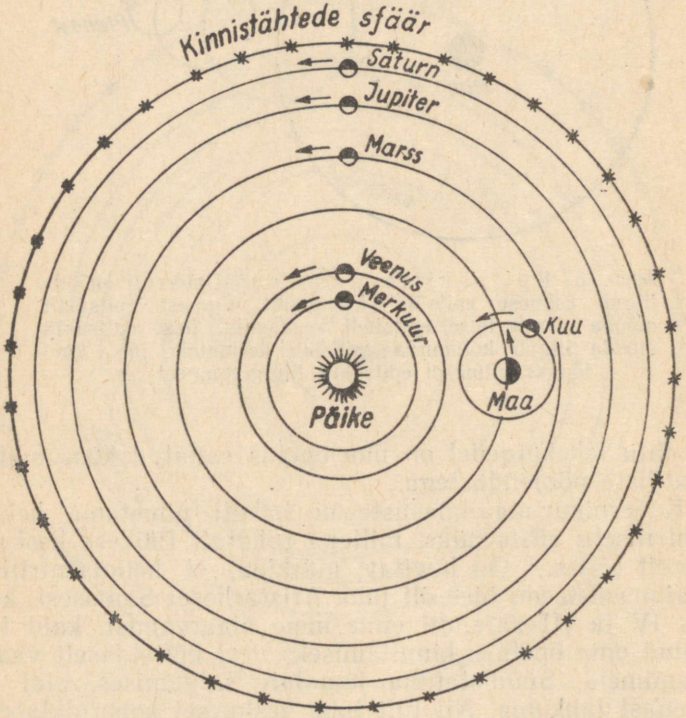
Koperniku maailmasüsteemi hakati nimetama heliotsentriliseks süsteemiks, millega rõhutati Päikese keskset asendit selles.[10] On huvitav märkida, et heliotsentrilise maailmasüsteemi idee oli juba Aristarhosel Samosest, kes elas IV ja III sajandil enne meie ajaarvamist, kuid tal polnud oma õpetuse kinnitamiseks veel küllaldaselt vaatlusandmeid. Süüdistatuna jumalate salgamises, pidi ta Ateenast lahkuma. Nii tuli juba «esimesel koperniklasel» oma õpetuse pärast kannatada.

Esialgu ei omistanud katoliku kirik Koperniku maailmasüsteemile erilist tähtsust. Niipea aga kui ilmnes, et uus õpetus õõnestab religiooni aluseid, algas halastamatu võitlus tema pooldajate vastu. Uue õpetuse levitamine tähendas ketserite nimekirja sattumist, mis võis lõppeda tuleriidaga. Nii põletati 1600. aastal suur mõtleja Giordano Bruno. Teaduslik vaidlus kahe maailmasüsteemi pooldajate vahel muutus inimkonna progressiivsete ja tagurlike jõudude võitluseks. Võitjaks jäid Koperniku pool-

[10] Sõna «helios» tähendab kreeka keeles «päike».

dajad. «Sellest ajast,» kirjutab Friedrich Engels, «vabanes looduse uurimine oluliselt religioonist.»

Kui Ptolemaiose maailmasüsteemi pooldajad kinnitasid, et maailma keskpunktis asub Maa, siis koperniklased omistasid selle au Päikesele. Alles Bruno väitis esimesena,



Joon. 6. Maailma pilt Koperniku järgi. Koperniku arvates asusid kõik kinnistähed ühel ja samal sfääril.

et maailmal keskpunkti ei olegi. Kinnistähed ei moodusta mingisugust sfääri, nagu varem arvati, vaid on maailmaruumis kindlate seaduste järgi liikuvad Päikesed. Seega langeb ära võimalus kirjeldada taevakehade liikumist maailma keskpunkti suhtes.

Nagu kõigi kehade, nii tuleb ka Päikesesüsteemi liikumise kirjeldamisel eelkõige kindlaks määrata taustsüsteem. Kui võtame taustkehaks Maa, saame Ptolemaiose geotsent-

rilise maailmapildi.[11] Just Ptolemaiose maailmapilti näeb Maal olev inimene, kes loeb Maa liikumatuks ja planeedid ning Päikese selle ümber tiirlevateks. Kui aga valida taustkehaks Päike, saame Koperniku heliotsentrilise maailmapildi. Koperniku maailmapilt on täpselt niisugune, nagu seda näeks Päikese asukohas olev vaatleja.

Ptolemaiose süsteem ja Koperniku süsteem ei ole midagi muud, kui ühe ning sellesama Päikesesüsteemi liikumise kirjeldused eri taustsüsteemides: esimesel juhul on taustkehaks valitud Maa, teisel juhul Päike. Seega küsimus Ptolemaiose või Koperniku õigusest taandub õieti järgmiseks küsimuseks: kas Päikesesüsteemi kirjeldamisel on kõikvõimalikud taustsüsteemid samaväärsed või tuleb mõnda neist teistele eelistada? Kui osutub, et kõik taustsüsteemid on samaväärsed, siis annab see võrdselt õigust nii Ptolemaiosele kui Kopernikule. Lisaks nimetatud taustsüsteemidele oleks siis samaõiguslikud veel terve rida teisi süsteeme, näiteks niisugune, kus taustkehaks on võetud Marss. Viimasel juhul saame maailmapildi, milles liikumatu Marsi ümber tiirlevad (muidugi mööda epitsükleid) Päike ja planeedid, sealhulgas ka Maa.

Kui aga selgub, et taustkeha valikul tuleb eelistada alati Päikest, siis ainuõige kujutluse Päikesesüsteemist annab Koperniku maailmapilt.

Kas Koperniku maailmasüsteemi tuleb eelistada Ptolemaiose omale või mitte, see on küsimus, mille lahendamisele saame asuda alles päris raamatu lõpus (vt. peatükk IV, p. 13).

---

[11] Maa pöörlemist ümber oma telje me selle küsimuse käsitlemisel ei arvesta, s. o. taevakehade näiva ööpäevase liikumise jätame kõrvale. Meid huvitab siin ainult Päikesesüsteemi kehade näiv liikumine kinnistähtede suhtes.

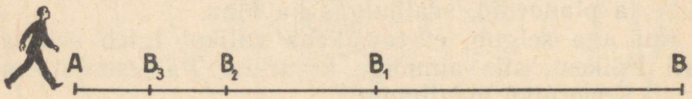
Olgu märgitud, et Ptolemaiose maailmapilti näeb Maal olev vaatleja ainult seetõttu, et ta vaatleb taevakehade liikumise projektsiooni taevavõlvile. Kui Maa peal olev vaatleja vaataks liikumise projektsiooni asemel planeetide ja Päikese tegelikku liikumist ruumis, näeks ta, et Kuu ja Päike tiirlevad ümber Maa, kuna ülejäänud planeedid tiirlevad ümber Päikese. Pilt, mille vaatleja sel juhul saaks, langeks ühte Tycho Brahe maailmasüsteemiga.

Hoopis omapärase seisukoha liikumise küsimuses võtsid vana-kreeka filosoofid, kes elasid VI ja V sajandil enne meie ajaarvamist Apenniini poolsaarel asetsevas koloonias Eleas; koloonia nime järgi hüüti neid eleaatideks. Eleaadid mõtisklesid kehade liikumise üle ning jõudsid järeldusele, et liikumist üldse ei saagi olemas olla. Kui me looduses liikumist näeme, on see ainult meeltepete — nii ekslikud võivad olla inimeste meeled! Eriti ilmekalt näitas liikumise võimatust eleaat Zenon. Toome siin ära tema neli kuulsat apooriat [12]:

a) **Dihhotoomia.** [13]

Selles apoorias Zenon tõestab, et lõpliku pikkusega teed pole võimalik lõpliku ajavahemiku jooksul katta.

Oletame, et meil tuleb liikuda punktist A punkti B (vt. joon. 7). Selleks, et katta teelõik punktist A punktini B,



Joon. 7.

tuleb enne katta pool sellest, s. o. punkti B liikumiseks tuleb enne jõuda punkti B_1. Edasi, selleks, et katta tee punktist A kuni punktini B_1, tuleb enne katta pool sellest, s. o. enne tuleb liikuda punktist A punktini B_2. Nii võib lõpmatuseni edasi arutleda. Et katta mingit teed, tuleb ikka enne katta sellest pool, et katta poolt teed, tuleb enne katta sellest poolest pool jne. jne. Punktist A punkti B jõudmiseks tuleb katta lõpmatu hulk teepikkusi, seda pole aga lõpliku aja jooksul võimalik teha. Ühest kohast teise saab liikuda ainult lõpmata pika ajavahemiku jooksul, s. o. liikumine on tegelikult võimatu.

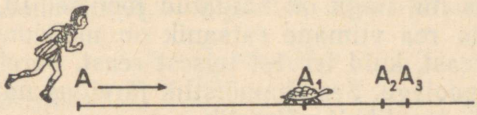
---

[12] Apooria tähendas antiikfilosoofias ületamatut vastuolu, mis tekkis mingi probleemi lahendamisel.

[13] Kreeka keeles sõna «dihha» tähendab «kaheks osaks» ja sõna «tome» tähendab «lõige».

b) Ahhilleus ja kilpkonn.

Trooja sõja kangelane Ahhilleus paistis silma peale muu veel oma väledate jalgadega. Ometi näitas Zenon, et võidujooksus ei suuda Ahhilleus isegi aeglast kilpkonna võita. Kuidas see juhtub? Ahhilleus on oma väledate jalgade peale kindel ning annab kilpkonnale paraja edumaa. Kilpkonn alustab jooksu punktist A_1, Ahhilleus aga temast tagapool punktist A (joon. 8). Selleks ajaks, kui Ahhilleus on jõudnud punkti A_1, on kilpkonn edasi roomanud kohale A_2. Selleks ajaks, kui Ahhilleus jõuab punkti A_2, on kilp-



Joon. 8.

konn juba punktis A_3 jne. jne. Välejalgne Ahhilleus ei jõua kunagi järele aeglasele kilpkonnale. See tähendab, et liikumist tegelikult ei ole olemas.

c) Nool.

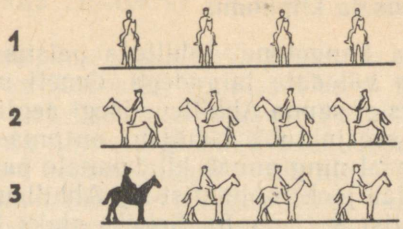
Selles apoorias Zenon tõestab, et lendav nool seisab tegelikult paigal. Tõepoolest, antud ajamomendil liikuv nool asetseb kindlas ruumikohas, s. o. noolt võime antud ajahetkel paigalolevaks lugeda. Nool seisab paigal igal ajamomendil, järelikult on ta üldse liikumatu.

d) Staadionid.[14]

Siin Zenon näitab, et kui pidada õigeks liikumise olemasolu, siis viib see mõttetu järelduseni, nagu peaks terve olema võrdne oma poolega.

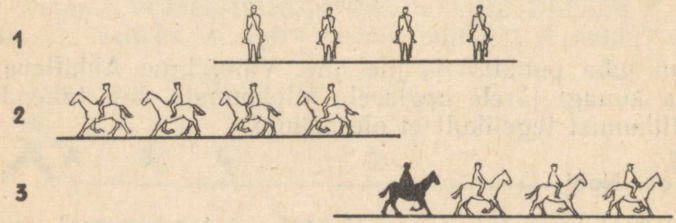
Olgu kolm rida ratsanikke paigutatud nii, nagu on näidatud joonisel 9. Kõigi kolme ratsanikerea pikkus on üks ja seesama. Hakaku nüüd teine rida liikuma vasakule, kolmas rida aga paremale. Teatud aja pärast asetsevad rat-

[14] Staadion oli vana-kreeka pikkusemõõt, mis sõltuvalt maastikust on kaasaegsetes ühikutes väljendatuna võrdne 150 kuni 190 meetriga. Apooria nimetusena on kasutatud seda sõna lihtsalt pikkuse tähenduses.



Joon. 9.

sanikud siis nii, nagu on näidatud joonisel 10. On näha, et kolmanda rea viimane ratsanik on möödunud poolest esimesest reast, kuid tervest teisest reast. Järelikult terve on võrdne poolega. See ebamõistlik järeldus näitab, et liikumine pole tegelikult võimalik.



Joon. 10.

Niisugused olid Zenoni apooriad, mis kõik viisid järeldusele, et liikumist ei saa olla. Selle väitega me nõustuda ei saa. Vastupidi, iga keha looduses on üldiselt just liikuv. Ainult niisugusel erandjuhul, kui kirjeldame keha liikumist eriti valitud taustsüsteemis, võime öelda, et keha on liikumatu. Paigalseis on ainult üks erijuht liikumisest. Kas näiteks maanteel lamav kivi on liikuv või mitte, sellest saame rääkida ainult mõne teise keha (nn. taustkeha) seisukohalt. Kosmoses on lõpmatu hulk kehi, ja peaaegu kõigi nende suhtes on kivikene liikuv. Paigal seisab ta oluliselt väiksema arvu kehade, teiste hulgas ka Maa suhtes.

Miks viisid Zenoni apooriad teda ebaõigetele järeldustele? See juhtus seetõttu, et Zenon ei tundnud liikumise põhiomadusi. Nii oli talle näiteks võõras kiiruse mõiste. Kui punktide A ja B vaheline tee on pikkusega a, siis, lii-

kudes kiirusega v, kulub selle katmiseks $\frac{a}{v}$ sekundit — seda teab iga õpilane.

Et Zenoni arutlus tegelikult samale tulemusele viib, selles on lihtne veenduda.

Kui me oleksime jõudnud juba punktisse B_1 (vt. joon. 7), jääb läbida veel tee pikkusega $\frac{a}{2}$ (pool kogu teest). Liikudes kiirusega v, kulub selleks aega

$$t_1 = \frac{a}{2v} \text{ sekundit.}$$

Analoogiline arutlus näitab, et lõigu B_2B_1 läbimiseks kulub aega

$$t_2 = \frac{a}{4v} \text{ sekundit,}$$

lõigu B_3B_2 läbimiseks

$$t_3 = \frac{a}{8v} \text{ sekundit}$$

jne. jne. kuni lõpmatuseni. Liites kõik need ajavahemikud, saamegi aja, mis kulub teelõigu AB katmiseks:

$$t = \frac{a}{2v}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \ldots\ldots\right).$$

Sulgudes olev summa on lõpmatu geomeetriline rida teguriga $\frac{1}{2}$. Niisuguse rea summa on teatavasti 2. Seega eelmisest võrdusest saame:

$$t = \frac{a}{v}.$$

Analoogiliselt lahendub Ahhilleuse ja kilpkonna probleem. Kui Ahhilleuse kiirus on V, kilpkonna kiirus v, ning kilpkonna edumaa Ahhilleuse ees s, siis

$$t = \frac{s}{V - v}$$

sekundi pärast saab Ahhilleus kilpkonna kätte.

Ka selles võime matemaatilise arutluse najal veenduda: Ahhilleusel kulub punktist A punkti A_1 jõudmiseks (vt. joon. 8)

$$t_1 = \frac{s}{V} \text{ sekundit.}$$

Selle aja jooksul liikus kilpkonn edasi punkti A_2, kattes tee pikkusega

$$s_1 = vt_1 = \frac{sv}{V}.$$

Aeg, mis kulub Ahhilleusel punktist A_1 punkti A_2 jõudmiseks on seega

$$t_2 = \frac{s_1}{V} = \frac{sv}{V^2}.$$

Selle aja jooksul kilpkonn katab lõigu A_2A_3, nihkudes edasi pikkuse

$$s_2 = vt_2 = \frac{sv^2}{V^2}$$

võrra. Selle teelõigu katmiseks kulub Ahhilleusel omakorda aega

$$t_3 = \frac{sv^2}{V^3} \text{ sekundit.}$$

Nii võib arutleda lõpmatuseni. Aeg, mis kulub Ahhilleusel kilpkonna kinnipüüdmiseks, on lõpmatu hulga ajavahemike t_1, t_2, t_3, ... summa:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + \ldots = \frac{s}{V}\left(1 + \frac{v}{V} + \frac{v^2}{V^2} + \ldots\right).$$

Sulgudes on geomeetriline rida teguriga $\frac{v}{V}$. Selle rea summa valemi kasutamine annab:

$$t = \frac{s}{V} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v}{V}} = \frac{s}{V - v}.$$

Ahhilleuse ja kilpkonna apooriat on käsitlenud Lev Tolstoi oma romaani «Sõda ja rahu» lehekülgedel. Ta kirjutab:

«Inimese mõistusele on arusaamatu liikumise absoluutne pidevus. Inimesele saavad ükskõik missuguse liikumise seadused arusaadavaks alles siis, kui ta vaatleb selle liikumise vabalt võetud üksusi. Ühtlasi aga tekib enamik inimeste eksimusi sellest pideva liikumise meelevaldsest jaotamisest katkestatud üksusteks.

Tuntud on muinaskreeklaste nõndanimetatud sofism, mis väitis, et Ahhilleus iialgi järele ei jõua ees minevale kilpkonnale, sellest hoolimata, et Ahhilleus käib kümme korda kiiremini kui kilpkonn ... See ülesanne näis muinaskreeklastele lahendamatuna. Lahenduse mõttetus (et Ahhilleus kilpkonnale iialgi järele ei jõua) järgnes vaid sellest, et meelevaldselt oletati liikumise katkestatud üksuste olemasolu, kuna tegelikult nii Ahhilleuse kui ka kilpkonna liikumine toimus pidevalt.»

Rääkides Ahhilleuse ja kilpkonna probleemi matemaatilisest lahendamisest, kirjutab Tolstoi edasi:

«Uus matemaatika haru, mis on omandanud lõpmata väikeste suuruste käsitlemise kunsti, annab nüüd ... keerulisemateski liikumise küsimustes vastuse küsimustele, mis näisid lahendamatuina. See uus, muinaskreeklastele tundmatu matemaatika haru parandab ... seda paratamatut eksitust, mida inimese mõistus tahtmatult peab

tegema, vaadeldes pideva liikumise asemel liikumise üksikuid üksusi.»

Noole apoorias teeb Zenon sama vea kui kahes esimeseski: ta jätab kahe silma vahele liikumise pidevuse omaduse. Noole liikumist ei saa käsitleda paigalolekute summana. Liikumine on üldisem nähtus kui paigalolek, seetõttu pole seda võimalik viimase kaudu seletada.

Eriti huvitav on neljas apooria. Vastuolu, milleni Zenon siin jõudis, on tingitud liikumise relatiivsuse mittemõistmisest. Meil on seda apooriat lihtne lahendada:

Liikugu teine ratsanike rida esimese suhtes kiirusega v vasakule, kolmas rida esimese suhtes aga sama kiirusega paremale. Siis kolmanda rea viimase ratsaniku kiirus esimese rea suhtes on v, kuid teise rea suhtes $2v$. Kui ratsanik on ratsutanud t sekundit, siis esimese rea suhtes on ta edasi liikunud vt meetrit, teise rea suhtes aga $2vt$ meetrit. Siin ei ole tegemist millegi muuga, kui liikumise kirjeldamisega eri taustsüsteemides: ühel juhul on taustkehaks esimene ratsanike rida, teisel juhul aga teine rida. Liikumise kirjeldamine eri taustsüsteemides annab loomulikult erinevad tulemused. Mingisugust vastuolu see tõsiasi endas ei sisalda.

Zenon eksis oma apooriates seetõttu, et ta käsitles liikumist liiga lihtsa nähtusena. Liikumine on oma olemuselt palju keerukam nähtus kui arvasid eleaadid.

6. INERTSISEADUS

Et looduses liikumine puudub, selles ei suutnud eleaadid veenda kedagi peale iseenda. Eriti omapärase vastuse andis vaidluses neile Diogenes, hakates vaikides edasi-tagasi käima. Sellega demonstreeris ta näitlikult liikumise olemasolu. Liikumise seaduste avastamiseks ei teinud antiikaja filosoofid aga midagi ära. Isegi niisugused mõisted nagu mitteühtlase liikumise kiirus ja kiirendus olid neile võõrad.

Enamik antiikfilosoofe arvas, et kõiki looduse tõdesid on võimalik avastada ainult mõtiskluste ja loogiliste skeemide abil, ning alahindas katse tähtsust. Katse oli nende arvates kehaline töö, mis sobis ainult orjadele. Ka

järgnevad tuhat viissada aastat ei andnud siin midagi uut. Alles Galileo Galilei tõstis katse kui looduse uurimise vahendi aukohale. Tema poolt avastatud liikumise seadusi täiendas Isaac Newton ja avaldas nad oma kuulsas töös «Loodusefilosoofia matemaatilised printsiibid» (1687). Sellest ajast kannavad need seadused Newtoni nime. Vaatame lähemalt Newtoni esimest seadust, nõnda-nimetatud inertsiseadust [15].

Iga keha säilitab oma paigaloleku või ühtlase ja sirgjoonelise liikumise seni, kuni tungide mõju seda olekut ei muuda. Teiste sõnadega: vaba keha (s. o. keha, millele ei mõju ükski tung) säilitab oma kiiruse [16].

Inertsiseadus näib esimesel pilgul olevat vastuolus meie igapäevase elu kogemustega. Mida teeb tasasel teel kihutav auto, kui tema mootor lakkab töötamast? Auto liikumine muutub üha aeglasemaks, kuni katkeb hoopis. Kadus autot liikuma sundiv tung ning auto jäi paigale. Nii on iga kehaga. Tarvitseb ainult jätta keha omaette, ja tema liikumine lõpeb peatselt. Seda tõsiasja märkasid inimesed juba iidsetel aegadel. Mõned antiikaja filosoofid järeldasid siit, et vaba keha ei muuda oma a s u k o h t a ruumis. Galilei-Newtoni inertsiseadus ütleb aga, et vaba keha ei muuda oma k i i r u s t, s. o. ta liigub ilma kiirenduseta, ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Kellel neist on õigus, kas antiikaja filosoofidel või Galileil ja Newtonil? Puhas mõtisklemine ning loogilised arutlused meid selle küsimuse lahendamisel palju ei aita. Miks peaksid vabad kehad eelistama just sirgjoonelist liikumist? Võib-olla püüavad nad tegelikult liikuda mööda ringjoont, nagu arvas näiteks Aristoteles. Või tuleks inertsiseadus sõnastada koguni nii, et vaba keha ei muuda oma kiirendust [17]?

---

[15] Sõna «inertia» tähendab ladina keeles liikumatust, laiskust, loidust.

[16] Kiiruse mõiste haarab endasse ka liikumise suuna. Kui näiteks auto liigub põhja suunas kiirusega 60 kilomeetrit tunnis, siis öeldakse, et autol on põhjasuunaline kiirus suurusega 60 kilomeetrit tunnis. Keha kiirust loetakse muutumatuks ainult siis, kui jäävad muutumatuks nii kiiruse suurus kui ka liikumise suund.

[17] Kiirendus iseloomustab kiiruse muutumist, või veel täpsemini öeldud, iseloomustab nii kiiruse suuruse kui ka liikumise suuna muutumist. Niipea kui muutub kas kiiruse suurus või liikumise suund (või ka nad mõlemad), ütlevad füüsikud, et liikumine toimub kiirendusega. Seega füüsika väljendus «kiirendusega liikumine» tähendab rohkem kui samad sõnad igapäevase elu keeles. Kiiren-

Kuidas valida kõigi nende inertsiseaduste vahel? Milline neist peegeldab tõelisi looduses esinevaid liikumisi? Vastuse saab siin anda ainult looduse vaatlemine, maailmas toimuvate tegelike liikumiste uurimine.

Inertsiseaduse kontrollimisel katsetega tekib aga tõsine raskus: seadus räägib vabadest kehadest, kuid loodusest ei leia me ühtegi keha, mis poleks allutatud tungide mõjule. Igale kehale mõjub raskustung, liikumist takistab hõõrdumine ja õhutakistus. Et seismajäänud mootoriga auto liikumine lakkab, see võib olla tingitud õhutakistusest ja rataste hõõrdumisest maapinna ja telgede vastu. Mida teeks aga auto siis, kui hõõrdumine ja õhutakistus puuduksid, seda ilma pikemata öelda ei saa. Niisugust autot ei ole me kunagi tegelikult vaadelnud. Näib, et siin on tegemist nõiaringiga. Inertsiseadus on formuleeritud, kas ta aga looduses sel kujul kehtib, seda ei saa kuidagi ei puht-loogiliste arutluste, ei otseste vaatluste teel kontrollida. Miks me võime siiski kindlalt väita, et Galilei-Newtoni inertsiseadus on õige loodusseadus? Sellepärast, et seda näitavad üldisemad vaatlustele tuginevad kaalutlused.

On näiteks teada, et planeedid tiirlevad ümber Päikese mööda ellipsikujulisi teid. Matemaatilised arutlused, millest me lugeja vabastame, näitavad aga, et planeedi orbiidi elliptilisest kujust järgneb otseselt Galilei-Newtoni inertsiseadus.

Omapäraselt arutleb selles küsimuses prantsuse matemaatik Henri Poincaré. Refereerime tema mõttekäike:

Planeedid liiguvad ümber Päikese ellipsikujulistel orbiitidel. Kuna ringjoon on erikujuline ellips, siis mõni planeet võiks juhuslikult liikuda Päikese ümber ka mööda ringjoont. Oletame, et kusagil maailmaruumis on meie Päikesesüsteemiga sarnane süsteem, milles juhuse tõttu kõik planeedid liiguvad ümber Päikese ühes ja samas tasapinnas mööda ringjoonelisi orbiite. Kui planeedid on nii väikesed, et nad üksteise liikumisele märgatavat mõju ei avalda, siis jäävadki nende orbiidid ringikujulisteks. Teadlased, kes elavad ühel hüpoteetilistest planeetidest, tahavad päikesesüsteemi liikumisest tuletada inertsiseadust. Loomulikult ei oska nad arvata, et kõigi planeetide orbiidid on ainult juhuslikult ringikujulised, vaid näevad selles üldist loodusseadust. Niisugusest loodusseadusest võib arvutuste teel tuletada inertsiseaduse, mis kõlab: vaba keha asukoht ruumis ei muutu.

---

dusega liikumise hulka kuulub näiteks kiirenev või aeglustuv liikumine sirget teed mööda või muutumatu kiirusega liikumine piki kõverjoonelist teed. Jääva kiirusega liikumine mööda ringjoont kuulub seega kiirendatud liikumiste hulka.

Miski ei kõigutaks teadlaste arvamist, et nad on avastanud õige inertsiseaduse.

Kujutleme nüüd, et ühel heal päeval tuleb maailmaruumist mingi suure massiga taevakeha ja möödub meie hüpoteetilisest päikesesüsteemist. Vööra taevakeha külgetõmme moonutab planeetide orbiidid ning rikub senivalitsenud erandliku olukorra. Kui häirija on eemaldunud, märkavad astronoomid üllatusega, et kõigi planeetide orbiidid on muutunud ellipsikujulisteks. Alles nüüd saavad nad aru, et üldreeglina liiguvad planeedid alati mööda ellipseid. Ainult erilise juhuse tõttu kulgesid nad seni ringjoonelistel teedel. Nüüd leiavad ka astronoomid, et õige inertsiseadus peab väitma vaba keha kiiruse muutumatust.

Põhimõtteliselt võttes võiksime ka meie inertsiseaduse leidmisel samal viisil eksida. Võib olla, et me elame maailmas, kus planeetide orbiidid on ellipsikujulised ainult erandliku juhuse tõttu. Ühel heal päeval võiks siis ilmsiks tulla, et planeedid liiguvad üldiselt keerulisematel kõveratel kui on ellips. See näitaks, et Galilei-Newtoni inertsiseadus ei vasta tegelikult loodusele. Niisugust ootamatust siiski karta ei ole, seda enam, et me ei jälgi üksnes planeete, vaid ka teisi taevakehi, samuti Maa peal liikuvaid kehi. Mitte kuskil ei ole avastatud liikumist, mis oleks vastuolus Galilei-Newtoni inertsiseadusega. Seepärast võimegi öelda, et inertsiseadus on vaatlustega kinnitatud loodusseadus, kuigi me kunagi ühtegi vaba keha vaadelnud ei ole.

Nii arutles Poincaré möödunud sajandi lõpuaastail. 1957. aastast peale võime aga inertsiseadust ka eksperimentaalselt suure täpsusega kinnitatuks lugeda. Jutt on nimelt Maa kunstlikest kaaslastest, lunoididest. Selgitame seda küsimust lähemalt.

Kujutleme, et oleme tõusnud umbes 1000 kilomeetri kõrgusele, kus õhkkond praktiliselt täiesti puudub. Olgu meil kaasas suurtükk, millest tulistame välja horisontaalsuunas liikuva mürsu. Suurtükitorust väljunud mürsk liigub inertsi mõjul otse edasi. Samal ajal aga tõmbab raskustung teda Maa poole. Mürsk joonistab õhus kaare ja kukub maapinnale. Lõppes inertsiaalne liikumine, mis kestis vähem kui 10 minutit ja oli pealegi moonutatud õhu takistava mõju poolt.

Mida suurema kiirusega me mürsu välja saadame, seda pikema tee katab mürsk enne maapinnale jõudmist ja seda kaugemale Maa kumeruse taha ta langeb. Kui mürsu algkiirus on 8 kilomeetrit sekundis, ei jõua ta enam kunagi maapinnale, vaid tema tee paindub ümber Maa. Piltlikult võiksime öelda, et mürsk langeb kogu aeg Maa poole, kuid oma suure horisontaalsuunalise kiiruse tõttu kukub sellest mööda.

Nii liiguvadki lunoidid ümber Maa. Nende liikumine

koosneb kahest komponendist: Maa poole suunatud komponendi tekitab raskustung, kuna horisontaalsuunaline liikumine on inertsiaalne. Et lunoidid püsivad üleval kuude kaupa ja katavad seejuures kümneid miljoneid kilomeetreid, see on otseseks kinnituseks inertsiseadusele. Nüüd võime öelda, et oleme jälginud inertsiaalset liikumist miljonite kilomeetrite ulatuses, millest Galilei ja Newton ei võinud unistadagi. Me võime olla kindlad, et kui puuduks üliväike õhutakistus ja teised tegurid, mis lunoidi lõpuks alla toovad, siis kestaks inimese poolt tekitatud inertsiaalne liikumine lõputult. Et lunoidi inertsiaalse liikumisega käib koos veel liikumine raskustungi mõjul, ei ole siin oluline.

7. INERTSIAALSÜSTEEMID

Tähelepanelik lugeja, lõpetanud eelmise punkti, külvab arvatavasti autori üle etteheidetega.

Miks ei ole inertsiseaduse selgitamisel kusagil mainitud taustsüsteemi, selleta kaotab ju liikumise kiirusest rääkimine oma mõtte! Sisutuks muutub ka ühtlase ja sirgjoonelise liikumise mõiste; ese võib ühe taustkeha (näit. Maa) suhtes liikuda ühtlaselt ja sirgjooneliselt, teise taustkeha (näit. Päikese) suhtes seevastu kõverjooneliselt.

Lugejal on õigus. Seni kuni me pole taustsüsteemi fikseerinud, on kogu eelmine punkt tegelikult sisutu arutlus. Kuidas mõtles Newton ise, kui ta oma inertsiseaduse sõnastas?

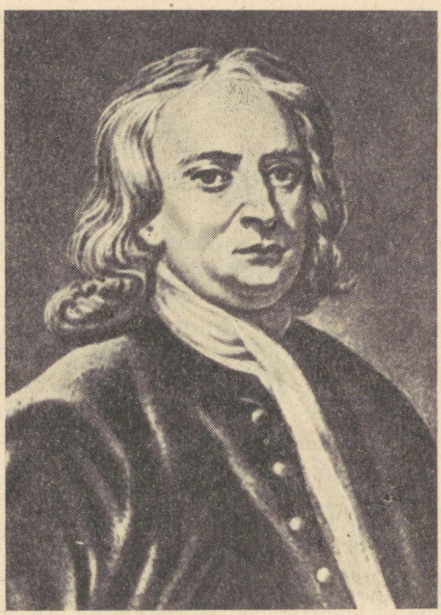
Kui Galilei arvas, et kehade liikumise seadused on õiged Päikesega seotud taustsüsteemis (s. o. Koperniku süsteemis), siis Newton läks teist teed. Ta oletas, et sõltumatult materiaalsete kehade liikumisest ruumis jääb viimane alati iseendale sarnaseks ja liikumatuks. Keha liikumist selle liikumatu, nn. absoluutse ruumi suhtes nimetas Newton absoluutseks liikumiseks. Oma seadusi sõnastades mõtles Newton alati absoluutset liikumist. Nii peaks inertsiseadus, rangelt võttes, väljenduma järgmiselt:

Iga keha säilitab oma paigaloleku või ühtlase ja sirgjoonelise liikumise absoluutses ruumis seni, kuni tungide mõju seda olekut ei muuda.

Samuti tuleks sõnastada Newtoni 2. seadus nii, et

selles oleks rõhutatud absoluutse ruumi kasutamine taustsüsteemina:

Keha kiirendus absoluutses ruumis on võrdeline kehale mõjuva tungiga.[18] See tähendab, et kui kehale mõjuv tung kahekordistub, siis kahekordistub ka keha kiirendus absoluutses ruumis. Kui kehale mõjuv tung muutub nulliks, saab nulliks ka kiirendus absoluutses ruumis — keha hakkab liikuma muutumatu kiirusega.



Isaac Newton.

Newton omistas ka ajale absoluutse tähenduse. Ta kirjutas: «Absoluutne, tõeline matemaatiline aeg voolab omaette, oma loomu poolest ühtlaselt ja vabana suhetest välismaailmaga. Teda nimetatakse ka kestuseks.»

Newton uuris kehade liikumist taustsüsteemis, mille moodustasid absoluutne ruum ja absoluutne aeg. Nimetame seda süsteemi absoluutseks taustsüsteemiks. Newton

[18] Newtoni teise seaduse sõnastus ülalantud kujul on päris täpne ainult eeldusel, et keha mass liikumise jooksul ei muutu.

arvas, et keha liikumist võib kirjeldada küll ükskõik missuguses taustsüsteemis, kuid igal kehal on olemas tema tõeline liikumine, see on liikumine absoluutses taustsüsteemis. Newton väitis seega, et kõikvõimalike süsteemide seast tuleb eelistada ühte, nimelt absoluutset ruumi.

Oletame hetkeks, et absoluutne ruum ja absoluutne aeg on tõepoolest olemas. See tähendab, et on olemas ruum, kus kõik vabad kehad liiguvad ühtlaselt ja sirgjooneliselt (inertsiseadus). Kujutleme nüüd lennukit, mis liigub absoluutses ruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt kiirusega 700 kilomeetrit tunnis. Samas läheduses liikugu ühtlaselt ja sirgjooneliselt veel kuulike kiirusega 750 kilomeetrit tunnis. Lennuki ja kuuli liikumise suunad pole olulised, kuid arutluste lihtsustamiseks oletame, et nad liiguvad ühes ning samas suunas. Jälgides kuuli liikumist, saame kindlaks teha, et tema kiirus lennuki suhtes on 50 kilomeetrit tunnis, ja mis kõige olulisem: kuulike liigub ka lennuki suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Lennukiga seotud taustsüsteemis on kuulikese liikumine samuti ühtlane ja sirgjooneline nagu absoluutses ruumiski.

Kuulikese liikumise inertsiaalne iseloom ei sõltu sellest, kas lennuk liigub samas suunas kui kuulike või ei, samuti pole tähtis lennuki kiirus. Oluline on ainult, et lennuk ja kuulike liiguksid absoluutses ruumis mõlemad ühtlaselt ja sirgjooneliselt, siis liigub kuulike lennuki suhtes samuti ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Kujutleme nüüd lõputu hulga lennukeid absoluutses ruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt lendamas (lennukite kiirused ja liikumissuunad võivad olla ükskõik missugused). Iga niisuguse lennukiga seome taustsüsteemi. Saame lõputu hulga taustsüsteeme, milledest igaühte võime kasutada kuuli liikumise kirjeldamisel. Eri süsteemides on kuulil erinev kiirus, kuid üks omadus on kõigile süsteemidele ühine: kuul liigub neis kõigis ühtlaselt ja sirgjooneliselt samuti nagu absoluutses ruumis. Just see on meile oluline. Newtoni esimeses seaduses ei räägita midagi kiiruse suurusest, vaid ainult liikumise ühtlasest ja sirgjoonelisest iseloomust. Siit järeldub: kui Newtoni esimene seadus kehtib absoluutses taustsüsteemis, siis on ta õige ka igas teises taustsüsteemis, mis liigub absoluutse ruumi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Analoogiline lugu on Newtoni teise seadusega, milles

ei räägita keha kiirusest, vaid ainult kiirendusest. Kuna kõik kujuteldavad lennukid liiguvad absoluutses ruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt (s. o. kiirendusega null), siis keha kiirendus ükskõik missuguse lennuki suhtes on täpselt sama suur kui kiirendus absoluutse ruumi suhtes. Järelikult: kui Newtoni teine seadus kehtib absoluutses taustsüsteemis, siis kehtib ta ka igas teises taustsüsteemis, mis liigub absoluutse ruumi suhtes ühtlaselt ning sirgjooneliselt.

Kui Newton formuleeris oma seadused, siis mõtles ta liikumist ainult absoluutse ruumi suhtes. Tegelikult kehtivad need seadused kõigis taustsüsteemides, mis liiguvad absoluutse ruumi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Kõiki taustsüsteeme, kus kehtivad Newtoni seadused, nimetame edaspidi inertsiaalsüsteemideks. Teiste sõnadega: inertsiaalsüsteemid on niisugused taustsüsteemid, kus kõik vabad kehad liiguvad kiirenduseta, kõik tungide mõjule allutatud kehad aga kiirendusega. Kuna Newtoni seadused absoluutses ruumis kehtivad, siis tuleb ka absoluutne ruum ise lugeda üheks inertsiaalsüsteemiks.

Newtoni seadused on õiged kõigis taustsüsteemides, mis liiguvad absoluutse ruumi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Taustsüsteemides aga, mis liiguvad absoluutse ruumi suhtes kiirendusega, Newtoni seadused ei kehti. Igapäevases elus oleme sellega ammu harjunud. Rong teeb jaamas peatudes järsu nõksatuse, ning samal hetkel tunneme, nagu oleks keegi meid tõuganud. Ometi ei hakka me kaasreisijaid süüdistama, vaid teame, et see tõuge oli tingitud rongi järsust peatumisest. Peatumisel rongi liikumine absoluutse ruumi suhtes ei ole ühtlane, s. o. rong ei ole siis inertsiaalsüsteem, ning meie keha reageerib sellele otsekohe nihkega rongi suhtes. Äkiline nihe pole midagi muud kui kiirendatud liikumine, mis seekord toimus ilma tungi mõjuta. Näeme, et süsteemis, mis pole inertsiaalne, esinevad kiirendatud liikumised ka ilma tungita. Mitteinertsiaalsüsteemides Newtoni teine seadus ei kehti. Mitteinertsiaalsüsteemides ei ole õige ka Newtoni esimene seadus, sest seal liiguvad vabad kehad kiirendusega.

Lugedes Newtoni seadused õigeteks loodusseadusteks, oleme sellesamaga asetanud inertsiaalsüsteemid kõigi

teiste taustsüsteemide ees eelistatud olukorda. See tähendab, et keha liikumisest saame õige pildi ainult siis, kui kirjeldame seda inertsiaalsüsteemis.

8. KLASSIKALINE RELATIIVSUSPRINTSIIP

Newtoni vaated absoluutsest ruumist näivad esimesel pilgul väga veenvatena. Tõepoolest, mis on veel loomulikum kui oletus, et ruum on midagi iseseisvat, seal asuvatest kehadest sõltumatut ning liikumatut, kusjuures iga liikumist tuleb vaadata liikumisena paigalseisvas ruumis. Just niisugused on meie vahetud muljed liikumisest ja ruumist.

Igapäevastest muljetest ei piisa aga alati teadusliku teooria loomiseks ning loodusnähtuste sisusse tungimiseks. Näiteks sooja ja külma on inimesed tundnud juba iidsetest aegadest peale, kuid see ei andnud neile mingisuguseid andmeid soojuse kui loodusnähtuse kohta. Alles soojusprotsesside teaduslik uurimine avas inimesele soojuse olemuse ning andis näpunäiteid aurumasinate, plahvatusmootorite ja teiste soojusmasinate konstrueerimiseks. Täpselt samasugune on lugu liikumise ja ruumiga. Ka siin tuleb iga meie tavaline kujutlus kriitiliselt läbi analüüsida. Siis selgub, kui palju on temas näivat, kui palju tegelikkusele vastavat.

Kujutleme end asuvat kinnises kastis ja jälgivat seal kehade liikumist. Kõik kehad liiguvad täpselt Newtoni seaduste kohaselt. Kas me võime sellest järeldada, et meie kast on absoluutse ruumi suhtes liikumatu? Ei või. Newtoni seadused kehtivad kastis ka siis, kui viimane liigub absoluutses ruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Ka subjektiivsed tunded ei võimalda selle üle otsustada, kas me liigume absoluutses ruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt või seisame paigal. Piki jõge sõites on sageli tunne, nagu seisaks paat paigal ja kaldad liugleksid mööda. Võimatu on öelda, kas liigub paat, liiguvad kaldad või liiguvad nii kaldad kui ka paat.[19] Veelgi teravamalt ilmneb subjektiivse tunde petlikkus, kui seista sillal ja

[19] Kõik eelöeldu käib ainult ühtlase ja sirgjoonelise liikumise kohta. Niipea, kui paat hakkab liikuma kiirendatult või aeglustuvalt, on see tunda (kiirendatud liikumisel tunneme tõmmet ahtri suunas, aeglustuval liikumisel paadi nina suunas).

üksisilmi vaadata voolavasse jõkke. Seejuures tekib varsti tunne, et sild ja kaldad hakkavad liikuma.

Seda, et subjektiivsete tunnete abil ei saa ühtlast liikumist paigalseisust eraldada, on inimesed juba ammu tähele pannud. Aastal 1615 ilmunud «Don Quijote» teises osas kirjeldab Cervantes vapra La Mancha rüütli ja tema kannupoisi sõitu imehobusel Clavileno. Seotud silmadega kangelased istusid puuratsul ja kujutlesid end suure kiirusega läbi õhu kihutavat. Tegelikult seisis puuhobune karja naljahammaste keskel, kes lõbustasid end rüütli ja tema relvakandja kulul. Et efekt oleks täielik, puhuti ratsanike peale suurtest lõõtsadest, tekitades neis sel teel läbi õhu vuhisemise tunnet.

Ei maksa arvata, et seda halba nalja oli võimalik teha ainult lihtsameelse Don Quijotega. Keegi meist ei saaks seotud silmade korral öelda, kas sõiduk, milles istume, seisab paigal või tormab ühtlaselt ja sirgjooneliselt läbi õhu. Küll oleks aga vahva rüütel pidanud tundma seda, et tema ratsu ei olnud liikuma hakanudki. Liikumise algul oleks hobune pidanud liikuma kiirendatult, kiirendatud liikumist on aga võimalik tunda.

Ühtlase ja sirgjoonelise liikumise eraldamatus paigalseisust sai täielikult selgeks juba Galileile. Tema töös «Dialoog kahest maailmasüsteemist» (1632) räägib peategelane Salviati:

«Sulgege end koos ühe sõbraga võimalikult avarasse ruumi suure laeva teki alla ja laske sinna kärbseid, liblikaid ja teisi nendetaolisi väikesi lendavaid olendeid. Olgu seal veel suur nõu veega ja kaladega. Riputage samuti lakke pang, millest tilkhaaval jookseks vesi teise väikese avaga anumasse, mis on esimese anuma all. Kuni laev seisab paigal, jälgige, kuidas need loomad võrdse kiirusega lendavad toa igasse külge. Näete, et kalad ujuvad ühte moodi igas suunas; tilgad langevad kõik allapandud anumasse. Kui viskate sõbrale mingi eseme, siis ei ole teil vaja seda ühes suunas visata tugevamini kui teises suunas, kui ainult kaugused on võrdsed. Hüpata suudate igas suunas võrdsele kaugusele. Jälgige kõike seda ja laske laev käiku ükskõik missuguse kiirusega. Kui laeva liikumine on ühtlane, ei märka te vähimatki muutust üheski loetletud tegevuses ja mitte millegi põhjal ei saa otsustada, kas laev liigub või seisab paigal. Hüppamisel läbite põrandal samad vahemaad mis varemgi, s. t. kuigi

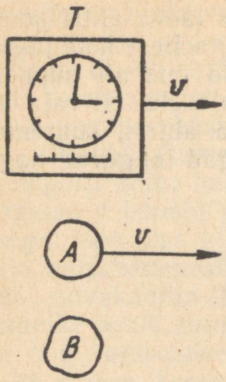
laev liigub väga kiiresti, ei soorita teie laeva ahtri poole pikemaid hüppeid kui laeva nina poole, sellest hoolimata, et ajal, kui viibite õhus, libiseb põrand teie all hüppele vastassuunas. Eseme viskamisel kaaslasele ei vaja te juhul, kui ta on laeva ninas, teie aga ahtris, suuremat jõudu kui ümberpöördud olukorras. Tilgad langevad nagu ennegi alumisse anumasse . . .»



Galileo Galilei.

Esitatud tsitaadist on näha Galilei mõttesügavus liikumise ja paigaloleku mõistmisel. Selles küsimuses jõudis ta ette isegi sajand hiljem töötanud Newtonist. Galilei luges ühtlast ja sirgjoonelist liikumist paigalseisuga samaväärseks, sest ükski kinnises ruumis teostatud vaatlus ei võimalda ruumi ühtlase ja sirgjoonelise liikumise kiirust kindlaks teha.

Kui keha liigub absoluutses taustsüsteemis ühtlaselt ja sirgjooneliselt kiirusega v, siis on ta mingisuguses inertsiaalsüsteemis paigal (see on süsteem, mis liigub absoluutse ruumi suhtes samas suunas samuti kiirusega v). Teiselt poolt, kui keha liigub mingisuguses inertsiaalsüsteemis, siis võib ta absoluutses ruumis paigal olla (joon. 11). Paigalseisu ja ühtlase ning sirgjoonelise liikumise samaväärsusest järgneb nüüd, et absoluutne



Joon. 11. Taustsüsteem *T* liigub absoluutses ruumis kiirusega *v*. Keha *A* liigub absoluutses ruumis samuti kiirusega *v*, süsteemi *T* suhtes on ta paigal. Keha *B* on paigal absoluutse ruumi suhtes, taustsüsteemis *T* liigub ta aga kiirusega *v* vasakule.

ruum ei ole midagi muud kui ainult üks inertsiaalsüsteemidest. Absoluutset ruumi pole kehade liikumise jälgimisel võimalik inertsiaalsüsteemide hulgast ära tunda. Kõik inertsiaalsüsteemid on samaväärsed ja pole mingit põhjust ühte neist absoluutseks süsteemiks nimetada. See tõsiasi on kokku võetud klassikalise relatiivsusprintsiibi sõnastuses: [20]

Kehade liikumise kirjeldamisel on kõik inertsiaalsüsteemid samaväärsed. Ei ole ühtegi alust mõne inertsiaalsüsteemi eelistamiseks teistele.

Klassikaline relatiivsusprintsiip väljendab kiiruse suhtelisust. Ei ole mõtet absoluutsel väitel: «keha kiirus on nii ja nii suur». Kiirust saab mõõta üksnes mõne teise keha suhtes — see teine keha on siis valitud taustkehaks. Väited: «kuulike liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt teda ümbritsevate kehade suhtes» ja «kuulike on paigal, tema ümbrus aga liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt vastupidises suunas», on sisuliselt samaväärsed. Esimesel juhul on taustkehaks valitud kuulikese ümbrus, teisel juhul aga kuulike ise. Kumbagi valikut ei saa teisele eelistada. See mõte tundub esialgu võib-olla võõrana, kuid sellega tuleb harjuda. Klassikaline relatiivsusprintsiip on avastatud looduses toimuvate liikumiste uurimisel, seega on ta üheks loodusseaduseks.

---

[20] Newtoni seadustele tuginevat mehhaanikat nimetatakse klassikaliseks mehhaanikaks. Siit tuleneb ka nimetus «klassikaline relatiivsusprintsiip» või nagu seda veel nimetatakse — «klassikalise mehhaanika relatiivsusprintsiip». Kuna sõna «relatiivsus» eestipärasem vaste on «suhtelisus», siis võiks relatiivsusprintsiipi nimetada ka suhtelisuse printsiibiks. Viimane ei ole aga teadusliku terminina kasutamist leidnud.

Võib karta, et enamik lugejaid on juba tüdinenud teoreetilistest arutlustest ning nõuavad mõne konkreetse inertsiaalsüsteemi näitamist looduses. Püüame nende soovi võimaluse piires täita. Küsime konkreetselt: kas näiteks Maa on inertsiaalsüsteem? Iga õpilane vastab sellele: «Näited, mida füüsika õpetaja toob Newtoni seaduste selgitamisel, räägivad kõik Maa peal liikuvatest kehadest. Ma saan sellest nii aru, et kehade liikumine Maal toimub just Newtoni seaduste kohaselt. Järelikult Maa on inertsiaalsüsteem.» Küsige insenerilt ja te saate vastuseks, et masinate konstrueerimisel juhindub ta just Newtoni seadustest. Kuidas asja ka vaadata, Maa peaks olema inertsiaalsüsteem, sest seal kehtivad Newtoni seadused.

Ometi on niisugune järeldus ekslik. Et selles veenduda, kandume mõttes Pariisi, Pantheoni, kus 1851. aastal demonstreeris oma kuulsat pendlikatset Prantsuse Teaduste Akadeemia liige Leon Foucault.

Pantheoni kupli laest ripub alla 67 meetri pikkune tross, mille külge on kinnitatud 28 kilogrammi raskune vaskkuul. See hiiglaslik pendel pannakse võnkuma. Juba mõne võnke järel ilmneb üllatav nähtus: pendli võnketasapind hakkab aeglaselt pöörduma päripäeva. Miks? Foucault seletas katse tulemust Maa pöörlemisega ümber oma telje. Maa pöörleb, pendli võnketasapind aga ei muutu — see viib pendli võnketasapinna pöördumisele maapinna suhtes. Me oleme selle seletusega täielikult nõus, kuid sõnastame ta veidi teisiti: Maa ei ole inertsiaalsüsteem. Pendli võnketasapind pöördub Maa suhtes, kuid ei ole võimalik avastada ühtegi tungi, mis seda pöördumist põhjustaks. Siin on kiirendatud liikumine (pöörlemine kuulub kiirendatud liikumiste hulka) ilma tungita. Inertsiaalsüsteemides, kus kehtivad Newtoni seadused, niisugust nähtust olla ei saa.

Maad võime lugeda inertsiaalsüsteemiks ainult ligikaudu, teiste sõnadega: Maad võime lugeda inertsiaalsüsteemiks ainult niisuguste protsesside kirjeldamisel, kus Maa pöörlemine praktiliselt märgatavat mõju ei avalda. Rõhuv enamik meid huvitavatest nähtustest on just niisuguse iseloomuga. Seepärast võime praktilises elus Newtoni seadusi julgesti rakendada.

Et Maa ei ole inertsiaalsüsteem, seda kinnitavad veel mitmed teised nähtused. 1802. aastal korraldati Hamburgis katse, kus raskel kehal lasti 76 meetri kõrguselt maapinnale langeda. Seejuures ilmnes, et keha ei langenud täpselt raskustungi mõjumise suunas, vaid kukkus peaaegu ühe sentimeetri võrra ida poole. Ei ole võimalik leida tungi, mis põhjustas selle kõrvalekalde. Põhjuseks võib olla ainult asjaolu, et Maa ei ole inertsiaalsüsteem.

Aastal 1857 avaldas vene akadeemik Karl Baer oma kuulsa seaduse jõgede kallaste uhtumisest: jõgedel, mis voolavad meridiaani sihis, on põhjapoolkeral parem kallas kõrge ja vasak madal, lõunapoolkeral aga vastupidi — vasak kallas kõrge ja parem madal. See seaduspärasus ilmneb eriti teravalt suurte jõgede juures. Kõrge parema kaldaga on näiteks Niilus, Ob, Irtõš, Leena, Volga, Doonau, Dnepr, Don jt. Vasak kallas ületab parema aga niisugustel lõunapoolkera jõgedel nagu Paraná ja Paraguay. Seletada saab seda ainult nii, et põhjapoolkeral mööda meridiaani [21] voolavad jõed nihkuvad oma parema kalda poole (lõunapoolkeral vastavalt vasaku kalda poole), kusjuures uhteliivast kujunev vasak kallas jääb lamedaks.

Miks peaksid mööda meridiaani voolavad jõed kõrvale nihkuma? Samal põhjusel, nagu pöördus pendli võnketasapind või kaldus kõrvale vabalt langev keha. Geograaf ütleb, et kõiki neid nähtusi põhjustab Maa pöörlemine ümber oma telje. Füüsik väidab aga, et siin avaldub Maa kui taustkeha mitteinertsiaalne iseloom. Maa ei ole inertsiaalsüsteem, vaid ta pöörleb inertsiaalsüsteemide suhtes.[22]

Et Maa ei ole inertsiaalsüsteem, see teeb palju tüli geofüüsikutele ja meteoroloogidele. Analoogiliselt jõgedele nihkuvad ka merehoovused ning õhuvoolud kõrvale ja muudavad isegi oma suunda. Kuna siin pole kaldaid takistamas, siis on see kõrvalekaldumine küllaltki suur. Võrrandid, mis kirjeldavad õhumasside liikumist, peavad sisaldama ka Maa pöörlemise kiirusest sõltuvaid liikmeid.

---

[21] Tegelikult esineb ühe kalda uhtumine kõigil jõgedel (välja arvatud mööda ekvaatorit voolavad jõed), kuid eriti märgatav on see nähtus meridiaani sihis voolavate jõgede juures.

[22] Peale Maa pöörlemise on veel teisi põhjusi, mis tingivad Maaga seotud taustsüsteemi mitteinertsiaalsuse. Üks nendest on näiteks Maa tiirlemine ümber Päikese.

Juba ennegi keerulised võrrandid muutuvad seetõttu veelgi raskepärasemateks.

Põhimõtteliselt on inertsiaalsüsteemi leidmine lihtne: tarvitseb vaid üles otsida taustsüsteem, milles Newtoni seadused täpselt kehtivad ning otsitav ongi käes. Praktiliselt pole aga asi nii lihtne. Inertsiaalsüsteemiks võib olla ainult vaba kehaga seotud süsteem. Looduses vabu kehi ei esine, vaid kõik kehad mõjutavad üksteist, olgu see mõju siis nii väike kui tahes. Seega konkreetset inertsiaalsüsteemi looduses näidata on võimatu, küll aga saab alati leida süsteemi, mida antud probleemi uurimisel võib praktilise täpsuse piires lugeda inertsiaalsüsteemiks. See süsteem tuleb alati valida nii, et tema mitteinertsiaalsusest tingitud nähtused on väiksemad kui kasutatavate mõõteriistade täpsus.

Et enamiku maapealsete liikumiste kirjeldamisel võime inertsiaalsüsteemiks lugeda Maad, seda nägime juba eespool. Foucault katse korral, samuti Maa liikumise uurimisel tuleb inertsiaalsüsteem siduda Päikesega.[23] Päikese liikumist võime kirjeldada inertsiaalsüsteemis, mis on seotud kinnistähtedega (kinnistähed loetakse seejuures praktiliselt liikumatuiks), kuid Linnutee pöörlemise uurimisel tuleb kasutada mõeldavat inertsiaalsüsteemi, milleks on Linnutee masskese koos mõeldava kella ja mõeldava mõõdupuuga.

Kõige paremateks inertsiaalsüsteemideks looduses on kahtlemata neutriinodega seotud taustsüsteemid. Neutriino on osake, mille olemasolu ennustas šveitsi füüsik Pauli juba 1933. aastal, kuid mis avastati alles 22 aastat hiljem. Neutriino mass on üliväike: sajad, võib-olla isegi tuhanded korrad elektroni massist väiksem. Neutriinol puudub elektrilaeng ja igasugused magnetilised omadused. Seetõttu võib neutriino paljudest tähtedest ja galaktikatest läbi lennata, ilma et ümbritsev mateeria talle vähimatki mõju avaldaks. Neutriinod liiguvad kõik üksteise suhtes sirgjooneliselt ja muutumatu kiirusega. Seetõttu võib neutriinodega seotud taustsüsteeme suure täpsusega lugeda inertsiaalsüsteemideks.

---

[23] Kui me räägime inertsiaalsüsteemi sidumisest Päikesega, siis jätame alati arvestamata Päikese pöörlemise ümber oma telje. Pöörleva Päikesega seotud süsteemi ei saa kõige jämedamaski lähenduses inertsiaalsüsteemiks lugeda.

10. KLASSIKALISE RELATIIVSUSPRINTSIIBI RAKENDUSI TEHNIKAS

Oleme harjunud meid ümbritseva maailmaga. See tähendab, et iga inimene on omandanud teatava kogemuste pagasi, üks suurema, teine väiksema, mis alati aitab tal otstarbekat käitumisviisi valida. Need elu jooksul saadud kogemused pole aga midagi muud kui looduses valitsevatest seaduspärasustest tulenevad praktilised käitumisjuhised. Tuleb välja, et loodusseadusi tunnevad vähesed — ja needki ainult väikest hulka seadustest —, kuid kogemuste kujul arvestavad neid kõik.

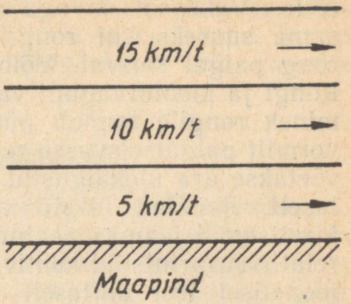
Relatiivsusprintsiip on üks loodusseadustest, mida tuntakse väga vähe, kuid millel on otsustav tähtsus maailma kujundamisel niisuguseks, nagu meie teda tunneme. Võiks esitada lõputu loetelu tegevustest, kus inimesed alateadlikult arvestavad relatiivsusprintsiipi. Peatume järgnevalt mõne lihtsa projekti juures, mis on teostatavad ainult tänu sellele, et looduses valitseb relatiivsusprintsiip.

a) Tuleviku kõnniteed.

Mugav on laskuda eskalaatoril metroosse. Kas ei oleks hea, kui kõik kõnniteed linnas liiguksid nii nagu Moskva allmaaraudtee trepid. Jalakäijal poleks siis vaja ühest kohast teise kõndida, vaid ta võiks rahulikult kõnniteel seista ja ajalehte lugeda. Pole muud muret, kui õiges kohas maha astuda. Halb on ainult, et niisuguse liikuva kõnnitee kiirus ei või olla kuigi suur — 5 kilomeetrit tunnis, mitte enam. Suurema kiiruse korral iga inimene enam kõnniteele hüpata ei julgeks ja selle kasutamise lõbu jääks ainult noorematele. Kuid aeglase kõnniteega liikumine viidab palju aega. Kuidas konstrueerida üldkasutatavat ning kiiret kõnniteed? Vastuse sellele küsimusele annab relatiivsusprintsiip.

Et suurendada kiirust, tuleb ehitada mitmelindiline kõnnitee, nagu on näidatud joonisel 12. Selle põhjal koosneb kõnnitee kolmest samas suunas liikuvast lindist: esimese lindi kiirus maapinna suhtes on 5 kilomeetrit tunnis, teise lindi kiirus 10 kilomeetrit tunnis ning kolmanda lindi kiirus 15 kilomeetrit tunnis. Astumine kõnnitee esimesele lindile on täiesti hädaohutu, sest viimase

kiirus maapinna suhtes on väike. Astunud maapinnalt esimesele lindile, läks jalakäija ühest inertsiaalsüsteemist (maapind) üle teise inertsiaalsüsteemi (lint). Relatiivsusprintsiibi järgi toimuvad aga kõik liikumisnähtused mõlemas inertsiaalsüsteemis täpselt ühtemoodi. Inimese olukord esimesel lindil on täpselt samasugune, kui oli maapinnal. Esimese lindi kõrval liigub teine lint. Maapinna suhtes on selle kiirus küll 10 kilomeetrit tunnis, esimese lindi suhtes aga ainult 5 kilomeetrit tunnis. Järelikult võib inimene ilma hädaohuta üle minna teisele lindile, sealt aga omakorda kolmandale. Kolmandal lindil liigub ta maapinna suhtes juba rahuldava kiirusega — 15 kilomeetrit tunnis. Kui on vajalik veelgi suurem kiirus, tuleb kõnnitee lintide arvu suurendada. Lahkumine niisuguselt liikuvalt kõnniteelt toimub vastupidises järjekorras: kolmandalt lindilt teisele, sealt esimesele ja siis maapinnale.



Joon. 12. Mitmelindilise liikuva kõnnitee skeem. Joonisel on märgitud lintide kiirused maapinna suhtes.

Võib arvata, et tuleviku linnades ehitatakse niisuguseid liikuvaid kõnniteid. Seni on neid kasutatud ainult mõnedel näitustel külastajate jalavaeva kergendamiseks.

b) Rong, mis jaamas ei peatu.

Palju aega kulutab kiirrong jaamades peatumiseks. Palju energiat kulub raske rongi pidurdamiseks jaama jõudmisel ning liikuma panemiseks jaamast lahkumisel. Kuidas neid kadusid vältida? Ainult sel teel, et rong võtab reisijad vagunisse jaamas peatumata. Kujutlege järgmist pilti.

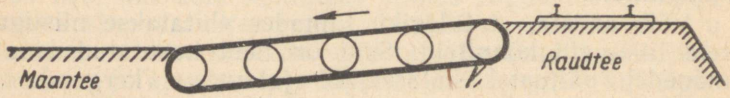
Reisijad, kes soovivad minna varsti mööduvale rongile, astuvad raudteega paralleel-rööbastel seisvasse mootorvagunisse. Jaamas süttib hoiatustuli, mis tähendab rongi lähenemist. Juht käivitab mootori ja vagun hakkab üha kiirenevalt liikuma. Juba jõuabki kihutav rong jaama-

teele. Vahepeal on aga mootorvaguni kiirus kasvanud sama suureks kui rongilgi — vagunist vaadates näib rong paigal seisvat. Võib alustada reisijate üleandmist. Rongi ja mootorvaguni vahele kinnitatakse sild ning ülemineк rongile toimub nüüd sama rahulikult nagu platvormilt paigalseisvasse rongi. Kui kõik reisijad on rongil, võetakse ära ülekäigusild ning mootorvagun peatub aeglaselt. Reisijad läksid vagunisse, ilma et rong oleks tarvitsenud jaamas peatuda. See oli võimalik ainult tänu relatiivsusprintsiibi kehtivusele: reisijad tundsid end sirgjoonelisel teel ühtlaselt liikuvas mootorvagunis täpselt samuti kui jaamaplatvormil. Üleminekul rongi nad võibolla isegi unustasid rongi ning iseenda suure kiiruse maapinna suhtes.

c) Ohutu ülesõit raudteest.

Musta veduri kujutus kollasel kilbil — iga autojuht teab, et see märk on hoiatuseks raudtee-ülesõidu ees. Siin tuleb hoida silmad lahti. Vähimgi tähelepanematus võib põhjustada õnnetuse.

Kuidas ehitada automaatset kaitset katastroofide vältimiseks raudteest ülesõidul, ka selle kohta annab relatiivsusprintsiip näpunäiteid.



Joon. 13. Ohutu ülesõidukoha skeem.

Mootori töö kulub auto liikumapanemiseks teel. Kas tee ise seejuures maapinna suhtes liigub või mitte, see ei ole relatiivsusprintsiibi kohaselt oluline. Kasutades liikuvat maanteed, tuleks ohutu ülesõit siis nii konstrueerida, et ükskõik kui suure kiirusega kihutaval autol poleks võimalik mööduvale rongile läheneda. Seda võib saavutada näiteks järgmiselt.

Raudteele lähenev maantee osa asendatakse laia rullidele paigutatud lindiga. Kui rong läheneb ülesõidukohale, hakkab lint rullidel automaatselt tagasi jooksma. Pole häda, kui autojuht ei märganud liiklusmärki ning kihutab maanteed ületava rongi poole. Lint haarab auto

ja hakkab teda tagasi, raudteest eemale kandma. Kui kiiresti auto ka ei sõidaks, raudteele ta ei lähene. Rongi möödumisel jääb lint seisma ning auto võib raudtee takistuseta ületada.

d) Uute lennukitüüpide sepikojas.

Teadlane töötab uue lennukitüübi konstrueerimisel. Probleeme on palju. Tuleb välja selgitada kõige voolujoonelisem kere kuju, kõige praktilisem kandepinna ristlõige jne. Et kõigile neile küsimustele vastata, tuleb uurida õhukeeriseid, mis tekivad lendava lennuki ümber. Kuidas seda teha? Võiks kinnitada mõõteaparaadid lennuki välispinnale ning teostada sõidu ajal mõõtmisi. See on aga keerukas ja pealegi väga hädaohtlik. Alles lõplikult viimistlemata lennukiga võib kergesti juhtuda avarii...

Jällegi aitab hädast välja relatiivsusprintsiip, mis ütleb: on ükskõik, kas lennuk liigub õhu suhtes või õhk lennuki suhtes. Seepärast võib lendava lennuki õhukeeriste asemel uurida keeriseid, mis tekivad kiires õhuvoolus asetseva lennuki ümber. Lennuk paigutatakse hiigeltoru ette, millest õhk voolab välja sama suure kiirusega, kui peaks olema lennuki kiirus õhus.[24] Kõik keerised tekivad nüüd täpselt samuti kui lendava lennuki ümber, kuid nende uurimine ei paku katsetajale erilisi raskusi. Kirjeldatud seadis, nõndanimetatud aerodünaamiline toru, on lennukikonstruktori ja ka autokonstruktori igapäevaseks abiliseks.

e) Kosmilises lennukis.

Juba lähema sajandi jooksul võib saada teoks inimkonna ammune unistus — lahkuda Maalt ning suunduda teistele planeetidele. Et kosmiline reaktiivlennuk suudaks end Maa külgetõmbe mõju alt lahti rebida, selleks tuleb talle anda väga suur kiirus: otse üles lennates umbes 11 kilomeetrit sekundis. See on üle 30 korra suurem kui kaasaegsete reaktiiv-hävituslennukite kiirus.

---

[24] Praktiliselt kasutatakse väiksema ulatusega õhuvoolu, mille abil uuritakse lennukit osade kaupa.

Oletame nüüd, et looduses relatiivsusprintsiip ei kehti. Kiiresti liikuv lennuk ja maapind ei ole siis samaväärsed süsteemid, s. o. lennukis toimub kehade liikumine teiste seaduste kohaselt kui Maal. See tähendab, et lennukis istuv inimene tunneb lennuki liikumise kiirust. Nii nagu meie organismile mõjub kahjustavalt liiga hele valgus või liiga vali hääl, nii mõjuks siis halvasti ka tavalisest liiga palju erinev kiirus. Võiks väga kergesti juhtuda, et kiirus 11 kilomeetrit sekundis ületaks inimese poolt talutava piiri. Siis ei oleks vähimatki lootust Maalt kunagi lahkuda.

Õnneks ei ole asi nii. Kehtib relatiivsusprintsiip ja selle otseseks järelduseks on, et inimene tunneb ainult kiirendust, mitte aga kiirust. Aegamööda kiirust suurendades (s. o. piirdudes mööduka kiirendusega) võib anda kosmilisele lennukile Maa mõjupiirkonnast väljalendamiseks vajaliku kiiruse. Reisijad kosmilises lennukis tunnevad end seejuures sama hästi kui maapinnal.

11. KLASSIKALISE RELATIIVSUSPRINTSIIBI RAKENDUSI TEOORIAS

Relatiivsusprintsiip osutub tõhusaks abiliseks ka mitmesuguste teoreetiliste küsimuste lahendamisel. Toome selle kohta mõned lihtsad näited.

a) Munakoksimise teooria.

On olemas teooriaid male, bridži, piljardi ja paljude teiste mängude jaoks. Oletame, et ühel heal päeval hakkab keegi looma ka munakoksimise teooriat. Ei maksa muiata. Ka siin võivad teoreetilised kaalutlused anda näpunäiteid vastase muna koore hõlpsamaks purustamiseks. Püstitamegi küsimuse: kumb puruneb kergemini, kas muna, mida lüüakse teise munaga, või muna, millega lüüakse? Arutleda võib siin mitmeti. Hoolikas ning täpne uurija võib üha suurematesse peensustesse tungida. Ta arvestab kõike — nii muna koore võlvikujulist ehitust kui ka osa, mida mängivad munavalge ning rebu põrkehetkel. Ometi pole seda kõike tarvis. Relatiivsusprintsiibi rakendamine lahendab küsimuse lihtsamalt.

Põrget võime uurida inertsiaalsüsteemis, kus esimene muna on paigal ja teine liigub (esimese munaga seotud süsteem), või süsteemis, kus esimene muna liigub ja teine on paigal (teise munaga seotud süsteem). Kuna relatiivsusprintsiibi järgi kõik inertsiaalsüsteemid on samaväärsed, siis on ükskõik, kummas süsteemis munade põrget kirjeldada — tulemus peab olema üks ja seesama. Järelikult ei ole koksimisel oluline, kumb muna liigub, kumb seisab paigal. Pole oluline, kumma munaga lüüakse — puruneb ikka nõrgem.

Rangelt võttes on eelnev arutlus õige ainult sel juhul, kui koksimine toimub õhutühjas ruumis. Vastasel korral mõjub õhu suhtes liikuvale munale õhutakistus, mis küllalt suure kiiruse korral võib muna koore juba enne põrget purustada. Tegeliku koksimise juures õhutakistus siiski märgatavat mõju ei avalda — muna liikumise kiirus on selleks liiga väike.

b) Veel kord Ahhilleusest ja kilpkonnast.

Pöördume tagasi Zenoni apooria juurde, milles püüti tõestada, nagu ei jõuaks välejalgne Ahhilleus kilpkonna kinni püüda. Seekord kasutame selle lahendamiseks aga relatiivsusprintsiipi.

Varem uurisime Ahhilleuse ja kilpkonna liikumist maapinna suhtes, s. o. maapinnaga seotud taustsüsteemis. Nüüd aga läheme üle kilpkonnaga seotud süsteemi. Klassikaline relatiivsusprintsiip ütleb, et kilpkonnaga seotud süsteem on maapinnaga seotud süsteemiga samaväärne.[25] Arutluse tulemus ei sõltu järelikult taustsüsteemist, milles arutlus on läbi viidud.

Kilpkonnaga seotud taustsüsteemi kasutamine tähendab seda, et kõiki kiirusi mõõdame kilpkonna suhtes. Ahhilleuse kiirus maapinnal oli V, kilpkonna kiirus aga v, seega Ahhilleuse kiirus kilpkonna suhtes on $V - v$. Kilpkonna kiirus iseenda suhtes on loomulikult null, s. o. uues taustsüsteemis kilpkonn moodustab lihtsalt liikumatu punkti, milleni tuleb jõuda kiirusega $V - v$ liikuval Ahhilleusel.[26] Kilpkonnaga seotud taustsüsteemi üle-

[25] Kilpkonn liigub eelduse kohaselt ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

[26] Kilpkonna ja Ahhilleuse liikumine kilpkonnaga seotud taustsüsteemis toimub täpselt nii, nagu seda näeks kilpkonna seljas istuv vaatleja.

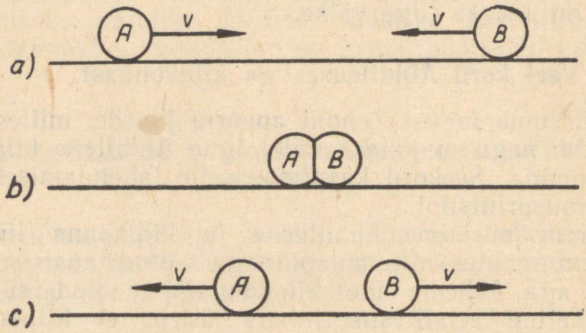
minekuga muutus probleem täpselt samasuguseks, nagu on apoorias «Dihhotoomia»: on tarvis katta tee pikkusega s (Ahhilleuse esialgne kaugus kilpkonnast), kusjuures liikumise kiirus on $V - v$. On ilmne, et selleks kulub aega

$$t = \frac{s}{V - v} \text{ sekundit.}$$

Saime sama tulemuse nagu varemgi. Relatiivsusprintsiip viis meid sama lahenduse juurde, kuid palju lihtsamat teed, kui punktis 5 esitatud matemaatiline arutlus.

c) Elastse põrke seadused.

Kaks võrdmassilist kuulikest lähenevad teineteisele mööda sirgjoonelist teed, mõlema kiirus maapinna suhtes



Joon. 14. Kahe võrdmassilise elastse kuuli põrge.

on v (joon. 14, *a*). Kokkupõrkel jäävad mõlemad kuulid seisma ning puutekohal nende pinnad deformeeruvad (joon. 14, *b*). Kui kuulid on mitteelastsest materjalist, siis sellega kõik lõpebki. Elastsete kuulide korral jäävad sissesurutud pinnad aga vinnastatud vibudena pinge alla. Niipea, kui kuulide liikumine lakkab, võtavad nad tagasi oma esialgse kuju. Sissesurutud pinnad õgvenevad nagu lahtilastud kellavedrud ning kuulid paiskuvad teineteisest eemale sama kiirusega, kui nad lähenesidki. Pärast põrget liiguvad mõlemad kuulid tagasi kiirusega v (joon. 14, *c*).

Niisugune on pilt kahe elastse võrdmassilise kuuli põrkumisel. [27] Sel viisil põrkuvad näiteks kaks piljardipalli või teraskuuli. Kuidas põrkuvad aga ebavõrdsete kiirustega liikuvad elastsed kuulid? Juba hollandi teadlane Huygens näitas, et relatiivsusprintsiibi abil on seda laadi küsimusi lihtne lahendada. Võtame näiteks ülesande. Kuul *A* läheneb paigalseisvale kuulile *B*. Kuidas liiguvad mõlemad kuulid pärast põrget, kui kuuli *A* kiirus enne põrget on $2v$ (eeldame muidugi, et kuulid on võrdmassilised)?

Asudes selle ülesande lahendamisele, kirjutas Huygens: «Kui muutumatu kiirusega liikuva laeva reisija paneb põrkuma kaks võrdset kuuli, mis liiguvad tema enda ja laeva suhtes võrdsete kiirustega, siis põrkuvad nad üksteisest eemale võrdsete kiirustega just nii, nagu see toimub kaldalgi...» Huygens arvestab seega relatiivsusprintsiipi: kahe kuuli põrkumine ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuval laeval toimub samuti kui kaldal. See printsiip annab võtme ülesande lahendamiseks.

Toimugu laeval kiirusega v liikuvate võrdmassiliste kuulide elastne põrge; laev ise liikugu sel ajal kalda suhtes kiirusega v (joon. 15, *a*). Kuulide põrge toimub laeval täpselt samuti, nagu see oleks toimunud kaldal, s. o. pärast põrget kuulid eemalduvad üksteisest, liikudes laeva suhtes kiirusega v (joon. 15, *b*).

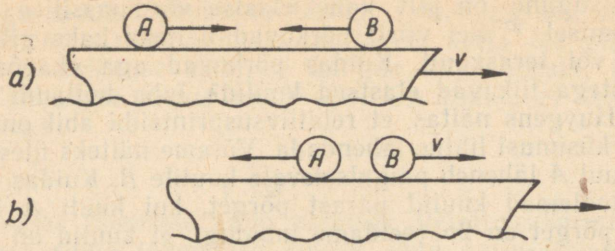
Kaldal seisev vaatleja näeb sama põrget teisiti toimuvat: enne põrget ei liigu kuulike *B* kalda suhtes üldse (sama palju kui laev liigub edasi, läheb kuulike tagasi), kuna kuulike *A* liigub kiirusega $2v$ laeva liikumise suunas.[28] Niisugused olid just meie ülesande lähteandmed. Järelikult jooniselt 15, *b*, kus on esitatud kuulide liikumine pärast põrget, saame välja lugeda ülesande lahenduse. Selleks tuleb ainult vaadata, kuidas liiguvad kuulid maapinna suhtes. On näha, et pärast põrget jääb kuulike *A* maapinna suhtes liikumatuks, kuna kuulike *B* hakkab

---

[27] Kui põrkuvate kuulide massid pole võrdsed, on põrke pilt veidi keerulisem.

[28] Kui on antud kuuli kiirus laeva suhtes ning laeva kiirus maapinna suhtes, siis kuuli kiiruse maapinna suhtes leiame järgmiselt. Kui laev ja kuul liiguvad ühes ja samas suunas, siis tuleb kuuli kiirusele liita laeva kiirus; liikumise suund jääb seejuures endiseks. Kui laev ja kuul liiguvad vastassuundades, siis tuleb suuremast kiirusest lahutada väiksem, kusjuures kuul liigub sinnapoole, kuhu on suunatud suurem kiirus.

TRÜ Raamatukogu



Joon. 15. Kahe võrdmassilise elastse kuuli põrge laeval. Kuulide kiirused on antud laeva suhtes, laeva kiirus aga kalda suhtes.

kiirusega $2v$ paremale liikuma. See ongi ülesande lahendus. Kuul *B*, mis enne põrget näis paigal seisvat, hakkab liikuma kiirusega $2v$, kuna varem liikunud kuul *A* jääb paigale. Liikunud kuul andis põrkel kogu oma kiiruse üle paigalseisvale kuulile ja jäi ise seisma.

Analoogiliselt eelnevale võib lugeja kindlaks teha elastse põrke iseloomu mitmesuguse kiirusega liikuvate võrdmassiliste kuulide vahel. Seejuures avastab ta varsti üldise seaduse: elastsel põrkel võrdmassilised kuulid vahetavad oma kiirused.

12. MISSUGUNE ON KEHA TRAJEKTOOR?

Et igal mehel on oma tõde, see ei ilmne kusagil mujal nii selgesti kui kehade liikumise vaatlemisel.

Jõel liigub aurik. Selle kiirust mõõdavad kaks meest: üks, kes seisab jõe kaldal ning teine, kes istub 60-kilomeetrise tunnikiirusega kihutavas autos. Esimene mõõtjatest väidab, et auriku kiirus on 15 kilomeetrit tunnis, teine saab aga 75 kilomeetrit tunnis. Kummal neist on õigus? Õigus on mõlemal. Kahe mehe erinevatest tõdedest järeldub üldisem tõde: liikumise kiirus on relatiivne suurus.

Relatiivne ei ole ainult liikumise kiirus, vaid nii kummaline kui see esimesel pilgul tundubki, ka keha poolt läbitud tee kuju, s. o. keha trajektoor. Et selles veenduda, kujutlege end istuvat sirgel raudteel muutumatu kiirusega liikuvas rongis. Pillake nüüd vaguni aknast välja raske kivi. Missugust teed mööda liigub kivi maa poole?

Inertsi tõttu jätkab kivi liikumist sama kiirusega kui vagungi, s. o. kivi jääb kogu aeg vaguni akna kohale. Samal ajal langeb ta allapoole. Te näete järelikult, et kivi liigub maa poole *sirgjoonelist* teed mööda. See on rongil istuva mehe tõde. Kas sedasama võib öelda mees, kes seisab raudteetammi kõrval? Tema näeb, et kivi jätkab liikumist rongi liikumise suunas, langedes samal ajal allapoole. Vaguni aknast pillatud kivi liigub samuti nagu horisontaalselt visatud keha — mööda parabooli. Kivi trajektoor on *parabool* — see on raudteetammi kõrval seisva mehe tõde.[29]

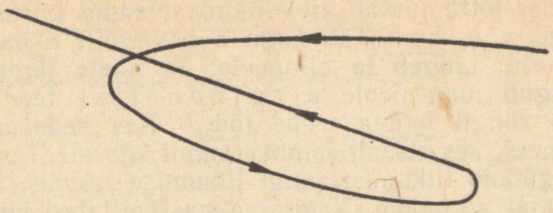
Ei ole mõtet küsida, missugune oli kivi tõeline trajektoor, kas sirge või parabool. Kui esimene mees ütleb, et see oli sirge, on tal õigus. Õigus on ka teisel mehel, kes peab kivi trajektooriks parabooli. Nende seisukohtade näivast vastuolust järeldub üldine tõde: keha trajektoor ei ole absoluutne mõiste. Trajektoorist saame rääkida ainult kui kindla taustkeha suhtes määratud suurusest. Eri taustsüsteemides on trajektooril erinev kuju. Kui rongiga seotud taustsüsteemis on kivi trajektoor sirge, siis maapinnaga seotud taustsüsteemis võib ta väga hästi olla parabool, ja ongi, kui ainult rong maapinna suhtes liigub. Nagu kiirus, nii ka trajektoor on relatiivne suurus. Ta omandab kindla tähenduse alles pärast taustsüsteemi fikseerimist.

Näiteid trajektoori relatiivsuse kohta võib tuua hulgana. Näiteks planeet Marsi tee Päikese suhtes on ellipsikujuline, Maa suhtes on tema tee aga hoopis keerulisem, silmustest koosnev kõver. Joonisel 16 on esitatud Marsi tee poole aasta jooksul, nii nagu see paistab maapealsele astronoomile (Maa ööpäevase pöörlemise mõju pole siin arvestatud). See on Marsi tee Maa suhtes. Just nende silmuste seletamiseks kasutatakse Ptolemaiose süsteemis epitsükleid. Või teine näide.

Maaga seotud taustsüsteemis Maal endal trajektoor puudub (Maa on iseenda suhtes liikumatu), kuna Päikesega seotud süsteemis on Maa trajektoor ellips nii nagu Marsilgi. Näeme, et mõnes taustsüsteemis kehal trajek-

---

[29] Esitatud arutlus oleks täpne sel juhul, kui puuduks õhutakistus. Tegelikkuses kivi trajektoorid maa ja rongi suhtes tulevad sirgest ja paraboolist veidi erinevad. Mingil juhul ei ole nad aga ühesugused kõverad.



Joon. 16. Planeet Marsi tee taevavõlvil Maalt vaadatuna.

toor üldse puudub, kuna teistes taustsüsteemides on see olemas — igas süsteemis eri kujuga.

Trajektoor moodustub ajaliselt üksteisele järgnevatest keha asukohtadest. Seetõttu võib trajektoori relatiivsust nimetada ka asukoha relatiivsuseks.

Keha liikumist iseloomustavatest suurustest kaks — trajektoor ja kiirus — on relatiivsed. Tekib mulje, et vastavalt sellele peaks ka relatiivsusprintsiipe olema kaks: üks neist räägib kiiruse, teine trajektoori relatiivsusest. Tegelikult asi nii ei ole. Arvutused näitavad, et trajektoori relatiivsus on järeldus kiiruse relatiivsusest.[30] Seega piisab liikumise teoorias ainult ühest relatiivsusprintsiibist, s. o. klassikalisest relatiivsusprintsiibist ehk kiiruse relatiivsusprintsiibist.

13. RUUM JA AEG

Keha kiiruse määramiseks on tarvis mõõta tema poolt kindla ajavahemiku jooksul läbitud tee pikkus. Kiiruse määramine toimub seega kaudselt — tegelikult mõõdame pikkuse ruumis ja ajavahemiku. Kiiruse selline iseloom lubab järeldada, et uurides kehade liikumisi ruumis, võime laiendada oma teadmisi ka ruumi ja aja kohta. Tõepoolest, füüsika ajalugu näitab, et ruumi ja aja omaduste väljaselgitamisel on kõikidest teadustest suurima panuse andnud relatiivsusteooria, mis oma sisult on suurel määral suurte kiiruste teooria.

Mida me teame ruumi omadustest? Teame kõike seda, mida õpetab geomeetria. Geomeetria on oma olemuselt

---

[30] Olgu märgitud, et trajektoori relatiivsusest kiiruse relatiivsust ei järgne. Seega trajektoori relatiivsuse printsiibist looduse kirjeldamisel ei piisaks — kiiruse relatiivne iseloom jääks sel juhul arvestamata.

ruumiõpetus. Niisugusel kujul, nagu geomeetriat koolis õpetatakse, arendati see olulises osas välja vanade kreeklaste poolt juba mitusada aastat enne meie ajaarvamist. Euroopas sai kreeklaste geomeetria tuntuks peamiselt Eukleidese koostatud raamatu kaudu. Seetõttu nimetatakse seda geomeetriat ka eukleidiliseks geomeetriaks.

Igapäevase elu kogemused näitavad, et kõigi ruumis teostatavate mõõtmiste korral võime alati julgelt kasutada Eukleidese geomeetria lauseid. Inimesed on tuhandete aastate jooksul loendamatuid kordi mõõtnud kolmnurki ning iga kord veendunud, et kolmnurga sisenurkade summa on 180°, samuti et täisnurkse kolmnurga hüpotenuusi ruut on võrdne kaatetite ruutude summaga (Püthagorase lause). Meid ümbritsev ruum on nähtavasti niisugune, et seal asetsevatel esemetel on täpselt samasugused omadused kui eukleidilise geomeetria kujunditel.

Kaua aega arvati, et ainukeseks võimalikuks geomeetriaks on Eukleidese geomeetria. Selle vaate ekslikkust näitas 1830-ndatel aastatel vene matemaatik N. I. Lobatševski ning temast sõltumatult ungarlane J. Bólyai. Nii rajati uus geomeetria, milles kolmnurga sisenurkade summa on väiksem kui 180°, täisnurkse kolmnurga hüpotenuusi ruut aga suurem kui kaatetite ruutude summa. Paarkümmend aastat hiljem lõi saksa matemaatik B. Riemann jällegi uue geomeetria, milles kolmnurga sisenurkade summa on suurem kui 180°, täisnurkse kolmnurga hüpotenuusi ruut aga väiksem kaatetite ruutude summast.

Mida näitavad meile igapäevase elu kogemused? Ainult seda, et väikeses ruumiosas asetsevate geomeetriliste kujundite omadused on niisugused, nagu nõuab eukleidiline geomeetria. Missugused omadused on aga näiteks hiiglasuurel kolmnurgal, selle kohta ei ütle meie kogemused midagi. Kui õnnestuks mõõta maailmaruumis konstrueeritud hiiglasuure kolmnurga sisenurki, võiks väga hästi välja tulla, et sisenurkade summa pole sugugi 180°, vaid on sellest kas suurem või väiksem. Võiks selguda, et maailmaruumi struktuurile vastab tegelikult Lobatševski või Riemanni geomeetria, mitte aga Eukleidese geomeetria. Vanaaja rahvastel, kes tundsid maakera pinnast ainult väikest osa, tekkis kujutlus Maast kui tasasest kehast. Alles suuremate maakera osade

tundmaõppimine selgitas välja tõe. Analoogiline eksitus võib juhtuda ka ruumi omaduste uurimisel. Seni oleme mõõtmisi toimetanud ainult väikeses osas maailmaruumist. On väga vähe tõenäoline, et andmed, mis me siin oleme saanud, annaksid õige pildi maailmaruumi suurte piirkondade omadustest.

Peame tunnistama, et meie igapäevane ettekujutus ruumist on õige ainult Maa kõige lähemas ümbruses. Mis tuleb kaugemal, selle kohta jääb küsimus esialgu lahtiseks. Ruumi küsimusi vaatame lähemalt käesoleva raamatu eelviimases osas. Asume nüüd aja juurde.

Igapäevases elus oleme harjunud julgesti tarvitama niisuguseid mõisteid nagu «hiljem», «varem» või «samal ajal». Kogemused näitavad, et nendest sõnadest inimestevahelises suhtlemises mingisuguseid arusaamatusi ei teki — kõik saavad neist aru ühtemoodi. Kui üks pealtvaatajatest ütleb, et teatrilaval paremalt esimene baleriin tegi oma sammu teistest veidi hiljem, siis on sellega nõus kõik tähelepanelikud saalisistujad. Ometi pole asi alati nii lihtne.

Kui vaatluspunktis istuv sõdur kuulmise järgi väidab, et suurtükk parempoolses metsatukas tulistas varem kui vasakul olev suurtükk, siis ei ütle see veel midagi laskude tegeliku järjekorra kohta. On väga hästi mõeldav, et hiljem kuuldud pauk tuli lasu juurest, mis tegelikult toimus varem. Heli levib õhus võrdlemisi aeglaselt — ühe kilomeetri läbimiseks kulub tal umbes kolm sekundit. Kui on teada, et vasakule paigutatud suurtükk on vaatluspunktist kaks kilomeetrit kaugemal kui paremal asuv suurtükk, siis lasu kõla esimese juurest vaatlejani levib 6 sekundit kauem kui teise juurest. Kuigi paremalt kostab nüüd lask ühe sekundi võrra varem kui vasakult, on vaatlejale selge, et vasakpoolne suurtükk tulistas tegelikult 5 sekundit varem kui parempoolne suurtükk. Kuidas peaks selle küsimuse lahendama aga lendur, kes suure kiirusega vasakult paremale lendab (oletame, et lennuki mootorid parajasti seisavad ning ei sega lenduril lasu kõla kuulamast)? Eriti keeruliseks läheb asi siis, kui on tegemist kaasaegse hävituslennukiga, mille kiirus ületab hääle kiiruse — lasku vasakpoolselt suurtükilt lendur sel juhul üldse ei kuule. On selge, et lasu kõla järgi ei saa siin midagi otsustada. Aidata võiks ehk silmaga vaatamine: varem saadab oma mürsu välja see suurtükk,

mida lendur näeb varem tulistavat. Häälelaine asemel toob toimunud lasust teate nüüd valguskiir.

Kui maapealsetes tingimustes võib valguskiirt praktiliselt täiesti usaldavaks käskjalaks lugeda, siis kosmilises ruumis toimunud sündmuste järjestuse hindamisel põhjustab ka see segadusi. Võtame näiteks uute tähtede ilmumise. Aeg-ajalt juhtub, et mõni vaevaltmärgatav täheke taevavõlvil hakkab heledalt loitma. Süttis uus täht või noova, nagu sel puhul ütlevad astronoomid. Huvitav nähtus ei kesta kaua. Juba mõne nädala pärast hakkab uue tähe valgus kahanema ja lõpuks on taevavõlvil jällegi ainult vaevaltmärgatav täheke.

Ühest niisugusest uuest tähest, mis süttis 1054. aastal Sõnni tähtkujus, räägivad hiina kroonikad. Süttinud täht olevat oma heleduse poolest olnud võrreldav Jupiteriga. Teisest, 1572. aastal Kassiopeia tähtkujus tekkinud väga heledast noovast teatab Tycho Brahe. Kumb kosmilistest plahvatustest toimus varem, kas Sõnni tähtkujus või Kassiopeia tähtkujus? See on küsimus, millele saame vastata alles siis, kui on teada uute tähtede kaugused Maast. Kui näiteks Kassiopeia uus täht on enam kui 518 valgusaasta[31] võrra kaugemal Sõnni tähtkuju noovast, siis on ilmne, et plahvatus Kassiopeias toimus tegelikult varem kui Sõnnis.

Kuidas aga mõista kaugust uutest tähtedest Maani? Maa liigub ümber Päikese, Päike liigub noovade suhtes, liiguvad ka noovad omavahel. Missugusel hetkel tuleks siin mõõta kaugusi? Kas sel hetkel, kui uued tähed süttivad? Kuid me ei tea sellest süttimisest midagi — näeme seda alles siis, kui valguskiired Maani jõuavad. Väljendus «samal hetkel kui noova süttib», kaotab igasuguse praktilise sisu, sest meil pole mingisugust võimalust süttimise hetke tabada. Teateid sellest saame alles tagantjärele.

Võtame teise näite. Linnutee on hiiglaslik tähesüsteem, milles kõik tähed liiguvad kindlate seaduspärasuste järgi. Liikumise põhjuseks on tähtede vastastikune külgetõmme. Ka meie Päike pole midagi muud kui harilik täht selles süsteemis. Vaadates selgel ööl taevasse, näeme seal

---

[31] Valgusaasta on pikkus, mille läbib tühjas ruumis leviv valgus aasta jooksul. Üks valgusaasta on võrdne 9 460 000 miljoni kilomeetriga.

Linnutee pilti (kõik tähed, mida me taevavõlvil näeme, kuuluvad Linnutee süsteemi). Kuid mis pilt see on! Linnutee äärel olevalt tähelt on valgus meieni tulnud ligi 100 000 aastat — neid tähti näeme järelikult kohal, kus nad asetsesid sada tuhat aastat tagasi. Teisi lähedalolevaid tähti näeme aga kohal, kus nad olid mõne aasta eest. Pilt, mida me taevavõlvil näeme, on tegelikult kokku lapitud erinevatel aegadel teostatud momentvõtetest. Kuid see on ainuke pilt, mida on võimalik Linnuteest saada. Kuidas näeb välja Linnutee süsteem vaatlushetkel, seda ei saa me kunagi otseselt vaadata.[32]

Kirjeldatud raskustest saaks veel üle, kui ei tekiks uusi komplikatsioone. Kui suur on õieti valguse kiirus? Kui täht meile läheneb, kas kiirgab ta siis kiiremini levivat valgust kui meist eemaldumise korral (mõeldud on muidugi meie suunas levivat valgust)? Kuni pole lahendatud need küsimused, ei saa me midagi öelda kosmilises ruumis toimuvate sündmuste ajalise järjestuse kohta.

Näeme, et ka ajaga seotud küsimused vajavad hoolikamat uurimist. Kui mõisted «varem», «hiljem» või «samal ajal» on maapealsete sündmuste vaatlemisel küllalt täpselt rakendatavad, siis kosmilistes mastaapides tekivad ka siin raskused. Nii ruumi kui ka aja omadused vajavad lähemat uurimist. Seda teeb relatiivsusteooria.

14. KLASSIKALINE KIIRUSTE LIITUMISE SEADUS

Lennuk läheneb märklaud-balloonile kiirusega 200 meetrit sekundis. Lennuki kuulipilduja kuuli algkiirus kuulipilduja suhtes on 800 meetrit sekundis. Kui suure kiirusega tabavad kuulid märklauda?

Niisugune ülesanne võiks olla probleemiks ainult esimese klassi õpilasele. Et kuulid tabavad märki kiirusega 1000 meetrit sekundis, see näib olevat iseendastmõistetav tõde, milles on võimatu kahelda. Tõepoolest, kui ettevaatlikud ning umbusklikud me ka ei oleks, ikkagi tuleb tunnistada, et inimkonna kauaaegne praktika kinni-

[32] Olgu märgitud, et kirjeldatud probleemil on ainult põhimõtteline tähendus. Linnutee näiv pilt erineb tegelikust nii vähe, et praktiliselt võime neid ühesugusteks lugeda.

tab niisugust resultaati: kiiruste 200 meetrit sekundis ning 800 meetrit sekundis liitumisel tekib alati kiirus üks kilomeeter sekundis.

Formuleerime selle ilmse tõsiasja matemaatilise valemina. Kui esimese keha kiirus tausta suhtes on u ja teise keha kiirus esimese suhtes — v, siis teise keha kiirus tausta suhtes, mida tähistame w, avaldub järgmiselt:[33]

$$w = u + v. \qquad (1)$$

See valem kannab klassikalise kiiruste liitumise seaduse nime.

Klassikalist kiiruste liitumise seadust rakendavad inimesed nii teadlikult kui ka mitteteadlikult igal sammul. Ka käesolevas raamatus oleme seda kogu aeg endastmõistetavana kasutanud. Seepärast tundub ketserlusena üldse tõstagi küsimust selle seaduse õigsusest. Kui on tarvis liita kiirused 0,2 kilomeetrit sekundis ja 0,8 kilomeetrit sekundis, annab valem (1) liitkiiruse üks kilomeeter sekundis. Kui on tarvis liita kiirused 200 000 kilomeetrit sekundis ja 150 000 kilomeetrit sekundis, saame liitkiiruse 350 000 kilomeetrit sekundis jne. Kus võiks siin eksida?

Kriitiliselt mõtlev inimene on aga ettevaatlikum. Ta ütleb:

«Esimesele nendest tulemustest olen nõus kahe käega alla kirjutama, sest seda kinnitavad looduses teostatud mõõtmised. Teise kohta ei saa ma aga midagi öelda. Ma ei tea, kas tegelikult suured kiirused liituvad samuti kui väikesed. Suurimad kiirused, millega inimene puutub otseselt kokku, on kilomeetri ümber sekundis. Võiksime öelda, et kiiruste liitumise seadus on kontrollitud kiirusteni kuni kilomeeter sekundis. Oletus, et sama seadus kehtib ka tuhandeid kordi suuremate kiiruste liitumisel, ei ole millegagi põhjendatud. Ainult looduses toimetatud mõõtmised saavad siin anda vastuse.»

Klassikaline mehhaanika on töölisele, insenerile ning looduseuurijale ustavaks abiliseks. Selle tundmine lubab ehitada hiiglaslikke laevu ning täpseid tööpinke, võimaldab põllumehel kangi abil suuri kivimürakaid maa seest välja kaaluda ning inseneril võimsaid masinaid ehitada,

---

[33] Valemi (1) kirjutamisel on oletatud, et liidetavate liikumiste suunad ühtivad. Juhtu, kus liikumiste suunad moodustavad omavahel mingisuguse nullist erineva nurga, me siin ei vaata.

mis koristavad samu kive mängides. Kuid siiski on rida küsimusi, nagu näiteks ruumi ja aja probleem või suurte kiiruste liitumise seadus, kus sisseharjunud kujutluste rakendatavus nõuab täiendavat kontrolli. Need on niiöelda lahtised otsad, mille uurimisega tegeleb relatiivsusteooria.

Käsitletud peatükis õppisime tundma mitmesuguseid liikumise omadusi, mis igapäevases elus kahe silma vahele kipuvad jääma. Lõpuks kerkisid esile aga kahtlused. Kas need õigustatud on, seda võib öelda ainult loodus ise. Järgmises peatükis asumegi looduse küsitlemisele.

II

LOODUSEUURIJA LABORATOORIUMIS

Paljude füüsikute arvates on kujuteldamatu, et hilisem katse võiks kunagi midagi muuta mehhaanika vankumatuis printsiipides; ja ometi, mis pärit katsest, seda võib alati parandada katse läbi.

H. Hertz

1. VALGUSE KIIRUS

Galilei raamatust «Vestlused ja matemaatilised tõestused kahest uuest teadusest», mis ilmus 1638. aastal, loeme järgmist.[34]

Sagredo: «Missuguseks ja kui suureks tuleb meil pidada valguse kiirust? Kas valguse kiire liikumine on silmapilkne või võtab see aega nagu teistegi kehade liikumine? Kas me võime seda küsimust katse abil lahendada?»

Simplicio: «Igapäevane kogemus näitab, et valgus levib silmapilkselt, sest kui me vaatame kaugel asuva suurtükiväe tegevust, siis leeki näeme otsekohe, kuna hääl jõuab kõrvu alles mõne aja pärast.»

Sagredo: «Oot-oot, Simplicio, mina saan sellest kõigile tuntud kogemusest järeldada ainult niipalju, et meie kõrvu tulev hääl rändab aeglasemalt kui valgus; see ei ütle veel, kas valgus levib silmapilkselt või, kui kiiresti ta ka ei liiguks, tarvitab siiski aega.»

Salviati: «Nende ja teiste taoliste vaatluste vähene veenvus sundis mind avastama meetodi, mille abil võiks täpselt kindlaks teha, kas valguse levimine on tõepoolest silmapilkne...»

Edasi Salviati hakkab seletama oma eksperimendi põhimõtet:

Kaks meest seisavad pimedal ööl lageda välja vastasäärtel. Mõlemad on varustatud kaetud laternaga. Algab katse. Üks meestest avab oma laterna. Tema sõber, niipea kui näeb valgust, avab silmapilkselt ka oma laterna. Valgus sellest levib esimese mehe juurde tagasi. Viima-

[34] See teos on kirjutatud vestlusena kolme mehe, Salviati, Sagredo ja Simplicio vahel, kusjuures Galilei enda seisukohtade väljendajaks on harilikult Salviati.

sel pole muud tarvis, kui mõõta aeg, mis möödus oma laterna avamisest kuni sõbra laternast tuleva valguskiire kohalejõudmiseni. See on aeg, mis kulus valguskiirel kahe katsetaja vahel edasi-tagasi käimiseks.

Põhimõtteliselt on Galilei esitatud katsekorraldus õige, kuid abinõud selle teostamiseks olid sel ajal liiga primitiivsed. Kirjeldatud viisil saab mõõta ainult katsetajate reageerimiskiirust, mitte aga valguse kiirust, mis on liiga suur nii lihtsal viisil mõõtmiseks.

Huvitav, miks Galilei ei tulnud sellele, et ühe katsetajatest võib asendada peegliga. Siis katsekorraldajal oleks tarvis ainult avada latern ning mõõta aeg, mille jooksul valguskiir liigub peeglini ja sealt tagasi (s. o. aeg, mis on laterna avamise ja peegeldunud valguskiire nägemise vahel). Niisugust meetodit kasutas 1849. aastal prantsuse füüsik Fizeau, kusjuures valgusallika avamine ning katmine toimus ülitäpselt pöörleva hammasratta hammastega. Nii õnnestus Fizeaul esmakordselt valguse kiiruse mõõtmine maapealsetes tingimustes. Astronoomiliste vaatluste põhjal oli valguse kiirus määratud aga juba palju varem.

Valguse kiiruse esimeseks mõõtjaks sai eneselegi ootamatult taani astronoom Ole Rømer. See oli aastal 1675. Rømer koostas Jupiteri kuude varjutuste tabeli eeloleva aasta jaoks. Selles tabelis olid toodud täpsed ajamomendid, millal Jupiteri vari pidi langema mõnele tema neljast kuust.[35] Algul läks kõik hästi. Kuud kadusid Jupiteri varju täpselt neil ajamomentidel, nagu Rømer oli ennustanud. Siis aga hakkasid tulema ebameeldivused. Varjutused hilinesid ikka enam ja enam; poole aasta jooksul kasvas hilinemine kuni 1000 sekundini. Edasi hakkas hilinemine jälle kahanema.

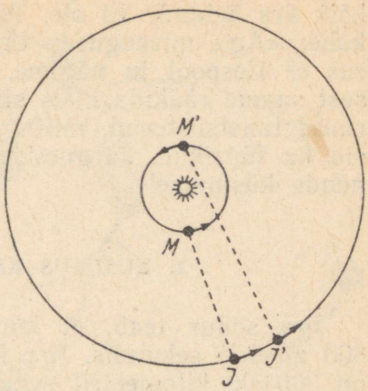
See ebaõnnestumine ei andud Rømerile rahu. Miks osutusid tabelid ebaõigeiks? Ja korraga tuli talle õnnelik mõte: süüdi ei ole arvutused, vaid valgus. Vaatluste alguses oli Maa samal pool Päikest kui Jupitergi. Kuna Jupiter teeb täistiiru ümber päikese ligi 12 aastaga, Maa aga ühe aastaga, siis poole aasta pärast on kaugus Maa ja Jupiteri vahel kasvanud Maa orbiidi läbimõõdu, see on 300 miljoni kilomeetri võrra (joon. 17). Hilinemine

---

[35] Kaasajal on teada 11 Jupiteri kuud, milledest neli on juba hariliku binokli abil nähtavad.

1000 sekundit tuli nähtavasti sellest, et valgus pidi täiendavalt katma need 300 miljonit kilomeetrit. Valguse kiirus peaks seega olema 300 000 kilomeetrit sekundis.[36] Astronoomiliste arvutuste au oli päästetud!

Rømer ei võinud uneski näha, kui olulise avastuse ta oli teinud. Valguse kiirus tühjas ruumis — see on suurus, millele tugineb kogu relatiivsusteooria. Valguse kiiruse arvulist väärtust on hiljem korduvate mõõtmistega järjest täpsustatud. Kaasajal loetakse valguse kiiruseks 299 790 kilomeetrit sekundis (veaga ± 1 kilomeeter sekundis), kuid praktilistes arvutustes võime lihtsuse mõttes valguse kiirust lugeda võrdseks 300 000 kilomeetriga sekundis. Kuna valguse kiirus vaakuumis on erakordselt oluline suurus, siis on seda hakatud tähistama eri tähisega — tähega *c*.



Joon. 17. Valguse kiiruse määramine Rømeri poolt. Joonisel *M* ja *J* tähistavad Maa ja Jupiteri asukohti mingil momendil, kuna *M'* ja *J'* märgivad Maa ja Jupiteri asendeid poole aasta pärast (Maa teeb täistiiru ümber Päikese ühe aastaga, Jupiter aga ligi 12 aastaga). On näha, et poole aasta jooksul on Maa kaugus Jupiterist suurenenud Maa orbiidi läbimõõdu, s. o. 300 miljoni kilomeetri võrra. Selle vahemaa katmiseks kulub valgusel 1000 sekundit; valguse kiirus on seega 300 000 kilomeetrit sekundis.

Teades valguse kiiruse väärtust, saame aru, kui puudulikud olid vahendid, mida Galilei soovitas kasutada valguse kiiruse mõõtmisel. Valgus katab ühe sekundi jooksul vahemiku, mis on 7,5 korda suurem Maa ümbermõõdust. Mõnekilomeetrise tee läbimiseks Galilei katses kulub valguskiirel nii vähe aega, et hariliku kella abil pole seda võimalik mõõta.

Valguse kiirus tühjas ruumis on *c*. Kas sellega on

---

[36] Valguse kiiruse lõplikkust oletas enne Galileid ja Rømerit juba vana-kreeka filosoof Empedocles, samuti inglane Francis Bacon. Sellele vaatamata suhtusid paljud teadlased Rømeri avastusse esialgu umbusklikult.

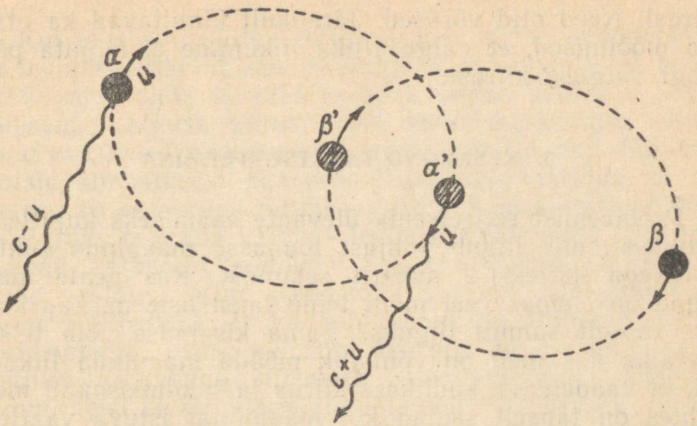
kõik ära öeldud? Ei ole. Tähelepanelik lugeja küsib siin kohe: «Aga missuguses taustsüsteemis on valguse kiirus c? Eespool ju nägime, et kiiruse arvulisest väärtusest saame rääkida alles siis, kui oleme eelnevalt fikseerinud taustsüsteemi, milles kiirust mõõdame.» Nii küsisid ka füüsikud. Järgnevalt näemegi, milline oli vastus nende küsimusele.

2. KÜSIMUS KAKSIKTÄHTEDELE

Iga sõdur teab, et kuulipilduja kuuli algkiirus on 800 meetrit sekundis. Iga füüsik teab, et valguse kiirus on 300 000 kilomeetrit sekundis. Kuulipildur võib lisaks veel rääkida, et kuuli algkiirus on mõõdetud just kuulipilduja, mitte aga märklaua või mõne teise keha suhtes. Seda peetakse silmas näiteks hävituslennukite juures, kus kuulipildujad paigutatakse lennuki ninasse. Kuulipilduja rauast väljuva kuuli algkiirusele liitub nii veel lennuki kiirus — kaasaegsetel reaktiivhävitajatel on see 300 kuni 400 meetrit sekundis — ja kuuli läbilöögijõud kasvab märgatavalt.

Meil kui füüsikutel ei ole sellele tiraadile midagi esialgu vastu panna. Kuulipilduril on kõik kuuli liikumisse puutuv selge, meie aga alles otsime tausta, mille suhtes valguse kiirus oleks 300 000 kilomeetrit sekundis. Kas siin ei saaks ära kasutada kuulipilduri kogemusi? Võib-olla, et valgusallikas on omamoodi kuulipilduja, mis saadab välja valgust algkiirusega c. Sel juhul peaks valguse kiirus sõltuma valgusallika liikumiskiirusest. Kas see on nii? Vastuse sellele küsimusele annavad kaksiktähed.

Joonisel 18 on kujutatud kaksiktäht, mille komponent asendis α eemaldub Maast parajasti kiirusega u ning kiirgab samal ajal enda suhtes kiirusega c levivat valgust. Maa poole hakkab valguslaine levima siis kiirusega $c - u$ (vt. klassikalist kiiruste liitumise seadust). Mõne aja pärast jõuab tähekomponent asendisse α'; sealt saadab ta meile valgust, mis levib Maa poole kiirusega $c + u$. Teise valguslaine kiirus on suurem kui esimesel. Küllalt pikal teel võib nii juhtuda, et teine laine püüab esimese kinni ja läheb sellest mööda. Kui Maa peale jõuab teine valguslaine enne esimest, siis näeme tähe-



Joon. 18. Kui valguse kiirus sõltuks valgusallika kiirusest, siis asendis α saadaks tähekomponent Maa poole kiirusega $c - u$ levivat valgust, asendis α' aga kiirusega $c + u$ levivat valgust. Laineline joon tähistab valguse levimise suunda.

komponenti taevas enne kohal α', seejärel alles kohal α. Veelgi enam. Võib juhtuda isegi niisugune kurioosum, et üks ja sama tähekomponent on näha mõnikord kahes kohas korraga. Niisuguseid «täheviirastusi» ega muid korrapäratusi kaksiktähtede liikumises märgatud ei ole. Tähekomponendid liiguvad täpselt nii, nagu teoreetilised arvutused ennustavad. Järelikult valguse kiirus ei sõltu valgusallika liikumise kiirusest. Valgusallikas nähtavasti ei ole selleks taustkehaks, mille suhtes valguse kiirus on c.

Hiljuti õnnestus teostada mõõtmisi, mis otseselt kinnitasid valguse kiiruse sõltumatust valgusallika liikumisest.

On teada, et Päike pöörleb suure kiirusega ümber oma telje. Tema pinna kiirus ekvaatoril on 1,95 kilomeetrit sekundis.

See tähendab, et päikeseketta üks äär ligineb meile selle kiirusega, teine aga eemaldub. Kui nüüd oletada, et valgusallika liikumine avaldab mõju valguse kiirusele, siis kiir päikeseketta ühelt äärelt peaks Maa suhtes kiiremini liikuma kui kiir ketta teiselt äärelt. Erilise teravmeelse meetodi abil, mille idee pärineb S. I. Vavilovilt, võrreldi päikeseketta vastasäärtelt tulevate valguskiirte

kiirusi. Need olid võrdsed. Järelikult kinnitavad ka otsesed mõõtmised, et valgusallika liikumine ei mõjuta põrmugi valguse kiirust.

3. KESKKOND TAUSTSÜSTEEMINA

Probleemist reljeefsema ülevaate saamiseks kujutleme kuulikest, mis liigub põhjast lõunasse maapinna suhtes kiirusega näiteks 2 meetrit sekundis. Kas peale maapinna on olemas veel mõni teine taustsüsteem, kus kuulike täpselt samuti liiguks? Sama küsimuse võib teisiti asetada: kas meil on võimalik mööda maapinda liikuda nii, et vaadeldava kuulikese kiirus ja liikumissuund meie suhtes on täpselt samad kui maapinnal istuva vaatleja suhtes? Selgub, et ei ole. On olemas ainult üks taustsüsteem, milles kuulikesel on lõunasuunaline kiirus suurusega 2 meetrit sekundis. See on maapinnaga seotud süsteem.

Asume nüüd valguse juurde. Loomulikult oodati ka siin, et on olemas a i n u l t üks taustsüsteem, milles valguse kiirus on kõigis suundades täpselt c, kuna kõigis teistes süsteemides peab olema tema kiirus sellest erinev. Eelmises punktis püstitasime oletuse, et selleks üheks süsteemiks on valgusallikaga seotud taustsüsteem. Sel juhul oodati valguse kiiruse sõltuvust valgusallika liikumisest. Kaksiktähtede vaatlused seda ootust ei kinnitanud. Valgusallikas nähtavasti otsitavaks taustsüsteemiks ei ole. Aga võib-olla on selleks taustsüsteemiks keskkond, kus valgus levib.

Igasuguses materiaalses keskkonnas levib valgus väiksema kiirusega kui c. Näiteks vees on valguse kiirus 225 000 kilomeetrit sekundis, klaasis 200 000 kilomeetrit sekundis jne. Arvu, mis näitab, mitu korda valguse kiirus antud keskkonnas on väiksem valguse kiirusest vaakuumis, nimetatakse vastava keskkonna murdumisnäitajaks ja tähistatakse tähega n. Nii on vee murdumisnäitaja $n = 4/3$ (s. o. 1,333), klaasi murdumisnäitaja $n = 3/2$ (s. o. 1,5) jne. Tühja ruumi murdumisnäitajat tuleb lugeda võrdseks arvuga 1; õhu murdumisnäitaja on praktiliselt sama suur (täpsemini 1,00029). See tähendab, et tühjas ruumis ja praktiliselt ka õhus levib valgus kiirusega c.

Kui taustaks, mille suhtes valguse kiirust mõõdetakse, on levimiskeskkond, siis muidugi ei saa oodata, et mõõtmistulemus oleks c, vaid ta peab olema sellest n korda väiksem. Valguse kiirus tema levimiskeskkonna suhtes on $c' = c/n$ — niisugune oli oletus, mille abil füüsikud lootsid kimbatusest pääseda. Tuleb aga märkida, et see oletus viis omakorda mitmesugustele komplikatsioonidele.

Kuidas seletada valguse levimist vaakuumis, kus igasugune keskkond puudub? Sellele küsimusele polnud raske vastata. Kuni käesoleva sajandi algusaastateni uskusid füüsikud, et ka tühi ruum on täidetud erilise keskkonnaga, mille murdumisnäitaja on 1. Seda hüpoteetilist keskkonda nimetati maailmaeetriks. Valgust, samuti teisi elektromagnetilisi laineid [37] loeti siis lihtsalt eetri lainetuseks. Veel tänapäevalgi räägivad raadiomehed näiteks eetrisse saadetud muusikast. See on kõnekäänd, mis pärineb ajast, kui füüsikud veel maailmaeetrit tõsiselt võtsid.

Maailmaeetriga oli üldse raskusi. Ilma selleta füüsikud kuidagi läbi ajada ei osanud, kuid teiselt poolt viis selle kasutamine loodusnähtuste seletamisel järjest uutele raskustele. Pöördume näiteks kas või eespool kirjeldatud taustsüsteemi otsingute juurde tagasi. Lihtne ning loomulik oli oletada, et taustsüsteemiks, milles valgus levib igas suunas ühe ja sama kiirusega $c' = c/n$, on levimiskeskkond (see tähendab, et taustsüsteemiks, milles valgus levib vaakuumis kiirusega c, on maailmaeeter). See oletus viis aga otsekohe kummalistele järeldustele.

Kujutleme kahte ühesugust, teineteise suhtes liikuvat gaasilist keskkonda. Tehtud oletuse kohaselt peab valguse kiirus mõlema keskkonna suhtes olema üks ja seesama c' (keskkonnad on ju ühesugused). Oletame nüüd, et valguskiir läheb ühest keskkonnast teise. Mida näeb selle juures kõrvaltvaataja?

---

[37] Valguseks nimetatakse ainult niisugust osa elektromagnetilistest lainetest, mille lainepikkused on 390 ja 770 millimikroni vahel. Pikemad lained kannavad nimetust infrapunane kiirgus ning veelgi pikemad (alates millimeetri murdosast) — raadiolained. Valgusest lühema lainepikkusega on ultravioletne kiirgus ning röntgenikiirgus. Veel väiksema lainepikkusega on radioaktiivsete ainete gammakiirgus. Kõige lühemad elektromagnetilised lained, mida me tunneme, tekivad õhkkonnas kosmiliste kiirte mõjul. Nende lainepikkus võib olla alla miljardiku X-ühiku (X-ühik on üks kümnemiljondik meetrit).

Kujutlege, et sõidate mootorpaadiga järvel, kusjuures paadi kiirus vee suhtes jääb kogu aeg muutumatuks. Paat läheneb järve suubuva jõe suudmele. Niipea, kui jõest tulev veevool haarab paadi ja hakkab seda kaasa kandma, näeb kaldal olija, et paadi kiirus muutus äkki, paat muutis nii oma liikumise suunda kui ka kiirust. Täpselt samasugune asi peaks juhtuma valguskiire üleminekul ühest keskkonnast teise. Teine keskkond, mis esimese suhtes liigub, viib valguskiire endaga kaasa. Kõrvaltvaataja näeb, et keskkondade lahutuspinnal valguse kiirus äkki muutub. Toimub valguse kiiruse hüpe, mille suurus, olgu märgitud, ei olene keskkondade tihedusest, vaid ainult ühe keskkonna kiirusest teise suhtes.

Hakkame nüüd keskkondi hõrendama. Valguse kiiruse hüpe lahutuspinnal seejuures ei muutu. Nii jõuame lõpuks olukorrani, kus mõlema keskkonna asemel on tühi ruum, valguse kiiruse hüpe jääb aga ikka endiseks. Tühjas ruumis leviv valgus muudab ilma igasuguse põhjuseta oma kiirust ja levimissuunda. Niisugune absurdne tulemus näitab, et meie oletus ei saa olla õige. Taustsüsteemiks, milles valgus levib igas suunas ühesuguse kiirusega c', ei saa olla levimiskeskkond.

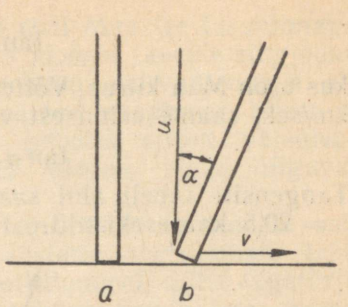
Siiski, ettevaatus on tarkuse ema. Lõplikku otsust niisuguse loogilise arutluse põhjal veel ei maksa teha. Võib-olla, et me kusagil eksisime. Lõpliku otsuse selle kohta, kas otsitavaks taustsüsteemiks on levimiskeskkond või ei, saab anda ainult loodus ise. Järgnevalt vaatame mõningaid konkreetseid katseid, mis võeti ette selle küsimuse lahendamiseks.

4. TÄHTEDE ABERRATSIOON

1727. aastal märkas inglise astronoom James Bradley, et kõik kinnistähed liiguvad mööda väikesi ellipseid, tehes täpselt aasta jooksul täistiiru. Seda nähtust hakati nimetama tähtede aastaseks aberratsiooniks. Aberratsiooni uurimisel ilmnes huvitav nähtus: ükskõik kui kaugel täht meist ka asetseb, ikka joonistab ta taevavõlvil ellipsi, mille pikem läbimõõt paistab meile 41 kaaresekundi suuruse nurga all. Ellipsi lühem läbimõõt sõltub aga tähe asendist: mida väiksema nurga moodustab tähelt

tulev valguskiir Maa tee tasapinnaga, seda piklikum on ellips. Kuidas seda kõike seletada?

Valmistage vett-imavast paberist kaks pikka põhjaga varustatud toru. Tuulevaikse ilmaga, kui juhtub sadama tugevat ning ühtlast hoovihma, tehke järgmine katse: üks torudest asetage püsti maapinnale, teine aga pange horisontaalsuunas kiiresti liikuma, nii et ta püsiks seejuures täpselt püstasendis nagu esimenegi toru. Seejärel võite veenduda, et esimese toru põhi on märg, teise oma aga täiesti kuiv. Kuidas seda seletada? Olid ju mõlemad torud täpselt paralleelsed. Miks siis paigalseisvas torus vihmapiisad langesid põhjani, liikuvas aga mitte? Lähem järelemõtlemine annab küsimusele lihtsa vastuse.



Joon. 19. Selleks, et otse ülalt alla langevad vihmapiisad jõuaksid toru põhjani, tuleb paigalseisvat toru a hoida täpselt vertikaalselt, liikuvat toru b aga liikumise suunas kallutatuna. Kui toru liikumise kiirus maapinna suhtes on v ja vihmapiiskade langemise kiirus u, siis liikuva toru kaldenurk α avaldub järgmise valemi kaudu:

$$\tan \alpha = \frac{v}{u}.$$

Liikuvasse torusse kukkunud vihmapiisk jätkab langemist toru põhja poole. Samal ajal toru liigub kõrvale ning veel enne, kui piisk jõuab põhjani, põrkab ta vastu toru külge ja neeldub seal. Nii ei jõua ükski vihmapiisk liikuva toru põhjani. Kui tahate, et ka liikuva toru põhi saaks märjaks, tuleb toru hoida liikumise suunas veidi kallutatuna (joon. 19).

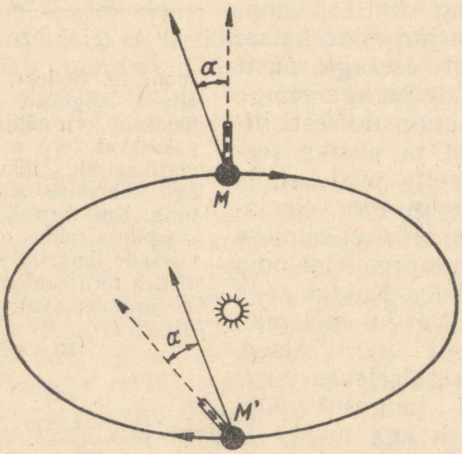
Analoogiliselt saame seletada tähtede aastast aberratsiooni. Tähele suunatud pikksilm asetseb Päikese suhtes kiirusega 30 kilomeetrit sekundis liikuval Maal. Pikksilm on seega liikuva toru osas, kuna vihma rolli mängib tähelt tulev valgus. Kui me suuname pikksilma täpselt tähele, siis valgus neeldub pikksilma seinas enne vaatleja silma jõudmist. Et pikksilma langenud valgus jõuaks okulaarini, on vaja pikksilma Maa liikumise suunas veidi kallutada. Kaldenurk α sõltub seejuures Maa kiiruse ja valguse kiiruse suhtest:

$$\tan \alpha = \frac{v}{c},$$

kus v on Maa kiirus. Võttes $v = 30$ km/sek ja $c = 300\,000$ km/sek, saame eelmisest valemist:

$$\tan \alpha = 0{,}0001.$$

Tangensite tabeli abil saame nüüd leida nurga α, s. o. $\alpha = 20{,}5$ kaaresekundit.



Joon. 20. Tähtede aastase aberratsiooni tekkimine. *M* ja *M'* tähistavad Maa asendeid käesoleval hetkel ning poole aasta pärast. Pidev nool näitab tegelikku suunda tähele, punktiirnool aga suunda tähe näivasse asukohta. Nurk α nende suundade vahel on joonisel tugevasti suurendatud, tegelikult peab ta olema 20,5 kaaresekundit.

Eelnevast järeldub, et me näeme kõiki tähti taevavõlvil Maa liikumise suunas 20,5 kaaresekundi võrra nihutatuna.[38] Sedamööda, kuidas muutub Maa liikumise suund, tuleb muuta ka pikksilma kaldenurka. Nii tekib mulje, nagu muutuks tähe koht taevavõlvil. Kui tähelt

[38] Tuleb märkida, et Maa liikumine koos Päikesega teiste kinnistähtede suhtes põhjustab täiendavat aberratsiooni. Kuna aga Päikese liikumise suund on praktiliselt kogu aeg muutumatu, siis ka sellest liikumisest tingitud pikksilma kaldenurk on kogu aeg konstantne. Niisugusest konstantsest aberratsioonist me käesolevas ei huvitu.

tulevad valguskiired langevad risti Maa tee tasapinnaga, siis täht näib joonistavat aasta jooksul taevale ringjoone, mis paistab meile 41 kaaresekundilise vaatenurga all. Kui kiired tähelt kulgevad Maa tee tasapinnas, siis näib täht mööda 41 kaaresekundi pikkust sirget võnkuvat. Kõik vahepealsetes asendites olevad tähed liiguvad mööda ellipseid.

Bradley vaatlustulemuste teoreetiline seletamine osutus päris lihtsaks: tähtede aastane aberratsioon tekib Maa kiiruse ja valguse kiiruse liitumisel, mille tagajärjel valguse suund muutub. See seletus annab aga surmahoobi lootusele lugeda valguse levimiskeskkonda otsitavaks taustsüsteemiks. Kui valguse kiirus oleks olnud c Maa atmosfääri suhtes [39], mis on antud juhul keskkonnaks, kus valgus levib, siis ei oleks Maa kiirus kuidagi saanud liituda valguse kiirusega — Maa atmosfäär liigub ju Maaga koos.

Tähtede aastane aberratsioon näitab, et taustsüsteemiks, milles igas suunas leviva valguse kiirus oleks c', ei ole levimiskeskkond. See on ootamatu tulemus. Veelgi kummalisematele järeldustele viis Fizeau' katse.

5. FIZEAU' KATSE

Teadlased tuletavad mõnes suhtes meelde väikesi lapsi: kunagi ei tüdine nad looduse küsitlemisest ning usutlemisest. Kõrvaltvaatajale näib asi ammugi selge olevat, nemad aga pärivad ikka veel edasi. Iga uus eksperiment on küsimus loodusele. Kuidas viimane ka ei põikleks, varem või hiljem on ta sunnitud midagi «välja lobisema».

Tähtede aastase aberratsiooni nähtus ütles küll, et levimiskeskkonna liikumine ei mõju valguse kiirusele (s. o. keskkond oma liikumisel ei vii kaasa temas levivat valgust), kuid füüsikud ei jäänud sellega veel rahule. Aga kui valguse kaasaviimine maakera õhkkonna poolt on millegipärast nii väike, et seda pole võimalik mõõta? Tuleks uurida, kuidas toimub valguse kaasaviimine tihedamates keskkondades. Fizeau' katse eesmärgiks oligi välja

[39] Eespool märkisime juba, et õhu murdumisnäitaja on praktiliselt võrdne arvuga 1, s. o. õhus liigub valgus kiirusega c.

selgitada, kas voolav vesi viib valguskiire kaasa või mitte.

Valguse kiirus paigalseisvas vees on c/n, kus n tähistab vee murdumisnäitajat. Kui nüüd panna vesi kiirusega v voolama, kas valguse kiirus maapinna suhtes jääb siis endiseks või mitte? Sellele küsimusele pidi andma vastuse 1850. aastal Fizeau' poolt korraldatud katse. Kui vesi viib kaasa seal leviva valguse, siis valguse kiirus maapinna suhtes, mida tähistame tähega w, peaks olema

$$w = c/n + v.$$

Kui vesi valguslainet kaasa ei vii, siis vee liikumine valguse kiirusele mõju ei avalda ning

$$w = c/n.$$

Kumba neist valemitest kinnitab katse?

Fizeau' laskis valguskiirel liikuda nii vastu kui pärivoolu ning rakendas seejuures reakordselt täpseid mõõtmismeetodeid. Tulemus oli

$$w = c/n + v(1 - 1/n^2).$$

Voolav vesi viis valguse ainult osaliselt kaasa.[40]

Maailmaeetri hüpoteesi seisukohalt oli Fizeau' katse tulemus hästi seletatav; õieti öelda oli niisugust tulemust Fresnel juba varem ennustanud. Fresnel oletas, et materiaalsetes kehades on eetri tihedus suurem kui tühjas ruumis. Kui keha eetris liigub, siis voolab eeter selle esipinnast kehasse, tagapinnast aga väljub. Toimub eetri läbivool kehast. Seejuures on eetri voolu kiirus kehas väiksem keha liikumise kiirusest välise eetri suhtes.

Skitseerime lühidalt Fresneli arutluse matemaatilist külge.

Olgu eetri tihedus vees ϱ_v, eetri tihedus tühjas ruumis aga ϱ. Kui nüüd oletada, et valgus on eetri ristlainetus, siis peab vee murdumisnäitaja n vaakuumi suhtes avalduma eetri tiheduste kaudu järgmiselt:

$$n = \sqrt{\frac{\varrho_v}{\varrho}}. \qquad \text{(a)}$$

[40] Vee murdumisnäitaja n on suurem kui 1, s. o. suurus $1 - 1/n^2$ on väiksem kui 1. Fizeau' katse näitas seega, et valguse kiirusele c/n ei liitu vee kiirus v, vaid ainult osa sellest: $v(1 - 1/n^2)$. Seepärast ütlemegi, et voolav vesi viib valguse osaliselt kaasa. Tegurit $1 - 1/n^2$ nimetatakse kaasaviimise koefitsiendiks.

Olgu märgitud, et Maa õhkkond viib ka tähelt tuleva valguskiire osaliselt kaasa. Siin on see efekt aga nii väike (kaasaviimise koefitsient on peaaegu null), et kaasaegse mõõtmistäpsuse juures pole seda võimalik avastada.

Kujutleme nüüd, et kuup servapikkusega 1 cm on täidetud veega ja liigub oma ühe tahu suunas eetri suhtes kiirusega v. Siis ühe sekundi jooksul kuubi esipinnast sissevoolava eetri hulk on $v\varrho$.

Eetri kiiruse veega täidetud kuubis tähistame V. See tähendab, et ühe sekundi jooksul läbi kuubi ristlõike voolava eetri hulk on $V\varrho_v$ kus ϱ_v on eetri tihedus veega täidetud kuubis. On selge, et sekundi jooksul kuupi sissevoolava eetri hulk peab olema sama suur kui kuubi ristlõiget sekundi jooksul läbiva eetri hulk, s. o.

$$V\varrho_v = v\varrho.$$

Siit saame

$$V = \frac{\varrho}{\varrho_v} v,$$

mille valemi (a) abil võime kirjutada

$$V = \frac{v}{n^2}.$$

Saime avaldise, mis määrab veega täidetud kuubis oleva eetri kiiruse vee suhtes. Vees oleva eetri kiirus ümbruskonnas oleva eetri suhtes on siis

$$v - V = v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

Saadud valemit võime nüüd rakendada Fizeau' katse tulemuse seletamisel.

Eetri suhtes valgus liigub kiirusega c/n. Kui vesi hakkab valguse levimissuunas kiirusega v liikuma, viib ta eetri kaasa kiirusega $v(1 - 1/n^2)$. Seega valguse kiirus voolavas vees peab olema

$$w = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right),$$

nagu näitas ka Fizeau' katse.

Fresneli teooria järgi viib liikuv keskkond eetri, seega ka seal leviva valguse osaliselt kaasa. Kui intensiivne see kaasaviimine on, sõltub kaasaviimise koefitsiendist $1 - 1/n^2$. Tihedal keskkonnal, mille murdumisnäitaja n on suur, on ka kaasaviimise koefitsient suur. Tihe keskkond kisub eetrit tugevasti kaasa. Vastupidi, mida enam läheneb keskkonna murdumisnäitaja arvule 1 (s. o. mida hõredamaks muutub keskkond), seda nõrgemaks muutub eetri kaasakiskumine liikuva keskkonna poolt.

Eetri osalise kaasaviimise abil on lihtne lahendada eelkirjeldatud paradoksi, mis tekkis kahe üksteise suhtes liikuva keskkonna hõrendamisel. Mida hõredamaks muutuvad keskkonnad, seda nõrgemini viivad nad eetrit kaasa. Lõpuks, kui keskkondade asemel on praktiliselt

tühi ruum, ei toimu ka enam mingisugust eetri kaasaviimist. Eeter on igal pool paigal, ning mingisugust kiiruse hüpet seal levival valgusel olla ei saa.

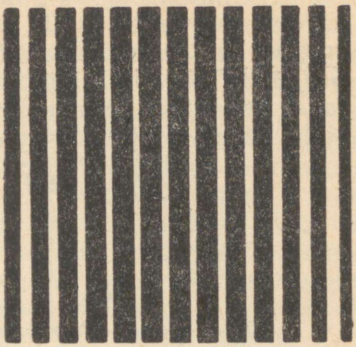
Eetri hüpotees koos Fresneli oletusega eetri osalisest kaasaviimisest liikuvate kehade poolt näis esimesel pilgul lahendavat kõik raskused. Otsitavaks taustsüsteemiks, milles valguse kiirus ei sõltu levimissuunast, osutus maailmaeeter. Kuid teiselt poolt maailmaeetri enda teooria loomine ebaõnnestus täielikult. Et kirjeldada valguse levimist eetris, tuli eetri omadused lugeda ühtelangevaks tahke keha omadustega. Kuid on ju täiesti võimatu, et näiteks ümber Päikese tiirlevad planeedid liiguvad tahkes kehas! Väljapääsu olukorrast otsiti küll ühel, küll teisel teel. Nii näiteks oletati, et maailmaeeter on pigiga analoogiline keskkond. On teada, et pigi võib aeglaselt voolata. Kui asetada pigitükile haavel, siis mõne kuu möödumisel on haavel sukeldunud pigisse nagu vedelikku. Samas aga äkilise löögi mõjul puruneb pigitükk nagu tahke keha. Nii oletatigi, et ka eeter aeglaste liikumiste suhtes (nagu näit. Maa liikumine ümber Päikese) käitub nagu vedelik, samal ajal kui kiire võnkumise (näit. valguse levimine) korral on tal tahke keha omadused. Ei aidanud aga füüsikuid see ega teisedki teravmeelsed oletused. Eetri hüpoteesi omaksvõtmine viis füüsikud umbtänavasse. Peale kõige muu oli eetri hüpotees vastuolus veel klassikalise relatiivsusprintsiibiga.

6. MICHELSON-MORLEY KATSE

Klassikaline relatiivsusprintsiip väitis kõigi inertsiaalsüsteemide samaväärsust. Eetri hüpoteesi tunnistamine sunnib meid nüüd seda seisukohta järgmiselt korrigeerima.

Valguse levimise uurimisel tühjas ruumis võime kõigi inertsiaalsüsteemide hulgast alati eraldada eetriga seotud süsteemi, s. o. süsteemi, milles valguse kiirus on sõltumatult suunast täpselt *c*. Nimetame seda süsteemi absoluutseks taustsüsteemiks. Absoluutne ruum, mille me eespool kui sisutu mõiste kõrvale heitsime, omandab nüüd jälle konkreetse tähenduse. See on ruum, milles maailmaeetri kiirus on null.

Absoluutses ruumis on valguse kiirus sõltumatult levimissuunast c. Oletame nüüd, et Maa liigub absoluutse ruumi suhtes kiirusega v. Järelikult, kui valgus levib Maa liikumise suunas, siis peaks tema kiirus Maa suhtes olema $c - v$, kui ta levib aga Maa liikumisele vastassuunas, tuleks oodata Maa suhtes kiirust $c + v$. Eri suundades levival valgusel on Maa suhtes erinev kiirus. Just sellele rajasid oma lootused A. Michelson ja E. Morley 1887. aastal korraldatud katses.[41] Et kindlustada suurt mõõtmistäpsust, kasutasid nad erilist meetodit, mis tugineb valguse interferentsi nähtusel.



Joon. 21. Valguse interferentsjooned.

Valgus on samasugune lainetusnähtus nagu teisedki elektromagnetilised lained. Kui jagada valguskiir kaheks eri suundades levivaks kiireks ning pärast teatava vahemaa katmist viia need peeglite abil jälle kokku, siis võib juhtuda, et kiirte võnkumised ei ole enam omavahel kooskõlas: ühe kiire lained hakkavad teise kiire laineid summutama. Kahe valguskiire kokkusattumisel võivad mõlemad sel viisil hävida, nii et tekib pime koht. Samas kõrval aga võivad kiirte võnkumised omavahel kooskõlas olla ja üksteist tugevdada. Niisuguses kohas näeme eriti heledasti valgustatud laiku. Joonisel 21 on esitatud interferentspilt, mis on saadud eelkirjeldatud viisil.[42]

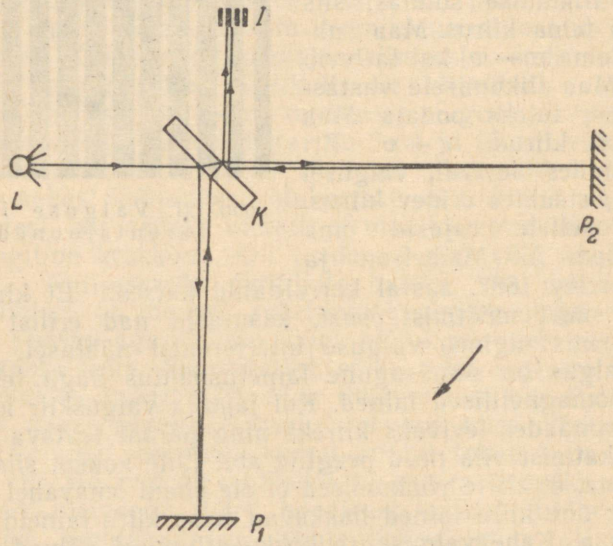
Interferentspildi kuju on väga tundlik kõige väikse-

---

[41] Kuus aastat varem oli sama katse korraldanud A. Michelson üksinda, kuid väiksema täpsusega.

[42] Olgu märgitud, et joonisel esitatud interferentspildi saab ainult ühevärvilise valguse kasutamisel. Liitvalguse (näiteks päikesevalgus) korral interferentspilt koosneb mitmevärvilistest ribadest. Igaüks on näinud, kuidas läigib mitmevärviliselt seebimull või veepinnal asetsev õhuke õlikiht. Tegelikult ei ole värviline õli ise, vaid värvilised laigud tekivad valguse interferentsist: õlikihi alumiselt pinnalt peegeldunud valgus liitub õlikihi ülemiselt pinnalt peegeldunud valgusega. Interferentsnähtuste kasutamisel teaduslike mõõtmiste juures rakendatakse alati ühevärvilist valgust.

malegi muutusele valguskiire levikutingimustes.[43] Ühel kiirtest tarvitseb ainult õige veidi aeglustada oma liikumist, kui interferentspilt muutub juba üsna tunduvalt. Seejuures on pildi muutuse järgi võimalik välja arvutada, kui palju vähenes valguskiire kiirus. Sellele rajasidki Michelson ja Morley oma katse (joon. 22).



Joon. 22. Michelson-Morley katseseadme skeem.

[43] Interferentspildi sõltuvust kiirte levimistingimustest võib kergesti märgata valguslainetest pikemate elektromagnetiliste lainete, nimelt lühikeste raadiolainete juures. Lühikesed raadiolained levivad saatjast vastuvõtjani kahte erinevat teed mööda: üks raadiolainete kiir läheb piki maapinda, kuna teine suundub kõrgusesse ja peegeldub atmosfääri ülemises osas asuvalt ioonide kihilt tagasi. Kohtudes vastuvõtja juures, mõlemad kiired liituvad. Nii tekib maapinnal raadiolainete interferentspilt, mida ei saa küll silmaga näha, kuid mille olemasolus võib veenduda raadioaparaadi abil: ühes kohas on vastuvõtjas saatejaama hästi kuulda, teises kohas aga hädavaevalt. Ioonide kihis toimuvad liikumised muudavad kogu aeg raadiolainete peegeldumistingimusi, seetõttu muutub pidevalt ka raadiolainete interferentspilt maapinnal. Kui ühel silmapilgul on raadiolainete intensiivsus vastuvõtja juures õige suur, siis varsti pärast seda võib see peaaegu nullini kahaneda. Raadioaparaadis on selgesti kuulda, kuidas helitugevus kõigub.

Valgusallikast L lähtuv kiir langeb õhukese hõbedakihiga kaetud klaasplaadile K. Niisugusel plaadil on omadus, et ta poole kiirest peegeldab kõrvale peegli P_1 suunas, poole kiirest suunab aga peeglile P_2. Mõlemad kiired jõuavad pärast peegeldumist klaasplaadini tagasi. Kiir, mis tuleb peeglilt P_1, läheb läbi plaadi, peeglilt P_2 tulnud kiir aga peegeldub sellel. Nii saavad vahepeal lahus olnud kiired jälle kokku ja tekitavad kohas I interferentspildi. Kui valguse kiirus Maa suhtes oleks eri suundades erinev, siis katseseadme pööramisel ruumis muutuks klaasplaadi ja peeglite vahel leviva valguse kiirus. See peab aga otsekohe avaldama mõju interferentspildile. Katsele eelnenud arvutused näitavad, et katseseadme pööramisel 90 kraadi võrra peaksid interferentsjooned nihkuma rohkem kui ühe kolmandiku oma läbimõõdust. Samal ajal olid katsetajad kindlad, et nad suudavad interferentsjoonte nihkumist isegi siis veel kindlaks teha, kui see on ainult üks sajandik joonelaiusest. Lootused katse kordaminekuks olid seega kõige paremad, kuid ... juhtus midagi arusaamatut. Michelson ja Morley pöörasid oma katseseadet kõigis võimalikes suundades, kuid mingisugust interferentsjoonte nihkumist polnud märgata. Sellel on ainult üks seletus: valguse kiirus Maa suhtes oli kõigis suundades üks ja seesama. Katsest ei saanud kuidagi välja lugeda Maa liikumise kiirust absoluutses ruumis (teiste sõnadega Maa liikumise kiirust eetri suhtes).

Julged eksperimenteerijad ei kaotanud veel lootust. Võib olla, et just sel ajal, kui nad mõõtmisi teostasid, seisis Maa absoluutse ruumi suhtes juhuslikult paigal. Siis on katse tulemus arusaadav, sest absoluutses ruumis pidi ju valgus kõigis suundades ühe ja sama kiirusega levima. Poole aasta pärast peaks olukord aga teine olema. Maa tiirleb ümber Päikese kiirusega 30 kilomeetrit sekundis. Kui praegusel hetkel Maa seisab absoluutses ruumis paigal, siis poole aasta pärast peaks ta viimases liikuma kiirusega 60 kilomeetrit sekundis.

Poole aasta pärast korraldatigi katse uuesti, ja jällegi ei avastatud midagi. Ka nüüd oli valguse kiirus Maa suhtes kõigis suundades ühesugune. Michelson-Morley katse lõppes täieliku ebaõnnestumisega: Maa liikumise kiirust absoluutse ruumi suhtes määrata ei õnnestunud. Lootused absoluutse ruumi leidmiseks läksid jällegi tühja.

III

ERIRELATIIVSUSTEOORIA

Nagu igapäevases elus nii ka
teaduses õnn naeratab just julgeile.

Louis de Broglie

1. ERIRELATIIVSUSPRINTSIIP

Võib ette kujutada lugeja rahulolematust, kui ta on lõpetanud eelmise peatüki. Terve peatükk on pühendatud taustsüsteemi otsimisele, milles valguse kiirus oleks suunast sõltumatult täpselt *c*, ja täiesti tulemusteta. Lootsime niisugust taustsüsteemi valgusallikaga siduda — kuid ei õnnestunud. Tähtede aastase aberratsiooni nähtus kinnitab, et ka valguse levimiskeskkond ei ole otsitavaks süsteemiks. Fizeau' katse tulemust saab seletada ainult hüpoteetilise maailmaeetri abil, kuid see viib otsekohe vastuollu Michelson-Morley katsega. Michelson-Morley katse ütleb selge sõnaga, et valguse kiirus Maa suhtes on kõigis suundades üks ja seesama. Kuna Maa ei saa olla teiste universumi kehade hulgas eelistatud olukorras, järeldub siit, et ükskõik mille suhtes valguse kiirust vaakuumis ka mõõta, tulemuseks on alati *c*. Kuid see näib ju ilmse absurdsusena! Teie istute ülikiiresti Päikese poole lendavas reaktiivlennukis ja saate Päikeselt tuleva valguse kiiruse mõõtmisel sama arvu *c* nagu teie maapinnale jäänud sõbergi...

On kindlasti ka rahulikumalt mõtlevaid lugejaid, kes ütlevad: «Olgu pealegi asi segane. Suurem osa raamatust on veel ees — küllap sealt pikapeale kõik selgub.» Tõepoolest, see on nii nagu põnevusromaanide lugemisel: kui süda enam oodata ei kannata, võib ju lõpu ette ära vaadata. Aga mida pidid tundma teadlased, kes ise neid katseid tegid. Nendel polnud lõpplahendust kusagilt võimalik teada saada. Et küsimuses kuidagiviisi selgust luua, esitati mitmesuguseid oletusi. Võtame näiteks prantslase Arago katse ja seletuse, mille andis temale Arago ise.

Valguskiire murdumisnurk prismas oleneb valguse kiirusest prisma suhtes. Arago valis välja tähe, millele Maa oma tiirlemisel ümber Päikese parajasti lähenes ja mõõtis

tähelt tuleva kiire murdumise ulatust prismas. Poole aasta pärast, kui Maa liikumissuund oli muutunud vastupidiseks, s. o. kui Maa eemaldus vaatluse alla võetud tähest, mõõtis ta uuesti tähelt pärineva valguse murdumist prismas. Kuna nüüd valguse kiirus prisma suhtes pidi olema väiksem kui esimese mõõtmise ajal, siis võis oodata, et ka kiire murdumisnurk erineb poole aasta eest saadud nurgast. Tegelikult aga mingisugust erinevust ei avastatud.[44] Valguse kiirus prisma (ja seega ka Maa) suhtes oli mõlemal juhul võrdne. 1818. aastal kirjutab Arago Fresnelile ja püüab oma katse tulemust seletada järgmiselt:

«Oletame, et valgus koosneb osakestest, mis väljuvad valgusallikast kõikvõimalike kiirustega, kuid meie silm on tundlik ainult nendele osakestele, mis liiguvad kiirusega c[45]. Siis liikuva prisma korral (s. o. prisma korral, mis liigub koos meiega valgusallika suhtes kiirusega v) näeme ainult neid osakesi, millede kiirus valgusallika suhtes on $c - v$ ja kiirus prisma suhtes — $(c - v) + v = c$. Sel viisil me ei avasta mingisugust prisma liikumist.»

Kui teravmeelne Arago hüpotees ka ei olnud, ei kannatanud see siiski tõsist kriitikat välja. Järgnesid uued ja uued eksperimendid, kuid raskused ei kadunud. Michelson-Morley katse tulemus ajas lõngakera lõplikult sassi. Nüüd ei jäänud enam ühtegi otsa, millest edasi harutada. Pole ime, et seda katset korrati üha uuesti, mõõtmistäpsus läks üha suuremaks, kuid midagi ei aidanud. Interferentsjooned kinnitasid kangekaelselt, et valguse kiirus Maa suhtes on kõigis suundades üks ja seesama. Täiesti arusaamatu tulemus! Nii tekkis olukord, mis esineb teaduses alati enne suuri murranguid.

Harilikult avastab teadlane uusi tõdesid juba kindlakskujunenud ideedele ning kujutlustele tuginedes. Ühel heal päeval selgub aga, et see, millesse seni kaljukindlalt usuti, ei kõlba enam. Senised juhtideed osutuvad uute nähtuste seletamisel kõlbmatuiks, uusi aga veel ei ole. Teadlastel tuleb mõni aeg, piltlikult öeldes, käsikaudu kobada. Uue avastamist takistab veel see, et teadlased on kes vähem kes rohkem vana mõtteviisi kammitsas.

---

[44] Kui Arago katse oleks andnud positiivseid tagajärgi, siis järelduks siit näiteks pikksilma objektiivi fookusekauguse sõltuvus sellest, kuidas Maa vaadeldava tähe suhtes liigub. Objektiivi fookusekaugus oleks iga tähe vaatlemisel isesugune.

[45] Arago mõtleb siin kiirust silma suhtes.

Ummikust pääsemiseks on tarvis aga julgelt loobuda vanast ning leida uut, kui harjumatu ning võõras see uus ka esialgu ei oleks. Varem või hiljem segaduste periood lõpeb — ühel julgetest mõtlejatest õnnestub avastada uus juhtidee. Nüüd saab korraga selgeks kõigi seniesinenud raskuste põhjus ja teadusele avanevad uued, endisest laiemad perspektiivid.



H. A. Lorentz.

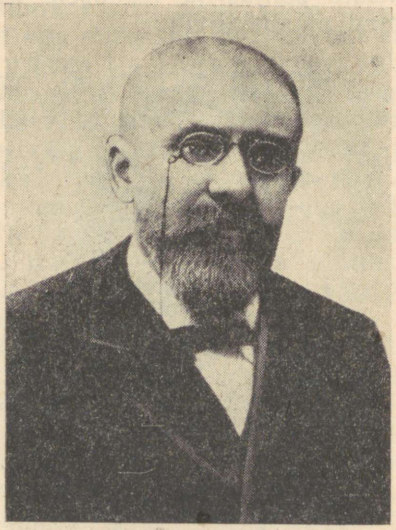
Pärast Michelson-Morley katset järgnes füüsikas just niisugune käsikaudu kobamise ajajärk. Eelmises peatükis kirjeldatud ning teiste analoogiliste katsete tulemusi püüti küll ühel, küll teisel viisil seletada.

Hollandi füüsik H. A. Lorentz näiteks oletas, et absoluutse ruumi suhtes liikuvad kehad tõmbuvad liikumise suunas kokku [46].

Valides sobivalt lühenemise suuruse, õnnestus tal tõepoolest oma teooriat Michelson-Morley katsega kooskõlla viia. Sellele vaatamata ei saanud Lorentzi teooriat

[46] Kehade kokkutõmbumise idee pärineb õieti Fitzgeraldilt (1892), kuid selle väljaarendajaks sai Lorentz.

lugeda probleemi sisuliseks lahenduseks. Siin jäi täielikult seletamata põhjus, miks peaksid absoluutse ruumi suhtes liikuvad kehad oma liikumise suunas kokku tõmbuma. Kuid Lorentzi teooria sisaldas mõndagi väärtuslikku, mida relatiivsusteooria sai hiljem ära kasutada.

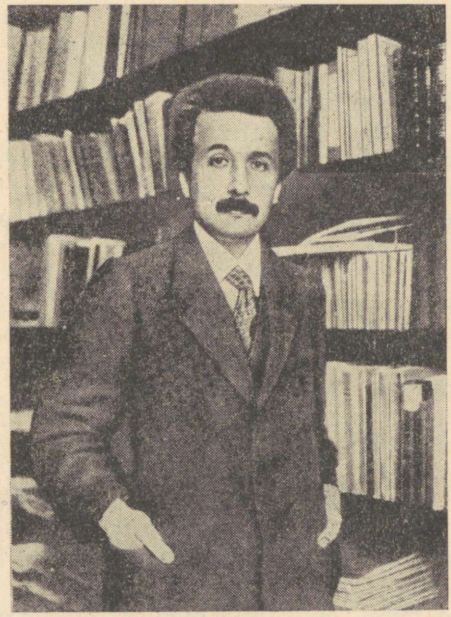


H. Poincaré.

Lorentzist kaugemale läks prantsuse matemaatik H. Poincaré. Tema taipas, et klassikaline relatiivsusprintsiip tuleks asendada üldisema printsiibiga. Poincaré formuleeris üldistuse, mida hiljem hakati nimetama erirelatiivsusprintsiibiks[47]. Samuti õnnestus Poincarél tuletada mitmed relatiivsusteooria valemid. Õigusega märgitakse, et Poincaré oli juba 1904. aastal relatiivsusteooria avastamise künnisel, kuid sellest üle ta ei astunud. Põhjus seisis siin nähtavasti filosoofilistes vaadetes. Poincaré arvas, et ühtesid ja samu loodusnähtusi võib kirjeldada mitme erineva teooriaga, kusjuures kõik need teooriad on võrdse tähtsusega. Et üks teooria peegeldab loo-

[47] Erirelatiivsusprintsiipi nimetatakse ka spetsiaalseks relatiivsusprintsiibiks. Sellele vastavalt erirelatiivsusteooria kannab spetsiaalse relatiivsusteooria nime.

dust, teine on aga kunstliku kombineerimise tulemus, seda ta ei näinud. Loomulik, et niisugused seisukohad ei innustanud Poincaréd uue teooria loomisele. Sellele, mida ta ise oli juba teinud, ei omistanud ta erilist tähendust. Poincaré ei mõistnud oma valemite täit sisu.



Albert Einstein erirelatiivsusteooria loomise ajal.

Uue teooria loojaks sai 26-aastane Berni patendibüroo ekspert Albert Einstein. Tema sellekohane töö «Liikuvate keskkondade elektrodünaamikast» ilmus 1905. aastal. Seda aastat loetakse relatiivsusteooria sünniaastaks.

Mida siis tegi Einstein?

Absoluutse taustsüsteemi avastamine Michelson-Morley katses vastu ootusi ei õnnestunud. Einstein võttis julguse öelda, et järelikult kaalutlused, mis andsid lootusi absoluutse taustsüsteemi leidmiseks, tuginesid vigasele alusele. Loodusseadused peavad olema niisugused, et nad ei anna mingisuguseid näpunäiteid absoluutse

taustsüsteemi avastamiseks, sest absoluutset taustsüsteemi looduses ei ole olemas. Sisuliselt tähendab see, et kõik inertsiaalsüsteemid jäävad endiselt võrdõiguslikeks, ükski neist teistest ei eraldu. Nii formuleeriski Einstein nn. erirelatiivsusprintsiibi: loodusnähtuste kirjeldamisel on kõik inertsiaalsüsteemid samaväärsed. Teiste sõnadega: kui loodusseadus kehtib ühes taustsüsteemis, siis on ta õige ka kõigis teistes taustsüsteemides, mis liiguvad esimese süsteemi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Oletame, et üks uurijatest on avastanud loodusseaduse ja selle kirja pannud. Kui nüüd sama seaduse avastab teine uurija, kes esimese suhtes kogu aeg ühtlaselt ja sirgjooneliselt liigub, siis peab avastatud seadus täpselt ühtima esimese uurija poolt avastatud seadusega — see on relatiivsusprintsiibi mõte.

Michelson-Morley katses selgus, et valguse kiirus Maa suhtes on suunast sõltumatult *c*. Kuna Maa kui taustkeha mitteinertsiaalsusest tingitud nähtused on väiksemad katseveast Michelson-Morley katses, siis võib öelda, et valguse kiirus Maaga seotud inertsiaalsüsteemis on suunast sõltumatult *c*. Einstein oletas, et see tulemus on loodusseadus, mis peab kehtima kõigis inertsiaalsüsteemides ühteviisi. Valguse kiirus on kõigis inertsiaalsüsteemides suunast sõltumatult *c* — see on relatiivsusprintsiibi kõrval teine alussammas, millele tugineb erirelatiivsusteooria.

On lihtne näha, et erirelatiivsusprintsiip on klassikalise relatiivsusprintsiibi üldistuseks. Viimases räägitakse ainult liikumise nähtustest ning liikumise seadustest, esimeses aga kõigist loodusnähtustest ning loodusseadustest. Einsteini geenius avaldus just selles, et tuginedes Michelson-Morley katse tulemusele, laiendas ta relatiivsusprintsiibi kehtivust kõigile loodusnähtustele, kuna varem loeti teda õigeks ainult mehhaanikas.

Erirelatiivsusprintsiibis räägitakse inertsiaalsüsteemidest, s. o. süsteemidest, mis liiguvad üksteise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Ühtlane ja sirgjooneline liikumine on erikujuline liikumine, seepärast nimetatakse ülalpool formuleeritud printsiipi erirelatiivsusprintsiibiks. Lugeja märkab kahtlemata teed relatiivsusprintsiibi edasiseks üldistamiseks, kus taustsüsteemide ühtlane ja sirgjooneline liikumine asendatakse ükskõik missuguse lii-

kumisega. Einstein seda hiljem tõepoolest tegigi, kuid neid küsimusi vaatame käesoleva raamatu järgmises peatükis.

2. SUURTE KIIRUSTE LIITUMISE SEADUS

Uue relatiivsusprintsiibi püstitamine on alles pool teed erirelatiivsusteooria loomisel. Kui siia peatuma jääda, säilivad endiselt kõik arusaamatused; nad muudavad ainult oma välist vormi. Michelson-Morley katse tulemus on nüüd formaalselt küll arusaadav — ta on kooskõlas uue relatiivsusprintsiibiga — kuid sisuliselt viib ta ikkagi välja vastuolule.

Michelson-Morley katse näitab, et loodusseadus «valguse kiirus tühjas ruumis on suunast sõltumatult c» peab kehtima kõigis inertsiaalsüsteemides. Mis tuleb aga tegelikult välja? Klassikaline kiiruste liitumise seadus (1) leheküljel 58 ütleb: kui valguse kiirus ühes inertsiaalsüsteemis on c, siis selle süsteemi suhtes kiirusega v liikuvas inertsiaalsüsteemis on tema kiiruseks $c + v$ [48]. Siin on ilmne vastuolu Michelson-Morley katsest tuleneva erirelatiivsusprintsiibiga, mis kinnitab, et k õ i g i s inertsiaalsüsteemides peab valguse kiirus olema c. Uus relatiivsusprintsiip on vastuolus vana kiiruste liitumise seadusega. Üks neist peab valeks osutuma.

Vastandina vanarahva tarkusele ei anna teaduses järele mitte targem, vaid see, kelle argumendid on nõrgemad. Eespool nägime, et klassikalise kiiruste liitumise seaduse õigsust võime katseliselt kontrollida ainult väikeste kiiruste korral. Et see seadus kehtib ka sel juhul, kui üks liidetavatest on väga suur — näiteks valguse kiirus — selles ei saa keegi füüsikuid veenda. Kui tekkis ületamatu vastuolu, võib väga hästi süüdlaseks olla vana kiiruste liitumise seadus, mis suurte kiiruste liitmiseks nähtavasti ei kõlba.

Einstein asendas klassikalise kiiruste liitumise seaduse (1) uue, relativistliku kiiruste liitumise seadusega [49]. Kiiruste u ja v liitumisel saame kiiruse w, mis avaldub järgmise valemi kaudu:

---

[48] Kiirus v on mõeldud vastassuunalisena valguse kiirusele c.

[49] Uue kiiruste liitumise seaduse avastas tegelikuit Poincaré juba enne Einsteini.

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}. \qquad (2)$$

Analüüsime seda valemit konkreetsete näidete varal.

Kohtugu kaks vastassuunas liikuvat reaktiivlennukit, millede kiirus maapinna suhtes on mõlemal 3 kilomeetrit sekundis (s. o. $u = 3$ km/sek ja $v = 3$ km/sek). Kui suur on ühe lennuki kiirus teise suhtes? Klassikaline valem (1) annab siin lihtsa vastuse: ühe lennuki kiirus teise suhtes $w = 6$ kilomeetrit sekundis. Arvutus valemi (2) järgi võtab veidi enam vaeva, kuid tulemuseks saame $w = 5{,}9999999994$ kilomeetrit sekundis, mis ülivähe erineb eelmisest arvust. Meie käsutuses olevad mõõduriistad ei võimalda ühelgi viisil kiirust 6 kilomeetrit sekundis eraldada kiirusest 5,9999999994 kilomeetrit sekundis. See tähendab, et kiiruste 3 kilomeetrit sekundis liitmisel valemid (1) ja (2) annavad praktiliselt ühtelangevad tulemused.[50]

Ei tohi unustada, et 3 kilomeetrit sekundis on hariliku elu mõõdupuuga võrreldes väga suur — niisuguse kiirusega ei lenda tegelikult veel ükski reaktiivlennuk. Igapäevases elus puutume kokku kiirustega, mis on sellest märksa väiksemad. Vastavalt on väiksemad ka erinevused valemite (1) ja (2) rakendamise tulemuste vahel. Kuna relativistliku valemi kasutamine nõuab rohkem arvutusi kui klassikaline valem, tulemused on aga väga suure täpsusega needsamad, siis on igapäevases elus otstarbekohasem kasutada klassikalist kiiruste liitumise seadust. Põhimõtteliselt rääkides annab aga relativistlik valem (2) tegelikkusele enam vastavad tulemused kui vana valem (1).

Vaatame nüüd, mida ütleb uus valem suuremate kiiruste liitumise kohta.

Kihutagu kosmilises ruumis teineteisest mööda kaks ainekübemekest, kummagi kiirus Päikese suhtes 300 kilomeetrit sekundis. Klassikalise mehhaanika seadustele

---

[50] Et piltlikult veenduda selles, kui vähe erinevad need tulemused, oletame, et korraga hakkavad liikuma kaks lennukit: üks kiirusega 6 kilomeetrit sekundis, teine kiirusega 5,9999999994 kilomeetrit sekundis. Siis tunni aja pärast, kui mõlemad on katnud üle poole maakera ümbermõõdust, on teine lennuk esimesest maha jäänud ainult veidi üle kahe millimeetri.

tuginev füüsik ütleb nüüd, et ühe osakese kiirus teise suhtes on 600 kilomeetrit sekundis. Relatiivsusteooria pooldaja pole sellega nõus. Ta kasutab valemit (2) ja leiab osakeste omavaheliseks kiiruseks 599,9994 kilomeetrit sekundis. Näeme, et isegi nii suurte kiiruste korral nagu 300 kilomeetrit sekundis ei anna relativistlik valem klassikalisest valemist oluliselt erinevat tulemust. Veelgi suuremate kiiruste korral muutub erinevus aga märgatavaks. Liites kiiruse 100 000 kilomeetrit sekundis teisele sama suurele kiirusele, saame relativistliku valemi järgi 180 000 kilomeetrit sekundis. See erineb oluliselt klassikalise valemi tulemusest 200 000 kilomeetrit sekundis. Edasi lähevad erinevused veelgi suuremaks. Kiiruste 200 000 kilomeetrit sekundis ja 200 000 kilomeetrit sekundis liitmisel saame 277 000 kilomeetrit sekundis (mitte 400 000 kilomeetrit sekundis, nagu annab klassikaline valem), kuna kiiruse 299 000 kilomeetrit sekundis liitmine teisele sama suurele kiirusele annab 299 998 (mitte 598 000 kilomeetrit sekundis).[51]

Eriti huvitavale tulemusele viib relativistliku kiiruste liitumise seaduse rakendamine siis, kui üks liidetavatest kiirustest on valguse kiirus c. Asendame valemisse (2) $u = c$. Lihtne arvutus näitab siis, et $w = c$. Tähendab, kui üheks liidetavaks kiiruseks on valguse kiirus, saame tulemuseks jälle valguse kiiruse c. Kui valguse kiirus ühes inertsiaalsüsteemis on c, siis teises süsteemis, mis liigub esimese suhtes kiirusega v, on tema kiiruseks samuti c, mitte $c + v$, nagu annab klassikaline valem.

Relativistlik kiiruste liitumise valem on nii tuletatud, et seadus: «valguse kiirus tühjas ruumis on c» kehtiks kõigis inertsiaalsüsteemides. Samal ajal väikeste kiiruste liitmisel annab ta suure täpsusega sama tulemuse kui klassikaline kiiruste liitumise seadus. Valem (2) on kooskõlas nii meie igapäevase elu kogemustega kui ka mõõtmistega, mis on tehtud valguse kiiruse määramisel.

---

[51] Nagu juba öeldud, kasutame igal pool tegeliku valguse kiiruse 299 790 km/sek asemel ligikaudset arvu 300 000 km/sek. See tähendab, et näiteks kiirus 299 998 km/sek tuleb meie käsitluses lugeda valguse kiirusest väiksemaks, kuigi ta ületab faktilise valguse kiiruse. Kõik kiirused, mis on väiksemad kui 300 000 km/sek., loeme käesolevas raamatus valguse kiirusest väiksemaks.

Järelikult on see õige loodusseadus. Klassikaline valem seevastu on ebatäpne ning vastab ainult ligikaudu tegelikkusele. Väikeste kiiruste liitmiseks see sobib — sel juhul ei ületa viga praktilist mõõtmistäpsust, kuid suurte kiiruste liitmisel annab ta hoopis valed tulemused.

Kiiruste liitumine ei toimu sugugi nii lihtsalt, nagu me varem arvasime. Esimesel pilgul näib isegi arusaamatuna, kuidas saavad kiirused üldse nii liituda, nagu väidab relativistlik seadus. Sama loomulikuna nagu «kaks korda kaks on neli» tundub ka nõue, et kõik kiirused, olgu nad suured või väikesed, liituksid klassikalise valemi (1) kohaselt. Niisugune veendumus on inimesesse juurdunud seetõttu, et me elame väga väikeste kiiruste maailmas. Kui te sõidaksite tööle autoga, mis kihutab kiirusega 200 000 kilomeetrit sekundis või jalutaksite tänaval kiirusega 10 000 kilomeetrit sekundis ning vahetaksite sama kiirusega mööduva sõbraga käigupeal mõne lause, siis veenduksite varsti, et looduses liituvad kiirused just nii, nagu väidab relativistlik kiiruste liitumise seadus. Te harjuksite ära selle seadusega, ning varsti näiks see sama loomulikuna ja «silmnähtavalt õigena», kui praegu tundub olevat klassikaline kiiruste liitumise seadus.

Silmas pidades, et looduses liituvad kiirused nii, nagu ütleb relativistlik valem (2), on lihtne seletada kõigi eelmises peatükis kirjeldatud katsete tulemusi.

Kaksiktähe komponendi kiirus Maa suhtes, liitudes tema poolt kiiratud valguse kiirusele c, ei muuda viimast. Valguse kiirus on c nii tähekomponendi-valgus-allika suhtes kui ka Maal oleva vaatleja suhtes. Sellest tingituna ei saa kaksiktähe liikumises mingisuguseid näivaid segadusi tekkida. Samuti seletub Michelson-Morley katse tulemus. Kuidas valguse kiirust ka ei mõõdeta, ikka on tulemuseks c (muidugi juhul, kui valgus levib tühjas ruumis), sest ükski kiirus, liitudes valguse kiirusele, viimast ei muuda. Lihtne arvutus näitab, et ka Fizeau' katse tulemus on kooskõlas relativistliku kiiruste liitumise seadusega.

Kui valguse kiirus vees on c/n ja vee kiirus maapinna suhtes v, siis valguse kiiruse maapinna suhtes saame neid kiirusi valemi (2) abil liites

$$w = \frac{v + \frac{c}{n}}{1 + \frac{1}{n}\frac{v}{c}} = c\,\frac{\frac{v}{c} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{1}{n}\frac{v}{c}}.$$

Korrutame selle murru lugejat ja nimetajat suurusega

$$1 - \frac{1}{n}\frac{v}{c}.$$

Siis saame

$$w = c\,\frac{\left(\frac{v}{c} + \frac{1}{n}\right)\left(1 - \frac{1}{n}\frac{v}{c}\right)}{1 - \frac{1}{n^2}\frac{v^2}{c^2}}.$$

Vee voolamise kiirus v on valguse kiirusega c võrreldes väga väike. Seetõttu on ka suurus v/c väga väike, selle ruut (s. o. v^2/c^2) aga veel palju väiksem. Fizeau oma katses nii väikest mõju, nagu on liige v^2/c^2, avastada ei suutnud — katseriistade täpsus ei olnud selleks küllaldane. Seepärast võime ka meie oma arvutustes v^2/c^2 sisaldavad liikmed nulliks lugeda. Eelmine valem võtab siis järgmise kuju:

$$w = c\left(\frac{v}{c} + \frac{1}{n}\right)\left(1 - \frac{1}{n}\frac{v}{c}\right).$$

Pärast sulgude avamist ning v^2/c^2 sisaldava liikme ärajätmist saame:

$$w = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

Sama valemi sai oma katse tulemusena ka Fizeau. See näitab, et Fizeau' katse tulemus seletub täielikult relativistliku kiiruste liitumise seaduse abil.

Fizeau' katse tulemust loeti omal ajal üheks kindlamaks tõenduseks maailmaeetri olemasolu kohta. Relatiivsusteooria ilmumisel kinnitas Fizeau' katse ka seda. Samal ajal aga eitas relatiivsusteooria eetrit koos absoluutse taustsüsteemiga. Tekkis huvitav olukord: üks ja sama katse kinnitas kahte teineteisega täielikus vastuolus olevat seisukohta. Tuginedes üksnes Fizeau' katsele, ei ole võimalik otsustada, kumb nendest seisukohtadest on õige. «Fizeau' katse ajalugu on õpetlikuks näiteks selle kohta, kui suurt osa mängivad teooria elemendid iga katse seletamisel; neid on katsest isegi võimatu eral-

dada. Ja kui teooriad vahetuvad, muutub katse ühe teooria kinnitajast sama oluliseks argumendiks vastupidise teooria kasuks.» [52]

3. SUURIM KIIRUS LOODUSES

Erirelatiivsusprintsiip ja relativistlik kiiruste liitumise seadus (või sellest järelduv tõsiasi, et valguse kiirus on kõigis inertsiaalsüsteemides c), on kaheks alussambaks, millele tugineb kogu erirelatiivsusteooria. Lähtudes nendest alustest võime nüüd asuda mitmesuguste konkreetsema iseloomuga probleemide selgitamisele. Võtame kõigepealt fantastilise kosmilise lennu küsimuse valgusest kiiremal lennukil, millest oli juttu päris raamatu alguses.

Inimene talub tervist kahjustamata kiiruse pidevat muutumist 50 km/sek tunni aja jooksul. Kui kehtiks klassikaline kiiruste liitumise seadus, nii nagu me raamatu alguses oletasimegi, oleks kavandatud lend tõepoolest teostatav. Iga tunni jooksul lisaks lennuk kiirust 50 km/sek võrra, see tähendab, et juba 6000 tundi hiljem oleksime saavutanud valguse kiiruse. 250 päeva kestnud lennu järel ei jõuaks valguskiir enam meie eest põgeneda. Tegelikult kujuneb asi aga teisiti.

Sõidame mõttes kaasa kosmilise lennukiga, mis kogu reisi kestel iga tunni jooksul lisab oma kiirusele 50 kilomeetrit sekundis. Olgu muude aparaatide seas sellel lennukil ka kiirusemõõtja, mis mõõdab lennuki kiirust Maa suhtes. Algul kulgeb kõik korrapäraselt. Lennuki kiirus suureneb nii nagu oli ette nähtud. 24 tundi pärast starti vuhisevad reisijad juba kiirusega 1200 kilomeetrit sekundis (Maa suhtes mõõdetuna) läbi ruumi. Veel ööpäev, ning kiirus on tõusnud juba 2400 kilomeetrini sekundis. Mööduvad päevad. Ühel hommikul valvekorra piloot mõõdab lennuki kiiruse Maa suhtes ja saab 10 000 kilomeetrit sekundis. Täpselt 24 tunni pärast korratakse mõõtmist, ning tulemus on ainult 11 199 kilomeetrit sekundis [53]. Kiiruse juurdekasv oli ainult 1199

---

[52] Tsitaat on võetud M. Laue saksakeelsest raamatust «Füüsika ajalugu». Rõhutades ainult küsimuse ühte külge, on Laue jätnud märkimata, et katse ei tarvitse alati iga teooriaga kooskõlas olla. Just teooria ja katse ebakõla on üheks teooriate vahetumise põhjuseks.

[53] Niisuguse arvu saame, kui liidame valemi (2) abil kiirused 10 000 kilomeetrit sekundis ja 1200 kilomeetrit sekundis.

kilomeetrit sekundis ööpäeva kohta, kuna lennu alguses oli see 1200 km/sek. Edasi läheb asi veelgi halvemaks. Sel päeval, kui kiirusemõõtja hommikul näitab 100 000 kilomeetrit sekundis, kasvas kiirus järgneva ööpäeva jooksul ainult 1065 km/sek võrra. Kas siin midagi korrast ära ei ole? Lennukilt heidetakse välja keha, mis oma inertsi tõttu hakkab ruumis muutumatu kiirusega edasi liikuma. 24 tunni pärast mõõdetakse lennuki kiirust selle keha suhtes. Selgub, et ööpäeva jooksul on lennuki kiirus selle keha suhtes suurenenud 1200 km/sek võrra, Maa suhtes suurenes lennuki kiirus sama aja jooksul aga vähem kui 1065 km/sek võrra.

Nii läheb järjest edasi. Lennuki kiirus suureneb igas ööpäevas küll 1200 km/sek võrra (see kiiruse juurdekasv on mõõdetud keha suhtes, mis 24 tundi enne mõõtmist lennukist välja heideti), kuid Maa suhtes muutub kiiruse juurdekasv üha aeglasemaks. Tabelis 1 on esitatud lennuki kiiruse ööpäevased juurdekasvud Maa suhtes, kui 24 tundi enne mõõtmist lennukist väljaheidetud keha suhtes on kiiruse juurdekasv 1200 km/sek.

Tabel 1.

Lennuki kiirus Maa suhtes mingil ajamomendil	Lennuki kiirus Maa suhtes ööpäeva pärast	Kiiruse ööpäevane juurdekasv (Maa suhtes mõõdetuna)
0	1200	1200
10 000	11 199	1199
100 000	101 065	1065
200 000	200 665	665
280 000	280 154	154
295 000	295 040	40
299 000	299 008	8
299 900	299 901	1

Tabel näitab, et mida lähemale jõuab lennuki kiirus valguse kiirusele (Maa suhtes mõõdetuna), seda väiksemaks muutub kiiruse ööpäevane juurdekasv. Kui kaua lennuk ka ei lendaks, valguse kiirust ei saavutaks ta kunagi. Relativistlik kiiruste liitumise seadus muudab plaanitsetud kosmilise lennu teostamatuks fantaasiaks. See on oht, mida me raamatu alguses karta ei teadnud.

Eelnevast selgub väga oluline tõsiasi: ükski keha looduses ei saa liikuda suurema kiirusega kui valgus[54]. Veelgi enam. Ükski keha ei saa liikuda ka valguse kiirusega. Ükskõik kuidas me keha ka ei kiirendaks, ikka jääb ta kiiruse poolest valguskiirele alla. On teada ainult kaks nähtust, mis liiguvad täpselt kiirusega *c*, aeglasemalt aga liikuda ei saagi. Need on valgus (s. o. elektromagnetiline väli) tühjas ruumis ning gravitatsiooniväli. Kui näiteks Päikese mass mingisugusel põhjusel muutuks kahekordseks, siis kahekordistuks ka Päikese külgetõmme Maale. See ei toimuks aga silmapilkselt, vaid Päikese lisamõju hakkaks kiirusega 300 000 kilomeetrit sekundis Maa pool liikuma ja jõuaks Maani alles 8,3 minuti pärast.[55]

4. MIS TOIMUS VAREM, MIS HILJEM?

Kujutleme järgmist olukorda.

Tallinna kohale kogunevad tumedad äikesepilved. Ilm muutub üha ähvardavamaks. Seal sähvabki kahe pilve vahel mitmeharuline välgunool... Samal päeval näevad paar möödaminejat, kuidas Tartus Ülikooli tänaval veereb umbes inimpea suurune keravälk. Tekib küsimus: kas Tartus tekkis keravälk samal momendil kui välgulöök Tallinnas või ei? Vastata saab sellele küsimusele ainult siis, kui tallinlased fikseerisid oma kella järgi aja, millal toimus välgusähvatus ja samuti tartlased määrasid täpselt keravälgu ilmumise momendi. Muidugi on seejuures vajalik, et tallinlased ja tartlased oleksid oma

---

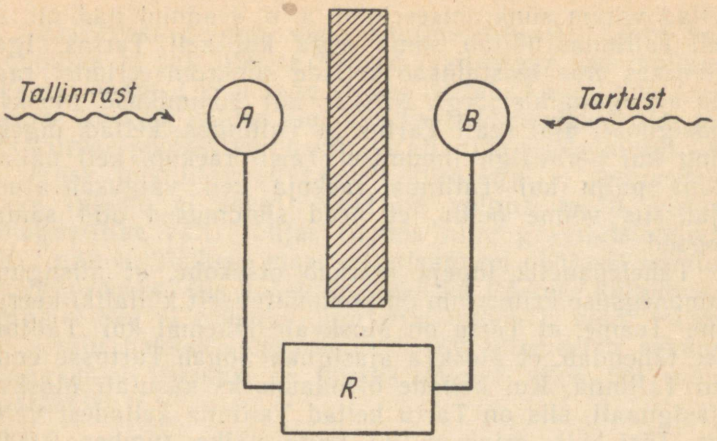
[54] Olgu märgitud, et nähtused, mis endaga energiat kaasas ei kanna, võivad liikuda ka valgusest kiiremini. Nii näiteks lainemehaanikas, mis on õpetus elementaarosakeste liikumisest, räägitakse osakese liikumist saatvatest mateerialainetest. Need lained levivad valgusest kiiremini, kuid energiat nad edasi ei kanna. Energiat kannab osake ise, liikudes väiksema kiirusega kui valgus.

[55] Eespool märkisime, et tähte ei näe me taevavõlvil selles kohas, kus ta tegelikult asub, vaid kohas, kus ta oli siis, kui ta kiirgas valgust, mis parajasti meie silma jõuab. Kuna gravitatsiooniväli levib samuti valguse kiirusega, siis tähe poolt Maale avaldatav külgetõmme mõjub just selles suunas, kust täht parajasti paistab, mitte aga tähe tegeliku asukoha suunas. Nii huvitab meid eeskätt tähtede paigutus Linnutees just niisugusena, nagu me teda silmaga näeme, mitte aga niisugusena, nagu see tegelikult on. Olgu veelkord rõhutatud, et kinnistähtede mõju Maale on tegelikult üliväike.

kellad varem sünkroniseerinud, s. o. seadnud nad nii, et kell Tallinnas näitab sama aega kui kell Tartus. Igapäevases elus teostatakse kellade sünkroniseerimist raadio ajasignaalide järgi. Niisiis: kui hommikuse Moskva ajasignaali ajal seati Tartus ja Tallinnas kellad õigeks ning kui keravälgu ilmumisel Tartu raekoja kell näitas sama palju kui Tallinna raekoja kell välgusähvatuse ajal, siis võime öelda, et need sündmused olid samaaegsed.

Tähelepanelik lugeja märkab otsekohe, et niisugune samaaegsuse kriteerium on põhimõtteliselt küllaltki keeruline. Teame, et Tartu on Moskvale lähemal kui Tallinn. See tähendab, et Moskva ajasignaal jõuab Tartusse enne kui Tallinna. Kui kellade õiendamiseks kasutati Moskva ajasignaali, siis on Tartu kellad Tallinna kelladest veidi ees. Tõsi küll, erinevus on väga väike (umbes 0,0005 sekundit), kuid põhimõtteliste küsimuste arutamisel on ka see oluline. Tallinna ja Tartu kellade täpseks sünkroniseerimiseks peaks raadiosaatja asuma Tallinnast ja Tartust võrdsel kaugusel, s. o. kusagil Paide kandis. Edasi peame olema selles veendunud, et kellad, mis ajasignaali saamisel ühte seati, kogu päev sünkroniseeritult käivad.

Tallinnas ja Tartus toimunud sündmuste ajalise järjestuse kindlakstegemisel võib läbi saada ka ilma kelladeta, mis teeb asja palju lihtsamaks. Asendame näiteks Paide raadiosaatja kahe elektromagnetiliste lainete vastuvõtjaga, millest üks asetsegu Tartu, teine Tallinna pool (joon. 23). Vastuvõtjate vahel olgu elektromagnetilistele lainetele läbimatu vahesein. Vastuvõtjasse *A* satuvad seega ainult Tallinnast tulnud lained, vastuvõtjasse *B* aga lained, mis on lähtunud Tartust. Vastuvõtjad olgu lülitatud niisugusesse skeemi, et registreerimisseadeldis *R* ütleb täpselt, kummalt poolt signaal varem kohale jõudis, kas Tartust või Tallinnast. Niipea kui Tallinnas sähvab välk, hakkab sealt valguskiir (mis pole midagi muud kui elektromagnetiline laine) Paide poole liikuma. Sama teeb ka valguskiir Tartu keravälgu juures. Kuna vastuvõtjad asuvad Tartust ja Tallinnast võrdsel kaugusel, valgussignaal levib aga kõigis suundades ühe ja sama kiirusega, siis on lihtne otsustada, kumb sündmustest toimus varem, kumb hiljem. Kui näiteks enne reageeris vastuvõtja *A*, alles selle järel vastuvõtja *B*,



Joon. 23. Seadeldis eemal toimunud sündmuste ajalise järjestuse kindlakstegemiseks. Kui see aparaat asub näiteks Tallinna ja Tartu raekojast võrdsel kaugusel, siis saab tema abil otsustada, kas sündmused raekodade juures olid samaaegsed või ei.

siis toimus välgulöök Tallinnas varem kui nähti keravälku Tartus. Kui mõlemad vastuvõtjad reageerivad korraga, olid sündmused Tartus ja Tallinnas samaaegsed.

Kirjeldatud moodus eri ruumipunktides toimuvate sündmuste ajalise järjestuse kindlakstegemiseks on täiesti korrektne. Elektromagnetilise signaali kasutamine teate edasiviijana on eriti sobiv just seetõttu, et see levib kõigis inertsiaalsüsteemides igas suunas ühe ja sama kiirusega *c*. Sellestsamast valguse kiiruse konstantsusest järgneb huvitav loodusseadus: sündmused, mis ühes inertsiaalsüsteemis on samaaegsed, ei ole samaaegsed teistes inertsiaalsüsteemides. Teiste sõnadega: sündmused, mida üks vaatleja näeb toimuvat ühel ja samal ajamomendil, ei ole teise vaatleja jaoks, kes liigub esimese vaatleja suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, enam samaaegsed[56]. Tundub esimesel pilgul uskumatuna, kuid see on siiski tõsi.

[56] Tuleb rõhutada, et samaaegsuse relatiivsus ei sõltu vähimalgi määral samaaegsuse kindlakstegemise meetodist või muudest taolistest teguritest. Igasuguseid seadmeid ja mõttelisi katseid kirjel-

Kujutlege end istuvat sirgjoonelisel teel ühtlaselt liikuvas raudteerongis, võrdsel kaugusel vedurist ja viimasest vagunist. Teie sõber seisab raudteetammi ääres. Ilm kisub äikesele, ning äkki sähvatavad kaks välku: üks neist tabab vedurit, teine aga viimast vagunit. Välgud jätavad seejuures jäljed ka raudteele. Kuidas näeb neid sündmusi sõber, ning kuidas saate neist aru ise?

Oletame, et maapinnal seisev sõber näeb välkusid korraga sähvavat. See tähendab, et valgussignaalid mõlema välgu juurest jõudsid temani ühel ja samal hetkel. Järgnev mõõtmine näitab, et sõber seisis maapinnale jäänud välgumärkidest võrdsel kaugusel. See tähendab, et välgusähvatused olid tema jaoks samaaegsed sündmused. Kuidas otsustate seda aga ise? Selgitame seda küsimust lähemalt.

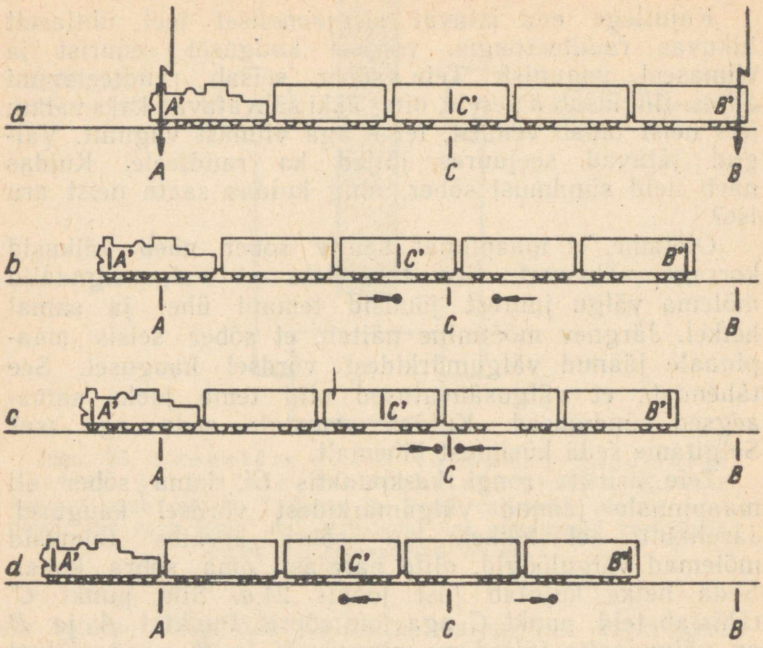
Teie asusite rongi keskpunktis C', kuna sõber oli maapinnale jäänud välgumärkidest võrdsel kaugusel. Järelikult sel hetkel, kui sõbra arvates toimusid mõlemad välgulöögid, olite parajasti oma sõbra kohal. Seda hetke kujutab just joonis 24,*a*. Siin punkt C' tähistab teid, punkt C aga teie sõpra. Punktid A ja B on välgunoolte jäljed maapinnal, A' ja B' nende jäljed rongil. Mõlema välgu sähvatuskohalt lähtuvad valgussignaalid ning hakkavad kiirusega c edasi liikuma. Samal ajal liigub edasi ka rong.

Kui maapinnal olija jaoks olid välgulöögid samaaegsed, siis pidid valgussignaalid mõlema sähvatuse juurest jõudma korraga punkti C. Nende kohalejõudmise hetke kujutab joonis 24,*c*, kus valgussignaale tähistavad noolega varustatud punktikesed. Kuna valgussignaalide levimine rongi otstest keskele võttis teatud aja, siis punkt C' jõudis vahepeal punktist C mööduda. Sel momendil, kui sõber võttis vastu valgussignaalid, ei asu teie enam oma sõbra kohal.

Vaadates joonisele 24,*c* on näha, et valgussignaal veduri juurest on punktist C' juba läbi läinud, kuid viimase vaguni juurest lähtunud signaal pole sinna veel jõudnudki. Järelikult mõne aja eest pidi esinema joonisel

---

dame käesolevas ainult probleemi illustreerimiseks. Tegelikult on samaaegsuse relatiivsus erirelatiivsusteooria üks järeldustest, mis tuleneb teooriast täiesti rangelt ning üldiselt.



Joon. 24.

24,*b* kujutatud olukord: vedurilt tulev signaal on jõudnud punktini *C'*, kuna punktini *C* pole kumbki signaalidest veel jõudnud. Lõpuks jõuab ka viimase vaguni juurest lähtunud signaal punktini *C'*. Seda hetke kujutab joonis 24,*d*.

Punkti *C'*, kus teie istusite, jõudis vedurilt lähtunud signaal varem kui signaal viimasest vagunist. Tuletame nüüd meelde, et valguse kiirus kõigis inertsiaalsüsteemides on suunast sõltumatult *c*. Järelikult liiguvad mõlemad valgussignaalid ka rongi suhtes kiirusega *c*.

Seega olete asetatud järgmiste tõsiasjade ette:

a) Teie istute rongis võrdsel kaugusel vedurist ja viimasest vagunist.

b) Valgussignaal veduril toimunud välgulöögist jõuab teie juurde varem kui valgussignaal viimase vaguni juures toimunud sähvatusest.

c) Mõlemad signaalid levivad võrdse kiirusega *c*. Nende andmete põhjal saate ainult ühe mõistliku järel-

duse teha: välgulöök veduri juures toimus varem kui välgulöök viimasesse vagunisse. Seejuures ajavahemik sähvatuste vahel on teie arvates seda suurem, mida kiiremini liigub rong.

Jällegi kaks meest ja kaks tõde. Teie sõber ütleb, et välgulöögid olid samaaegsed, ise arvate aga, et löök vedurisse toimus varem kui löök viimasesse vagunisse. Ärge siiski sõbraga selles küsimuses tülli minge. Sõbra ja teie seisukohtade erinevus on tingitud ainult sellest, et te viibisite eri inertsiaalsüsteemides. Sündmused, mis ühes inertsiaalsüsteemis (näiteks maaga seotud inertsiaalsüsteemis) on samaaegsed, toimuvad kõigis teistes inertsiaalsüsteemides (muuhulgas ka rongiga seotud inertsiaalsüsteemis) eri ajamomentidel. Sündmuste samaaegsus on relatiivne mõiste. Rääkides samaaegsusest, tuleb alati lisada taustsüsteem, milles me sündmusi kirjeldame. Kui inertsiaalsüsteem on fikseerimata, on sündmuste samaaegsus sisutu mõiste.

Oluliseks eelnevas arutluses osutub see, et valguse kiirus on c nii maapinna kui ka rongi suhtes. Just siin on see punkt, mis toob arutlusse uue, klassikalisest teooriast erineva momendi. Kogu arutlus rongi ja välkudega võib esimesel pilgul jätta niisuguse mulje, nagu tugineks see harilikule kiiruste liitumise seadusele ja seega ka klassikalisele mehaanikale. Tegelikult see nii ei ole. Klassikalise kiiruste liitumise seaduste kasutamine viiks meid otsekohe vastuollu relatiivsusprintsiibiga. Muuhulgas peaksime siis ka tunnistama, et rongiga seotud taustsüsteemis valguse kiirus ei ole c. See kõik oleks vastuolus Michelson-Morley katsega. Tegelikult esitatud mõtteline katse pole midagi muud kui rongi ja valguskiire liikumise uurimine relatiivsusteooria põhiseisukohtadest lähtudes. See uurimine viib meid tulemusele, et sündmuste samaaegsus on relatiivne mõiste.

Mitte ainult sündmuste samaaegsus, vaid ka nende ajaline järjestus on sõltuv inertsiaalsüsteemi valikust. Kui eespool kirjeldatud välgulöökide ajal rong oleks liikunud tagurpidi, siis rongi keskel olevad reisijad oleksid näinud välgulööki viimasesse vagunisse varem kui lööki rongi lükkavasse vedurisse. Kui ühes inertsiaalsüsteemis (näiteks maaga seotud süsteemis) on sündmused A ja B samaaegsed, siis mõnes teises süsteemis (näiteks õigetpidi liikuva rongiga seotud inertsiaalsüsteemis) toimub

sündmus *A* varem, sündmus *B* hiljem. Mõnesuguses kolmandas süsteemis (näiteks tagurpidi liikuva rongiga seotud süsteemis) on aga sündmuste ajaline järjestus vahetatud — sündmus *B* toimub varem, sündmus *A* hiljem.

Sündmuste samaaegsuse relatiivsus on tingitud sellest, et valgus levib lõpliku kiirusega *c*, mis on kõigis inertsiaalsüsteemides üks ja seesama. Kui valguse kiirus oleks lõpmata suur, oleks nii rongil istuja kui ka raudteetammi ääres seisja välgulöökidest silmapilkselt teada saanud ning mõlemad oleksid leidnud, et sähvatused olid samaaegsed. Sündmused, mis on samaaegsed ühes inertsiaalsüsteemis, oleksid siis samaaegsed ka kõigis teistes inertsiaalsüsteemides. Sündmuste samaaegsus oleks sel juhul absoluutne mõiste.

Igapäevases elus oleme harjunud väikeste kiirustega, nii et valguse kiiruse loeme praktiliselt juba lõpmata suureks. See tähendab, et igapäevases elus võime sündmuste samaaegsust absoluutseks pidada. Kui sündmused on ühe arvates samaaegsed, on nad seda ka kõigi teiste inimeste arusaamise kohaselt, kuidas inimesed ka ei liiguks. See on tingitud väikesest liikumiskiirusest. Suurte kiiruste korral tuleksid sündmuste samaaegsuse hindamisel ilmsiks märgatavad erinevused. Vaatame järgmist näidet.

Asetsegu teineteisest 3000 kilomeetri kaugusel kaks lõhkeaine kogust, mis teatud aja pärast plahvatavad. Kummastki kogusest 1500 kilomeetri kaugusel istuv vaatleja otsustab, et need plahvatused olid samaaegsed. Kuidas näeb neid plahvatusi vaatleja pea kohalt mööduv lendur, kes lendab ühe plahvatuskolde poolt teise poole? Olgu kõigepealt öeldud, et lennuki liikumise suunas toimunud plahvatus on lenduri jaoks varasem lennuki taga toimunud plahvatusest. Ajavahemik plahvatuste vahel sõltub seejuures lennuki kiirusest; seda sõltuvust näitab tabel 2.

Tabelist näeme, et isegi ülisuurte kiiruste korral on ajavahemikud plahvatuste vahel väga väikesed. Kui kaugus plahvatuste vahel oleks ainult 3 kilomeetrit, oleks need ajavahemikud veel 1000 korda väiksemad. Siit on näha, et igapäevases elus sündmuste samaaegsuse relatiivsus nähtavale ei tule. Põhimõtteliselt aga on sündmuste samaaegsuse relatiivsusel oluline tähtsus. Eriti huvitav on, et ajavahemik sündmuste vahel, ükskõik missuguses inertsiaalsüsteemis me neid sündmusi ka ei vaataks, oleneb

Tabel 2

Lennuki kiirus kilomeetrites sekundis	Ajavahemik plahvatuste vahel sekundites
0	0
300	0,00001
3000	0,0001
30 000	0,001
100 000	0,003
200 000	0,009
299 000	0,1
299 990	1,2
299 999	3,9

kaugusest sündmuste toimumiskohtade vahel. Siin peegeldub väga oluline tõsiasi, et ruum ja aeg ei ole sõltumatud nähtused, vaid nad on omavahel teatud kindlal viisil seotud.

5. PÕHJUS JA TAGAJÄRG

Õuel askeldab väike poiss. Korraga kostab puruneva klaasi klirin, visatud kivi on lennanud aknasse. On selge, et selle loo eest tuleb noormehel maksta oma nahaga... Või siiski — kas ei aitaks siin loodusseaduste otstarbekas rakendamine! Poiss seletab, et ema arvatavasti eksis, kui ta nägi, kuidas visatud kivi aknaklaasi purustas. Küsitagu selles asjas parem lenduri-onu, kes sel ajal siit üle lendas. Tema nägi sündmusi kindlasti nii, et enne purunes aken ja alles selle järel lendas kivi...

Mõte iseendast on kaval: tuua tunnistajaks inimest, kes nägi sündmusi teisest inertsiaalsüsteemist. Võib-olla oli lennukiga seotud süsteemis sündmuste järjestus vastupidine sellele, mida nägi ema... Kahjuks see lootus ei õigusta end. Me ei räägigi sellest, et lennuk, mis pahanduse ajal üle maja lendas, liikus relatiivsusteooria seisukohalt väga väikese kiirusega — kõige rohkem 1000 kuni 1500 kilomeetrit tunnis. Ajavahemik kivi viskamise ja akna purunemise vahel on siis lenduri arvates ainult biljondiku [57] sekundi võrra erinev sellest, mida näeb ema.

[57] Käesolevas kasutatakse arvusüsteemi, kus biljon tähendab miljon miljonit.

Kui küsimus oleks ainult lennuki väikeses kiiruses, siis võiks noormees end vähemalt sellega lohutada, et ta sai nahatäie tänu kaasaegse tehnika madalale tasemele: puuduvad ülikiired lennukid. Kuid asi on siin tõsisem. Kivi viskamine ja kivi jõudmine aknasse on niisugused sündmused, millede ajalist järjestust muuta ei saa, ükskõik missugusest inertsiaalsüsteemist me ka vaataks. Ükskõik kui kiiresti lennukid üle õue lendaksid, lendurid näeksid sündmusi täpselt samas järjekorras kui emagi.

Relatiivsusteooria näitab, et looduses võib välja valida niisuguste sündmuste paare, millede ajaline järjestus on kõigis inertsiaalsüsteemides üks ja seesama. Niisugused sündmused ei ole üheski inertsiaalsüsteemis isegi samaaegsed. Eeltoodud näite najal on öeldus lihtne veenduda.

Niipea kui poiss viskab kivi, hakkab pilt sellest sündmusest ruumis valguse kiirusega igas suunas edasi liikuma. See pilt ongi valgussignaal, mille sündmus (kivi viskamine) välja saadab. Kivi liigub aeglasemalt kui valgus. Nii on valgussignaal selleks ajaks juba ammu akna juurest möödunud, kui kivi akna purustab. Pilt akna purunemisest hakkab ruumis samuti valguse kiirusega edasi liikuma. See on valgussignaal teisest sündmusest (akna purunemine). Kuna mõlemad signaalid liiguvad ühe ja sama kiirusega, siis on selge, et teine signaal ei saa esimest kunagi kätte. Valgussignaalid ei kohtu kunagi, vaid igalt poolt läheb enne läbi esimene, selle järel alles teine signaal. Tähendab, kõik vaatlejad, ükskõik kuidas nad ka ei liiguks, leiavad, et kivi viskamine toimus enne kui akna purunemine. Nende kahe sündmuse ajaline järjestus on kõigis inertsiaalsüsteemides üks ja seesama.

Üks huvitavamaid probleeme on põhjuslikkus looduses. Päikese pinnal toimus suur purse. Maal nähti erakordselt heledaid virmalisi. Kas üks nendest sündmustest saab olla teise põhjuseks? Relatiivsusteooria annab selle küsimuse lahendamiseks lihtsa juhtnööri.

On selge, et põhjus peab alati eelnema tagajärjele. Kui mõnes inertsiaalsüsteemis purse Päikesel toimub enne virmaliste ilmumist, teises süsteemis aga vastupidi, virmalised tekivad enne purset Päikesel, siis on kindel, et kumbki nendest sündmustest ei saa teise põhjuseks olla.

Niisuguste sündmuste ajaline järjestus ei ole üldse kindel, vaid sõltub sellest, missuguses inertsiaalsüsteemis me sündmusi kirjeldame. Nii ka näiteks eelmises punktis kirjeldatud välgud on täiesti iseseisvad nähtused. Kumbagi neist ei saa teise põhjuseks pidada.

Kui aga purse päikesel toimub igas inertsiaalsüsteemis enne virmaliste süttimist Maa õhkkonnas, siis on võimalik, et virmalised olid purskest tingitud. Kas virmalised olid t e g e l i k u l t purskest Päikese pinnal põhjustatud, see nõuab muidugi täiendavat uurimist. V õ i m a l u s selleks on igatahes olemas.

Pöördume nüüd tagasi välgulöökide ja akna purustamise loo juurde. Lähem järelemõtlemine näitab, et välgulöögid rongil ühelt poolt ja kivi viskamine ning akna purunemine teiselt poolt on täiesti erinevat tüüpi sündmuste paarid. Välgulöögid rongil olid niisugused sündmused, millede ajaline järjestus sõltus inertsiaalsüsteemist: ühes süsteemis oli see ühesugune, teises süsteemis teistsugune. Maaga seotud taustsüsteemis olid need välgulöögid koguni samaaegsed. Niisuguseid sündmuste paare, kus sündmuste ajaline järjestus sõltub inertsiaalsüsteemist, nimetame ruumilist tüüpi sündmuspaarideks. Ruumilist tüüpi sündmuspaari kuuluvad sündmused ei saa olla omavahel põhjuslikult seotud. Kivi viskamine ja akna purunemine moodustavad aga teistsuguste omadustega sündmuspaari. Ükskõik missugusest inertsiaalsüsteemist me ka ei vaataks, ikka puruneb aken alles pärast kivi viskamist. Need on sündmused, millede ajaline järjestus ei sõltu inertsiaalsüsteemist. Nimetame niisuguste sündmuste paare ajalist tüüpi sündmuspaarideks [58]. Need on sündmuspaarid, millesse kuuluvad sündmused võivad olla põhjuslikult seotud.

Missugune on siis tunnus, mis eraldab ruumilist ja ajalist tüüpi sündmuspaare? Mille poolest erinesid näiteks kaks välgulööki kivi viskamisest ja akna purunemi-

---

[58] Ajalist tüüpi sündmuspaarid jagatakse relatiivsusteoorias veel kahte alaliiki: ühed, kus teine sündmus toimub pärast seda, kui esimese sündmuse juurest tulev valgussignaal on juba mööda läinud, teised aga, kus teine sündmus toimub just samal hetkel, kui esimese sündmuse juurest tulev valgussignaal kohale jõuab. Viimased sündmuspaarid on õieti ajalist ja ruumilist tüüpi sündmuspaaride vahepealsed, meie loeme nad aga lihtsuse mõttes ajalist tüüpi sündmuspaaride hulka kuuluvaiks.

sest? Näib, et kõige olulisem erinevus nende sündmuspaaride vahel seisneb järgmises.

Välgulöögid järgnesid teineteisele nii kiiresti, et teine löök sähvas enne, kui valgussignaal esimese löögi juurest tema toimumiskohta jõudis (joon. 24). Aken purunes aga alles pärast seda, kui sealt oli möödunud kivi viskamisest lähtunud valgussignaal. Just see ongi oluline. Ruumilist tüüpi sündmuspaarides toimub teine sündmus alati enne esimese sündmuse juurest lähtunud valgussignaali kohalejõudmist. Ajalist tüüpi sündmuspaarides seevastu teine sündmus toimub alles pärast seda, või ka samal ajahetkel, kui valgussignaal esimese sündmuse juurest kohale jõuab.

Eespool nägime, et põhjuslikult saavad olla seotud ainult teist tüüpi sündmuspaaridesse kuuluvad sündmused. Kui tahame nüüd otsustada küsimuse üle, kas virmalised võisid olla tingitud purskest Päikese pinnal või mitte, saame selleks lihtsa kriteeriumi.

Kui virmalised ilmusid enne seda, kui valgussignaal Päikesel toimunud purskest nende ilmumiskohta jõudis (s. o. tegemist oli esimest tüüpi sündmuspaariga), siis kumbki nendest sündmustest ei saa olla teise põhjuseks. Kui aga virmalised tekkisid just Päikese purskest tuleva valgussignaali kohalejõudmisel või isegi hiljem (s. o. tegemist on teist tüüpi sündmuspaariga), siis virmaliste põhjuseks võib olla purse Päikesel.

Eelnevast nähtub, et ükski mõju looduses ei saa levida valgusest kiiremini. Kui mõju levib valguse kiirusega, siis tagajärg järgneb põhjusele samal momendil, kui valgussignaal jõuab põhjussündmusest tagajärg-sündmuse toimumiskohta. Kui mõju liigub valgusest aeglasemalt (nagu oli kiviga akna purustamisel), siis tagajärg-sündmus toimub pärast seda, kui valgussignaal põhjussündmusest on esimese toimumiskohast juba möödunud. Nii ongi tegelikult olukord Päikese pursete mõjuga Maale. Pursked ning nendega kaasnevad nähtused kutsuvad Maal esile virmalisi, magnetilisi torme ja lühilainelise raadioside häireid. Need nähtused ei teki aga silmapilkselt koos pursetega Päikesel. Purse tekitab oma müber tugeva magnetivälja, samuti paiskub seejuures maailmaruumi osakesi, mille kiirus on kuni mõni tuhat kilomeetrit sekundis. Magnetiväli liigub ruumis elektromagnetilise välja kiirusega c, s. t. juba 8,3 minutit pärast purset on magnetiväli Maale

jõudnud.[59] See on Päikese purske esimene mõju, mis jõuab Maale täpselt samal ajal kui valguskiired purske pildigagi. Osakeste poolt edasikantav mõju ei saa Maal ilmneda aga varem kui umbes ööpäeva möödumisel — see aeg kulub osakestel Maa ja Päikese vahelise kauguse ületamiseks. Vaatlused näitavadki, et kõige intensiivsemad virmalised esinevad umbes 24 tundi pärast uute pursete ning laikude tekkimist Päikesel, mis kinnitab, et virmaliste põhjuseks on Päikeselt purske ajal väljapaisatud mateeriaosakesed.

6. KUI KIIRESTI VOOLAB AEG?

Huvitava tegevuse või paeluva raamatu juures lendab aeg märkamatult, igavat loengut kuulates venib aga teosammul. Kuid igaühele on selge, et siin ei ole tegemist tõelise füüsikalise ajaga, vaid ainult meie subjektiivse ajatundega. Kuidas on aga füüsikalise ajaga, kui suur on tema voolamise kiirus? On see suur või väike? Lähem järelemõtlemine näitab, et vastust sellele küsimusele on võimatu anda. Olukord on siin samasugune, nagu oleks kedagi koos kellaga kinnisesse kasti asetatud ja nõutud, et ta otsustaks kella käigu õigsuse üle. Kella käigu üle saab otsustada ainult mõne teise kellaga võrdlemisel. Aja voolamise kiiruse üle saab otsustada ainult siis, kui võrrelda seda mingisuguse teise aja voolamisega.

Mõistlikult saame küsimuse aja voolamise kiirusest püstitada näiteks nii: kui suur on aja voolamise kiirus naabertoas, võrreldes aja voolamise kiirusega minu juures. Või jälle: kui suur on aja voolamise kiirus lendaval reaktiivlennukil võrreldes aja voolamise kiirusega lennuväljal. Nendele küsimustele saab vastata, kui võrrelda näiteks lennukil asetseva ideaalselt täpse kella käiku teise samasuguse lennuväljale paigutatud kella käiguga. Kui niisuguse võrdlemise teostavad lennuvälja töötajad ja leiavad näiteks, et lennu ajal lennuki kell jääb maapealsest kellast taha, siis võivad nad öelda: «Maapinna suhtes [60] voolab aeg lennukil aeglasemalt kui maapinnal.»

---

[59] Liikuva magnetväljaga kaasneb alati ka elektriväli, nii et faktiliselt liigub Päikeselt Maa poole elektromagnetiline laine.

[60] Sõnadega «maapinna suhtes» on rõhutatud seda, et kellade võrdlejad asusid maapinnal. Hiljem näeme, et samade kellade käigu võrdlemine näiteks lenduri poolt annab hoopis teise tulemuse.

Näeme, et aja voolamise kiiruse üle otsustamiseks on meil eelkõige tarvis ideaalseid kelli, see on kelli, mis peegeldavad ideaalselt täpselt aja voolamise kiirust ilma igasuguste mehhanismist tingitud ebatäpsusteta. Kellaks sobib iga looduses toimuv protsess, näiteks radioaktiivsete ainete lagunemine. Iga radioaktiivset elementi iseloomustab poolestusaeg, s. o. aeg, mille jooksul tema aatomite arv kahaneb poole võrra. Raadiumi poolestusaeg on näiteks 1590 aastat.[61] Selle aja jooksul pooled raadiumi aatomitest on muutunud teise elemendi — radooni aatomiteks. Viimased omakorda lagunevad edasi. Aja voolamise kiiruse võrdlemist lennukil ja lennuväljal tuleks siis ette kujutada näiteks nii, et lennukile ja lennuväljale asetatakse raadiumi tükike. Oletame, et just selleks momendiks, kui lennuvälja raadiumist on lagunenud üks miljondik, jõuab lennuk tagasi. Kohe mõõdetakse ka lennukil oleva raadiumi hulk. Kui lennukil olevast raadiumist on lagunenud samuti üks miljondik, siis tähendab see, et aeg kulges lennukil sama kiiresti kui maapinnal. Kui aga lagunenud aatomite arv lennukil on väiksem, näitab see, et aeg voolas lennukil aeglasemalt kui maapinnal.

Lugeja märkab kohe, et eelmises näites oli kellade võrdlemiseks eriti soodne olukord: lennuk pöördus just vajalikuks ajamomendiks lennuväljale tagasi. Kuidas aga võrrelda kelli siis, kui lennuk näiteks eemaldub kogu aeg lennuväljast, liikudes ühtlaselt ja sirgjooneliselt? Et sellele küsimusele vastata, peatume lähemalt kellade võrdlemise juures.[62]

Kui kellad asetsevad ühes ja samas ruumipunktis (praktiliselt tähendab see, et kaugus kellade vahel on väga väike), siis pole nende võrdlemiseks muud vaja, kui heita pilk numbrilaudadele. Valguskiir kannab mõlema kella pildi silmani ning me näeme osuteid just niisuguses asendis, nagu nad samaaegselt on — see ongi kellade võrdlemisel oluline.

Kui kellad asetsevad teineteisest eemal, kuid on oma-

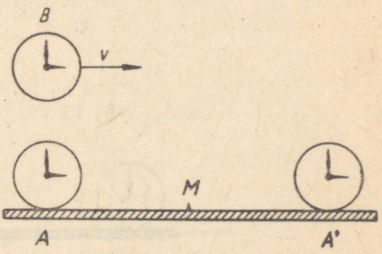
---

[61] See tähendab, et näiteks ühest grammist raadiumist on 1590 aasta pärast järel 0,5 grammi, 3180 aasta pärast — 0,25 grammi, 4770 aasta pärast — 0,125 grammi jne.

[62] Kella all me mõistame kogu aeg ükskõik missugust looduslikku protsessi. Ainult konkreetsuse mõttes kujutame teda osutite ja numbrilauaga varustatud seadeldisena.

vahel liikumatud, ka siis pole nende võrdlemine raske. Selleks tuleb vaatlejal asetuda mõlemast kellast võrdsele kaugusele. Kuna valguskiir ühe kella juurest tuleb vaatlejani täpselt sama kaua aega kui teise kella juurest, siis näeb ta jällegi kellade osuteid just asendeis, nagu nad ühel ja samal ajamomendil on. Oluline on seejuures, et kellade võrdleja oleks ise kellade suhtes liikumatu. Muidu tekivad samasugused segadused nagu sündmuste samaaegsuse üle otsustamisel.

Kuidas nüüd võrrelda kahte kella, kui üks neist liigub teise suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Omavahel liikuvate kellade näitusid saame otseselt võrrelda ainult sel hetkel, kui nad asetsevad ühes ja samas kohas, s. o. kui nad parajasti teineteisest mööduvad. Et võrrelda kellade käiku, tuleb mõne aja pärast teostada veel teine võrdlemine. Alles siis näeme, kumb kelladest on vahepeal aeglasemalt, kumb kiiremini käinud. Kellade teistkordseks võrdlemiseks tuleb kasutada juba keerukamat meetodit. Selgitame seda joonisel 25.

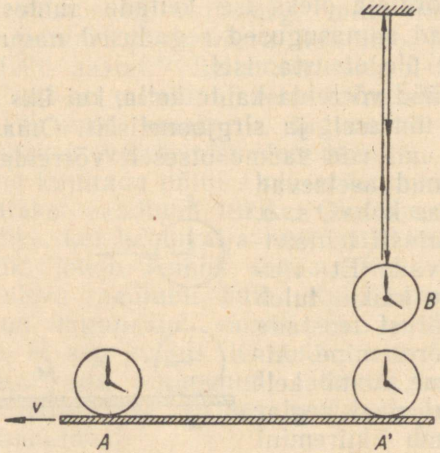


Joon 25. Kui kell *B* liigub kella *A* suhtes, siis tuleb nende käigu võrdlemisel kasutada abikella *A'*, mis on kella *A* suhtes liikumatu.

Võtame kaks kella, *A* ja *A'*, mis olgu meie suhtes liikumatud. Sünkroniseerime need kellad, s. o. asetame nende osutid nii, et nad näitaksid samaaegselt ühte ning samasse kohta numbrilaual (igapäevases elus öeldakse selle kohta, et «me seadsime kellad ühte»). See tähendab, et mõlemast kellast võrdsel kaugusel olev kellade suhtes liikumatu vaatleja *M* näeb mõlemat kella ühte ning sama aega näitavat. Asetume nüüd kella *A* kõrvale ning sel silmapilgul, kui kellast *A* möödub kell *B*, võrdleme nende näitusid. Mõne aja pärast kell *B* möödub ka kellast *A'*; sel hetkel, kui see sünnib, teostame ka siin võrdluse. Kuna kell *A'* käis kellaga *A* sünkroonselt, oleme sellega kaudselt võrrelnud kelli *A* ja *B* teistkordselt. Nüüd saame juba otsustada nende kellade käigu erinevuse üle, s. o. saame teada, kuidas erineb aja voolamise kiirus kellaga

A seotud inertsiaalsüsteemis aja voolamise kiirusest kellaga B seotud süsteemis.

Lugejale võib tunduda kogu see kellade võrdlemise keeruline süsteem tarbetuna. Kas siis tõesti eri inertsiaalsüsteemides võib aeg erineva kiirusega voolata!

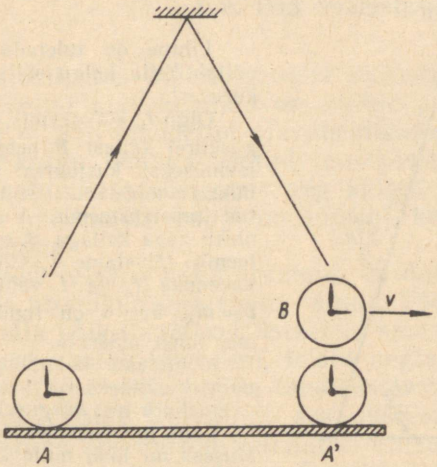


Joon. 26. Valgussignaali tee kella B juures oleva vaatleja jaoks. Vaatleja loeb iseennast ja kella B paigalseisvaiks, kelli A ja A' aga kiirusega v liikuvaiks. Kui valgussignaal teele läks, oli vaatleja kohal kell A, signaali tagasijõudmise ajal aga kell A' (joonisel on kujutatud kellade paigutus valgussignaali tagasijõudmisel). Valguskiir kattis kella B juures oleva vaatleja jaoks ühe ja sama tee edasi-tagasi.

Võib-olla tundub see esimesel pilgul uskumatuna, kuid see on tõesti nii. Kohe näeme, et niisugune kellade võrdlemine näitab meile järgmist. Kellaga B seotud inertsiaalsüsteemis voolab aeg aeglasemalt kui kellaga A seotud inertsiaalsüsteemis. Öeldus veendumiseks vaatame järgmist mõttelist katset.

Olgu kellad A ja A' nende suhtes liikumatu vaatleja poolt endiselt sünkroniseeritud. Kujutleme nüüd, et sel hetkel, kui kell B möödub kellast A, lähtub tema juurest

valgussignaal. Signaal kohaku oma teel peeglit ning jõudku kella B juurde tagasi just sel momendil, kui viimane möödub kellast A'. Kella B juures olev vaatleja väidab nüüd, et valguskiir läbis ühe ja sellesama tee kellast peeglini edasi-tagasi, sest kiir tuli tagasi samasse

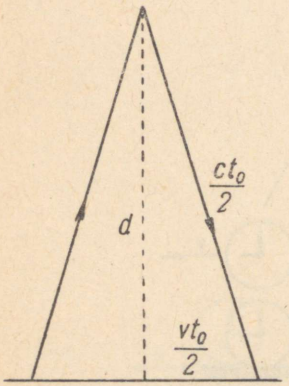


Joon. 27. Valgussignaali tee kella A juures oleva vaatleja jaoks. Vaatleja loeb iseennast ja kelli A ning A' paigalseisvaiks, kella B aga kiirusega v liikuvaks. Valgussignaal lähtus kella A juurest ja jõudis tagasi kella A' juurde, järelikult liikus ta mööda võrdhaarse kolmnurga haarasid. Joonisel on kujutatud kellade paigutus valgussignaali tagasijõudmise hetkel.

punkti, kust ta lähtuski, s. o. kella B juurde (joon. 26). Teiste sõnadega, kellaga B seotud taustsüsteemis on valguskiire tee sirgjoon, mille ta katab edasi-tagasi. Missugune on selle kiire tee aga kellaga A seotud taustsüsteemis?

Kella A suhtes liikumatu vaatleja näeb, et kiir lähtus kella A juurest, tagasi jõudis aga kella A' juurde. Kellaga A seotud taustsüsteemis valguskiir liikus võrdhaarse kolmnurga haarasid mööda (joon. 27) ja tema tee seal

on järelikult pikem kui kellaga B seotud süsteemis.[63] Eespool nägime, et valguse kiirus on kõigis inertsiaalsüsteemides üks ja seesama c, järelikult on see c nii kellaga A kui ka kellaga B seotud süsteemis. Siit järeldub otseselt, et kella B suhtes oli valguskiir teel vähem aega kui kella A suhtes. Järelikult käib liikuv kell B aeglasemalt kui paigalseisev kell A.



Joon. 28. Valguskiire tee kella B juurest peeglini ja tagasi kella A juures olija jaoks (pidev joon) ja kella B juures olija jaoks (punktiirjoon).

Lihtne on tuletada valemit, mis näitab kella käigu sõltuvust liikumise kiirusest.

Olgu t_0 ajavahemik, mis kulus valguskiirel kellast B peeglini ja tagasi levimiseks, kusjuures seda ajavahemikku mõõdame kellaga A seotud taustsüsteemis. Valguskiire teeloleku aega kellaga B seotud taustsüsteemis tähistame t. Oletame, et ajavahemike t_0 ja t vahel kehtib seos $t = at_0$, kus a on tundmatu kordaja, mis tuleb määrata.

Joonistame kolmnurga (joon. 28), mille haaradeks on joonisel 27 antud valguskiire tee, kõrguseks aga valguskiire tee jooniselt 26. Selle kolmnurga aluseks on lõik, mille kattis kiirusega v liikuv kell B sel ajal, kui valguskiir oli teel; selle lõigu pikkus on seega vt_0. Kolmnurga haarade kogupikkus võrdub teega, mille käis ära valgus t_0 sekundi jooksul. Ühe haara pikkuseks on seega $\frac{1}{2}ct_0$. Peegli kaugus kellast B (peegel on mõeldud kella B suhtes liikumatuna) avaldub siis kellaga A seotud taustsüsteemis järgmiselt:

$$d = \sqrt{\left(\frac{ct_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{vt_0}{2}\right)^2} = \frac{ct_0}{2}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Kellaga B seotud taustsüsteemis oli valgussignaal teel $t = at_0$ sekundit ja käis selle aja jooksul mööda kolmnurga kõrgust edasitagasi. Peegli kaugus kellast B avaldub siis selles süsteemis järgmiselt:

---

[63] Relatiivsusteoorias näidatakse, et kellade A ja B kohtumishetkel peegli kaugus kellast B kellaga B seotud taustsüsteemis on sama suur kui kaugus kellast A kellaga A seotud taustsüsteemis (vt. järgmist punkti, kus näidatakse, et liikumise ristsihis olevad ruumilised pikkused on kõigis inertsiaalsüsteemides võrdsed).

$$d = \frac{\alpha t_0 c}{2}.$$

Võrrutades need kaks d avaldist, saame α väärtuse $\alpha = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Seega

$$t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (3)$$

Saime valemi, mis näitab, kuidas kiirusega v liikuva kellaga mõõdetud ajavahemik t on seotud paigalseisvate kellade A ja A' abil mõõdetud ajavahemikuga t_0. Iga kell mõõdab aja kulgu temaga seotud taustsüsteemis. Seega kellaga B seotud taustsüsteemis aeg kulgeb aeglasemalt (ajavahemik sündmuste vahel on lühem) kui kellaga A seotud süsteemis.

Lugejal võib tekkida nüüd arvamus, et oleme oma relatiivsusteooria arendamisega rappa läinud. Tõepoolest, kuidas saavad olla kõik inertsiaalsüsteemid samaväärsed, kui ühes neist aeg voolab kiiremini, teises aeglasemalt. Jääb mulje, et nii võime välja otsida taustsüsteemi, milles aeg voolab näiteks kõige kiiremini; see süsteem oleks siis teiste süsteemide ees ilmselt eelistatud olukorras, mis on vastuolus relatiivsusprintsiibiga. Tegelikult seda vastuolu siiski ei esine.

Eeltoodud näites oli vaatleja kellade A ja A' suhtes liikumatu (muidu ei oleks tal võimalik olnud neid kelli sünkroniseerida). Võrreldes kellade A ja B käiku (s. o. aja voolamise kiirust nende kelladega seotud taustsüsteemides), jõudis ta järeldusele, et liikuv kell B käib aeglasemalt kui paigalseisev kell A. Vaatame nüüd, missugusele järeldusele kellade käigu kohta jõuab kella B suhtes liikumatu vaatleja. Et võrrelda kellade A ja B käiku, peab ka temal olema abikell. Kas ta saab abikellana kasutada kella A'? Lihtne arvestus näitab, et ei saa.

Kellad A ja A' olid sünkroniseeritud kella A suhtes liikumatu vaatleja poolt. See tähendab, et kella A juures oleva vaatleja jaoks nende kellade osutid olid s a m a - a e g s e l t ekvivalentsetes asendites. Kuid eelmises punktis nägime, et sündmuste samaaegsus on relatiivne mõiste: sündmused, mis on samaaegsed näiteks kellaga A seotud süsteemis, ei ole seda kellaga B seotud süsteemis. Kella B juures oleva vaatleja jaoks on kellade A ja A' osutid e r i a j a m o m e n t i d e l ekvivalentsetes asen-

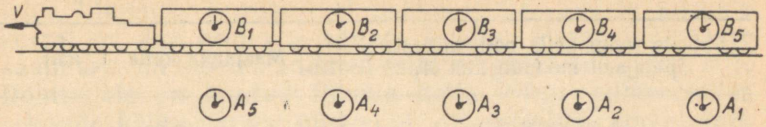
dites. Järelikult kell A' ei käi kella B juures oleva vaatleja jaoks kellaga A sünkroonselt ning kellade võrdlemise juures seda kasutada ei saa. Kui kella B suhtes liikumatu vaatleja tahab võrrelda kellade A ja B käiku, peab ta võtma abikella B', mis on kella B suhtes liikumatu ning mille ta on kellaga B sünkroniseerinud. Arutledes täpselt samuti nagu eespool, veendume nüüd, et kell A käib aeglasemalt kui kell B.[64]

Järelikult käib kella A suhtes liikumatu vaatleja jaoks kell A kiiremini kui kell B; kella B suhtes liikumatu vaatleja jaoks aga käib kell B kiiremini kui kell A. Kelladega A ja B seotud inertsiaalsüsteemid on seega täiesti võrdses olukorras. Mõlemas neis kehtib loodusseadus — süsteemi suhtes liikumatu kell käib kõige kiiremini, kuna liikuv kell käib seda aeglasemalt, mida suurem on tema kiirus selles taustsüsteemis (vt. valem (3)). Järelikult ei ole me rikkunud relatiivsusprintsiipi, mis nõuab kõigi süsteemide samaväärsust.

Oletame nüüd konkreetsuse mõttes, et me võrdleme aja kulgu maapinnal ning kiirusega 198 450 kilomeetrit sekundis liikuval rongil. Üks võrdlejatest asub rongil, teine aga maapinnal. Maapinnal asetsev vaatleja sünkroniseerib kõik maapinna kellad A_1, A_2, A_3, A_4 (joon. 29), kuna rongil olija sünkroniseerib kõik rongi kellad B_1, B_2, B_3, B_4. Maapinnal olija võrdleb rongi kella B_1 kõigi oma kelladega. Oletame, et sel hetkel, kui kell B_1 möödus kellast A_1, näitasid mõlemad «kell üks». Oletame veel, et sel momendil kui kell B_1 möödub kellast A_2, näitab viimane täpselt «kell kaks». Kui palju näitab sel kohtumisel rongi kell B_1? Arvutus valemi (3) järgi annab: kui paigalseisev kell näitab ühe tunni möödumist, siis kiirusega 198 450 kilomeetrit sekundis liikuv kell näitab ainult 45 minuti möödumist. Seega kellade B_1 ja A_2 kohtumisel esimene neist ei näita mitte 2.00, vaid 1.45. Kella B_1 näitude võrdlemine maapinnale asetatud kellade näitudega on teostatud tabelis 3. Tabel 4 esitab aga võrdlemise tulemused, mis sai rongil olev vaatleja, kes võrdles ühte maapinnal olevat kella terve rea rongil paiknevate kelladega.

---

[64] See on arusaadav, sest kellade B ja B' võrdlemine kellaga A toimub täpselt samuti kui kellade A ja A' võrdlemine kellaga B. Järelikult peab ka võrdlemise tulemus sama olema — liikuv kell (esimesel juhul kell A, teisel juhul kell B) käib aeglasemalt kui paigalseisev kell.



Joon. 29. Aja voolamise kiiruse võrdlemine eri inertsiaalsüsteemides. Maapinnal olev vaatleja võrdleb rongi kella B_1 näitusid kõigi maapinnal olevate kellade A_1, A_2, A_3 jne. näitudega. Iga võrdlemine toimub sel hetkel, kui rongi kell B_1 vastavast maapinnal olevast kellast möödub.

Rongil olev vaatleja võrdleb maapinna kella A_1 näitusid kõigi rongi kellade B_1, B_2, B_3 jne. näitudega. Iga võrdlemine toimub sel hetkel, kui maapinnal olev kell A_1 vastavast rongi kellast möödub. Joonisel on kujutatud olukord, kus rongi vaatleja võrdleb parajasti kelli A_1 ja B_5, kuna maapinnal olev vaatleja võrdleb kelli B_1 ja A_5.

Tabelitest 3 ja 4 ilmnevad selgesti mõlema vaatleja tulemused: maapinnal oleva vaatleja jaoks aeg rongil voolab aeglasemalt ajast maapinnal, kuna rongil olija jaoks voolab rongi aeg kiiremini maapinna ajast. Nende järelduste näivas vastuolus avaldub loodusseadus, et aja voolamise kiirus mingis inertsiaalsüsteemis ei ole absoluutne mõiste. Aja voolamise kiirusest antud inertsiaalsüsteemis saame rääkida alles siis, kui oleme eelnevalt fikseerinud teise süsteemi, mille suhtes me seda kiirust mõõdame. Sellest seisukohast on aja voolamise kiiruse mõiste sarnane keha kiiruse mõistega. Ka keha kiirusest saime rääkida alles siis, kui olime eelnevalt kindlaks määranud taustsüsteemi, mille suhtes me kiirust määrasime. Rääkides kiirusest, tuleb alati öelda, missuguse keha kiirust me mõtleme ning missuguse taustsüsteemi suhtes

Tabel 3

Selle maapinna kella näit, millest kell B_1 parajasti möödub	Rongi kella B_1 näit
1.00 (kell A_1)	1.00
2.00 (kell A_2)	1.45
3.00 (kell A_3)	2.30
4.00 (kell A_4)	3.15
5.00 (kell A_5)	4.00

Märkus. Rongil oleva kella näitude võrdlemine maapinnal asuvate omavahel sünkroniseeritud kellade näitudega, kui rong liigub maapinna suhtes kiirusega 198 450 kilomeetrit sekundis. Sulgudes on märgitud kell, mida parajasti võrreldi rongi kellaga B_1.

Tabel 4

Selle rongi kella näit, millest parajasti möödub kell A_1	Maapinna kella A_1 näit
1.00 (kell B_1)	1.00
2.00 (kell B_2)	1.45
3.00 (kell B_3)	2.30
4.00 (kell B_4)	3.15
5.00 (kell B_5)	4.00

Märkus. Maapinna kella näitude võrdlemine rongil asuvate omavahel sünkroniseeritud kellade näitudega, kui maapind liigub rongi suhtes kiirusega 198 450 kilomeetrit sekundis. Sulgudes on märgitud kell, mida parajasti võrreldi kellaga A_1.

me seda kiirust mõõdame. Samuti rääkides ajast, tuleb alati lisada, missuguse inertsiaalsüsteemi aega me mõtleme ning missuguse inertsiaalsüsteemi suhtes me selle voolamise kiirust mõõdame.

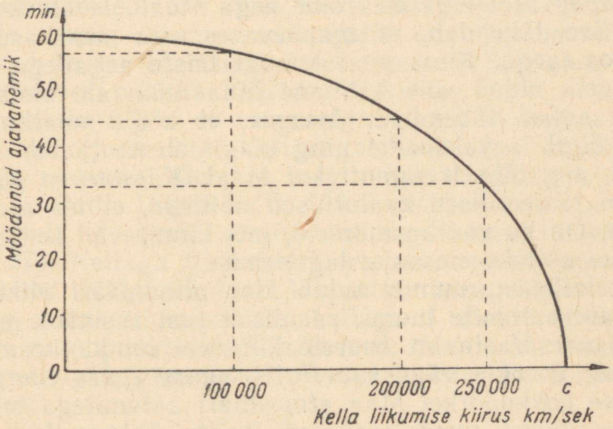
Kella käigu sõltuvust liikumiskiirusest kirjeldab valem (3). Selle sõltuvuse konkreetsemaks iseloomustamiseks on koostatud tabel 5. Tabelist on näha, et isegi niisuguse suure kiiruse korral, nagu 300 kilomeetrit sekundis, jääb liikuv kell paigalseisvast tunni jooksul ainult 0,002 sekundi võrra taha. See on tühine suurus. Kaasaegses tehnikas ettetulevate kiiruste juures, mis on ülimalt 8 kilomeetrit sekundis, on see mahajäämine veel palju väiksem. Seetõttu igapäevases elus kella käigu sõltuvus

Tabel 5

Kella käigu sõltuvus tema liikumise kiirusest

Kella liikumise kiirus (kilomeetrites sekundi kohta)	Ajavahemik, mis on möödunud liikuva kella järgi, kui paigalseisev kell näitab ühe tunni möödumist
300	59 min. 59,998 sek.
3 000	59 min. 59,8 sek.
100 000	56 min. 34 sek.
200 000	44 min. 43 sek.
250 000	33 min. 10 sek.
290 000	15 min. 22 sek.
299 000	4 min. 54 sek.
299 900	1 min. 33 sek.
299 990	29 sek.

tema liikumise kiirusest ei hakka silma. Suurte kiiruste korral on aga erinevus vägagi tunduv. Parema ülevaate saamiseks on tabeli 5 andmed esitatud graafikus (joon. 30). Rõhtteljele on kantud liikuva kella kiirus kilomeetrites sekundi kohta, kuna püstteljel on esitatud ajavahemik liikuva kella järgi, kui paigalseisev kell näitab 60 minuti möödumist.



Joon. 30. Kella käigu sõltuvus tema liikumise kiirusest.

Klassikalises mehaanikas uuritakse ainult aeglasi liikumisi. See tähendab, et kõikide klassikalises mehaanikas kasutatavate taustsüsteemide kellad käivad praktiliselt ühtemoodi. Igal taustsüsteemil ei olegi järelikult vajadust oma kella järele. Piisab, kui on olemas üks universaalne kell, mis mõõdab aega kõigis taustsüsteemides korraga. Teine lugu on relatiivsusteoorias. Kuna see teooria uurib eelkõige just suure kiirusega toimuvaid liikumisi, siis käib siin iga taustsüsteemi kell teistest kelladest erinevalt. Universaalset kella relatiivsusteoorias kasutada ei saa. Siin peegeldub jällegi tõsiasi, et relatiivsusteoorias pole võimalik aega ruumist eraldada.

Kõik looduses olevad kehad muutuvad aja jooksul. Raud roostetab, puu mädaneb, radioaktiivse aine tükike muutub aja jooksul teiseks aineks jne. Kõigi nende protsesside kiirus sõltub aja voolamise kiirusest kehal. Eelne-

vast on selge, et aja kulg kehal (seega ka kõigi nimetatud protsesside kiirus) sõltub sellest, kuidas liigub keha vaatleja suhtes. Kui keha on liikumatu, siis vaatleja arvates voolab aeg seal maksimaalse kiirusega. Teiste sõnadega: kui keha vaatleja suhtes ei liigu, siis kehale kinnitatud kell käib maksimaalse kiirusega. Aega, mida mõõdab keha külge kinnitatud kell, nimetatakse selle keha omaajaks.

Igapäevases elus määrame aega Maal olevate kellade abil. See tähendab, et igapäevases elus me kasutame Maa omaaega. Kuna meil kunagi teiste aegadega tegemist pole olnud, siis kaldume Maa omaajale omistama universaalset tähendust. Arvame, et kogu maailmaruumis, kõigil taevakehadel ning kõigil elementaarosakestel voolab aeg täpselt samuti kui Maal. Käesolevas punktis toodud teoreetilised kaalutlused näitasid, et nii see olla ei saa. On ka vaatlusandmeid, mis kinnitavad sedasama. Võtame näiteks mesonite lagunemise.

Kosmilisest ruumist sajab Maa atmosfääri ülikiiresti liikuvaid aatomite tuumi, peamiselt just vesiniku ja heeliumi omi. Vastavalt suurele kiirusele on ka kosmiliste osakeste energia väga suur.[65] Niisuguse suure energiaga osakese kokkupõrkel Maa atmosfääri aatomitega tekivad mitmesugused uued osakesed, teiste hulgas ka mitut liiki mesonid. Mesonid ei ole püsivad osakesed, vaid nad lagunevad varsti pärast tekkimist. Nii näiteks elektronist 207 korda raskem μ-meson püsib ainult veidi üle kahe miljondiku sekundi — see on juhul, kui ta on liikumatu. Mõõtes Maa atmosfääris suure kiirusega liikuva μ-mesoni eluiga, saame aga suurema arvu. Miks pikendab liikumine mesoni eluiga? Seepärast, et me mõõdame liikuva mesoni eluiga maapinnal oleva kellaga. Kui meie kella järgi on möödunud kaks miljondikku sekundit, siis liikuval mesonil olev kell, mis käib relatiivsusteooria kohaselt aeglasemalt, ei näita veel selle aja möödumist. Mesonil ei ole veel aeg laguneda.

---

[65] Üksikute ülikiirete kosmiliste osakeste energia on näiteks nii suur, et ühe osakese energiast piisaks 200-grammise keha tõstmiseks 10 sentimeetri kõrgusele.

Kõik see, mida eelmistes punktides rääkisime aja kohta, kehtib teatud muudatustega ka ruumi suhtes. Selles avaldub aja ja ruumi lähedane sugulus. Nii nägime eespool, et sündmused, mis ühes inertsiaalsüsteemis toimuvad ühel ja samal ajamomendil (kuid eri ruumipunktides), ei ole samaaegsed teistes inertsiaalsüsteemides. Analoogiliselt sündmused, mis ühes inertsiaalsüsteemis juhtuvad ühes ja samas ruumipunktis (kuid eri ajamomentidel), toimuvad teistes inertsiaalsüsteemides eri kohtades. Näiteks eelmises punktis kirjeldatud katses kella B juures olev vaatleja ütleb, et valgussignaal jõudis tagasi oma lähtepunkti (joon. 26). Kelladega A ja A' kaasaliikuv vaatleja seevastu näeb, et valgussignaal lähtus kella A kohalt ja jõudis tagasi kella A' kohale. See vaatleja leiab loomulikult, et signaal ei jõudnud tagasi oma lähtekohta (joon. 27). Kellaga B seotud inertsiaalsüsteemis toimusid sündmused (valgussignaali lähtumine ja tagasijõudmine) ühes ja samas ruumipunktis, kellaga A seotud süsteemis aga eri ruumipunktides. Sündmused, mis on samapaiksed ühes inertsiaalsüsteemis, ei ole seda teistes inertsiaalsüsteemides.

Et üleminekuga ühest inertsiaalsüsteemist teise võib samapaikseid sündmusi ruumiliselt eraldada, on juba klassikalises mehaanikas tuntud tõsiasi. Reisija istub vagunis ning suitsetab. Temalt küsides saate vastuseks, et kõik piibutäied tõmbas ta ühes ja samas kupees ühel ja samal pingil istudes, s. o. ühes ja samas kohas. Ametnikud raudteejaamades teavad aga rääkida, et esimese piibu süütas ta Tallinnas, teise alles Aegviidus. Piibu süütamised pole maapinna suhtes sugugi samapaiksed sündmused. Nad on seda ainult rongi suhtes. Arusaamiste erinevus selles küsimuses on täiesti mõistetav. Reisija kasutab ruumipunktide kindlaksmääramisel taustkehaks rongi, raudteeametnikud aga maapinda. Rongi liikumine maapinnal tingibki rongi suhtes samapaiksete sündmuste ruumilise eraldumise maapinna suhtes.

Klassikaline mehaanika räägib küll samapaiksuse relatiivsusest, kuid samaaegsusele omistab ta absoluutse tähenduse (s. o. sündmusi, mis on samaaegsed ühes inertsiaalsüsteemis, loeb ta samaaegseteks ka kõigis teistes taustsüsteemides). Relatiivsusteooria parandab selle vea,

näidates, et samaaegsus on samasugune relatiivne mõiste nagu samapaiksuski. Seejuures korrigeerib teooria ka samapaiksuse küsimust: relatiivsusteooria seisukohad ühtivad siin klassikalise mehaanika seisukohtadega ainult valguse kiirusega võrreldes aeglaste liikumiste korral. Näiteks tabelis 6 on antud ruumiline kaugus kahe sündmuse vahel arvutatuna klassikalise mehaanika ja

Tabel 6

Samapaiksete sündmuste ruumiline eraldumine liikuvates inertsiaalsüsteemides klassikalise mehaanika ja relatiivsusteooria järgi

Liikuva inertsiaalsüsteemi kiirus kilomeetrites sekundi kohta selle süsteemi suhtes, milles sündmused on samapaiksed	Ruumiline kaugus sündmuste vahel liikuvas inertsiaalsüsteemis, mõõdetuna kilomeetrites	
	klassikalise mehaanika järgi	relatiivsusteooria järgi
0	0	0
300	300	300,0002
3 000	3 000	3 000,2
10 000	10 000	10 006
100 000	100 000	106 100
200 000	200 000	268 300
250 000	250 000	452 200
290 000	290 000	1 132 700

relatiivsusteooria järgi. Seejuures on oletatud, et nn. paigalseisvas inertsiaalsüsteemis toimuvad need sündmused ühes ja samas ruumipunktis ühesekundilise vaheaja järel. Näeme, et kiirusteni kuni 3000 kilomeetrit sekundis langevad relatiivsusteooria ja klassikalise mehaanika tulemused praktiliselt ühte. Niisuguste kiirusteni võib klassikalise teooria rakendamist õigustatuks lugeda. Kiiremate liikumiste korral annab klassikaline teooria sündmuste ruumilise kauguse jaoks aga väiksemad väärtused kui õigus. Õiged väärtused annab relatiivsusteooria.

Aja relatiivsus ja ruumi relatiivsus ei ole eraldiseisvad küsimused, vaid nad põimuvad teineteisega. Selles võime veenduda lihtsa näite abil.

Kujutleme ülikiiret rongi, mis liigub maapinna suhtes kiirusega 290 000 kilomeetrit sekundis. Olgu selle rongi vagunisse paigutatud kell, mille osuti iga sekundi möödu-

misel hüppab uuele jaotusele kella numbrilaual. Uurime nüüd kahte teineteisele järgnevat hüpet — need on kaks sündmust, mis rongiga seotud inertsiaalsüsteemis toimuvad ühes ja samas ruumipunktis. Ajavahemik nende vahel on rongi ajas mõõdetuna täpselt üks sekund. Tabelist 6 näeme, et maapinnal olija suhtes ei ole vaadeldavad sündmused sugugi samapaiksed, vaid ruumiline kaugus nende vahel on 1 132 700 kilomeetrit. Kui suur ajavahemik on nende sündmuste vahel maapealse kellaga mõõdetuna? Kas see saab olla üks sekund, nagu ütleb rongi kell? Ei saa. Kui ajavahemik oleks ainult üks sekund, siis tähendaks see, et rongil paiknev kell on ühe sekundi jooksul edasi liikunud 1 132 700 kilomeetrit. Rong oleks liikunud kiiremini kui valgus, mis on võimatu.

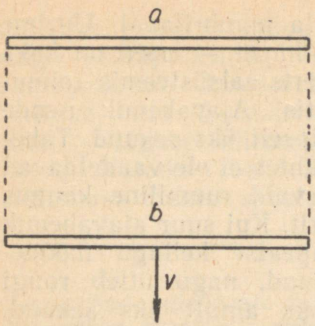
Lihtne arvutus näitab, et valgusel kulub 1 132 700 kilomeetri katmiseks veidi vähem kui 3,8 sekundit. Rongil läheb selleks veel rohkem aega. Tõepoolest, liikudes kiirusega 290 000 kilomeetrit sekundis kulub rongil nimetatud vahemiku katmiseks 3,9 sekundit. See on just ajavahemik, mille möödumist näitab maapinnal olev kell selle aja jooksul, kui rongil möödub üks sekund. Siit on näha, et rongis kui maapinna suhtes liikuvas süsteemis kulgeb aeg aeglasemalt ajast maapinnal. See on tõsiasi, milles me veendusime juba eespool. Lähtudes samapaiksuse relatiivsusest, jõudsime välja aja relatiivsusele. Selles peegeldub seos aja ja ruumi vahel.

8. LIIKUVA KEHA MÕÕTMED

Asume nüüd pikkuse mõõtmise probleemide lähemale vaatlemisele. Ka siin tuleb meil mõningate ootamatustega kokku puutuda.

Kujutleme, et võrrelda tuleb kahe varda pikkust. Kui üks varras teise suhtes ei liigu, on seda lihtne teha. Selleks tuleb ainult asetada üks varras teise kõrvale ning vaadata, kas mõlema varda otsad ühtivad või mitte. Omavahel liikuvate varraste võrdlemine on juba keerukam.

Olgu vardad a ja b paralleelsed ning liikugu varras b iseenda ristsuunas kiirusega v (joon. 31). Varraste pikkuste võrdlemiseks laseme varda a otstest välja vardaga risti levivad valguskiired. Kui need kiired tabavad

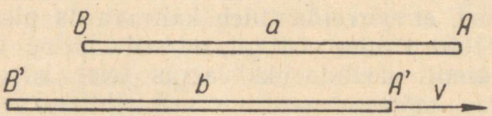


Joon. 31. Liikuvate varraste pikkuste võrdlemine juhul, kui vardad on risti suhtelise liikumise suunaga. Punktiirjooned kujutavad valguskiiri, mis on ühe varda otstest teise varda otstesse suunatud.

ka varda *b* otsi, siis on mõlemad vardad ühepikkused. Mõõtmise tulemus ei sõltu sellest, kas varras *b* liigub ja kui suure kiirusega ta liigub.

Vardaga *a* seotud taustsüsteemis on vardad *a* ja *b* ühepikkused. Täpselt samale tulemusele jõuab varda *b* suhtes paigalseisev vaatleja. Lastes varda *b* otstest vardaga risti välja valguskiired, tabavad need täpselt varda *a* otsi. Ka vardaga *b* seotud taustsüsteemis on vardad *a* ja *b* ühepikkused. Eri inertsiaalsüsteemides olevate vaatlejate arvamused varraste pikkuse kohta ühtivad täielikult. See näitab, et keha liikumise suunaga risti olev mõõde ei sõltu sellest, missuguses inertsiaalsüsteemis me keha mõõdame. Seda tõsiasja kasutasime juba eespool, kui oletasime, et peegli kaugus kellast *B* on kella *A* juures oleva vaatleja jaoks sama suur kui kella *B* juures olija jaoks.

Kuidas nüüd võrrelda kahte varrast sel juhul, kui vardad on paralleelsed, kuid üks neist liigub teise suhtes ots ees (joon. 32), s. o. vardad on paralleelsed omavahelise liikumise suunaga. Nüüd on varraste võrdlemist võimalik teostada ainult ühel kindlal ajamomendil, ei varem ega hiljem.



Joon. 32. Liikuvate varraste pikkuste võrdlemine, kui vardad on paralleelsed omavahelise liikumise suunaga. Niisuguseid vardaid saab võrrelda sel hetkel, kui otsad *A* ja *A'* kokku langevad.

Kui varraste a ja b vastavad otsad ühtivad ühel ja samal ajamomendil, siis on vardad võrdse pikkusega. Kui aga näiteks enne ühtivad varraste A ja A' ja alles seejärel teised otsad, siis varras b on kindlasti vardast a pikem.

Lugeja arvatavasti märkas juba, et varraste võrdlemise juures tuli kasutada sündmuste samaaegsuse mõistet. Sündmuste samaaegsus sõltub aga inertsiaalsüsteemist. Sündmused, mis on samaaegsed ühes inertsiaalsüsteemis, ei ole seda teistes süsteemides. Järelikult: kui varraste mõlemad otsad ühtivad ühes inertsiaalsüsteemis ühel ja samal ajamomendil, siis teistes inertsiaalsüsteemides ühtivad nad eri hetkedel. Siit järeldub paratamatult: kui omavahel liikuvad vardad on võrdsed ühes inertsiaalsüsteemis, ei ole nad seda teistes inertsiaalsüsteemides.

Olgu veelkord rõhutatud, et pikkuse olenevus inertsiaalsüsteemist kehtib ainult liikumise suunas oleva mõõtme kohta. Liikumise ristsuunas mõõdetud pikkused inertsiaalsüsteemist ei sõltu.

Vaatame konkreetselt rongi näidet, millest oli juttu eespool. Seal nägi maapinnal olev vaatleja, et välgulöögid rongi lõpus ja alguses toimusid samaaegselt. Järelikult olid rongi otsad samaaegselt maapinnale jäänud välgumärkide kohal. Rong on täpselt sama pikk kui välgumärkide vahe. Mida ütleb aga rongis istuv vaatleja? Tema arvates toimus välgulöök veduril varem kui välgulöök rongi lõpus. See tähendab, et tema arvates ühtis rongi esimene ots maapinnale jäänud välgumärgiga varem kui rongi lõpp. Rong on järelikult pikem kui maapinnale jäänud välgumärkide vahe. Maapinnal olev vaatleja mõõtis liikuva rongi pikkust ja sai väiksema mõõtarvu kui rongil istuv vaatleja, kes luges rongi paigalseisvaks. Siit on näha, et liikuva keha liikumissuunaline mõõt on väiksem kui sama mõõt paigalseisval kehal.

Lihtne on leida valemit, mis näitab keha liikumissuunalise mõõtme olenevust kiirusest.

Oletame, et eespool kirjeldatud katses kellade ja valgussignaaliga kella A juures olev vaatleja mõõdab ära kellade A ja A' vahekauguse. Olgu see l_0 meetrit. Just nii palju liikus kell B edasi selle aja jooksul kui valgussignaal oli teel, s. o. t_0 sekundi jooksul. Kella B kiirus kella A suhtes on siis

$$v = \frac{l_0}{t_0}. \qquad (a)$$

Samal ajal mõõdab kellade A ja A' vahekaugust ka kella B juures olev vaatleja. Olgu tema mõõtmistulemus l, mis on just see pikkus, mille võrra nihkus edasi kell A selle aja jooksul, kui valgussignaal oli teel, s. o. aja t jooksul. Kella A kiirus kella B suhtes on siis

$$v = \frac{l}{t}. \qquad (b)$$

On selge, et kella B kiirus kella A suhtes on sama suur kui kella A kiirus kella B suhtes (erinevus on ainult kiiruse suunas, mis meid aga käesoleval juhul ei huvita); seepärast tähistasimegi neid ühe ja sama tähega v. Võrdustest (a) ja (b) järgneb:

$$\frac{l_0}{t_0} = \frac{l}{t}.$$

Asetades siia t avaldise valemist (3), saame pärast teguriga $t_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ korrutamist:

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}. \qquad (4)$$

See ongi otsitav valem, mis näitab keha liikumissuunalise mõõtme sõltuvust liikumise kiirusest. Kui paigalseisva keha pikkus on l_0, siis kiirusega v liikuva keha pikkus l on määratud valemiga (4).

Mida suurem on keha kiirus, seda lühem ta ise on võrreldes teise täpselt samasuguse, kuid paigalseisva kehaga. Kas niisugune järeldus relatiivsusteooriast ei vii välja vastuolule?

Lennuväljal seisavad kaks täpselt ühesugust lennukit. Üks neist tõuseb õhku, teeb linna kohal tiiru ja vuhiseb siis suure kiirusega üle lennuvälja. Maapinnale jäänud lendur võrdleb kiiresti lendavat lennukit oma lennukiga ja leiab, et esimene neist on lühem. Samal ajal võrdleb lennukite pikkusi ka õhus viibiv lendur. Tema seisukohalt lennuk, milles ta ise istub, on paigal, kuna lennuväli koos sinnajäänud lennukiga tormab mööda. Mõõtmine näitab järelikult, et maapinnal olev lennuk on lühem kui tema lennuk.

Lendurite otsused on omavahel ainult näivalt vastuolulised. Selles näivas vastuolus peegeldub loodusseadus, et keha pikkus on relatiivne suurus. Ei saa rääkida lihtsalt keha pikkusest, vaid alati tuleb rääkida keha pikkusest kindla taustsüsteemi suhtes. Seejuures: mida

kiiremini liigub keha inertsiaalsüsteemis, seda lühem on ta selle süsteemi suhtes. Keha on kõige pikem taustsüsteemis, milles tema kiirus on null (jutt on kogu aeg muidugi ainult keha liikumissuunalisest pikkusest).

Nagu kõik relatiivsusteooria poolt ennustatud nähtused, nii on ka kehade liikumissuunaline lühenemine väikeste kiiruste juures märkamatu. Jalgrattur, kelle kiirus maapinna suhtes on 18 kilomeetrit tunnis, näeb maa peal asetsevaid asju oma liikumise suunas ainult 0,000 000 000 000 01% võrra lühenenuina. Kiirusega 500 kilomeetrit tunnis sõitvalt lennukilt vaadatuna on maapealsed esemed lühenenud 0,000 000 000 01% võrra. See tähendab, et näiteks kaugus Tallinna ja Tartu vahel on sellel lennukil sõitja jaoks 1,5 sajatuhandiku millimeetri võrra lühem kui seda näitavad maapinnal teostatud mõõtmised. Ka taevakehade kiirused on selleks liiga väikesed, et võiks avastada nende liikumisest tingitud mõõtmete vähenemist. Päike näiteks liigub Maa suhtes kiirusega 30 kilomeetrit sekundis. Sellest tingituna peaks tema liikumissuunaline läbimõõt näitama 0,000 000 5-protsendilist vähenemist, mis on tegelikult ainult 7 meetrit. 150 miljoni kilomeetri kauguselt, nagu oleme meie Päikesest, pole nii väike suurus üldse mõõdetav.

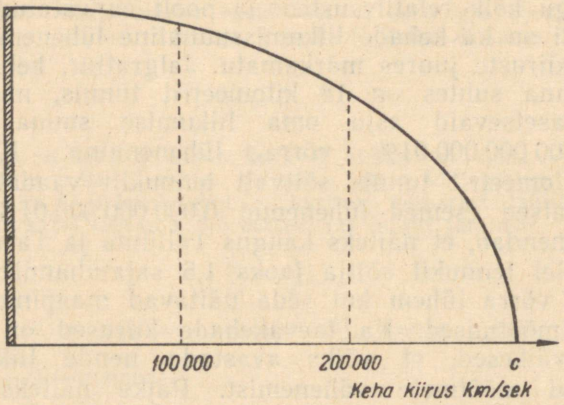
Valguse kiirusega võrreldavate kiiruste juures peaks kehade liikumissuunaline lühenemine märgatav olema. Tabelis 7 on esitatud keha pikkuse olenevus kiirusest, kui

Tabel 7

Keha liikumissuunalise pikkuse olenevus kiirusest

Keha kiirus kilomeetrites sekundi kohta	Keha liikumissuunaline pikkus
0	1
10 000	0,9994
42 300	0,990
100 000	0,94
131 000	0,90
200 000	0,75
260 000	0,50
298 500	0,10
299 850	0,01

liikumatu keha pikkuseks on üks meeter. Näitlikult iseloomustab keha liikumissuunalise lühenemise sõltuvust joonis 33. Joonise vasakule servale on joonestatud varras



Joon. 33. Keha liikumissuunalise pikkuse olenevus kiirusest.

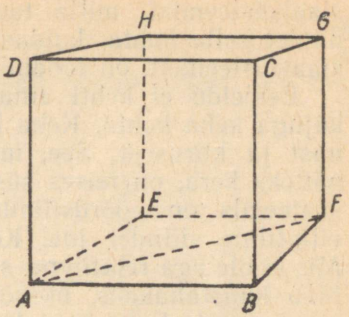
nii pikana, nagu see on paigal seistes. Kui tahame teada sama varda pikkust liikumisel ots ees ja kiirusega näiteks 100 000 kilomeetrit sekundis, tuleb mõõta kõvera kaugus rõhttelje punktist, mille juurde on kirjutatud 100 000. See ongi kiirusega 100 000 kilomeetrit sekundis liikuva varda pikkus.

Jooniselt on näha, et keha kiiruse lähenemisel valguse kiirusele muutub varda pikkus nulliks. Kui varras liiguks täpselt valguse kiirusega, siis oleks varda pikkus null, s. o. varrast ei olekski olemas. Siit on näha, et igasuguse keha kiirus peab alati olema väiksem valguse kiirusest. Valguse kiirusega võivad liikuda ainult niisugused nähtused, mida ei iseloomusta geomeetriline kuju. Sellisteks on näiteks valguse osakesed — footonid, millest tuleb juttu hiljem.

9. RELATIIVSUSTEOORIA JA GEOMEETRIA

Klassikaline mehaanika luges relatiivseks (s. o. taustsüsteemi valikust sõltuvaks) suuruseks kiirust. Erirelatiivsusteooria lisas sellele ajavahemiku ja ruumilise kau-

guse. Kuid see pole veel kõik. Terve rida mõisteid, mida me oleme harjunud absoluutseteks pidama, osutuvad lähemal vaatlemisel relatiivseteks. Võtame näiteks keha kuju.



Joon. 34. Kuup.

Valmistame kuubi, mille serva pikkus on üks meeter ja asetame maapinnale (joon. 34). Oletame nüüd, et sihis *AB* lendab üle kuubi suure kiirusega lennuk. Lendur mõõdab mööda lennates maapinnal olevat keha ja leiab, et servad *AB*, *HG*, *DC* ja *EF* on ülejäänud neljast servast lühemad. Maapinnal ei ole lenduri arvates mitte kuup, vaid risttahukas. Keha, mis maapinnaga seotud inertsiaalsüsteemis kujutab endast kuupi, on lennukiga seotud süsteemis risttahukas, kusjuures selle risttahuka mõõtmed olenevad lennuki kiirusest maapinna suhtes.

Näha kuubi asemel risttahukat pole ainuke võimalus. Mõnes teises suunas lendava lenduri jaoks võib maapinnal olev kuup olla ka risttahukast erineva kujuga. Kuustahuka (mis maapinna suhtes oli kuup) kuju sõltub inert-

Tabel 8

Kuustahuka mõõtmed mitmesugustes inertsiaalsüsteemides

Inertsiaalsüsteem	Kuustahuka kuju	Mõned kuustahukat iseloomustavad mõõdud
Süsteem, milles kuustahukas on paigal	kuup	$AB = 1$ $BC = 1$ $BF = 1$
Süsteem, milles kuustahukas liigub serva *AB* suunas kiirusega 260 000 km/sek	risttahukas	$AB = 0{,}5$ $BC = 1$ $BF = 1$
Süsteem, milles kuustahukas liigub põhja diagonaali *AF* suunas kiirusega 260 000 km/sek	püsttahukas, mille põhjaks on romb	$EB = 1{,}41$ $AF = 0{,}70$ $AB = 0{,}79$ $BF = 0{,}79$ $BC = 1$

siaalsüsteemist, mille taustal teda kirjeldatakse. Paar näidet selle kohta, kuidas kuustahuka kuju sõltub inertsiaalsüsteemist, on toodud tabelis 8.

Eelöeldu ei kehti ainult kuustahuka, vaid igasuguse kujuga keha kohta. Keha kuju sõltub alati liikumise suunast ja kiirusest. See, mis ühes inertsiaalsüsteemis on näiteks kera, on teises süsteemis ellipsoid; see, mis ühes süsteemis on pöördsilinder, võib teises süsteemis olla elliptiline silinder jne. Keha kuju on relatiivne mõiste. Mis ei ole aga relatiivne, see on tahkude arv. Kuustahukas jääb kuustahukaks, ükskõik missuguses inertsiaalsüsteemis me seda ka ei vaataks.

Kui juba keha kuju on relatiivne, siis on seda loomulikult ka ruumala. Kiirusega v liikuva keha ruumala on $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ korda väiksem teise samasuguse, kuid paigalseisva keha ruumalast:

$$V = V_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \qquad \text{(a)}$$

kus V_0 on paigalseisva keha ruumala, V aga sama keha ruumala, juhul kui ta liigub kiirusega v.

Analoogiliselt: kui tasapinnaline kujund liigub oma tasapinnas kiirusega v, siis tema pindala on $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ korda väiksem teise samasuguse, kuid paigalseisva kujundi pindalast.

Valemina avalduks see:

$$S = S_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \qquad \text{(b)}$$

kus S_0 on paigalseisva kujundi pindala, S aga sama kujundi pindala, juhul kui see liigub oma tasapinnas kiirusega v.

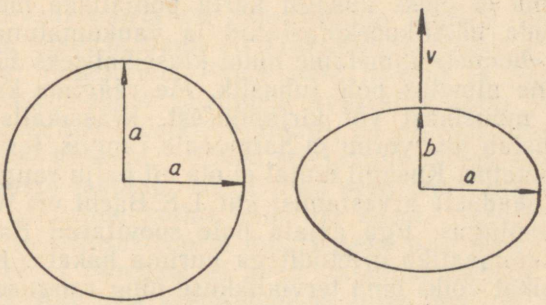
Matemaatikast huvituvale lugejale olgu märgitud, et relatiivsusteooria võimaldab lihtsal viisil leida mitmesuguseid geomeetria valemeid. Toome selle kohta ühe näite.

Olgu antud ring raadiusega a. Ringi pindala on teatavasti πa^2. Kujutleme nüüd, et ring hakkab joonisel 35 näidatud suunas liikuma. Siis valemi (b) järgi saab ringi pindala võrdseks

$$S = \pi a^2\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

Teiselt poolt teame, et ringi liikumissuunaline raadius on lühem kui a; selle pikkus b avaldub $b = a\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. See tähendab, et faktiliselt on

meil ringi asemel ellips. Asetades pindala S avaldisse $a\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ asemel tema väärtuse b, saame ellipsi pindala valemi: $S = \pi ab$, kus a ja b tähistavad ellipsi pooltelgi.



Joon. 35. Kui paigalseisev kujund on ring, siis kiirusega v liikuv kujund on ellips, mille liikumisesuunalise pooltelje pikkus $b = a\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$.

Analoogiliselt saab tuletada pindala ja ruumala valemid paljude teiste geomeetriliste kujundite jaoks, kusjuures lähtuda saab alati lihtsamast kujundist. Nii näiteks saab rombi pindala valemi leida ruudu pindala valemist, või ellipsoidi ruumala leida, kui lähtume kera ruumala valemist.

10. RELATIIVSUSTEOORIA JA KLASSIKALINE FÜÜSIKA

Kehade liikumissuunaline lühenemine, millest räägib relatiivsusteooria, ei olnud iseendast mingisugune uudis. Juba 1892. aastal oli niisugusest lühenemisest rääkinud H. A. Lorentz. Seejuures oli isegi lühenemise seadus Lorentzil täpselt samasugune, kui andis hiljem relatiivsusteooria. Kasutades ainult lühenemise hüpoteesi, õnnestus Lorentzil suurepäraselt seletada Michelson-Morley katse tulemust. Tekib küsimus: miks me eelistame siiski Einsteini relatiivsusteooriat Lorentzi hüpoteesile absoluutse ruumi suhtes liikuvate kehade kokkutõmbumisest?

Maailmapilt, mille füüsikud olid endale loonud käesoleva sajandi alguseks, moodustas loogilise ja omavahel hästi seostatud kogumi. See maailmapilt oli omamoodi harmooniline tervik. Füüsikutele näis, et järgnevad uurimused võivad seda harmooniat siin ja seal ainult täiustada, ilma et oleks kusagil karta põhjalikke muudatusi. Kogu seda hästi-kooskõlastatud ja vankumatuna näivat füüsika «hoonet» nimetame nüüd klassikaliseks füüsikaks. Niisugune nimetus pole juhuslik. Me räägime ka klassikalisest muusikast või kirjandusest. Klassikalist kunsti iseloomustab just vormi ja harmoonia rangus, terviklikkus ning lõpetatus. Kusagil mujal ei ole nii palju rangust ning rangete seaduste arvestamist kui J. S. Bachi või W. A. Mozarti loomingus. Ega asjata pole soovitatud Bachi fuugasid matemaatika meetoditega uurima hakata. Klassikalist füüsikat võiks oma terviklikkuse ning ranguse poolest võrrelda suurte muusikaklassikute Bachi ja Mozarti loominguga.

Üldist füüsika harmooniat segasid sajandi algul ainult üksikud ärevad hääled. Need olid Fizeau, Michelson-Morley ja teiste taoliste katsete tulemused. Kuidas neid ka ei püütud sobitada vana füüsika harmoonilisse süsteemi, ikka jäi midagi üle või tuli puudu. Kõige paremini õnnestus nende katsete seletamine Lorentzil kehade lühenemise hüpoteesi abil. Sellega lülitati need katsed küll klassikalise füüsika süsteemi, kuid selle süsteemi täiuslikkus oli kadunud. Lühenemise hüpotees oli meelevaldne oletus, mida kuidagi polnud võimalik põhjendada. Endise harmoonilise süsteemi asemele astus seega füüsika, mida võiks võrrelda Mozarti helitööga, kuhu on kaasaegse muusika üksikuid akorde sisse puistatud.

Lorentzi edasised uurimused ning ka Poincaré tööd ei parandanud olukorda. Põhisuunaks oli ikka klassikalise füüsika harmoonilise süsteemi moonutamine, et sinna saaks mahutada uusi fakte. Einsteinil oli hoopis teine eesmärk. Tema ei kohendanud vana süsteemi, vaid lõi täiesti uue, mis haaras endasse kõik tuntud faktid. Einsteini loodud süsteem, mida hakati nimetama relatiivsusteooriaks[66], tugineb kahele katsetega tõestatud faktile.

---

[66] Pärast relatiivsusteooria edasiarendamist ning nn. üldise relatiivsusteooria loomist hakati seda teooriat nimetama erirelatiivsusteooriaks.

Need on:

a) erirelatiivsusprintsiip, mis väidab kõigi inertsiaalsüsteemide samaväärsust ja

b) tõsiasi, et valguse kiirus vaakuumis on inertsiaalsüsteemist sõltumatult *c*.

Relatiivsusteooria on samasugune täiuslik ning harmooniline süsteem nagu oli klassikaline füüsikagi, mõnes osas isegi täiuslikum. Peale selle haarab ta palju suurema hulga looduse uurimisel avastatud fakte kui seda tegi klassikaline füüsika. Muidugi, ka praegu avastatakse järjest uusi tõsiasju, millede seletamine nõuab suuremaid või vähemaid jõupingutusi. On ka probleeme, mis on alles lahtised — nende kallal käib töö edasi. Iseloomulik on siiski, et relatiivsusteooria muutmiseks pole seni vajadust olnud. See ei tähenda, et seda vajadust kunagi ei tule. Vastupidi, võib olla veendunud, et tuleb aeg, mil relatiivsusteooria asendatakse uue, veelgi täiuslikuma teooriaga. Ka Einsteini poolt loodud harmooniline ning terviklik süsteem asendatakse uue, kuid ilmtingimata jällegi tervikliku ja harmoonilise süsteemiga. Nagu praegu väikeste kiiruste korral relatiivsusteooria tulemused ei erine praktiliselt klassikalise füüsika tulemustest, s. o. väikeste kiiruste korral relatiivsusteooria taandub klassikaliseks füüsikaks, nii ka tuleviku teooria sisaldab endas relatiivsusteooriat kui ühte erijuhtu. Niisugune on teaduse arenemise üldine tee.

Pöördume nüüd tagasi küsimuse juurde, mille poolest on relatiivsusteooria täiuslikum klassikalisest füüsikast. Kõigepealt muidugi selle poolest, et relatiivsusteooria seletab ära palju rohkem fakte kui seda suutis teha temale eelnenud füüsika.[67] Peale selle näitab relatiivsusteooria seoste ning sümmeetria olemasolu ka niisugustes küsimustes, kus klassikaline füüsika ei teadnud seda aimatagi. Võtame näiteks ruumi ja aja probleemid. Klassikaline füüsika väitis, et sündmused, mis on samapaiksed ühes

[67] Iga füüsikaline teooria peab olema kooskõlas katse ja vaatlusega. Seejuures on teooria seda täiuslikum, mida rohkem fakte ta haarata suudab. Just selles suhtes oli relatiivsusteooria klassikalise füüsikaga võrreldes suureks sammuks edasi: relatiivsusteooria seletas ning ennustas palju niisugust, mis klassikalisele füüsikale käis üle jõu. Tänu oma väga suurele rakendatavuse piirkonnale on spetsiaalne relatiivsusteooria üheks viljakamaks füüsikaliseks teooriaks üldse. Relatiivsusteooria olulisemaid rakendusi vaatame käesoleva peatüki viimastes punktides.

inertsiaalsüsteemis, ei ole seda teistes süsteemides. Samaaegseid sündmusi luges ta aga samaaegseteks kõigis taustsüsteemides. Relatiivsusteooria kõrvaldas selle ebasümmeetria. Lisaks samapaiksuse-relatiivsusele näitab see teooria ka samaaegsuse relatiivsust: sündmused, mis on samaaegsed ühes inertsiaalsüsteemis, ei ole seda teistes inertsiaalsüsteemides. Lorentz moonutas vägivaldselt klassikalist füüsikat sellega, et tõi sisse hüpoteesi keha liikumissuunalisest lühenemisest. Einsteini teooriast järgnes peale keha pikkuse olenevuse kiirusest veel ka ajavahemiku olenevus kiirusest. Klassikaline füüsika vaatas aega ja ruumi täiesti sõltumatute nähtustena, relatiivsusteooria aga näitas, et aeg ja ruum on omavahel seotud. Peale nimetatud küsimuste näitas relatiivsusteooria seoste olemasolu veel terve rea nähtuste, nagu näiteks elektrivälja ja magnetvälja, massi ja energia ja teiste vahel. Neid probleeme vaatame hiljem.

Einsteini relatiivsusteooria eelistamine Lorentzi hüpoteesile ei ole tingitud ainult ülaltoodud kaalutlustest. Relatiivsusteooria kasuks on olemas ka kaalukaid katselisi argumente. Üks nendest on 1938. aastal teostatud Ivesi katse. Selle katse põhiidee seisneb järgnevas.

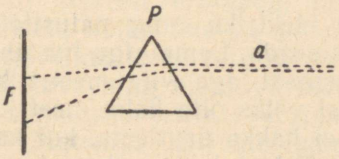
Valgus on teatavasti lainetusnähtus, kus iga värvi kiirel on oma kindel võnkesagedus. Valguse koostise uurimiseks kasutatakse spektrograafi, milles liitvalgus lahutatakse erinevate sagedustega koostisosadeks ja juhitakse seejärel fotoplaadile. Iga sagedusega valguskiir satub seejuures täpselt temale määratud kohta. Ilmutanud plaadi ning mõõtnud valguskiirte jälgede asukohad, on võimalik kindlaks teha, missuguste sagedustega valgust sisaldas liitvalgus. Niipea, kui valguskiire sagedus mingisugusel põhjusel muutub, nihkub kõrvale ka kiire jälg fotoplaadil.

Ives võttis lähema uurimise alla vesiniku aatomi poolt kiiratava sinakasrohelise valguskiire, mille sagedus on 600 miljonit võnget iga miljondiku sekundi jooksul. Katse käigus mõõdeti selle kiire sagedus siis, kui seda kiirgasid paigalseisvad aatomid, ning siis, kui kiirgajateks olid kiirusega 1800 kilomeetrit sekundis spektrograafi eest mööduvad aatomid.[68] Osutus, et teisel juhul oli kiire jälg spektrograafis veidi nihkunud. Täpsete mõõtmistega

[68] Tegelikult oli katse mõnevõrra komplitseeritum. Käesolevas esitame katse kirjelduse lihtsustatud kujul.

tehti kindlaks, et liikuvate aatomite poolt kiiratud sinakasrohelise kiire sagedus oli oodatust umbes 0,0018% võrra suurem.[69]

Lorentzi kehade lühenemise hüpoteesi abil seda sageduse suurenemist kuidagi seletada ei saa. Jälle üks fakt, mis ei sobi isegi klassikalise füüsika moonutatud süsteemi. Relatiivsusteooria järgi on Ivesi katse seletus aga ülimalt lihtne.



Joon. 36. Spektrograafi skeem. Liitvalguse a kimp juhitakse prismale P, mis erineva sagedusega kiired suunab fotoplaadi F eri kohtadesse.

Aega, mis iseloomustab aatomis toimuvate protsesside kiirust, mõõdab piltlikult öeldes aatomi suhtes liikumatu kell. Näiteks vesiniku aatom kiirgab sinakasrohelist valgust nii, et iga miljondiku sekundi jooksul, mis möödub aatomi suhtes liikumatu kella järgi, toimub valguskiires 600 miljonit võnget. Vaatame nüüd kahte aatomit: üks neist on spektrograafi suhtes paigal, teine aga liigub kiirusega 1800 kilomeetrit sekundis. Mõõdame aatomites kulgevat aega spektrograafi suhtes. Siis osutub, et liikuvas aatomis kulgeb aeg aeglasemalt kui paigalseisvas aatomis (see on relatiivsusteooria järgi nii). Aeg, mille jooksul liikuv aatom kiirgab 600 miljonit võnget, ei ole spektrograafi suhtes miljondik sekundit, vaid vähem. Seega spektrograafi aja järgi liikuva aatomi poolt kiiratud valgus teeb rohkem kui 600 miljonit võnget miljondiku sekundi kohta. Teiste sõnadega: valguse sagedus spektrograafiga seotud inertsiaalsüsteemis on suurem kui spektrograafi suhtes liikuva aatomiga seotud süsteemis. Arvutused näitavad, et kiirusega 1800 kilomeetrit sekundis

[69] Kui muutub valguskiire sagedus, muutub ka värvus. Sinakasrohelise kiire värvuse muutumine Ivesi katses oli aga nii väike, et seda pole võimalik silmaga kindlaks teha.

liikuva vesiniku aatomi poolt liikumise ristsuunas kiiratud sinakasrohelise kiire sagedus peab olema just 0,0018 protsendi võrra suurem kui sama kiire sagedus paigalseisva aatomi poolt kiiratuna.[70] Seega on Ivesi katse relatiivsusteooriaga täielikus kooskõlas.

II. NELJAMÕÕTMELINE MAAILM

Te kutsusite elektriku ning palusite teda toa lakke elektrilambi üles seada. Lamp olgu toa ühest seinast nelja meetri, naaberseinast aga viie meetri kaugusel. Lambi kõrgus põrandast võiks olla kolm meetrit. Sellest elektrikule piisab. Ta ei hakka usutlema, kui kaugel peaks pirn olema diivanist või kirjutuslauast, sest need andmed teda enam ei huvita. Elektrilambi asukoht toas on k o l m e arvuga täpselt määratud. Need kolm arvu ei tarvitse olla just niisugused, nagu eespool antud. Samahästi võiksime öelda, kui kaugel peaks elektrilamp asetsema toa kahest naabernurgast ning laest. Oluline on, et vähem kui kolmest arvust lambi asukoha täpseks määramiseks ei piisa, rohkem pole aga tarvis.

Võtame teise näite. Te palute meistrit ehitada väikese karbi. Selleks annate talle karbi mõõtmed: pikkuse, laiuse ja kõrguse — jällegi kolm arvu. Ehk küsimus: mitu sirget on võimalik tõmmata ühest ruumipunktist, nii et sirged oleksid kõik omavahel risti? Vastus: kolm sirget.

Kuna kõigis toodud näidetes on oluline arv 3, avaldub selles ruumi kolmemõõtmelisus. Ruumil on kolm mõõdet või dimensiooni. Miks just kolm mõõdet, mitte aga kaks või neli, selle kohta ei oska me midagi öelda. Tuleb lihtsalt teatavaks võtta, et meid ümbritseva ruumi põhiomaduseks on kolmedimensionaalsus.

Tuleb siiski silmas pidada, et maailma kirjeldamine kolmemõõtmeliste esemete koguna ei vasta tegelikkusele. Niisugune kirjeldus annaks meile maailmast muutumatu,

---

[70] Olgu märgitud, et ka klassikalises füüsikas esineb valem, mis kirjeldab valguse sageduse sõltuvust valgusallika liikumise kiirusest. See nn. klassikaline Doppleri efekt puudub aga valgusallika liikumise ristsuunas kiiratud valguskiirte juures. Relatiivsusteooria ennustab, et Doppleri efekt peab esinema ka siin. Just seda, nn. transversaalset Doppleri efekti uuriski Ives.

surnud pildi, tegelikus maailmas aga kõik muutub ja liigub. See tähendab, et maailma kirjeldamisel ei tule kirjeldada esemeid, vaid sündmusi. Sündmus ei ole aga määratud enam kolme, vaid nelja arvuga: kolm arvu, mis määravad sündmuse toimumiskoha ning neljas arv, mis annab toimumishetke.

Kõikide ruumipunktide hulk moodustab ruumi. Et ühte ruumipunkti (näiteks punkti, kus me soovime oma toas näha elektrilampi) teistest eraldada, tuleb anda kolm arvu.[71] Analoogiliselt, kõikvõimalike minevikus toimunud ja olevikus ning tulevikus toimuvate sündmuste hulk. moodustab tegeliku liikuva ning muutuva maailma. Et selles maailmas ühte sündmust teistest eraldada, on vajalik anda neli arvu.[72] Matemaatikud ütlevad niisugusel juhul, et sündmuste maailm on neljamõõtmeline moodustis. Neljamõõtmelist sündmuste maailma nimetatakse ka aegruumiks.

Matemaatikud püüavad kõiki küsimusi võimalikult üldiselt käsitleda. Nemad näiteks ei lepi sellega, et ruum peab tingimata olema ainult kolmedimensionaalne, vaid küsivad: missugused on ruumi omadused siis, kui selle dimensioonide arv on suurem kui kolm? Nii ongi matemaatikas uuritud nelja, viie ja veelgi suurema dimensioonide arvuga ruumide omadusi. Näiteks selgub, et neljamõõtmelises ruumis on võimalik ühest punktist tõmmata neli sirget, mis kõik on omavahel risti.

On loomulik, et neljamõõtmelist geomeetrilist ruumi inimene ette kujutada ei suuda; kõik inimese kujutlused on seotud paratamatult kolme dimensiooniga. Kuid see ei tähenda, et me neljamõõtmelise ruumi mõistet üldse kasutada ei saa. Neljamõõtmelise ruumi geomeetriliste omaduste uurimine ning rakendamine pole põhimõtteliselt sugugi keerukam kui kolmemõõtmelise ruumi korral. Olgu võrdluseks lugeja tähelepanu juhitud sellele, et koolis õpitav planimeetria pole midagi muud kui kahemõõtmelise ruumi geomeetriliste omaduste uurimine. Planimeetria on õpetus sellest, mis ilmneks siis, kui kõik esemed oleksid kahemõõtmelised, selle asemel et olla kolme-

---

[71] Need arvud määravad ruumipunkti ainult siis, kui eelnevalt on fikseeritud taustkeha. Elektriku näites on taustkehaks toa seinad ja põrand.

[72] Ka nendel arvudel on mõte ainult siis, kui lisatakse, missuguse taustsüsteemi suhtes neid tuleb mõista.

mõõtmelised. J. Nuut kirjutab oma raamatus «Millest kõneleb Einsteini relatiivsuse õpetus»:

«Lugeja eksib, arvates, et ta suudab «kujutella» kahemõõtmelist ruumi, neljamõõtmelist aga mitte. Kahemõõtmeliste esemete kujutlemine ei tee vähemaid raskusi kui neljamõõtmeliste oma; kujutelm, millega lugeja töötab kahemõõtmelise ruumi õpetuse puhul, pole õieti «kujutelm»; ta on pikaajalise harjumuse najal kasvatatud mõistete k o g u. Matemaatikule, kelle kogemused sel alal suuremad ning harjumused tugevamad, ei tee raskusi kasutada kohaselt loodud m õ i s t e t e kogu «kujutelmana» ka neljamõõtmelise ruumi puhul. Välisilma esemeid tajub inimene aga alati ainult kolmemõõtmelistena. Kolmemõõtmelised on ka kõik need joonised ning mudelid paberist, puust jne., mida me valmistame endile planimeetrilistest kujunditest, nagu «kolmnurk», «ruut», «ring» jt. Nende meie «kujutluse tugede» iseärasus on vaid see, et üks nende mõõde — paksus — on väike, võrreldes kahe teisega.»

Nüüd tekib küsimus: mis kasu on neljamõõtmelise ruumi geomeetriliste omaduste uurimisest, sest tegelik ruum on ju ainult kolmedimensionaalne. Osutub siiski, et matemaatikute neljadimensionaalne ruum võib olla samasuguste omadustega kui füüsikute aeg-ruum. Sel teel saavad füüsikud sündmuste maailma omadusi välja lugeda matemaatikute neljadimensionaalse ruumi omadustest. Niisugune geomeetriline uurimisviis on tihti kõige lihtsam ja ülevaatlikum.

Juba prantsuse matemaatik ning mehaanik Lagrange juhtis tähelepanu sellele, et looduses toimuvaid liikumisi saab kirjeldada neljamõõtmelise aeg-ruumi abil. Kuna aga klassikalises füüsikas aeg ja ruum on täiesti eraldiseisvad nähtused, siis nende ühendamine aeg-ruumiks on puhtformaalne võte, mida tegelikult ei kasutatud. Teisiti on lugu relatiivsusteoorias. Kuna see teooria arvestab ka aja ja ruumi vahelist seost, siis omandab nende ühendamine aeg-ruumiks sügava mõtte.

1908. aastal esitas H. Minkowski terve relatiivsusteooria neljamõõtmelise sündmuste maailma geomeetria kaudu. Minkowski esitus võimaldas kõiki relatiivsusteooria tõdesid ülilihtsate geomeetriliste skeemide abil tõlgendada. Niisugune lihtsus ei ole juhuslik, vaid on tingitud sellest,

et looduses aeg ja ruum moodustavad ühtse neljamõõtmelise aeg-ruumi.

Esimesel pilgul näib olevat niisugune väide arusaamatu. Kuidas on võimalik aega ja ruumi teoorias ühte sulatada, kui neid mõõdetakse erinevate riistadega ning



H. Minkowski.

erinevates ühikutes: ruumilisi kaugusi mõõdame näiteks meetrites, ajavahemikke aga sekundites. Süvenemine küsimusse näitab siiski, et niisugune vahetegemine pole tingimata vajalik. On võimalik mõõta ruumilisi kaugusi sekundites, või vastupidi, aega meetrites. Seda tehakse igapäevases elus tihti.

Jalakäija küsib: «Kui palju maad on linnani?» Vastus kõlab: «Umbes tunni tee.» Selles vastuses on tee pikkust mõõdetud ajaühiku tunni abil. Ka astronoomide valgusaasta ei ole midagi muud, kui kosmiliste kauguste mõõtühik, mis on väljendatud aastate kaudu.

Igapäevases elus tehakse tihti ka vastupidi, s. o. mõõdetakse aega pikkusühikute abil. Kui autojuht ütleb: «Bensiini ei jätku enam kauaks, kõige rohkem paariks kilo-

meetriks», siis on siin aja mõõtmisel kasutatud kilomeetreid.

Lugeja märkab, et kirjeldatud mõõtmisviisid ei ole harilikult kuigi täpsed. Väljendus «tunni tee» võib tähendada kolme, nelja või viit kilomeetrit, sõltuvalt sellest kui suur on jalakäija kiirus. Samuti on oluline liikumise kiirus aja mõõtmisel kilomeetrites. Kui mõõtmiseks kasutatav kiirus on ebatäpselt määratav, ei ole ka kirjeldatud mõõtmisviisist suurt täpsust loota. Vastupidi, kui on tegemist kindla kiirusega, siis on aja mõõtmine pikkusühikutes või pikkuse mõõtmine ajaühikutes täpselt teostatav. Kuna valguse kiirus on kindel suurus, siis on näiteks astronoomide valgusaasta täpselt määratud — see on võrdne 9 460 000 miljoni kilomeetriga.

Kui astronoomid mõõdavad pikkusi ajaühikute abil (valgusaasta), siis relatiivsusteoorias tehakse harilikult vastupidi, s. o. mõõdetakse aega pikkusühikutes. Selle asemel, et öelda 1 sekund, öeldakse 300 000 kilomeetrit — see on pikkus, mille valguskiir vaakuumis levides katab ühe sekundiga. Nii võetakse tarvitusele ajaühik, mida me võiksime nimetada valguskilomeetriks. Valguskilomeeter on aeg, mis kulub valguskiirel ühe kilomeetri katmiseks. Üks sekund on seega 300 000 valguskilomeetrit.

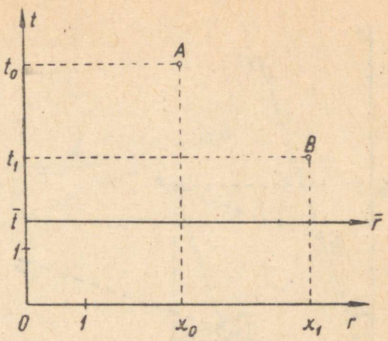
Huvitavat meetodit aja mõõtmiseks pikkusühikute abil kasutatakse lunoidi visuaalsetes vaatlusjaamades.

Magnetofoni lindile võetakse kronomeetri tiksumine. Samale lindile fikseeritakse ka signaal, mille annab vaatleja sel momendil, kui lunoid pikksilma vaatevälja eest möödub. Sekundi jooksul liigub magnetofoni lint 38,5 cm võrra edasi. See tähendab, et kronomeetri iga sekundilöök fikseeritakse lindil 38,5 sentimeetri kaugusel naaberlöökidest. Mõõtes magnetofoni lindil lunoidi möödumishetke määrava signaali kaugust kronomeetri sekundisignaalidest, on hiljem võimalik määrata lunoidi möödumishetke. Kuna magnetofoni lindi kiirus on täpselt teada, siis on niisugune aja mõõtmise viis pikkusühikute abil küllaltki täpne.

Kui tahame aega mõõta valguskilomeetrites, siis tuleb taustsüsteemi ette kujutada kui valgusallika ja mõõdupuuga varustatud keha. Aja mõõtmine toimub siis valgussignaali poolt läbitud tee pikkuse mõõtmise kaudu.

Esitame nüüd Minkowski relatiivsusteooria käsitluse põhiideed.

Geomeetriliselt võib taustsüsteemi kujutada kahe suunatud ristsirge abil,[73] nagu on näidatud joonisel 37. Rõhtsat sirget r nimetame siin ruumiteljeks. Selle sirge iga punkt tähistab ühte ruumipunkti. Telje alguses on märgitud pikkusühik, mida arvestatakse ruumis teostatavate mõõtmiste korral. Püstsirge t kannab nimetust ajatelg; selle telje iga punkt tähistab ühte ajahetke. Aega mõõdame seejuures eelkirjeldatud viisil valguskilomeetrites. Ka ajatelje algusse on märgitud mõõtühik, mis on võetud võrdseks ruumi mõõtühikuga. Joonisel esitatud ristsirged ning mõõtühikud moodustavadki taustsüsteemi geomeetrilise kujutuse. Vaatame nüüd, kuidas tähistada selles taustsüsteemis sündmusi.



Joon. 37. Taustsüsteemi geomeetriline kujutus.

Toimugu ajamomendil t_0 ruumipunktis x_0 mingisugune sündmus. Selle sündmuse kujutuse leidmiseks meie joonisel tõmbame punktidest t_0 ja x_0 paralleeljooned telgedele. Nende paralleeljoonte lõikepunkt A tähistabki kõne all olevat sündmust. Vastupidi, kui me võtame joonisel mingisuguse punkti B, siis võime otsekohe leida, et see punkt vastab sündmusele, mis toimus ruumipunktis x_1 ajamomendil t_1. Punkt O tähistab taustkeha asukohta ajamomendil null, s. o. sel momendil, kui lähtub aja mõõtmiseks kasutatav valgussignaal. Terve rõhtsirge, mis kannab tähist r, koosneb kõigist ruumipunktidest ajamomendil null — see on kogu ruum ajamomendil null. Teine, tähisega $\bar{r}$ varustatud rõhtsirge esitab siis kogu ruumi ajamomendil $\bar{t}$.

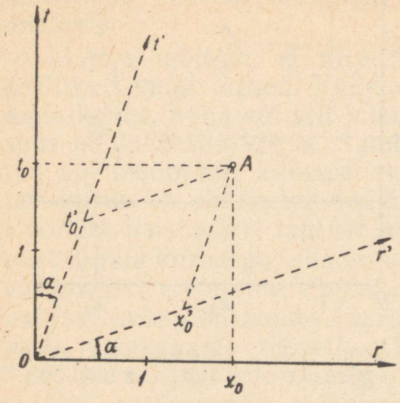
Ruumiline kaugus sündmuste A ja B vahel on ilmselt punktide x_0 ja x_1 vahel oleva lõigu pikkus, ajavahemik samade sündmuste vahel on aga kaugus punktide t_0 ja t_1 vahel.

Lugejal tekib nüüd loomulik küsimus: mille poolest erineb ühe inertsiaalsüsteemi geomeetriline kujutus teise inertsiaalsüsteemi omast? Minkowski näitas, et erinevus seisneb siin ainult ruumi- ja aja-telgede suunas. Üleminekut ühest inertsiaalsüsteemist teise kirjeldab lihtsalt telgede kallutamine, kusjuures telgede lõikepunkt jääb paigale. Joonisel 38 on üks inertsiaalsüsteem kujutatud pideva, teine aga katkendliku joonega. Teise süsteemi ruumitelg kannab tähist r', ajatelg aga t'.

Minkowski näitas, et nurk α kahe süsteemi telgede vahel on inertsiaalsüsteemide omavahelise kiirusega v seotud järgmiselt:

---

[73] Tegelikult tuleks taustsüsteemi geomeetriliselt kujutada nelja omavahel risti oleva sirge abil. Kolm sirget moodustavad siis ruumikoordinaadistiku, kuna üks sirge on ajateljeks. Meie kujutus on lihtsustatud, sest kasutame kolmest ruumiteljest ainult ühte.



Joon. 38 Kahe teineteise suhtes liikuva inertsiaalsüsteemi geomeetriline kujutus.

$$\frac{v}{c} = \tan\alpha. \qquad (a)$$

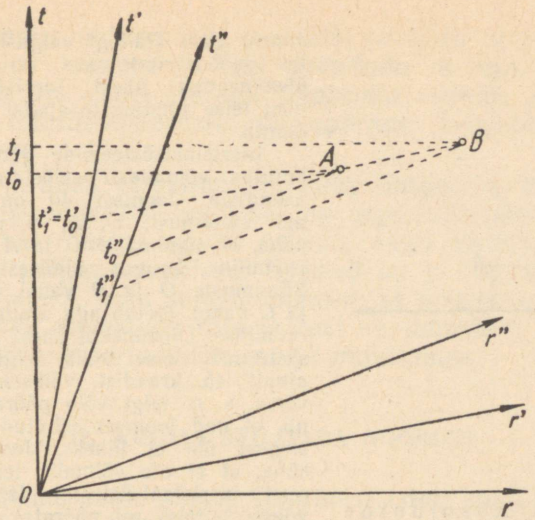
Kuna v maksimaalne väärtus on c, siis on näha, et kõige suurem väärtus, mida α võib omandada, on 45°. Nurk kahte inertsiaalsüsteemi kujutavate telgede vahel ei tohi olla suurem kui pool täisnurka.

Joonisel 38 on kujutatud veel sündmus A. Telgedega r ja t esitatud inertsiaalsüsteemis on tema toimumiskohaks x_0 ja toimumishetkeks t_0, telgedega r' ja t' kujutatud inertsiaalsüsteemis aga vastavalt x'_0 ja t'_0.

Inertsiaalsüsteemide geomeetrilisest esitusest järelduvad kõik relativistliku kinemaatika põhilised tulemused, nagu liikuva keha mõõtmete lühenemine või liikuva kella käigu aeglustumine. Et neid küsimusi lähemalt uurida, tuleks meil enne määrata mõõtühikud r' ja t' telgedel. Osutub nimelt, et need mõõtühikud peavad olema mõnevõrra pikemad kui mõõtühikud r ja t telgedel. Kuna mõõtühikute pikkuse määramine läheb väljapoole käesoleva raamatu raame, siis selle juures me pikemalt ei peatu. Seega tuleb meil loobuda ka pikkuste lühenemisega või aja aeglustumisega seotud küsimuste geomeetrilisest käsitlemisest. Küll aga saame peatuda samaaegsuse ning samapaiksuse probleemide juures, mis ei nõua mõõtühiku tundmist.

Inertsiaalsüsteemide geomeetrilisest esitusest järgneb väga lihtsalt samaaegsuse ja samapaiksuse relatiivsus. Vaatame näiteks joonisel 39 kujutatud sündmusi A ja B, millede toimumishetked telgedega r ja t esitatud inertsiaalsüsteemis on t_0 ja t_1. Samade sündmuste toimumishetked telgedega r' ja t' ning telgedega r'' ja t'' esitatud süsteemides on vastavalt t'_0, t'_1 ja t''_0, t''_1. Kuna $t'_0 = t'_1$, siis telgedega r' ja t' esitatud inertsiaalsüsteemis on sündmused A ja B samaaegsed. Telgedega r ja t esitatud süsteemis need sündmused samaaegsed ei ole, vaid sündmus A toimub varem kui sündmus B ($t_0 < t_1$). Seevastu telgedega r'' ja t'' esitatud inertsiaalsüsteemis toimub sündmus B varem kui sündmus A ($t''_0 > t''_1$). Olemegi näidanud, et sündmused, mis ühes inertsiaalsüsteemis on samaaegsed, ei ole seda teistes inertsiaalsüsteemides. Samuti võib üleminekul ühest inertsiaalsüsteemist teise muutuda sündmuste ajaline järjestus. Lugejal pole nüüd raske konstrueerida joonist, millelt oleks näha, et sündmused, mis ühes inertsiaalsüsteemis on samapaiksed, ei ole seda teistes inertsiaalsüsteemides.

Mida me mõistame oleviku all? See on kogu maailm ühel ja samal ajahetkel, nimelt praegusel ajahetkel. Olevik hetkel $t = 0$

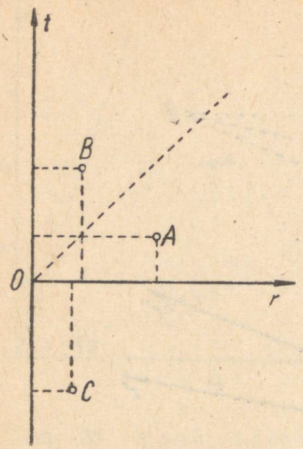


Joon. 39. Samaaegsuse relatiivsus. Sündmuse A toimumishetke telgedega r'' ja t'' esitatud süsteemis saame sel teel, et tõmbame läbi punkti A paralleelsirge r'' teljele. Selle sirge lõikepunkt t'' teljega annabki sündmuse A toimumishetke t_0''. Analoogiliselt leiame sündmuste A ja B toimumishetked kõigis kolmes inertsiaalsüsteemis. Jooniselt on nüüd näha, et sündmused A ja B on samaaegsed telgedega r' ja t' esitatud süsteemis ($t'_0 = t'_1$), kuna teistes süsteemides nad seda ei ole.

moodustub kõigist sel hetkel toimuvatest sündmustest. Niisuguseid sündmusi kujutavad punktid moodustavad ruumi-telje. Iga inertsiaalsüsteemi kujutusel on oma ruumi-telg. See tähendab, et igas inertsiaalsüsteemis mõistetakse oleviku all erinevaid sündmusi: ühes inertsiaalsüsteemis on selleks sündmused, mis moodustavad telje r, teises süsteemis aga sündmused, mis moodustavad telje r'. See, mis on olevik ühes inertsiaalsüsteemis, ei ole seda teises. Olevik on relatiivne mõiste. Samuti võivad olla relatiivsed ka minevik ja tulevik, seda näitab võimalus sündmuste ajalise järjestuse muutmiseks üleminekuga ühest inertsiaalsüsteemist teise.

Relatiivsusteooria tunneb siiski ka absoluutset minevikku ja absoluutset tulevikku. Põhjust ja tagajärge käsitlevas punktis nägime, et üleminekuga ühest inertsiaalsüsteemist teise sündmuste ajalist järjestust kõigis sündmuspaarides pole võimalik muuta. Seal saadud tingimused võib nüüd sõnastada järgmiselt.

Kui sündmuskohtade ruumiline kaugus on väiksem sündmuste vahel möödunud ajast (valguskilomeetrites mõõdetuna), siis sündmuste ajaline järjestus on kõigis inertsiaalsüsteemides sama. Kui aga sündmuskohtade ruumiline kaugus on suurem sündmuste vahel möö-



Joon. 40. Absoluutne minevik ja absoluutne tulevik relatiivsusteoorias. Sündmus *B* asetseb sündmuse *O* suhtes absoluutses tulevikus, sest pole võimalik leida inertsiaalsüsteemi, milles nende sündmuste ajaline järjestus oleks vastupidine. Analoogiliselt sündmus *C* asetseb sündmuse *O* suhtes absoluutses minevikus.

dunud ajast (jällegi valguskilomeetrites mõõdetuna), siis on võimalik üleminekuga ühest inertsiaalsüsteemist teise sündmuste ajalist järjestust muuta.

Inertsiaalsüsteemide geomeetriline kujutus võimaldab eelöeldus lihtsalt veenduda. Joonisel 40 on esitatud neli sündmust: *O*, *A*, *B* ja *C*. On näha, et sündmuste *O* ja *A* vahel on ruumiline kaugus ajalisest suurem. Sündmuste *O* ja *B* vahel, samuti *O* ja *C* vahel, ületab aga ajaline kaugus ruumilise. Üleminekul ühest inertsiaalsüsteemist teise tohib telgi pöörata ainult 45 kraadist väiksema nurga võrra, s. o. telgi võib pöörata ainult nii, et nad joonisel esitatud punktiirsirgest üle ei läheks. Jooniselt on näha, et ei ole võimalik leida niisugust inertsiaalsüsteemi (s. t. pole võimalik telgi nii pöörata), et sündmused *O* ja *A* oleksid uues süsteemis samapaiksed või sündmused *O* ja *B* (samuti sündmused *O* ja *C*) oleksid samaaegsed. Sündmus *B* toimub kõigis inertsiaalsüsteemides pärast sündmust *O*, s. o. sündmus *B* on sündmuse *O* suhtes absoluutses tulevikus. Analoogiliselt on sündmus *C* sündmuse *O* suhtes absoluutses minevikus.

Inertsiaalsüsteemide geomeetriline esitamine näitab ilmekalt, kui kompaktse terviku moodustavad tegelikult aeg ja ruum. Minnes üle ühest inertsiaalsüsteemist teise, toimub piltlikult öeldes «ülekande teostamine» ruumi arvelt aja arvele ja vastupidi. See näitab, et maailm on tegelikult neljamõõtmeline aeg-ruumiline tervik, mis meie peaajus peegeldudes tekitab kujutluse ruumist ja ajast. Ühe inertsiaalsüsteemi raames on ruum ajast eraldatud, üleminekul teise süsteemi see eraldatus aga kaob. Minnes ühest inertsiaalsüsteemist teise (s. o. muutes oma liikumise kiirust), peaks inimene juba «palja silmaga» avastama aja ja ruumi vahelise seose. Kahjuks muutub see seos praktiliselt märgatavaks alles ülisuurte kiiruse muutuste korral (suurusjärguga vähemalt mõnikümmend tuhat kilomeet-

rit sekundis lühikese aja jooksul), seetõttu otseselt selle olemasolus inimene kunagi veenduda ei saa. Et seos ruumi ja aja vahel on aga tingimata olemas, seda tunnistab relatiivsusteooria suurepärane kooskõla katseandmetega.

Lugeja näeb, et neljamõõtmeline sündmuste maailm ei ole midagi müstilist, vaid see on tegelikult looduses esinev tervik. Sellega ei ole öeldud, nagu oleksid esemed looduses neljamõõtmelised. Esemed on ja jäävad kolmemõõtmelisteks, kuid tegelik maailm ei koosne esemetest, vaid nende esemetega toimuvatest sündmustest. Just selles ilmneb mateeria liikumine ja muutumine.

12. KUIDAS SÄILITADA NOORUST

Kujutleme kahte sõpra. Üks neist istub kogu aeg ühel ja samal kohal, teine teeb aga maailmas suure ringi, tulles lõpuks lähtekohta tagasi. Esimene sõpradest oli paigal, teine aga liikus. Eelnevast teame, et liikuv kell käib paigalseisvast kellast aeglasemalt.[74] Seejuures ei mõista me kella all ainult ideaalselt täpset tasku- või käekella, vaid kella moodustab ükskõik missugune loodusnähtus. Kui sõprade kellad käivad erinevalt, siis tuleb seda nii mõista, et k õ i k loodusnähtused toimuvad ühe sõbraga teistsuguses tempos kui teisega. Muuhulgas on erinevus ka inimese kehas toimuvate protsesside kiiruses. Kui liikuva sõbra kell käis aeglasemalt paigalistuja kellast, siis tähendab see, et liikuv sõber elas lahusoleku aja kestel läbi vähem aega kui teine. Sõbrad lahkusid ühevanustena, kohtumisel on ringirännanud sõber aga teisest noorem.

Võtame teise näite. Kaks sõpra lahkuvad teineteisest ning lepivad kokku teatud aja pärast kusagil kohtuda. Üks sõpradest on mugava hingelaadiga inimene. Ta hak-

---

[74] Eespool saadud tulemused liikuva kella käigu aeglustumisest saime ühtlase ja sirgjoonelise liikumise uurimisel. Järelikult võime neid rakendada samuti ainult ühtlasele ja sirgjoonelisele liikumisele. Liikuva sõbra teed tuleks siis ette kujutada sirglõikudest koosneva murdjoonena, kusjuures igal lõigul on liikumise kiirus muutumatu. Need lõigud võivad olla ka väga lühikesed, moodustades nii praktiliselt kõvera tee.

kab sirgjoones kohtumispaiga poole liikuma, reguleerides oma kiiruse just nii suureks, et kogu aeg ühtlaselt liikudes jõuda ettemääratud ajaks kohale. Teine sõpradest on aga rahutu iseloomuga ja ei põlga vaeva maailmaga tutvumiseks. Et rohkem näha, teeb ta kohtumiskohale minnes suure ringi. Hilineda kohtumisele ei tohi, järelikult peab tema kiirus olema suurem kui mugaval sõbral, aga see omakorda tähendab, et tema kell käib aeglasemalt kui otsejoones liikujal. Kohtumisel osutub, et kõverteed käinud sõber on vahepeal vähem vananenud kui teine.

Lõpuks veel kolmas näide. Kaks sõpra peavad minema sirgjoonelist teed mööda ühest kohast teise. Üks neist ei näe midagi muud kui ainult oma otseseid kohuseid. Ühtlase kiirusega liigub ta lähtepunktist lõppeesmärgile. Teine sõber vaatab aga laia maailma, peatub siin, peatub seal ning korraga märkab, et tal tuleb rutata, kui ei taha hilineda. Suure kiirusega liigub ta ülejäänud osa oma teest, jõudes lõpuks siiski õigeks ajaks sihtkohta. Kuidas on vahepeal käinud sõprade kellad? Selgitame seda lihtsa näitega, milles on meelega võetud väga suured arvud.

Oletame, et esimene sõpradest liikus kogu aeg kiirusega 100 000 kilomeetrit sekundis. Teine rändur seevastu oli pool aega praktiliselt paigal, kuna ülejäänud aja liikus kiirusega 200 000 kilomeetrit sekundis. Matka esimesel poolel käib aeglasemalt esimese sõbra kell, teisel poolel aga teise sõbra kell. Seejuures on jooniselt 30 näha, et algul ei olnud kellade käigu erinevus kuigi suur (kellade käigu erinevus kiirustel 0 km/sek ja 100 000 km/sek); matka teisel poolel oli see tunduvalt suurem (kellade käigu erinevus kiirustel 100 000 km/sek ja 200 000 km/sek). Seetõttu kohtumisel selgub, et ebaühtlaselt liikunud sõbra kell on taha jäänud. Lihtne arvutus näitab, et meie näites see tahajäämine on ligi 4 minutit iga matkatunni kohta. Ebaühtlaselt liikunud sõber on vahepeal vähem vananenud kui teine.

Kahjuks nendel suurepärastel relatiivsusteooriast tulenevatel elureeglitel on juures oma «aga». Inimesele kättesaadavad kiirused on nii väikesed, et nende korral mingisugust praktiliselt märgatavat nooruse säilitamist pole võimalik saavutada — väikeste kiiruste juures on

ju relatiivsusteooria poolt ennustatud efektid tühiselt väikesed. Lisaks olgu veel öeldud, et kirjeldatud viisil saadud nooruse säilimisel, isegi kui see oleks reaalselt teostatav, ei ole nii suurt väärtust, kui see esimesel pilgul paistab. Kui kõik protsessid inimese kehas kulgevad aeglasemalt, siis tähendab see, et inimene elab aeglasemalt. Mida me võidaksime elueas, seda kaotaksime elutempos. Liikumise abil võidetud eluaastad kompenseeritakse sellega, et inimene tegutseb aeglasemalt. Muide, suure kiirusega liikuv inimene ei saa sellest ise arugi, et ta teiste arvates kauem, kuid aeglasemalt elab. Inimene ise elab oma aja järgi, mida mõõdab temaga kaasasolev kell. Seega ei anna liikumine juurde elu pikkust, küll aga nihutab ta eluea tulevikku. Kui inimene suure kiirusega teostatud ringreisilt oma paigalseisva sõbra juurde tagasi jõuab, leiavad mõlemad, et reisilt tulnud sõber on vahepeal vähem vananenud kui paigalolnud sõber.[75] Ülikiired reisid võimaldavad eluaega edasi nihutada. See on ainuke, mida annab vähemalt põhimõtteliselt relatiivsusteooria poolt soovitatud nooruse säilitamise meetod.

Muidugi ei oleks paha oma eluaega mõnesaja aasta võrra edasi lükata ning siis vaadata, mis kõik vahepeal on juhtunud. Kas niisugune eluea nihutamine tulevikku on mingisuguselgi viisil teostatav? Kas aitab siin näiteks ülikiire kosmiline lend?

Inimene võib pikemat aega taluda kiirendust 20 meetrit sekundis sekundi kohta, mis on võrdne kahekordse raskuskiirendusega Maa peal. Oletamegi, et me istume kosmilisse raketti, mille jõuseadmed annavad talle lennu algul kiirenduse 20 m/sek^2. Kui raketi jõuseadmed kogu aeg sama võimsusega edasi töötavad, siis aasta pärast

---

75 Lugejal võib tekkida kahtlus eeltoodud arutluse õigsuses. Me näitasime, et kui sõber *A* jõuab kiirelt reisilt tagasi oma sõbra *B* juurde, on ta vahepeal vähem vananenud. Arutluse teostasime taustsüsteemis, kus sõber *B* oli paigal (sõbraga *B* seotud taustsüsteem). Kui vaataksime sama probleemi aga sõbraga *A* seotud koordinaadistikus (siin sõber *A* on paigal, kuna sõber *B* teeb ringreisi), kas me siis ei jõuaks järeldusele, et sõber *B* on vähem vananenud? Asja konks seisneb selles, et sõbraga *B* seotud taustsüsteem on inertsiaalsüsteem, kuna sõbraga *A* seotud süsteem seda ei ole. Et inertsiaalsüsteemid on kõigi teiste taustsüsteemide ees eelistatud olukorras, siis võime arutlust läbi viia ainult sõbraga *B* seotud taustsüsteemis.

(Maal olevate inimeste arvates) on meie kiirus 270 000 kilomeetrit sekundis. Maast oleme jõudnud selle aastaga 0,6 valgusaasta kaugusele, s. o. planeedist Pluto tuhat korda kaugemale. Edasi asume raketi pidurdamisele, mis võtab aega teise aasta. Maast eemaldume seejuures veel 0,6 valgusaastat. Tagasitee Maale võtab samuti kaks aastat. Maal olijad arvavad seega, et meie lend kestis neli aastat, kuna meie oma arvestused näitavad, et ta ei kestnud rohkem kui kaks aastat ja kümme kuud. Selle kosmilise lennuga õnnestus meil oma eluaega aasta ja kahe kuu võrra edasi nihutada.

Kosmiline lend, mis tuleks teostada isegi selle küllalt väikese eluea nihke saavutamiseks, on väljaspool igasuguste reaalsete võimaluste piire. Kütteaine hulk, mida meie raketi jõuseadmed nelja aasta jooksul neelaksid, on fantastiliselt suur. Kui laseksime raketi jõuseadmeid töötada aga lühemat aega, siis jääks raketi kiirus nii väikeseks, et temal lennates oma eluaega märgatavalt edasi nihutada ei saa. Relatiivsusteooria poolt soovitatud nooruse säilitamise meetodid ei tule seega praktiliselt üldse arvesse, sest inimesele kättesaadavad kiirused on liiga väikesed. Kuid põhimõtteliselt on siin tegemist väga huvitava võimalusega.

Lugejal võib nüüd tekkida küsimus: kui relatiivsusteooria näitab põhimõttelist võimalust matkaks tulevikku — selleks on tarvis ainult teostada ülikiire kosmiline lend — kas ta siis ei näita ka võimalust eluea nihutamiseks minevikku? Ei näita. Osutub, et matk minevikku pole võimalik. Miks siis? Miks on tulevik mineviku ees eelistatud olukorras? Põhjus on siin lihtne.

Kui otsustame oma eluea kaugesse tulevikku üle viia, siis sellega oleme otsustanud kauges tulevikus toimuvatest sündmustest aktiivselt osa võtta ja nende sündmuste käiku suuremal või vähemal määral mõjustada. Selles pole midagi imelikku ega looduses valitseva põhjuslikkusega vastuolulist, kui me avaldame mõju tulevikus toimuvatele sündmustele.

Teistsugune oleks lugu siis, kui saaksime mingil viisil teostada matka minevikku. Siis oleks meil võimalik osa võtta sündmustest, mis toimusid minevikus. Meie osavõtt võiks isegi nende sündmuste tulemusi muuta, mis on aga absurdne, sest minevikus toimunud sündmuste

tulemused on ammu ajaloo poolt fikseeritud. Toome paar näidet.

Kui meil oleks mingisugusel viisil võimalik oma eluaega minevikku nihutada, siis me võiksime oma teadmistega näiteks aastasse 1887 rännata ja Michelson-Morley katse korraldajate juures olla. Me võiksime nende katse tulemuse kohe relatiivsusteooria seisukohalt ära seletada ja sellega muuta kogu järgnevat füüsika arengut. See on aga absurdne, sest juba toimunut ei saa enam kuidagi muuta.

Või teine näide. Kui oleks võimalik matk minevikku, siis me võiksime näiteks ühe moodsalt varustatud sõjaväeüksuse saata XIII sajandisse, appi meie esivanematele, kes kaitsesid oma kodumaad sissetungivate ristirüütlite vastu. Vaevalt suudaksid siis ristirüütlid Maarjamaad vallutada. Sellega me aga muudaksime ammu ajaloo poolt fikseeritud fakte.

Need näited illustreerivad selgesti, kuidas eluea nihutamine minevikku viiks absurdsetele tagajärgedele. Järelikult ei ole see võimalik. Küll on aga võimalik, vähemalt põhimõtteliselt, eluea nihutamine tulevikku.

13. KAS ELEKTRIVÄLJA SAAB LAHUTADA MAGNETIVÄLJAST?

Seni oleme käsitlenud relatiivsusteooriast ainult valguse kiire levimise ning ruumi ja aja omadustega otseselt seotud probleeme. Vaatame nüüd teisi küsimusi, mis suunavad uurijat relatiivsusteooria praktiliste rakenduste leidmisele. Peatume kõigepealt elektromagnetilise välja juures.

Paigutame lennukile elektrilaengu. Missugune väli ümbritseb seda laengut siis, kui lennuk üle lennuvälja vuhiseb? Vastata sellele küsimusele polegi nii lihtne, nagu mõni läbematu lugeja võib-olla arvab. Kui hoolega järele mõelda, siis veendume varsti, et vastus sõltub sellest, keda küsida. Lendur ütleb: «Elektrilaeng on lennukis liikumatu.» Kuna liikumatut laengut ümbritseb alati ainult elektriväli — seda teame juba keskkooli füüsikakursusest — siis lennukis oleva laengu ümber on puhas elektriväli (elektrostaatiline väli) ja mitte midagi rohkem.

Lennuväljal olijalt saame samal ajal hoopis teist-

suguse vastuse. Tema tuletab meile kõigepealt meelde, et liikuva elektrilaengu ümber on alati nii elektri- kui ka magnetiväli. Lennukil paiknev laeng liigub lennuvälja suhtes. Järelikult peab lennuväljal teostatud mõõtmine näitama, et laengut ümbritseb nii elektri- kui ka magnetiväli.

Erinevad vastused saaksime ka sel juhul, kui lennukile oleks paigutatud magnetipulk. Lendur ütleb, et magnetipulka ümbritseb ainult puhas magnetiväli, nii nagu see liikumatu magnetipulga ümber peabki olema. Lennuväljal olija aga väidab, et magnetipulk liigub, kuid liikuvat magnetipulka ümbritseb teatavasti alati nii magnetiväli kui ka elektriväli.

Erinevused elektrilaengut või magnetipulka ümbritseva välja hindamises ei ole tegelikult üllatavad. Tõepoolest, väljendustel «paigalseisev laeng» ning «liikuv laeng» ei ole absoluutset tähendust; mõtte omandavad nad alles siis, kui oleme eelnevalt fikseerinud taustsüsteemi, milles me laengut uurime. Paigalseisev saab laeng olla ainult ühes taustsüsteemis, kõigis teistes süsteemides on ta liikuv. Liikumine on üldine nähtus, paigalseis ainult erijuht. Laengut ümbritseb seega üldiselt alati väli, mis koosneb elektriväljast ja magnetiväljast — seda koguvälja nimetame elektromagnetiliseks väljaks. Ainult erijuhul valitud taustsüsteemis, kus laeng on liikumatu, avaldub tema elektromagnetiline väli elektrostaatilise väljana. Elektrostaatiline väli ei ole midagi muud kui elektromagnetilise välja erikuju.

Täpselt samasugune on lugu magnetipulga väljaga. Kõigis taustsüsteemides ümbritseb magnetipulka elektromagnetiline väli. Ainult ühes süsteemis, nimelt selles, kus magnetipulk on liikumatu, taandub elektromagnetiline väli puhtaks magnetiväljaks. Ka magnetiväli ei ole midagi muud kui elektromagnetilise välja erikuju.

Looduses on olemas ühtne elektromagnetiline väli, mille lahutamine elektriväljaks ja magnetiväljaks on võimalik ainult kindlas taustsüsteemis. Kõigi taustsüsteemide jaoks korraga ei ole seda võimalik teha, s. o. pole võimalik elektromagnetilist välja nii lahutada elektriväljaks ja magnetiväljaks, et ühest taustsüsteemist teise üle minnes need komponendid ei muutuks. Ülemineku tuleb alati elektriväljale juurde magnetiväli ja magnetiväljale elektriväli. Selles mõttes on vahekord

elektrivälja ja magnetivälja vahel analoogiline aja ja ruumi omavahelisele suhtele. Looduses on olemas ühtne aeg-ruum. Kindlas taustsüsteemis võime aja ruumist lahutada, kuid see lahutamine ei jää õigeks teistes taustsüsteemides. Üleminekul uude taustsüsteemi aeg ja ruum sulavad jällegi kokku. Kes on sellega nõus, et looduses eksisteerib ühtne neljadimensionaalne aeg-ruum, see peab tunnistama ka ühtse elektromagnetilise välja olemasolu ja vastupidi; kes loeb õigeks ühtse elektromagnetilise välja olemasolu looduses, ei saa vaielda vastu neljadimensionaalsele aeg-ruumile.

Erirelatiivsusteooria seisukohalt on elektromagnetilisel väljal looduses eriline koht. Valgussignaal, millest on käesolevas raamatus nii palju juttu, pole midagi muud kui elektromagnetiline laine. On huvitav, et elektromagnetilise välja konkreetne kuju sõltub välja kirjeldamisel kasutatavast taustsüsteemist, tema levimiskiirus aga mitte. Viimane on kõigis inertsiaalsüsteemides *c*.

14. MASS

Klassikalise mehaanika vaadete kohaselt ei sõltu keha mass sellest, kas keha liigub või mitte. Kui paigaloleva keha mass on m_0 (nn. seisumass), siis liikuma hakanud keha mass jääb sama suureks. Relatiivsusteooria näitab, et tegelikult ei ole asi nii, vaid kiirusega v liikuva keha mass m avaldub seisumassi m_0 kaudu järgmiselt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (5)$$

Olgu kohe märgitud, et valemis (5) esinev kiirus võib olla mõõdetud ükskõik missuguse inertsiaalsüsteemi suhtes. Nii nagu eri inertsiaalsüsteemides on kehal erinev kiirus, nii on tal eri inertsiaalsüsteemides ka erinev mass. Nagu kiirus, ajavahemik ning ruumiline pikkus osutusid relatiivseteks suurusteks, nii on relatiivne ka keha mass. Massi arvulisest väärtusest ei saa rääkida enne, kui on fikseeritud taustsüsteem, milles me keha uurime.

Eelnevast selgub, et keha iseloomustamisel ei saa lihtsalt öelda tema massi olevat nii ja nii suure. Näiteks

lause «kuuli mass on 10 grammi» on relatiivsusteooria seisukohalt ebamäärane. Kuuli massi arvuline väärtus ei ütle meile enne midagi, kui fikseeritakse ka inertsiaalsüsteem, mille suhtes see mass on mõõdetud. Harilikult antakse keha mass kehaga seotud inertsiaalsüsteemis, s. o. antakse seisumass.

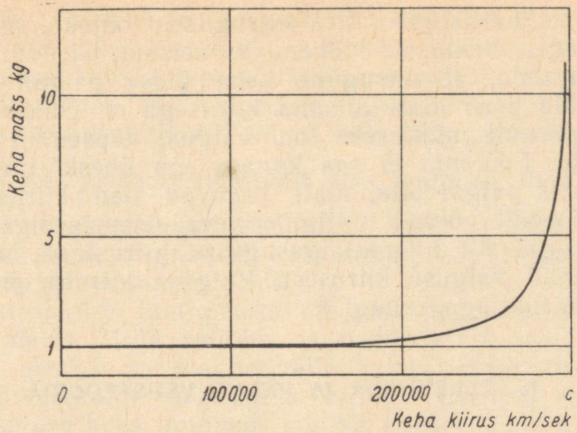
Tabel 9

Ühekilogrammise seisumassiga keha massi sõltuvus kiirusest

Keha kiirus km/sek.	Keha mass kilogrammides
0	1
10 000	1,0006
42 300	1,01
100 000	1,06
131 000	1,1
200 000	1,3
260 000	2
298 500	10
299 850	100

Tabelis 9 on toodud massi sõltuvus keha kiirusest. Seejuures oletatakse, et paigaloleva keha mass on üks kilogramm. Väiksemaid kiirusi kui 10 000 kilomeetrit sekundis tabelis üldse vaadatud ei ole, sest nende puhul massi erinevus ühest kilogrammist on tühiselt väike. Suuremate kiiruste juures see erinevus muutub juba märgatavaks. Mida suurem on keha kiirus, seda suurem on ka tema mass. Näiteks liikumisel kiirusega 299 850 kilomeetrit sekundis ületab keha mass seisumassi juba sajakordselt. Suurte kiiruste juures iga väikene kiiruse suurendamine suurendab õige tunduvalt ka keha massi. See hakkab eriti hästi silma joonisel 41, kus on graafiliselt kujutatud massi sõltuvus kiirusest.

Joonise vaatlemisel muutub ka arusaadavaks, miks klassikaline mehaanika võib lugeda massi kiirusest sõltumatuks suuruseks. Klassikalises mehaanikas uuritakse ainult aeglasi liikumisi, kus keha mass erineb seisumassist üsna vähe. Aeglaste liikumiste uurimisel võime seega keha massi lugeda võrdseks lihtsalt seisumassiga. Viga, mille me seejuures teeme, ei ole praktiliselt märgatav.



Joon. 41. Massi sõltuvus kiirusest (keha seisumass on üks kilogramm).

Kui keha kiirus läheneb valguse kiirusele, siis keha mass kasvab üle igasuguse piiri, või nagu öeldakse: keha mass saab lõpmatuks. Siit on ka arusaadav, miks ükski keha ei saa omandada valguse kiirust. Kui keha kiirus hakkab lähenema juba valguse kiirusele, siis tema mass muutub väga suureks. See tähendab, et ühegi lõpliku suurusega tungi abil pole enam võimalik keha märgatavalt kiirendada. Valguse kiirust keha ei saavuta seega kunagi. Siin on ka põhjus, miks nurjus valguse kiiruse ületamine käesoleva peatüki 3. punktis kirjeldatud kosmilisel lennukil. Maakeral olijad võivad otsekohe öelda lennuki ööpäevase kiiruse juurdekasvude kahanemise põhjuse. See on tingitud lennuki massi suurenemisest kiiruse kasvamisel. Kui lennuki kiirus on juba õige lähedal valguse kiirusele, siis muutub tema mass nii suureks, et mootor ei suuda enam kiirust tõsta.

Valemist (5) on näha, et juhul kui keha siiski liigub valguse kiirusega, s. o. kui $v=c$ ja $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=0$, peab olema null ka suurus m_0. Kui see nii ei oleks, kaotaks valem (5) valguse kiirusega võrdse kiiruse korral igasuguse mõtte. See tähendab, et valguse kiirusega võivad liikuda ainult kehad, milledel seisumass on null.

Kehadeks harilikus mõttes niisuguseid objekte nimetada ei saagi. Sisuliselt tähendab seisumassi võrdumine nulliga seda, et niisugune keha üldse paigal olla ei saa, vaid peab alati liikuma kiirusega *c*. Üheks seisumassiga null nähtuseks on valgus, täpsemini öeldes footonid. Footonid ei saa kunagi ega üheski inertsiaalsüsteemis paigal olla, alati liiguvad nad kiirusega *c*. Teiselt poolt võivad nullist erineva seisumassiga kehad olla paigal või liikuda igasuguste kiirustega, mis on väiksemad valguse kiirusest. Valguse kiirust ennast ei saavuta nad aga kunagi.[76]

15. TELEVIISOR JA RELATIIVSUSTEOORIA

Viimase aastakümne jooksul on kaugnägemine välja jõudnud katsetuste staadiumist ning leidnud tee inimeste igapäevasesse ellu. Televiisor ei ole enam mingi imeasi, vaid miljonid ja miljonid inimesed on temaga harjunud samuti kui raadioaparaadiga.

Me ei peatu selle juures, kuidas töötab kaugnägemise saatja, meid ei huvita ka televiisori raadiotehniline skeem. Ainuke, millele me tähelepanu pöörame, on televiisori peaosa — elektronkiiretoru. Elektronkiiretoru on tugevasti hõrendatud õhuga täidetud klaasballoon, mille üks ots kujundab televiisori kumera ekraani. Torus tekitatakse suure kiirusega ekraanile suunduvate elektronide kitsas kimp. Ekraan on kaetud vääveltsingi või mõne teise aine kihiga, mis elektronide kimbu mõjul hakkab helenduma. Kitsas elektronide kimp tekitab seega ekraanil heleda täpikese. Torus on veel seadeldi-

[76] Öeldu kehtib ainult valguse kiiruse kohta vaakuumis. Mingis keskkonnas, näiteks vees, on valguse kiirus väiksem kui *c*. Siin võivad kehad liikuda ka valgusest kiiremini. Kes on käinud Üleliidulise Tööstusnäituse aatomienergia rahuotstarbelise kasutamise paviljonis, see on näinud vee all töötava aatomreaktori ümber sinakat helendust. Selle valguse päritolu on huvitav. Reaktori töötamisel tekivad ülikiired elektronid, mis liiguvad vees valgusest kiiremini. Seetõttu elektrone ümbritsev elektromagnetiline väli ei jõua elektronile järele, vaid, piltlikult öeldes, rebeneb tükkide kaupa elektronist lahti. Need elektromagnetilise välja lahtirebenenud tükid moodustavadki silmaga nähtava sinaka helenduse. Niisuguse nähtuse avastas nõukogude füüsik P. A. Tšerenkov, mistõttu seda helendust nimetatakse Tšerenkovi helenduseks.

sed, mis elektri- ja magnetiväljade abil elektronide kimpu kõrvale kallutavad. Nende kallutajate abil muudetakse heleda täpi asukohta ekraanil; samuti on võimalik muuta täpi heledust. Elektronkiire liikumist juhitakse kallutajate abil nii, et hele täpp jookseb umbes $\frac{1}{25}$ sekundi jooksul rida-realt üle kogu ekraani. Täpi heledust reguleerivad seejuures kaugnägemissaatjast lähtunud raadiosignaalid. Muutuva heledusega täpp joonistab nii ekraanile pildi.

Elektronkiire juhtimiseks on vaja teada elektronide täpset massi. Mida suurem on nende mass, seda tugevamaid elektri- ja magnetivälju tuleb rakendada vajaliku kõrvalekalde andmiseks kiirele. Eespool nägime, et igasuguse keha, muidugi siis ka elektroni mass sõltub tema kiirusest. Elektroni seisumass on hästi tuntud suurus. Elektronkiiretorus kiirusega v liikuvate elektronide massi saame siis valemi (5) abil arvutada. Harilikus televiisoris kasutatakse elektronkiiretoru, kus elektronide kiirus on umbes 30 000 kilomeetrit sekundis. See tähendab, et elektronide mass torus on umbes ühe protsendi võrra seisumassist suurem. Seda ühte protsenti ei saa ignoreerida. Ükski televiisori omanik ei või öelda, et tal pole relatiivsusteooriaga midagi tegemist. Elektronide kimp tema televiisoris kaalub ühe protsendi võrra rohkem kui «õigus». See on efekt, mida seletab ainult relatiivsusteooria.

Praeguse televiisori ekraanile on võimalik korraga vaadata ainult mõnel, äärmisel juhul mõnelkümnel inimesel. Kaugnägemisülekande demonstreerimine tervele saalitäiele on aga senini lõplikult lahendamata probleem, kuigi katseid on tehtud mitmes suunas. Nii on püütud televiisori ekraanil saadava kujutise heledust suurendada. Saadud kujutist võib siis suure valgusjõuga objektiivi abil projekteerida suurele ekraanile. Kujutise niisugune suurendamine esitab muidugi kõrgemad nõudmised televiisori ekraanil saadava pildi teravusele. See tähendab, et elektronkiire juhtimine peab olema väga täpne. Samuti tuleb kujutise heleduse suurendamiseks tõsta elektronide kiirust. On tehtud katseid elektronkiiretorudega, kus elektronide kiirus ulatub kolmandikuni valguse kiirusest. Nii kiirete elektronide täpne juhtimine on võimalik ainult relatiivsusteooria näpunäidete kõige rangemal arvestamisel.

Heleda ekraaniga elektronkiiretorude kasutamine avab televisiooni ees uusi kasutamisperspektiive. Realiseerida saab neid ainult tänu relatiivsusteooriale. Võib kujutada ette teadlasi, kes ei tunne relatiivsusteooriat ja püüaksid suunata kiirusega 100 000 kilomeetrit sekundis liikuvat elektronkiirt. Kuidas nad end ka ei pingutaks, elektronkiir ei allu nende tahtele, vaid on igasuguste mõjude vastu palju tundetum kui võiks oodata. Kui aga võtta arvesse, et elektronide mass torus ületab seisumassi kuue protsendi võrra, kaovad raskused ühel hoobil.

Kaugnägemine on ainult üks paljudest elektronkiiretoru rakendusaladest. Iga kaasaegse füüsikalaboratooriumi ning isegi tehase laboratooriumi sisseseadesse kuuluvad aparaadid, kus elektronkiirt kasutatakse, piltlikult öeldes, kirjutusvahendina. Need aparaadid on ostsillograafid. Ostsillograafis joonistab elektronide kimp ekraanile pildi näiteks mingis seadeldises toimuvast elektrilisest võnkumisest. On oluline, et see pilt oleks täpne, ainult siis on sel teaduslik ja praktiline väärtus. See tähendab, et elektronkiire suunamisel tuleb arvestada massi juurdekasvu, mis on tingitud elektronide liikumisest torus.

Üheks laialdaseks elektronkiiretoru rakendusalaks on raadiolokatsioon. Siin näiteks joonistab elektronide kimp toru ekraanile raadiolainetega kombatava maakoha kaardi, või jälle elektronkiiretoru on abivahendiks, mis võimaldab mõõta ülilühikest ajavahemikku väljasaadetud raadiosignaali ning selle tagasipöördunud «kaja» vahel. See on aeg, mille jooksul raadiosignaal liikus peegeldava esemeni ning tagasi. Kuna raadiosignaali kiirus on teada ja see võrdub valguse kiirusega c, siis on lihtne määrata signaali peegeldanud eseme kaugust.

Tänu sellele, et valguse ja raadiosignaalide kiirus on kõigis inertsiaalsüsteemides üks ja seesama, ei teki kauguse määramisel raadiolokatsiooni meetoditega erilisi komplikatsioone. Oletame vaid hetkeks, et klassikalise füüsika seadused kehtivad kuitahes suurte kiiruste korral ning et looduses on olemas absoluutne taustsüsteem. Sel juhul oleks raadiolainete levimiskiirus eri suundades erinev. Vaevalt küll niisugune tähtsusetu taevakeha nagu meie Päike oleks absoluutse taustsüsteemi suhtes paigal (Maast muidugi rääkimata). Oletame siis näiteks, et Linnutee masskese on absoluutses ruumis liikumatu. See

tähendab, et raadiosignaali kiiruse erinevus suundade järgi võib olla kuni 540 kilomeetrit sekundis. Niisugune kiiruste erinevus tooks kaasa ebatäpsusi, mis oleksid veidi suuremad kaasaegse aparatuuri ebatäpsustest. Mis saaks aga siis, kui Maa kiirus absoluutses taustsüsteemis ulatuks tuhandetesse kilomeetritesse sekundis? Siis peaksid raadiolokaatorid olema varustatud täiendavate keerukate seadeldistega, mis arvestavad raadiosignaali kiiruse erinevust suundade järgi.

16. ELEKTRONMIKROSKOOP

Möödunud sajandil juhtis inglise matemaatik ja mehaanik W. R. Hamilton tähelepanu sellele, et valguskiire levimisel ja keha liikumisel on palju ühist. Nii nagu valguskiiri on võimalik läätsede abil koondada, nii saab ka ühesuguse kiirusega liikuvaid kehakesi ühte «fookusesse» suunata. Seega on kehade kasutamisel võimalik esemest samuti kujutist saada nagu valguskiirtegi abil. Praktiliselt polnud Hamiltoni ideed aga rakendatavad, sest kõigile kehadele mõjuv raskustung avaldas niisuguse «mikroskoobi» tööle liiga suurt segavat mõju. Alles pärast elektronide avastamist sai võimalikuks osakestega töötava mikroskoobi konstrueerimine. Raskustung ei ole siin praktiliselt enam märgatav, kuna elektronidele mõjuvad elektrilised tungid on sellest võrratult suuremad. Nii loodi elektronmikroskoop, kus valguskiire asemel kasutatakse kujutise saamiseks elektronide kimpu. Elektronide liikumist juhitakse seejuures elektri- ja magnetiväljade, nn. elektriliste ja magnetiliste läätsede abil.

Teeme järgmise katse.

Lööme järve põhja üle veepinna ulatuva vaia ning vaatame, missugust mõju see avaldab lainete liikumisele. Kerge tuulega, kui veepinda katab ainult nõrk lühilaineline virvendus, ei teki vaia taga lainetust. Vaia taga on sile veepind — vaia vari. Samuti võib märgata, et vaia vastu põrkunud lained peegelduvad sealt tagasi. Teisiti on lugu tugeva tuulega, kui veepinda katavad kõrged, suure lainepikkusega lained. Need möödu-vad vaiast nagu tühjast kohast. Puudub nii vari vaia taga kui ka vaialt peegeldunud lained.

Täiesti analoogilise nähtusega on tegemist mikroskoobi juures.

Kui paneme mikroskoobi alla eseme, mis on valguse lainepikkusega võrreldes suur, siis valguse lained peegelduvad sellelt ning optiliste läätsede abil koondatud peegeldunud valgus annab eseme suurendatud kujutise. Kui aga mikroskoobi alla paigutatud eseme suurus on alla 0,3 mikroni [77], siis ületab valguse lainepikkus eseme mõõtmed ning valguselained ei haju enam korrapäraselt. Sel juhul ei anna mikroskoop eseme kujutist. Nii väikeste osakeste vaatlemiseks mikroskoobiga kasutatakse lühema lainepikkusega valgust. On mikroskoope, kus kujutis saadakse silmale nähtamatute ultravioletsete kiirte abil, mis on teatavasti väiksema lainepikkusega kui nähtavad valguskiired. Kuna ultravioletsed kiired mõjuvad hästi fotoplaadile, siis on saadud kujutist võimalik fotografeerida. Aga ka sel teel on võimalik vaadelda osakesi läbimõõduga mitte alla 0,1 mikroni. Optilised mikroskoobid veelgi väiksemate esemete vaatlemist ei võimalda. Appi tuleb siin elektronmikroskoop.

Miks on siis elektronmikroskoop harilikust optilisest mikroskoobist võimsam? Et vastata sellele küsimusele, tuleb lühidalt peatuda elementaarosakeste loomuse juures.

Selgub, et elektronid (ja teised elementaarosakesed) ei ole lihtsalt väikesed kehakesed, mida võiks võrrelda haavlite või raheteradega, vaid neil on terve rida uusi huvitavaid omadusi, mis suurtel kehadel puuduvad. Näiteks liikuvate elektronide kimbu uurimisel avastame omapärase lainetusnähtuse, mida võiks võrrelda elektromagnetilise lainetusega. On võimalik mõõta selle lainetuse lainepikkust, sagedust, levimiskiirust ja muid omadusi. Elektronide kimp ei erine kuigi oluliselt valguskiirest.

Elektroni laineliste omaduste teooria (nn. lainemehaanika või kvantmehaanika) rajajaks sai prantsuse füüsik Louis de Broglie. See oli 1924. aastal. Katseliselt avastati elektronide kimbu lainelised omadused alles kolm aastat hiljem. On huvitav märkida, et lainemehaanika loomisel de Broglie lähtus Hamiltoni ideedest, kusjuures ta kasutas ka relatiivsusteooria abi.

---

[77] Üks mikron on tuhandik millimeetrit. Tuhandik mikronit kannab nimetust millimikron.

De Broglie kaalutlused näitavad, et kiirusega v liikuvate elektronide kimp käitub kui laine, mille lainepikkus λ avaldub järgmise valemi kaudu:

$$\lambda = \frac{7{,}28}{mv}.$$

Siin tuleb elektronide kiirust v mõõta sentimeetrites sekundi kohta ja elektroni massi m seisumassi osades (s. o. paigaloleva elektroni massi loeme võrdseks arvuga 1). Lainepikkuse λ saame sel juhul sentimeetrites.

Eeltoodud valemi illustreerimiseks vaatame kiirusega 72 000 kilomeetrit sekundis liikuvate elektronide kimpu. Elektronide mass on seejuures 1,03 seisumassi, s. o. meil tuleb võtta $m = 1{,}03$. Arvutus valemi järgi näitab nüüd, et niisuguse elektronide kimbu lainepikkus on 0,01 millimikronit, samal ajal kui näiteks violetsed nähtavad valguskiired on lainepikkusega 400 millimikronit. See tähendab, et elektronmikroskoop, milles elektronid liiguvad kiirusega 72 000 kilomeetrit sekundis, võimaldab 40 000 korda väiksemaid esemeid nähtavale tuua kui harilik optiline mikroskoop. Muidugi, silmaga me elektronkiiri ei näe, kuid see-eest mõjuvad nad hästi fotoplaadile.

Tööstuslikult toodetakse Nõukogude Liidus elektronmikroskoope, mis võimaldavad fotografeerida kuni 2 millimikroni suurusi osakesi. Mikroskoobi suurendus on seejuures 50 000 korda. (Olgu võrdluseks märgitud, et parimate optiliste mikroskoopide suurendus on ainult 2000.)

Lainepikkuse valemist on näha, et mida suurem on elektronide kiirus v, seda väiksem on lainepikkus λ, s. o. seda väiksemaid objekte saab niisuguste elektronide abil jälgida. Kaasaegsetes elektronmikroskoopides kasutatakse kiirusega kuni 135 000 kilomeetrit sekundis liikuvaid elektrone. On selge, et siin tuleb elektronide kimpude suunamisel juba tõsiselt arvestada elektronide rohkem kui kümnendiku võrra kasvanud massi. Kui teadlased ei tunneks relatiivsusteooriat, oleks nii kiirete elektronide sihipärane suunamine võimatu.

Suure kiirusega liikuvate elektronide kasutamine elektronmikroskoobis on probleem, mis vajab veel palju uurimist. Peamiseks pähkliks on siin kujutise puhtus ning täpsus. Elektronmikroskoobis saadava kujutise vead ei võimalda praegu kaugeltki nii väikesi esemeid jälgida, kui see teoreetiliselt oleks võimalik. Kuid pole kaht-

lust, et relatiivsusteooriale tuginev elektronmikroskoobi teooria annab näpunäiteid, kuidas vähendada kujutise moonutusi ning tõsta seega elektronmikroskoobi suurendusvõimet.

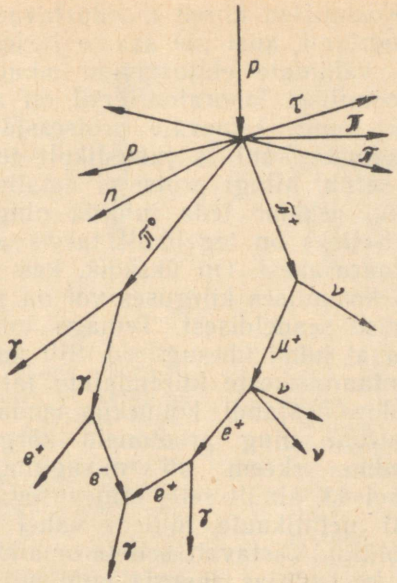
17. SUURTE KIIRUSTE JAHIL

Üheks enamkasutatavaks meetodiks aatomi tuuma uurimisel on tuuma pommitamine teiste osakestega. Suure kiirusega liikuvate prootonite voog suundub tuumale, põrkudes viimaselt igasse suunda. Uurides, kui palju prootoneid ühes või teises suunas hajub, saame teha järeldusi tuuma ümbritsevate tungiväljade kohta. Mida suurem on prootonite kiirus, seda lähemale tungivad nad tuumale ja seda rohkem toovad nad teateid tuuma ehitusest.

Võtame teise näite. Suure kiirusega liikuvate elektronide teele pannakse metallist märklaud. Elektronid põrkuvad vastu märklauda ning peatuvad äkki. Seejuures nende kineetiline energia muutub γ-kvandiks.[78] Mida suurem on elektronide kiirus, seda lühema lainepikkusega ning läbitungivam, või nagu öeldakse, seda kalgim on tekkiv γ-kiirgus. Kui lasta põrgata samal viisil suure kiirusega liikuvaid prootoneid, tekivad mesonid. Mida kiiremini liiguvad omavahel põrkuvad osakesed, seda mitmekesisemad ja huvitavamad protsessid nende põrkumisel tekivad. Neid protsesse jälgides saame järjest rohkem andmeid mateeria ehitusest. Olgu näitena toodud osa protsesse, mis toimuvad maailmaruumist tuleva väga kiire prootoni mõjul Maa õhkkonnas (joon. 42).

---

[78] Elektronide liikumise uurimisel selgus, et elektronide kimbul on elektromagnetilise lainega analoogilisi omadusi. Vastupidi, elektromagnetilise laine peenema struktuuri uurimine näitab, et elektromagnetiline laine koosneb osakestetaolistest moodustustest, nn. γ-kvantidest või footonitest. Mida lühem on seejuures elektromagnetiline laine, seda suurem on iga üksiku kvandi energia. Sellest tingituna näiteks raadiolainete juures, kus iga kvandi energia on väga väike, ei ole laine kvant-struktuur märgatav. Lühikeste lainete korral, nagu röntgenikiired, on aga iga kvandi energia võrratult suurem, nii et siin saab jälgida juba kas ühe või ainukese kvandi mõju. Lühilaineline elektromagnetiline laine tuletab meelde rohkem haavlipüssi laengut kui pidevat lainetust. Elektromagnetilisel lainel on nii nagu elektronide kimbulgi lainelised omadused koos osakestele iseloomulike karakteristikutega.



Joon. 42. Osa kosmilises kiirguses toimuvate protsesside skeemist.

Kosmilisest ruumist pärinev prooton p põrkub õhkkonna aatomite tuumadega, purustades neid prootoniteks (p), neutroniteks (n) ja väiksemateks tuumadeks. Samas võivad tekkida ka mitut liiki mesonid[79], mida joonisel tähistavad tähed π ja τ. Neutraalne π-meson (π^0) laguneb kaheks γ-kvandiks, γ-kvant aga, põrkudes mõne tuumaga, muutub elektronist ja positronist koosnevaks osakeste paariks (e^- ja e^+). Positiivselt laetud π-meson (π^+) laguneb positiivseks μ-mesoniks (μ^+) ja neutriinoks (ν), positiivne μ-meson laguneb omakorda positroniks ja neutriinodeks. Põrkudes vastu tuuma, võib positron kiirata γ-kvandi. Elektron ja positron muutuvad kohtumisel γ-kvandiks jne. Me oleme loendanud ainult väikese arvu kõigist kosmilises kiirguses toimuvatest

[79] Mesoniteks nimetatakse üldiselt elementaarosakesi, mis on elektronist raskemad, kuid prootonist kergemad. Mesonid võivad olla nii positiivselt kui ka negatiivselt laetud, samuti on neutraalseid mesoneid. τ-mesoneid nimetatakse viimasel ajal K-mesoniteks.

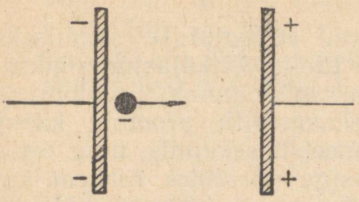
protsessidest. Kosmilised kiired moodustavad nagu hiiglasliku laboratooriumi, kust me saame järjest uusi andmeid mateeria vähimate ehituskivide omadustest ning käitumisest. Kosmilisel laboratooriumil on aga ka suur puudus, see on temas esinevate protsesside stiihilisus. Uurija peab ootama, kuni ta juhuslikult teda huvitava nähtuse peale satub. Mingi protsessi detailsel uurimisel on aga hea, kui oskame teda juhtida ning kunstlikult esile kutsuda. Selleks on tegelikult tarvis ainult küllalt kiireid elementaarosakesi. On ükskõik, kas näiteks kiire elektron esineb kosmilises kiirguses või on pärit elektronide kiirendamise seadeldisest. Temaga toimuvad protsessid on mõlemal juhul ühesugused. Siit kasvabki välja vajadus elementaarosakeste kiirendajate järele.

Kuni käesoleva sajandi kolmekümnendate aastateni kiirendati elektrone ning prootoneid kõrgepinge abil. Kiirendamisseadme skeem oli niisugune, nagu on näidatud joonisel 43, ainult selle erinevusega, et plaatide asemel kasutati metallkuule, millede vahel pinge ulatus kuni miljoni voldini. Vastavalt sellele omandasid elektronid niisuguses kiirendajas energia kuni miljon elektronvolti.

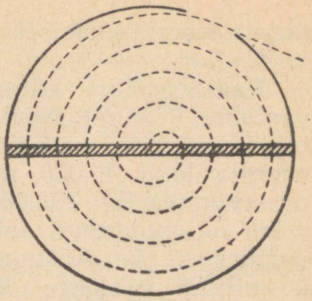
Ligi 25 korda suurema energia andis prootonitele tsüklotron, mis konstrueeriti kolmekümnendate aastate algul. Tsüklotroni lihtsustatud skeem on esitatud joonisel 44. Tsüklotronis kiirendatakse prootoneid perioodiliselt muutuva elektrivälja abil, kusjuures prootonid, tänu magnetivälja olemasolule, liiguvad spiraalikujulist teed mööda. Iga kord, kui prootonid jõuavad kiirendustsooni, on seal pinge parajasti maksimaalne. Iga tiiruga, s. o. iga korraga, kui prootonid läbivad kiirendustsooni, kasvab nende energia. Esimesel pilgul näib, et sel teel võib anda prootonitele kuitahes suure energia. Tegelikult see nii ei ole.

Mis paneb siis piiri tsüklotroni kiirendamisvõimele? Miks ei või temaga prootoneid kuitahes suurte kiirusteni kiirendada? Põhjus on selles, et tsüklotron ignoreerib relatiivsusteooriat.

Kui prootonite kineetiline energia tsüklotronis hakkab lähenema 20-le megaelektronvoldile, on nende kiirus juba 60 000 kilomeetrit sekundis. Nii suure kiirusega liikuva prootoni mass on kahe protsendi võrra seisumassist suurem. Massi suurenemisest tingitult ei jõua kiire-



Joon. 43. Mis on elektronvolt? Võtame kondensaatori, mille plaatide vahel on pinge üks volt. Asetame negatiivselt laetud plaadi lähedusse elektroni. Elektriliste tungide mõjul hakkab elektron üha suureneva kiirusega positiivselt laetud plaadi poole liikuma. Elektroni energiat, mille ta on omandanud positiivselt laetud plaadi juurde jõudmise momendiks, kasutatakse energia mõõtühikuna, mis kannab nimetust üks elektronvolt. Üks megaelektronvolt on miljon elektronvolti. Igapäevaste energiatega võrreldes on elektronvolt väga väike suurus. Märgime, et ühe miljondiku grammi tõstmiseks ühe kümnendiku millimeetri kõrgusele kulub 6 miljonit elektronvolti energiat.



Joon. 44. Tsüklotroni skeem. Joonise tasapinnaga risti suunatud magnetivälja mõju all olevad prootonid liiguvad mööda spiraalikujulist teed, mis on tähistatud punktiirjoonega (mida suuremaks muutub prootoni energia, seda suuremaks muutub tema tee raadius). Viirutatud piirkonnas, nn. kiirendustsoonis, esineb muutuva tugevusega elektriväli. Iga kord, kui prootonid jõuavad kiirendustsooni, on seal elektriväli just niisugune, et see lisab prootonitele kiirust. On oluline märkida, et aeg, mis kulub prootonil tsüklotronis täistiiru tegemiseks, oleneb ainult prootoni massist. Kuna kõigi prootonite massid on võrdsed, siis jõuavad kõik tsüklotronis olevad prootonid üheaegselt kiirendustsooni ning elektriväli kiirendab neid kõiki korraga.

mad prootonid enam õigeks ajaks kiirendustsooni. Selleks ajaks, kui hilinenud prootonid jõuavad kiirendustsooni, on seal pinge juba langenud, nii et prootonite kiirendamist enam ei toimu.

Et elementaarosakestele suuremaid kiirusi anda, tuleb kiirendaja konstrueerimisel arvestada relatiivsusteooria seadusi. Eriti suuri teeneid kaasaegsete kiiren-

dajate teooria loomisel on nõukogude füüsikul V. I. Veksleril.

Kaasaegsetest kiirendajatest ettekujutuse saamiseks vaatleme lähemalt Nõukogude Liidus käikulastud sünkrofasotroni. See on kiirendaja, mis annab prootonitele energia kuni 10 000 megaelektronvolti; prootoni kiirus on seejuures ligi 298 000 kilomeetrit sekundis, ning tema mass on muutunud seisumassiga võrreldes rohkem kui kümnekordseks. Niisugused kiirused on juba võrreldavad kosmiliste osakeste kiirustega. Seetõttu nimetatakse sünkro-fasotroni tihti ka kosmotroniks.[80]

Nõukogude kosmotronis peavad prootonid vajaliku energia omandamiseks tegema 4,5 miljonit 56-meetrise läbimõõduga ringi. See tähendab, et prootonid peavad läbima ligi 800 000 kilomeetri pikkuse tee ilma kõrvale kaldumata. Siit on näha, missuguse täpsusega peavad olema arvestatud kõik prootonite liikumise iseärasused, muuhulgas ka massi suurenemine kiiruse kasvamisel. Väikseimgi ebatäpsus seadme konstruktsioonis viib prootonid nende teelt kõrvale.

Veelgi suuremaid kiirusi annab spetsiaalne elektronide kiirendaja, nn. sünkrotron. Juba töötavad sünkrotronid võivad suurendada elektroni massi kuni 1300-kordseks, projekteerimisel on aga veelgi mitu korda võimsamad seadeldised. On täiesti põhjendatud mõnel pool tehtud ettepanek nimetada sünkrotroni mitte elektronide kiirendajaks, vaid raskendajaks.

18. ENERGIA

Keha energia all mõistavad füüsikud kehas peituvat töö varu. Seejuures ei tähenda töö füüsikutele sugugi ainult ühiskondlikult kasulikku tööd, mida inimesed igapäevases elus tööks nimetavad, vaid mistahes mõjude ületamist. Kui kivi lendab aknasse ning purustab selle, siis ütleme, et kivi tegi akna purustamisel tööd. Liikuval kivil oli varuks teatud hulk energiat, millest ta osa kulutas akna purustamiseks.

[80] Suur hulk maailmaruumist tulevaid osakesi on siiski veel palju suurema energiaga, kui annab kaasaegne kosmotron. Üksikute kosmiliste osakeste kiirus on koguni nii suur, et nende mass ületab seisumassi ligi miljard korda.

Klassikaline mehaanika ütleb, et vaba keha energia võib olla ainult liikumisest tingitud, nõndanimetatud kineetiline energia. Kui keha massiga m_0 liigub kiirusega v, siis tema kineetiline energia E avaldub klassikalises füüsikas teatavasti järgmiselt:

$$E = \frac{m_0 v^2}{2}. \tag{6}$$

Väike nullike massi tähise m juures rõhutab seda, et mass ei sõltu keha liikumise kiirusest.

Kineetiline energia oleneb teda kandva keha kiirusest, kiirus aga omakorda sõltub teatavasti taustsüsteemist, milles me keha kirjeldame. Siit on näha, et keha kineetiline energia sõltub taustsüsteemist — igas taustsüsteemis on energial eri väärtus. Kineetiline energia on seega juba klassikalises teoorias relatiivne suurus.

Mida ütleb relatiivsusteooria vaba keha energia kohta? Eespool nägime, et parandused, mida annab klassikalisele mehaanikale relatiivsusteooria, olid väikeste kiiruste juures alati tähtsusetud; alles suurte kiiruste korral muutusid nad kaaluvateks. Võiks oodata, et samasugune on lugu ka energiaga. Väikeste kiiruste korral langeb relatiivsusteooria energia valem arvatavasti ühte valemiga (6), kuna suurte kiiruste juures tulevad ilmsiks erinevused. Huvitaval kombel tegelikkus ei õigusta neid ootusi. Kui keha seisumass on m_0 ning kiirus v, siis tema energia relatiivsusteooria järgi avaldub:

$$E_r = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{7}$$

Täheke r energia tähise E juures rõhutab seda, et siin on tegemist relatiivsusteoorias tuletatud, nõndanimetatud relativistliku energia avaldisega.

Et valem (7) erineb valemist (6) üsna tunduvalt, seda näitab juba paigalseisva keha energia arvutamine. Kui võtame kiiruse v nulliks, siis klassikaline energia valem ütleb, et ka keha kineetiline energia on null. Relativistlik energia avaldis $v = 0$ korral aga nulliks ei lähe, vaid annab $m_0 c^2$. Paigalseisva keha relativistlikku energiat nimetame seisuenergiaks ning tähistame E_0:

$$E_0 = m_0 c^2. \tag{8}$$

Ühegrammise seisumassiga keha klassikalise kineetilise energia võrdlemine relativistliku energiaga

Keha kiirus km/sek	Keha klassikaline energia E_0 osades	Keha relativistlik energia E_0 osades
0	0	1
100	0,00000006	1,00000006
1 000	0,000006	1,000006
10 000	0,0006	1,0006
42 300	0,01	1,01
100 000	0,06	1,06
131 000	0,10	1,11
200 000	0,22	1,33
260 000	0,38	2,00
298 500	0,44	10,00
299 850	0,45	100,00

Lihtne arvutus näitab, et seisuenergia on juba väikeste kehade korral tohutu suur. Nii näiteks on ühegrammise seisumassiga keha seisuenergia 9 180 000 miljonit kilogramm-meetrit [81]. See on energia, mille arvel võib 918 000 tonnise raskuse tõsta 10 kilomeetri kõrgusele. Üks gramm ainet sisaldab endas niisuguse tohutu energiavaru — seda ennustab relatiivsusteooria. Klassikaline füüsika ei tea niisuguse energia olemasolust midagi rääkida.

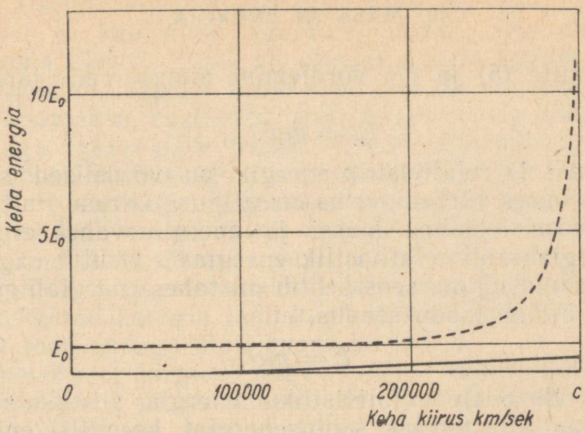
Tabelis 10 on võrreldud ühegrammise seisumassiga keha klassikalist ja relativistlikku energiat. Et vältida väga suurte arvude kirjutamist, on energia ühikuks võetud seisuenergia E_0. Tabeli 10 andmeid kasutades on koostatud graafikud joonisel 45.

Relativistliku energia avaldist saab üles kirjutada lõpmatu rea kujul. Selle rea esimesed liikmed on järgmised:

$$E_r = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2} + \frac{3}{8}\frac{m_0 v^4}{c^2} + \dots$$

Kui keha kiirus v on valguse kiirusega võrreldes väike, siis rea kolmas liige, samuti kõik järgmised liikmed on väga väikesed (nimetajas esineb valguse kiirus), ning need võime jätta arvestamata. Väikese kiirusega liikuva keha relativistlik energia avaldub seega järgmiselt:

[81] Kilogramm-meeter on energia hulk, mis kulub ühekilogrammise raskuse tõstmiseks ühe meetri kõrgusele.



Joon. 45. Keha klassikalise energia (pidev joon) ja relativistliku energia (punktiirjoon) võrdlus. E_0 tähistab keha seisuenergiat.

$$E_r = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2}.$$

m_0c^2 ei ole siin midagi muud kui keha seisuenergia. Väikese kiirusega liikuva keha relativistlik energia võrdub seisuenergia ja klassikalise kineetilise energia summaga.

Klassikalises füüsikas huvitavad meid ainult energiate vahed. Lahutades näiteks mingist protsessist osavõtva keha lõppenergiast algenergia, saame keha energia muutuse protsessi kestel. Kui keha seisumass m_0 protsessis ei muutu, siis energia vahede moodustamisel viimati kirjutatud esimene liige energia avaldises langeb välja. Niisuguste protsesside kirjeldamisel võime selle liikme siis juba algusest peale ära jätta. Järele jääb ainult klassikaline kineetilise energia avaldis.

Kõigest eelnevast on näha, et klassikalist energia avaldist võime kasutada energeetiliste arvutuste juures ainult siis, kui on täidetud kaks tingimust:

a) vaadeldava keha liikumise kiirus on valguse kiirusega võrreldes väike;

b) vaadeldava protsessi jooksul sellest protsessist osavõtvate kehade seisumass ei muutu.

Kui üks nendest tingimustest ei ole täidetud, tuleb keha energia arvutamisel kasutada relativistlikku energia avaldist (7).

Valemite (5) ja (7) võrdlemine annab meile järgmise seose:

$$E_r = mc^2.$$

Keha mass ja relativistlik energia on võrdelised suurused, kusjuures võrdeteguriks on valguse kiiruse ruut — c^2. Selle seose leidsime massi ja energia vahel erijuhul, kui energiaks oli relativistlik energia [82]. Osutub aga, et täpselt samasugune seos kehtib mistahes energialiigi korral. On üldine loodusseadus, et

$$E = mc^2, \qquad (9)$$

kus E võib peale relativistliku energia sisaldada veel potentsiaalset energiat, soojusenergiat, keemilist energiat või mistahes teist energiat. Valem (9) näitab, et keha koguenergiaga E on alati seotud mass. Niipea kui muutub keha energia, muutub temaga võrdeliselt ka mass ja vastupidi: igasuguse massi muutusega kaasneb alati ka vastav energia muutus.

Energia hulgad, millega me puutume kokku igapäevases elus, on nii väikesed, et nad ei kutsu esile märgatavat massi muutust. Soojendades näiteks ühekilogrammist rauatükki 1000° võrra, anname rauatükile juurde 108 kilokalorit [83] energiat. Võib arvutada, et rauatüki mass suureneb seejuures 5 miljardiku grammi võrra. See on nii väike suurus, et praktiliselt ei ole seda kuidagi võimalik avastada.

Keemia tunnis demonstreeritakse vahel järgmist katset.

Kaalukausile on paigutatud kinnine klaaskuppel, mille alla asetatakse tükike kergestisüttivat ainet. Kaal tasakaalustatakse. Nüüd süüdatakse aine (seda võib teha näiteks suurendusklaasi abil päikesekiiri ainetükikesele koondades) ning varsti jääb sellest järele ainult näputäis tuhka. Sellele vaatamata püsib kaal endiselt tasakaalus.

---

[82] Keha relativistlik energia sisaldab endas seisuenergiat ja relativistlikku kineetilist energiat, s. o. energiat, mis on tingitud keha liikumisest.

[83] Kalor on soojusenergia hulk, mis kulub ühe grammi vee temperatuuri tõstmiseks 14,5 kraadilt 15.5 kraadile Celsiuse järgi. Kilokalor on tuhat kalorit. Üks kilokalor on võrdne 427 kilogramm-meetriga.

Selle katsega demonstreeritakse aine jäävuse seadust: põlemisel ei kao ainet ega tule juurde, aine muudab ainult oma olekut. Kupli all olevate ainete kogumass on pärast põlemist täpselt sama suur, kui oli enne põlemist. Nii otsustatakse harilikult. Relatiivsusteooria valem (9) ütleb aga, et see päris täpselt nii ei ole. Põlemise ajal kiirgub kupli alt välja valgus- ja soojusenergiat. See tähendab, et kupli all oleva aine kogumass peab vähenema. Vähenemine, tõsi küll, on nii väike, et kaal sellele ei reageeri, kuid ta on ikkagi olemas. Kupli all olevate ainete kogumass jääb muutumatuks ainult sel juhul, kui kõik põlemisel tekkinud energia jääb kupli alla. Kupli alt väljuv energia toob endaga alati kaasa ka massi.

Eelnevast ei järgne, nagu tahaks relatiivsusteooria jäävuse seadusi ümber lükata. Relatiivsusteooria tunnistab massi jäävuse seadust kõige üldisemal kujul, kus arvestatakse ka seda, et igasuguse energia muutusega kaasneb ka massi muutus.

Keha liikumiseenergiat, nn. kineetilist energiat me kasutame iga päev. Liikuv keha annab ära oma energia ning jääb ise seejuures seisma. Relatiivsusteooria ütleb nüüd, et sellega ei ole keha energia veel kaugeltki ammendatud. Põhiline osa energiast, s. o. seisuenergia, on alles täielikult puutumata. Keha seisuenergiat saab vabastada ainult seisumassi vähendamise teel. Seejuures juba tühine seisumassi muutus viib suurte energiahulkade vabanemisele. Eespool nägime, et ühele grammile vastab 9 180 000 miljonit kilogramm-meetrit energiat. Niisugune hulk energiat vabaneks siis ühe grammi seisumassi kadumisel. See pole sugugi väike energia hulk; see võrdub üsna suure hüdroelektrijaama nädalatoodanguga.

Relativistlik seos massi ja energia vahel on selle poolest tähelepanuväärne, et see kehtib eranditult kõigi looduses olevate kehade ja üldse kõigi loodusnähtuste korral. See tähendab, et looduse kirjeldamisel pole üldse mõtet massist ja energiast eraldi rääkida — see oleks liigne kordamine. Võib rääkida näiteks ainult massist. Kui see kedagi huvitab, siis antud massiga keha energia võib ta valemi (9) abil ise arvutada. Looduse kirjeldamisel see suurus aga mingisugust olulist osa ei etenda, kuna see on asendatud juba teisega. Relativistlik füüsika ei tarvitseks üldse energia mõistet sisaldada. Teiselt poolt

võiks relativistliku[84] füüsika ka nii üles ehitada, et see üldse ei sisaldaks massi mõistet, vaid kõikjal esineks ainult energia. Klassikalises füüsikas nii teha ei saa, sest siin mingisugust seost massi ja energia vahel olemas ei ole. Kuna klassikaline füüsika jätab kõrvale peenemad efektid ja kirjeldab maailma just nii, nagu me seda igapäevases elus näeme, siis on arusaadav, miks mass ja energia näivad meile rangelt eraldatud suurustena, umbes samuti nagu ruum ja aeg. Asjade sügavamal uurimisel ilmneb aga massi ja energia vahel nii tihe seos, et ühe neist võiksime looduse kirjeldamisel üldse kõrvale jätta.

Aga kuidas on siis looduses, kas seal on olemas mass ja energia mõlemad, või ainult üks neist? Et vastata sellele küsimusele, tuleb kõigepealt peatuda füüsikas kasutatavate mõistete tekkimise protsessil.

Kõik füüsikas tarvitatavad mõisted on loodud inimese poolt, kusjuures nende valik teostatakse nii, et nad võimaldaksid õigesti kirjeldada loodust. Iga mõiste peegeldab ühte loodusnähtuste karakteristikut. Näiteks kehade mehaaniline liikumine seisneb selles, et aja muutudes muutub ka keha asukoht ruumis. Inimene vaatleb kehade asukoha muutumist ning leiab, et see ei toimu kõigi kehade juures ühesuguselt. Et kirjeldada seda erinevust, on otstarbekas tuua sisse kiiruse ja kiirenduse mõisted. Kehade liikumise erinev iseloom avaldub siis erinevas kiiruses ja kiirenduses. Kiirus ja kiirendus on inimese poolt loodud mõisted, kuid nad dikteeriti looduses toimuvate liikumiste poolt.

Täiesti analoogiline on lugu massi ja energiaga. Inimene uuris loodust ning veendus niisuguste mõistete kasutamise otstarbekuses, sest nende abil oli võimalik luua tõetruud pilti looduses toimuvatest liikumistest. Need mõisted on, piltlikult öeldes, fotod looduses esinevate kehade teatud karakteristikutest. Kui nüüd relatiivsusteooria näitas universaalse seose olemasolu massi ja energia vahel, siis oli sellega öeldud, et mass ja energia on mõisted, mis vastavad ühele ja samale karakteristikule looduses. Selles mõttes võime massi ja energiat ekvivalentseteks lugeda. See ekvivalentsus ei tähenda muidugi

---

[84] Relativistlikuks füüsikaks nimetatakse relatiivsusteooriale tuginevat füüsikat.

nende mõistete ühtelangemist, identsust. Võiksime siin tuua järgmise võrdluse.

Meil on kaks erinevat fotot ühest ja samast inimesest. Need fotod on ekvivalentsed selles mõttes, et nad kujutavad ühte ning sedasama inimest, kuid nad ei ole täielikult ühtelangevad, ei ole identsed. Täpselt samasugune on lugu massi ja energia ning selle füüsikalise realiteediga, mis peitub nende mõistete taga. Füüsikaline realiteet on üks ja seesama, kuid «fotod» temast, s. o. massi ja energia mõisted, on erinevad.

Seadus (9), mida nimetatakse massi ja energia ekvivalentsuse seaduseks, kuulub täielikult relativistlikku füüsikasse. Klassikalises füüsikas võime sellele äärmisel juhul vaadata ainult kui mõõtühikuid siduvale valemile. Kasutades valemit (9) võime näiteks mõõta massi kilogramm-meetrites või energiat grammides. See on põhimõtteline võimalus. Et niisuguste mõõtühikute kasutamine on praktiliselt ebasobiv, seda illustreerib järgmine näide.

Kui lugeda ühe kilovatt-tunni elektrienergia hinnaks 40 kopikat, siis üks gramm elektrienergiat maksab veidi üle kümne miljoni rubla. Kui teie elektriarve on mõnikümmend rubla kuus, mitmendiku grammi elektrit olete siis kuu jooksul kulutanud?

20. KUIDAS RELATIIVSUSTEOORIA NÄITAS TEED TUUMAENERGIA VABASTAMISEKS.

Relatiivsusteooria pakkus uurijaile meelitavaid perspektiive: tuleb avastada võimalused kehade seisumassi hävitamiseks ning vabanevad niisugused energiahulgad, millest inimkond ei ole julgenud varem unistadagi. Ühe grammi seisumassi kadumisel vabaneks sama palju energiat kui 2800 tonni kivisöe põletamisel.

Relatiivsusteooria poolt näidatud perspektiivid olid küll ahvatlevad, kuid ei olnud näha ühtegi teed nende realiseerimiseks. Isegi üks tuumafüüsika rajajatest, E. Rutherford, pidas seisumassist saadava energia kasutamist ebareaalseks. Kuid siiski leiti tee. Alguse sai see esimesel pilgul vähetähtsana näivatest ebakõladest.

Käesoleva sajandi kolmekümnendatel aastatel hakati

määrama aatomituumade masse. Mõõdeti näiteks heeliumi tuuma mass ning saadi 4,00285 aatomi massiühikut [85]. Samal ajal oli teada, et prootoni mass on 1,00759 ja neutroni mass 1,00898 aatomi massiühikut (mõeldud on kogu aeg seisumasse). Teostame nüüd lihtsa arvutuse.

Heeliumi tuum koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist, millede kogumass on 4,03314. Heeliumi tuuma mass on sellest arvust aga 0,03029 massiühiku võrra väiksem. Niisugune puudujääk massis avastati kõigi tuumade juures ja seda hakati nimetama massidefektiks. Tuumade juures esinev massidefekt ähvardas niisugust füüsika alussammast, nagu on massi jäävuse seadus: kui kahe prootoni ja kahe neutroni ühinemisel heeliumi tuumaks kaob 0,03029 massiühikut massi, siis näitab see selgesti massi jäävuse seaduse paikapidamatust. Kõik need kahtlused ja segadused lõpetas relatiivsusteooria sel teel, et ta sidus massi jäävuse seaduse energia jäävuse seadusega.[86]

Aatomituuma hoiavad koos väga tugevad tuumatungid. Tuuma koostisosadeks lahutamisel tuleb kulutada suur hulk energiat. Seda energiat, mis kulub tuuma lahutamiseks prootoniteks ning neutroniteks, nimetatakse tuuma seoseenergiaks. Kui tuuma lahutamisel kulub energiat, siis loomulikult sama hulk energiat eraldub tuuma moodustumisel. Seoseenergia on seega just energia, mis vabaneb prootonite ja neutronite ühinemisel tuumaks.

Nüüd võtab sõna relatiivsusteooria. Kui tuuma moodustumisel vabaneb energiat, siis massi ja energia ekvivalentsuse seaduse järgi peab tuuma mass olema väiksem kui teda moodustavate nukleonide [87] masside summa. Eraldunud energiaga ekvivalentne mass ongi see, mis moodustab massidefekti. Massidefekt tuumas on ekvivalentne tuuma seoseenergiaga.

Massidefekt heeliumi tuumas on meil teada, see on 0,03029 aatomi massiühikut. Valemi (9) abil võime nüüd arvutada heeliumi tuuma seoseenergia, mis on 28,2

---

[85] Aatomi massiühikuks on $^1/_{16}$ niisuguse hapniku tuuma massi, mis sisaldab 8 prootonit ja 8 neutronit. Üks aatomi massiühik on võrdne $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ grammiga.

[86] Massidefekti ennustasid relatiivsusteooriat tundvad füüsikud õieti ammu enne selle tegelikku avastamist.

[87] Nukleon või tuumaosakene on prootonite ja neutronite ühine nimetus.

megaelektronvolti [88]. Niipea, kui on mõõdetud tuuma mass, saame analoogilisel teel arvutada massidefektid ning seoseenergiad kõigi tuumade jaoks. Mõned arvutustulemustest on esitatud tabelis 11. Tabeli viimases veerus paiknev

Tabel 11

Mõnede tuumade seoseenergia

Element	Prootonite arv tuumas	Prootonite ja neutronite koguarv tuumas	Tuuma seoseenergia megaelektronvoltides	Seoseenergia ühe nukleoni kohta megaelektronvoltides
Vesinik	1	1	0	0
Deuteerium [89]	1	2	2,18	1,09
Heelium	2	4	28,20	7,05
Liitium	3	6	31.81	5,30
Süsinik	6	12	91,66	7,64
Hapnik	8	16	126,96	7,94
Uraan	92	238	1780	7,5

Märkus. Tabeli viimases veerus on näidatud seoseenergia ühe nukleoni kohta. See on suurus, mis näitab, kui palju massi on tuuma moodustumisel kaotanud iga nukleon, kusjuures massi kaotust mõõdetakse energiaühikutes.

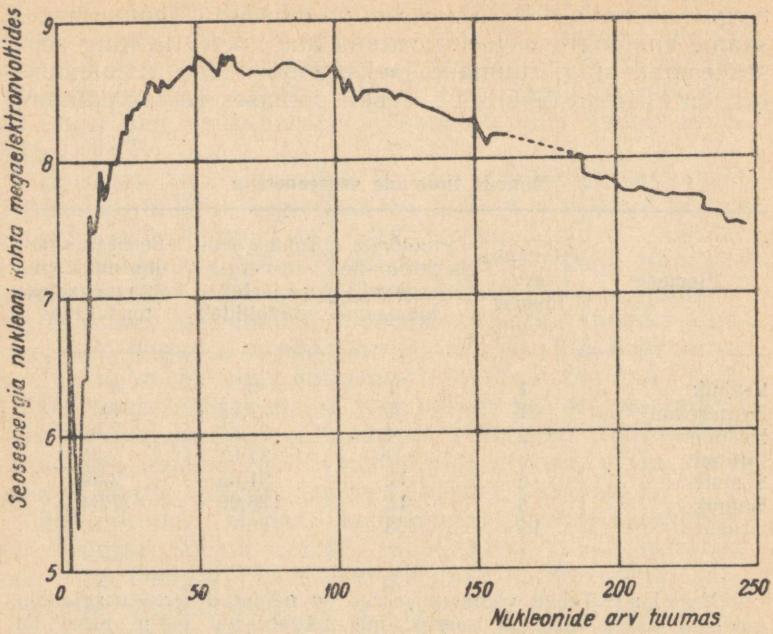
arv näitab, kui palju massi on kaotanud iga tuumas olev prooton või neutron, kusjuures massi kaotust on mõõdetud megaelektronvoltides. Teiste sõnadega: tabeli viimases veerus olev arv näitab, kui suur osa tuuma seoseenergiast tuleb ühe nukleoni kohta.

Tabelist on näha, et seoseenergia ühe nukleoni kohta ei muutu tuumalt tuumale minnes kuigi suurtes piirides. Veelgi paremini hakkab see silma joonisel 46 esitatud graafikul, kus rõhtteljele on kantud osakeste arv tuumas, püsttelje aga seoseenergia ühe nukleoni kohta.

Seoseenergia tuumaosakese kohta on kõigi elementide korral üks ja seesama — erinevused on ainult mõne megaelektronvoldi piires. Kuid just nendes erinevustes ongi

[88] Arvutuste juures on kasulik silmas pidada, et üks aatomi massiühik on ekvivalentne 931 megaelektronvoldiga. Seega vastab 0,03029 massiühikule 28,2 megaelektronvolti.

[89] Deuteerium on vesiniku teisend, mille tuuma moodustavad üks prooton ja üks neutron. Deuteeriumi nimetatakse ka raskeks vesinikuks.



Joon. 46. Kuidas seoseenergia nukleoni kohta sõltub nukleonide arvust tuumas.

võti aatomituuma energia vabastamiseks ning seisumassiga ekvivalentse energia kasutamiseks.

Deuteeriumi tuum sisaldab ühe prootoni ja ühe neutroni, heeliumi tuum aga kaks prootonit ja kaks neutronit. Kahe deuteeriumi tuuma ühinemisel tekib seega heeliumi tuum. Missugused energeetilised muudatused kaasnevad selle protsessiga? Tabelist 11 näeme, et deuteeriumi tuumas kumbki nukleon on kaotanud 1,09 megaelektronvoldiga ekvivalentse massi. Heeliumi tuumas on massi kaotus iga nukleoni kohta palju suurem, moodustades 7,05 megaelektronvolti. Tähendab, kahe deuteeriumi tuuma ühinemisel heeliumi tuumaks kiirgab iga tuumaosakene välja 5,96 megaelektronvolti energiat, kaotades seejuures muidugi vastava osa oma seisumassist. See ongi üks teedest, kuidas muuta seisumassi energiaks. Ka teisi teid on lugejal joonise 46 silmitsemisel kerge leida: aatomituuma

tuleb muuta nii, et seoseenergia nukleoni kohta (s. o. iga nukleoni poolt kaotatud mass) saaks võimalikult suureks. Iga kord esineb siis täiendav seisumassi kadumine ning tuumast eraldub energiat. Jämedates joontes väljendades on tuumaenergia vabastamise teid kaks: kergete tuumade ühendamine ja raskete tuumade lagundamine. Mõlemal juhul on eesmärgiks tekitada keskmisi tuumi, kus seisumassi kaotus nukleoni kohta (s. o. massidefekt) on kõige suurem.

Kaasaegsetes tuumareaktorites kasutatakse tehnilistel põhjustel ainult raskete tuumade lagundamise protsessi. Seejuures reaktori «kütteks» kõlbavad praegu ainult mõned üksikud elemendid, nagu uraan, toorium ja plutoonium. Tõsi küll, ka teised rasked elemendid eraldaksid lagunemisel energiat, kuid nende lagunemise protsess ei kulge ilma kõrvalise abita. Niisuguste elementide lõhestamine kaheks kergemaks elemendiks on võimalik ainult kiirete osakestega pommitamisel. Suurtükivägi niisuguseks pommitamiseks, s. o. osakeste kiirendajad, on olemas ainult suurtes füüsikalaboratooriumides. Peale selle on energiakulu osakeste kiirendamiseks tohutult suurem kui tuumade lõhestumisel vabanev energia.[90] Osakesi tuleb kiirendada palju, kuid ainult mõni üksik neist tabab märki ja lõhestab tuuma. On selge, et niisugusel tuumade lagundamisel võivad olla ainult teaduslikud eesmärgid. Rahvamajanduses rakendatavas aatomireaktoris saab kasutada ainult neid elemente, millede tuumad ilma kõrvalise abita lagunevad.

Ka tuumaenergia vabastamine kergete elementide liitmisel ei ole veel rahvamajanduses kasutatav, sest see on teostatav ainult ülikõrgete temperatuuride juures.[91] Küll aga toimuvad kergete tuumade ühinemised Päikese ja teiste kinnistähtede sisemuses. Tähtede kiirgusenergia

---

[90] Märgime näiteks, et nõukogude kosmotron kasutab töötamise ajal ühte viieteistkümnendikku V. I. Lenini nim. Volga hüdroelektrijaama võimsusest.

[91] Niisugused temperatuurid tekivad näiteks aatomipommi plahvatamisel. Sellele tugineb vesinikupommi ehitus, kus «sütikuna» kasutatava aatomipommi plahvatuse koldes pommile lisatud deuteerium ühineb heeliumiks, eraldades hiiglakoguse energiat.

On huvitav märkida, et nõukogude füüsikud on avastanud meetodi ülikõrgete temperatuuride lokaalseks tekitamiseks. See avastus avab loodetavasti tee aatomireaktorite konstrueerimisele, kus energia vabaneks kergete tuumade ühinemisel.

ongi tuumaenergia, mis tekib tähe seisumassi kadumise arvel. On välja arvutatud, et näiteks Päike kaotab kiirguseks igas minutis 240 miljonit tonni oma seisumassi. See on Päikese tohutu massi juures siiski tühine suurus. Säilitades oma kiirguse praeguse intensiivsuse, võib Päike meid soojendada veel miljardeid sajandeid.

Aatomi tuumaenergia vabastamise probleemi lahendamine oli võimalik ainult tänu relatiivsusteoorias avastatud massi ja energia ekvivalentsuse seadusele. Sellega on lahendatud ka seisumassi arvelt energia saamise probleem, kuigi mitte täielikult. Kaotada ära näiteks terve kivisõe tükike ja kasutada sellega ekvivalentset energiat, pole võimalik.[92] Meie käsutuses olevad vahendid võimaldavad ainult väikest osa mõne elemendi seisumassist hävitada, kuid ka juba see viib hiiglasuurte energiahulkade vabanemisele. Näiteks ühe grammi heeliumi moodustumisel deuteeriumi tuumadest kaob ainult 0,006 grammi seisumassi, kuid selle arvel vabaneb 129 miljonit kilokalorit energiat. Sama energia hulga saaksime alles 17,2 tonni kivisõe põletamisel. Raskete elementide lõhestumisel vabanevad energiad on üldiselt väiksemad. Ühe grammi loodusliku uraani kõigi aatomite lagundamisel kaheks ligikaudu võrdseks osaks saame 19,6 miljonit kilokalorit energiat. Sellest soojusest jätkuks 200 tonni vee keemaajamiseks, samal ajal kui kivisütt kuluks selleks 2,6 tonni. Grammid ja tonnid — see on tuuma-kütteaine ja hariliku kütteaine hulkade kasutamise vahekord isegi praeguste tagasihoidlike võimaluste juures. Üks gramm tuumakütust asendab tonne harilikku kütteainet — see on füüsikute panus maailma energeetika arendamisel.

Veel mõnikümmend aastat tagasi oli kuulda ohkeid inimkonna tuleviku pärast, kuna kõik energiaallikad, nagu kivisüsi, nafta jt. pidid juba mõnesaja aasta pärast otsa lõppema. Praegu on see mure täielikult kadunud. Ainuüksi maailma uraanivarud võivad inimkonna energiatarviduse katta rohkem kui 8000 aasta jooksul, rääkimata veel tooriumist, mida leidub rohkem kui uraani. Peale selle võib olla kindel, et varem või hiljem lahendatakse ka teistest elementidest energia saamise küsimus. Praktili-

[92] Võimatu on terve ainetüki muutmine energiaks seepärast, et looduses kehtib nukleonide jäävuse seadus. Nukleoni seisumass võib energiaks muutuda ainult nukleoni kohtumisel antinukleoniga (vt. järgmine punkt).

selt enam mingisugune energiapuuduse tont inimkonda ei ähvarda, ja seda tänu relatiivsusteooriale. Massi ja energia ekvivalentsuse seadus näitas inimkonnale tee uute, praktiliselt ammendamatute energiaallikate juurde.

21. UUTE OSAKESTE OTSINGUIL

J. Nuut kirjutas 1930. aastal erirelatiivsusteooria kohta: «Ainuüksi filosoofiliste targutuste abil Einsteini õpetust kõigutada pole võimalik, — seda näitab küsimuse seadmine matemaatilisel kujul: oleks Einsteini õpetus rajatud mõttelistele vigadele, siis peaksid need mõttelised vead esile tulema juba üldistes matemaatilistes mõttekäikudes. Päris kindel on praegu, et maailm *võiks* olla niisugune, nagu Einstein seda õpetab, — mingit sisemist vasturääkivust selles ei peitu. *Kas* maailm tõepoolest on niisugune, seda saab otsustada ainuüksi vaatluste ja katsete najal; juba praegused kogemused teevad väga tõenäoliseks, et ta seda *on*.»

Vahepeal on veerand sajandit mööda läinud ja inimkonna praktika on veenvalt näidanud, et maailm *on* niisugune nagu õpetab Einstein. Relatiivsusteooriata ei suuda kujutleda kaasaegset teadust ja tehnikat. Aatomisajand on ühtlasi ka relatiivsusteooria sajand, sest relatiivsusteooriata poleks toime tuldud aatomituuma energia vabastamisega. Relatiivsusteooria rakendustest tehnikas oli eespool juttu. Käesoleva peatüki viimaste punktide eesmärgiks on puudutada põgusalt selle teooria tähtsust teaduses ja esmajoones just teoreetilises teaduses.

Erirelatiivsusteooria on ruumi ja aja üldine teooria. See tähendab, et kõigi ruumis ja ajas kulgevate protsesside kirjeldamisel tuleb silmas pidada selle teooria põhinõudeid, eriti just nõuet, et kõik inertsiaalsüsteemid peavad olema teoorias samaväärsed. Selle nõude rakendamine osutus üheks kõige viljakamaks võtteks teoreetilise füüsika ajaloos. Üheks eredamaks näiteks öeldu kohta on positroni ja antiprootoni avastamise lugu.

1928. aastal lõi inglise füüsik P. Dirac elektroni teooria, silmas pidades kõiki erirelatiivsusteooria nõudeid. Teooria ennustused ühtisid katsete tulemustega üllatavalt täpselt, kuid üks asi ei olnud siiski korras. Leitud võrran-

did ei piirdunud ainult elektroni kirjeldamisega, vaid rääkisid veel mingisugustest elektroni massiga, kuid positiivset laengut kandvatest osakestest. Dirac oli hämmastunud. Ainukesed sel ajal tuntud positiivse laenguga osakesed olid prootonid, kuid nende mass ületas elektroni massi 1837 korda. Võrrandid rääkisid ilmselt mingisugustest teistest osakestest; Dirac nimetas neid antielektronideks.

Hüpoteetilistes antielektronides nähti Diraci teooria tõsist puudust. Kõige imelikum oli teooria ennustus, et antielektroni ja elektroni kohtumisel mõlemad kaovad ja tekib γ-kvant; või vastupidi: kui γ-kvandi energia on üle 1,02 megaelektronvoldi, võib see muutuda elektronist ja antielektronist koosnevaks paariks. Täiesti arusaamatud ennustused. Silmapaistev teoreetiline füüsik W. Pauli kirjutas 1932. aastal selle kohta:

«Osutub, et raskused teoorias on tõepoolest sügavad ning neid pole võimalik ei kõrvale jätta ega mingil viisil ületada.»

Ja siis selgus korraga, et tegelikult mingisuguseid raskusi ei olnudki. 1932. aastal avastati uus elektroniga võrdmassiline elementaarosakene, mis kandis positiivset elektrilaengut. Seda osakest hakati nimetama positroniks. Selgus, et positroni omadused olid täpselt samasugused kui Diraci teooria salapärasel antielektronil. Niipea kui positron satub elektroni lähedusse, hävivad nad mõlemad,[93] kusjuures tekib üks või mitu γ-kvanti koguenergiaga $2mc^2$ (m tähistab siin elektroni või sellega võrdmassilise positroni massi). See on just niisugune protsess, millest räägib relatiivsusteooria: elektroni ja positroni mass kaob ning vabaneb selle massiga ekvivalentne energia. On muidugi võimalik ka vastupidine üleminek, kus γ-kvandi energia arvel tekib elektronist ja positronist koosnev osakeste paar (sel juhul energia muutub seisumassiks). Ka niisugune muutumine on eksperimentaalselt avastatud.

Diraci teooria ennustused olid nii julged, et nendesse ei uskunud algul keegi, kaasa arvatud teooria autor ise. Ja ometi täitusid need ennustused kuni viimseni. Niisuguse hämmastava selgeltnägemisvõime andis teooriale relatiiv-

[93] Seda protsessi nimetatakse elektron-positronpaari annihilatsiooniks.

susteooria põhinõuete arvestamine. Positroni avastamine oli relatiivsusteooria triumfiks.

Edasi olid füüsikud juba targemad. Päevakorda kerkis jälle prooton. See on osakene, mis kannab positiivset laengut, kuid paljude teiste omaduste poolest on elektroniga sarnane. Relatiivsusteooria nõudeid rahuldav prootoni teooria ennustab seega ka prootonile vastava antiosakese olemasolu. Looduses peab olema osake, mis on muidu samasugune kui prooton, kuid kannab negatiivset elektrilaengut. Seda osakest hakati nimetama antiprootoniks. Teooria ütleb veel, et prootoni kohtumisel antiprootoniga annihileeruvad (kaovad) mõlemad, kusjuures vabaneb energia $2Mc^2$ (M tähistab prootoni või sellega võrdmassilise antiprootoni massi). Vastupidi, energia $2Mc^2$ arvel võib tekkida prootonist ja antiprootonist koosnev osakeste paar. Kas ka need ennustused on õiged? Teadlased asusid antiprootoni otsinguile.

Kõigepealt otsiti antiprootonit kosmilisest kiirgusest, kuid ei leitud. Kas see tähendas, et relatiivsusteooria oli seekord füüsikuid petnud? Teadlased arvasid teisiti. Tõenäoliselt tekib antiprootoneid kosmilises kiirguses, kuid kohtudes mõne läheduses oleva prootoniga annihileeruvad nad otsekohe. Antiprootoni eluiga on nähtavasti nii lühike, et me lihtsalt ei satu talle peale. Antiprootoneid tuleb järelikult kunstlikult tekitada. Relatiivsusteooria annab selleks lihtsa näpunäite.

Prootonist ja antiprootonist koosnev paar tekib energia $2Mc^2$ arvel. Kui suur on see energia? Arvutus näitab, et prootoni seisumass on ekvivalentne umbes 938 megaelektronvoldiga, sama võib öelda antiprootoni kohta. Et tekitada korraga prootonit ja antiprootonit, läheb seega tarvis vähemalt 1876 megaelektronvolti energiat. Peale selle nõuab impulsi jäävuse seaduse rahuldamine veel täiendavat energiat. Arvutused näitavad, et prootonist ja antiprootonist koosneva osakeste paari tekkimist võib oodata sel juhul, kui suunata mõnesugusest ainest märklauale prootonite kimp, kus iga prootoni kineetiline energia on vähemalt 5600 megaelektronvolti. Niisuguste prootonite mass ületab seisumassi peaaegu seitsmekordselt, kusjuures prootonite kiirus on üle 297 000 kilomeetri sekundis.

Mõni aasta tagasi alustati Ameerikas hiiglasliku kiirendaja ehitamist, milles prootonid pidid omandama

prootonist ja antiprootonist koosneva paari tekitamiseks vajaliku energia. Kiirendaja lasti käiku ja 1955. aasta sügisel läbis teadusemaailma kulutulena teade antiprootoni avastamisest. Teadlaste usk relatiivsusteooriasse õigustas end. Antiprootoni omadused olid just niisugused, nagu ennustas teooria: kokku puutudes prootoniga annihileerusid mõlemad, kusjuures vabanes nende massidega ekvivalentne hulk energiat. Selle energia kandjateks olid mesonid ja γ-kvandid.

22. AATOMIST JA ANTIAATOMIST

Relatiivsusteooria ennustas antielektroni ja antiprootoni olemasolu, samuti ütleb ta, et looduses peab esinema ka antineutron. Tõsi küll, neutron on ilma elektrilise laenguta osake, seega peab ka antineutron olema neutraalne. Laengu järgi antineutronit neutronist eristada ei saa. Sellele vaatamata on tunnuseid, mis võimaldavad neutroni ja antineutroni vahel vahet teha. Üks tunnustest oleks annihilatsiooniprotsessi esinemine: antineutron peab kohtumisel neutroniga tingimata annihileeruma.

1956. aasta septembris antineutron tõepoolest avastati. Osutus, et juhul kui antiprooton möödub prootoni lähedalt, kaotab ta oma laengu ja muutub antineutroniks. Prooton samal ajal muutub neutroniks. Antineutron, samuti nagu antiprootongi, oli just niisuguste omadustega, nagu ennustasid füüsikud.

Aatomid meid ümbritsevas maailmas koosnevad teatavasti aatomituumast ning elektronide poolt moodustatud elektronkestast. Aatomituuma ehituskividekson prootonid ja neutronid. Prootonitest, neutronitest ja elektronidest on moodustatud kõik meile tuntud keemilised elemendid. Kuid looduses on olemas veel kolm ehituskivi, mis võiksid samuti aatomiteks ühineda.[94] Need on antiprooton, antineutron ja positron (antielektron). Aatomit, milles antiprootonist ja antineutronist moodus-

[94] Olgu märgitud, et looduses on peale harilike aatomite avastatud ka teisi aatomitaolisi süsteeme, mis on aga kas harvaesinevad või lühikese elueaga. Üks niisugustest on näiteks positroonium — süsteem, mille moodustavad elektron ja positron. Positroonium kaob õige varsti pärast tekkimist sel teel, et elektron ja positron annihileeruvad.

tunud tuuma ümbritseb positronidest koosnev kate, nimetame antiaatomiks. Antiaatomis kannab tuum negatiivset, tuuma ümbritsev kate aga positiivset laengut.

On huvitav, miks meile tuntud maailm koosneb aatomitest, mitte aga antiaatomitest. Miks elektrone, prootoneid ja neutroneid esineb kõikjal, kuna positron, antiprooton ja antineutron kaovad peaaegu silmapilkselt pärast tekkimist — nad annihileeruvad. Oleks väga hästi mõeldav, et maailm koosneks antiaatomitest. Siis oleksid positron, antiprooton ja antineutron tavalised osakesed, kuna elektron, prooton ja neutron kaoksid varsti pärast tekkimist. Niisugune maailm, nimetame teda antimaailmaks, ei oleks millegi poolest halvem meie praegusest maailmast, ta võiks sellega isegi täpselt sarnane olla. Vahe elementaarosakeste laengu märgis ei ole oluline. Meile teadmata põhjustel valitsevad looduses siiski niisugused tingimused, et aine koosneb aatomitest; antiaatomeid pole õnnestunud seni isegi avastada. Täpsemini tuleks öelda: meile tuntud maailma osas valitsevad niisugused tingimused, kuid pole sugugi võimatu, et mõnes teises maailmapiirkonnas on tingimused teised ja aine koosneb seal antiaatomitest.

Huvitav on nõukogude teoreetiku L. D. Landau märkus selle kohta, et aatomi ja antiaatomi probleem on seotud ruumi peegelduslike omadustega. Kui uurida mingi eseme kujutist peeglis, siis selgub, et see kujutis on just niisuguste omadustega, nagu koosneks ta antiaatomitest. Seega meid ümbritseva maailma peegeldamisel saame antiaatomitest koosneva maailma. Õnneks ei ole peeglis tekkiv kujutis reaalne, muidu tuleks peeglit tõsiselt karta: iga ese võiks koos oma peegelpildiga annihileeruda.

Laskume korraks fantaasia valda. Oletame, et maailmas on olemas aatomitest ja antiaatomitest koosnevad osad. Kui need osad mingisugusel põhjusel peaksid kokku puutuma, siis tekib hiiglaslik katastroof: need kaks maailma annihileeruvad. Elektron annihileerub koos positroniga, prooton antiprootoniga ja neutron antineutroniga, s. o. aatom annihileerub kokkupuutumisel antiaatomiga. Esemed meie maailmast annihileeruvad kokkupuutumisel esemetega antimaailmast. Selle juures vabanevad energiahulgad on kujuteldamatult suured. Aatomireaktorites vabaneb energia seisumassi tühise osa kadumisel, sama lugu on aatomipommi plahvatusel. Siin aga

kaob peaaegu kogu seisumass.[95] üks gramm massi meie maailmast, annihileerudes ühe grammi massiga antimaailmast, annab 43 000 miljonit kilokalorit. See on energia, mille saaksime 55 000 tonni kivisöe põletamisel. Niisuguse maailma piirkondade kolossaalse annihileerumise juures ei kaoks muidugi maailma moodustav mateeria, vaid ta võtaks ainult teise kuju.

Maailmapiirkondade annihileerumine on muidugi fantaasia, kuid aatomi ja antiaatomi vahekord on küsimus, mis kahtlemata hakkab teadust ikka enam ja enam huvitama. See on probleem, mille tagant avanevad võib-olla uued seninägematud perspektiivid maailma energeetikale. Kujutlege seadeldist, kus väikesed kogused aatomeid ühendatakse antiaatomitega. Seejuures vabaneb ainult veidi vähem kui aatomite seisumassiga ekvivalentne energia. Siin kaob peaaegu kogu seisumass, mitte enam väike osake sellest nagu kaasaegsetes aatomireaktorites. Vastavalt sellele on ka saadavad energiakogused palju suuremad. Muidugi, kirjeldatud protsessi kasutamisel inimkond kasuliku energia koguhulgas midagi ei võidaks: antiaatomite tekitamiseks kuluks sama hulk energiat kui hiljem nende annihileerumisel saadakse. Küll aga saaks antiaatomeid kasutada energia akumulaatorina. Nii näiteks võiks kosmiline rakett oma energiavaru kaasa võtta antiaatomite kujul — nii kaalub see kõige vähem.

Antiaatomid energia akumulaatorina — tänapäeval on niisugune mõte isegi rohkem kui julge fantaasia. Aga kes teab, võib-olla tuleb kunagi aeg, kus ka see idee realiseeritakse.

23. OSAKESTEST-LIBAHUNTIDEST

Vanal hallil ajal jutustati palju libahuntidest ning teistest moondujatest, ja ainult ei jutustatud, vaid ka usuti neisse. Proovige tänapäeval rääkida, et nägite, kuidas nägus neiu jooksis metsas paar tiiru ümber kivi ja muutus hundiks... Niisugusele jutule ei leia uskujat isegi kõige sügavamast metsakolkast. Igaüks teab, et taolised

---

[95] Kogu seisumass ei kao selle tõttu, et prootoni ja antiprootoni, samuti ka neutroni ja antineutroni annihileerumisel tekivad ka mesonid, millede seisumass ei ole null.

moondumised on üleloomulikud. Iga asi looduses, ükskõik missugused muutused temaga ka ei toimuks, jääb ikka teatud määral iseendaks. Inimene kasvab, muudab oma välimust, kuid hunti temast ei saa. Rauatükiga võime ette võtta igasuguseid keemilisi reaktsioone, kullaks ei muutu ta seejuures kunagi. Libahunditaolisi esemeid ning olendeid looduses ei ole — nii tahaksime otsustada oma igapäevaste kogemuste najal. Kas see on siiski päris täpselt nii?

Olid elektron ja positron, ning korraga pole neid enam, on ainult valguse osakene — footon. Olid prooton ja antiprooton, ning äkki muutuvad nad mesoniteks ja footoniteks. Kas niisugused moondumised ei meenuta libahundi tempe? Elementaarosakesed, need on looduses nagu tõelised libahundid-moondujad. Tuginedes relatiivsusteooriale õnnestus füüsikutel luua õpetus, mis kirjeldab osakeste-libahuntide moondumisi. Selles osakeste-libahuntide teoorias [96] leidsid vastuse paljud huvitavad küsimused. Võtame näiteks kahe elektrilaengu vastastikuse mõju. Miks tõmbuvad isenimelised elektrilaengud teineteise poole? Keskkooli füüsikakursuses räägitakse ainult sellest, et niisugune tõmbumine on olemas, kuid tema põhjusest õpikud vaikivad. Osakeste-libahuntide teooria annab siin järgmise pildi.

Elektrilaengust kiirguvad elektromagnetilise välja osakesed — footonid — ja levinult valguse kiirgusega teise laenguni, neelduvad seal. Toimub nagu pallimäng kahe elektrilaengu vahel, kusjuures pallideks on footonid. Need footonid, mis ruumis parajasti vabalt liiguvad, moodustavad laenguid ümbritseva elektromagnetilise välja. Niisuguse «pallimängu» teel mõjustavad laengud üksteist: kui footoneid vahetavad ühenimelised laengud, tekib nende vahel tõuketung, kui aga isenimelised laengud, siis tõmbetung.

Huvitav on, et elektrilaengud ei sisalda footoneid. Footon tekib alles kiirgumise momendil ning neeldudes teises laengus, kaob täielikult. Selles avaldub footoni libahundiiseloom.

Üheks raskemaks pähkliks füüsikutele on tuumatungide probleem. See peab olema kolossaalne jõud, mis ühendab

---

[96] Seda teooriat nimetatakse teaduslikus keeles väljade kvantteooriaks.

prootonid ja neutronid ülitihedateks aatomituumadeks, nii tihedateks, et peotäis aatomituumi kaaluks rohkem kui kogu maailma sõjalaevastikud kokku. Samas ei ole aga väljaspool tuuma tuumatungide mõju märgata. Kuidas

Tabel 12

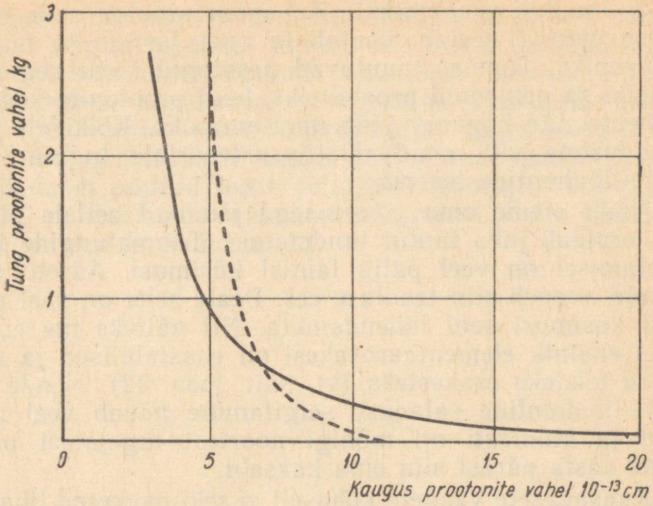
Footonite ja mesonite vahendusel tekkivate tungide võrdlemine

Kaugus prootonite vahel miljondikes millimikronites	Prootonite vahel valitseva elektrilise tõuketungi suurus kilogrammides (tungi ülekandjaiks on footonid)	Prootonite vahel valitseva mesoniseloomuga tungi suurus kilogrammides (tungi ülekandjaiks on π-mesonid)
1	23.5	410
5	0,94	2,7
7	0,48	0,44
10	0,24	0,04
15	0,10	0,0007
20	0,06	0,00002

seda seletada? Väga lihtsalt. Ka tuumas olevad prootonid ja neutronid mängivad palli, ainult nende pallideks ei ole footonid, vaid mesonid. Arvutus näitab, et nii tekib tung, mis on elektrilistest tungidest palju tugevam, kuid selle mõju ei ulatu kuigi kaugele. Tabelis 12 on võrreldud elektrilist tungi kahe prootoni vahel mesonite vahendusel tekkiva tungiga samade prootonite vahel. Seejuures on oletatud, et elektrilist mõju kannavad üle footonid, mitteelektrilist mõju aga π-mesonid seisumassiga 273 elektroni massi.

π-mesoneid vahetavad omavahel nii prootonid kui neutronid. Nii tekib tuumas meson-päritoluga tuumatung, mis seob kõiki tuumas olevaid nukleone ühesuguse tugevusega.

Mesontungide erinevus elektromagnetilistest tungidest hakkab eriti hästi silma joonisel 47. Siin on rõhtteljele märgitud kaugus kahe prootoni vahel, kuna püstteljele on kantud prootonite vahel mõjuvate tungide suurused kilogrammides. On näha, et väikestel kaugustel meson-iseloomuga tõmbetung prootonite vahel on palju suurem elektrilisest tõuketungist. Veidi kaugemal mesontung muutub aga praktiliselt nulliks. Joonis 47 annab võimaluse otsustada aatomituuma mõõtmete üle. Kuna mesontungid ulatu-



Joon. 47. Kahe prootoni vahel valitsevate tungide sõltuvus prootonitevahelisest kaugusest. Pidev joon kirjeldab footonite vahendusel tekkivat elektrostaatilist tõuketungi, punktiirjoon aga mesonite vahendusel tekkivat tõmbetungi. Olgu märgitud, et täpselt samasugune tõmbetung valitseb kahe neutroni vahel, samuti ka neutroni ja prootoni vahel.

vad umbes 7 miljondiku millimikroni kaugusele, siis nende tungide mõjul koos püsivad aatomituumad ei saa palju suuremad olla. Katsed näitavadki, et see arv on väga lähedal tuumade tegelikele mõõtmetele. Kui kaks prootonit asetsevad tuumas (s. o. kaugus nende vahel on väiksem kui 7 miljondikku millimikronit), siis neid ühendavad tõmbetungid on tõuketungidest tugevamad (joon. 47). Sellega seletubki, miks aatomituumad ei lagune prootonite vahel valitsevate elektriliste tõuketungide mõjul.

Mesoneid on olemas nii positiivseid, negatiivseid kui ka neutraalseid. See põhjustab aatomituumas mitmesuguseid lisanähtusi. Näiteks võib juhtuda, et prooton kiirgab positiivselt laetud mesoni. Sellega annab ta mesonile ära kogu oma positiivse laengu ning muutub ise neutroniks. See neutron aga, mis positiivse mesoni neelab, muutub prootoniks. Võib juhtuda ka teisiti. Neutron kiirgab negatiivselt laetud mesoni ja omandab ise positiivse laengu

(s. o. muutub prootoniks). Kui mõni prooton selle negatiivse mesoni neelab, kaotab ta oma laengu ja muutub neutroniks. Tuumas muutuvad prootonid kogu aeg neutroneiks ja neutronid prootoneiks, kuid prootonite koguarv ja neutronite koguarv jääb muutumatuks. Kõikidele neile järeldustele viib meid relatiivsusteooriale tuginev osakeste-libahuntide teooria.

Nüüd oleme oma jutustusega jõudnud sellele piirile, mis eraldab juba tuntut tundmatust. Tuumatungide tekke seletamisel on veel palju lahtisi küsimusi. Ääretu uurimisala avaneb siin teadlase ees. Peale selle on veel palju teisi küsimusi seni lahendamata. Nii näiteks me ei tea, miks enamik elementaarosakesi on ebastabiilsed ja muutuvad teisteks osakesteks (vt. näit. joon. 42). Nende osakeste-libahuntide saladuse selgitamine nõuab veel palju tööd ja kindlasti nii mõnigi noortest lugejatest pakub mõne aasta pärast siin oma kaasabi.

Kaasaegsete vaadete kohaselt ei teki osakesed-libahundid ainult teistest osakestest, vaid nad võivad ilmuda ülimalt lühikeseks ajaks ka täiesti tühjas ruumis. Ruumis, mida me loeme täiesti tühjaks, s. o. vaakuumis, tekivad näiteks footonid ja kaovad otsekohe. Samuti tekivad siin hetkelised elektronist ja positronist koosnevad osakeste paarid. Võib isegi nii juhtuda, et hetkeline elektron-positronpaar annihileerub ja tekib footon, mis seejärel kaob. Võib juhtuda aga ka nii, et hetkeline footon tekitab hetkelise elektron-positronpaari, mis seejärel kaob. Tühja ruumi mikropiirkondades esinevad küllalt keeruka iseloomuga protsessid. Need protsessid on võimalikud seetõttu, et ruum on materiaalne nähtus; isegi tühi ruum ei ole «mittemidagi», vaid ka temal on oma omadused.

Suurtele kehadele niisugused hetkelised osakesed mingisugust märgatavat mõju ei avalda. Teine asi on aga näiteks elektroniga. Kui selle kõrval tekib elektronist ja positronist koosnev paar, siis mõjuvad need elektronile üks tõuke-, teine tõmbetungiga. Võib juhtuda veelgi hullem lugu. Hetkeline positron võib koos esialgse elektroniga annihileeruda, kusjuures järele jääb vaakuumist tekkinud elektron. Kuna üks elektron ei erine millegi poolest teisest elektronist, siis otseselt me niisugust vahetust ei märka, kaudselt tuleb see aga ilmsiks.

Kõik need vaakuumis toimuvad protsessid avaldavad elektronile mõju, mida on võimalik mõõta. Ja mis kõige

huvitavam: teoreetiliselt ennustatud mõju on täpselt sama suur kui selgub tegelikul mõõtmisel. Katse on teooriaga kooskõlas, kuid ometi polnud teoreetikud üksvahe rahul. Asi oli selles, et teooria, mis seletas vaakuumi mõju elektronile, polnud relatiivsusteooriaga hästi kooskõlas. Ja siin ilmnes füüsikute kindel usk relatiivsusteooriasse: parandada ei püütud mitte relatiivsusteooriat, vaid seda teooriat, mis seletab vaakuumi mõju elektronile. Suurel määral on see ka õnnestunud.

IV

ÜLDINE RELATIIVSUS-TEOORIA

Teed loodusseaduste avastamiseks on sageli sama hämmastavad kui need seadused isegi.

Johannes Kepler

1. ALGAME JÄLLE GALILEIGA

Galilei oli esimene, kes avastas inertsiseaduse ning sõnastas klassikalise relatiivsusprintsiibi; sellelt aluselt arenes välja erirelatiivsusteooria. On huvitav, et Galileile võlgneme tänu ka nende loodusseaduste avastamise eest, mis hiljem said aluseks üldisele relatiivsusteooriale. Need seadused olid kehade vaba langemise seadused.

Mille poolest erineb kerge keha langemine raske keha langemisest? Näib, et küsimus on lihtne. Igaühel meist on olnud juhust selles veenduda, et kerged kehad langevad aeglasemalt kui rasked. Tellingult kukuvad korraga telliskivi ja töölise taskurätt. Kahtlemata on telliskivi see, mis enne maapinnale jõuab. Kas siit võib järeldada, et rasked kehad langevad kiiremini?

Laseme käest lahti udusule. See tõuseb keereldes ülespoole ning eemaldub. Kas siit tuleks järeldada, et nii kerged kehad nagu udusulg üldse maa poole ei lange? On kindel, et ükski lugejaist niisuguse järeldusega nõus ei ole. Need olid õhuvoolud, mis sule üles tõstsid. Kui poleks tuult, oleks ka sulg maa poole langenud.

Eelnevast on näha, et õhutakistus ning õhuvoolud võivad kehade langemisele üsna suurt mõju avaldada, eriti siis, kui keha on kerge ja suure pindalaga. Õhkkonna mõju kehade langemisele meid siinkohal ei huvita. Vaatleme siin ainuüksi kehade vaba langemist, s. o. kehade liikumist ainult Maa külgetõmbetungi mõjul, kusjuures puuduvad kõik kõrvalised mõjud, kaasa arvatud ka õhutakistus.

Kui soovitame ükskõik kellel kõrgest tornist alla hüpata, siis vaevalt ta meid kuulda võtab. Toolilt mahahüppamist ei karda aga keegi. See igapäevase elu kogemus, et kõrgelt kukkudes saab haiget, sisaldab endas ühte olulist kehade langemise omadust: vabalt langevad kehad

liiguvad kogu aeg kiirenevalt. Kõrgelt alla hüpates võtab meil langemine nii palju aega, et maapinnale jõudmise momendiks on kiirus juba õige suureks kasvanud. Põrge vastu maad toimub suure hooga, mis põhjustabki põrutuse. Kõrguse kartmine on jälle üheks näiteks selle kohta, kuidas inimesed arvestavad oma kogemuste kaudu loodusseadusi, mida nad teadlikult üldse ei tarvitse tunda.

Juba Aristotelesele oli teada, et vabad kehad langevad üha kiirenevalt, kuid nii Aristoteles kui ka teised antiikaja filosoofid olid veendunud, et kerged kehad langevad rasketest aeglasemalt. Tõe selles küsimuses seadis jalule alles Galilei.

Kehade vaba langemise seaduste väljaselgitamiseks korraldas Galilei 1589. aastast alates rohkearvulisi katseid. Pisa linnas, kus Galilei sel ajal elas, on kuulus viltune kellatorn [97], mis oli just nagu loodud taoliste katsete jaoks. Galilei langetas sellest tornist igasuguse kaalu ning kujuga kehi, mõõtes nende langemisaega. Kehad olid seejuures valitud võimalikult kompaktsed, et niipalju kui võimalik vähendada õhu takistavat mõju. Katsete tulemus oli mõnevõrra üllatav: kõik kehad, sõltumatult nende massist, langevad ühe ja sama kiirendusega. Kui kaks mingisugust keha alustavad langemist korraga, siis nad ka lõpetavad selle korraga. Langemine on seejuures ühtlaselt kiirenev. Esimese sekundi jooksul läbib langev keha 4,9 meetrit, teise sekundi jooksul 14,7 meetrit, kolmanda sekundi jooksul 24,5 meetrit jne. Keha kiirus suureneb igas sekundis 9,8 m/sek võrra.

Kehade vaba langemise seadust demonstreeritakse füüsika tunnis tihti nii, et võetakse pikk kinnijoodetud otstega klaastoru, milles on haavel ja udusulg. Kui pöörata toru otsaga allapoole, alustavad sulg ja haavel langemist, kusjuures sulg jääb haavlist tugevasti maha. Edasi pumbatakse torust õhk välja, nii et seal tekib praktiliselt õhutühi ruum. Nüüd sulg oma langemisel enam haavlist

[97] Pisa kellatorni ehitamist alustati 1174. aastal. Et aluspõhi ei olnud küllalt kindel, vajus torn juba ehitamise ajal veidi viltu. Edasi see kallak pidevalt suurenes. On andmeid, et XIV sajandil oli selle 54,5 meetri kõrguse torni tipp 2,1 meetrit kõrvale vajunud. Käesoleval ajal on torni tipp kõrvale nihkunud juba 4,8 meetrit. Arvatakse, et see on viimane piir. Kalde edasisel suurenemisel torn puruneks. Selle vältimiseks on võetud tarvitusele mitmesuguseid kinnitusabinõusid.

maha ei jää. Sule mahajäämine oli varem tingitud ainult õhu takistavast mõjust. Õhutühjas ruumis keha langemise kiirus tema massist ei sõltu.

Et õhutühjas ruumis kõik kehad langevad ühteviisi, seda põhjendas Galilei ka väga huvitava loogilise arutlusega.

Oletame, et raske keha langeb kergest kehast kiiremini. Seome need kehad kokku. Kuidas peaks nüüd langema saadud liitkeha? Ühelt poolt on liitkeha veelgi raskem kui oli enne kokkusidumist kumbki keha eraldi. Järelikult peaks liitkeha langema kiiremini, kui seda tegi kumbki keha eraldi. Järelikult peaks liitkeha langema kiiremini, kui seda tegi raske keha. Teiselt poolt aga kerge keha, langedes aeglasemalt raskest kehast, peaks viimase külge seotuna takistama selle langemist. Seega peaks liitkeha langema aeglasemalt kui raske keha. Need mõlemad järeldused on loogiliselt õiged, kuid omavahel on nad vastuolus. Viga peab olema järelikult lähte-eelduses, mis rääkis raskema keha kiiremast langemisest. Tuleb lugeda õigeks, et kõik kehad langevad ühteviisi, sõltumatult nende massist.

2. ÜLEMAAILMNE GRAVITATSIOONISEADUS

Newtonist jutustatakse järgmist anekdooti. Istub see nimekas teadlane mõtteisse süvenenult oma aias õunapuu all. Äkki kukub puult õun tema jalgade ette. See igapäevane sündmus sai aluseks ühele suuremale avastusele loodusteaduste ajaloos. «Miks kukub õun maa poole, mitte aga kusagile mujale,» mõtles Newton. Mõte järgnes mõttele, arutlus arutlusele. Appi tulid matemaatilised valemid, ning 1687. aastaks oli avastatud ülemaailmne gravitatsiooniseadus: iga keha looduses tõmbab kõiki teisi kehi enda poole, kusjuures tõmbetung kahe keha vahel on seda suurem, mida suuremad on kehade massid ning mida väiksem on kaugus masside vahel.

Newtoni poolt avastatud seadus määrab nii täheparvede ja planeetide liikumise kui ka õuna kukkumise puu otsast. Selles mõttes nimetatakse seda seadust ü l e m a a i l m s e k s gravitatsiooniseaduseks.

Tung F kahe massi m ja M vahel avaldub gravitatsiooniseaduse kohaselt järgmiselt:

$$F = C\frac{mM}{r^2}, \qquad (10)$$

kus $C = 0{,}068$. Siinjuures massid m ja M on mõõdetud tonnides, massidevaheline kaugus r — sentimeetrites ning tung F — kilogrammides. Tung kahe massi vahel on võrdeline masside korrutisega ning pöördvõrdeline massidevahelise kauguse ruuduga.

Gravitatsiooniseaduse (10) järgi võib arvutada tõmbetungi kahe mistahes keha vahel. Nii näiteks kaks inimest, kes seisavad teineteisest kahe meetri kaugusel, tõmbuvad omavahel ühe sajamiljondiku grammi tugevuselt. Kaks 25 000-tonnist laeva teineteisest 100 meetri kaugusel tõmbuvad juba rohkem kui 400-grammise tungiga. Kõigile maapinnal asetsevatele kehadele mõjuv raskustung pole midagi muud kui tõmbetung, mida Maa avaldab neile kehadele. Maa ja tema pinnal asetseva kuupsentimeetrise rauatüki vahel on tõmbetung näiteks 7,8 grammi.

Kui tõmbetungid väikeste kehade vahel on väga väikesed, siis taevakehade korral saavad nad kujuteldamatult suurteks. Maa ja Päikese vahel valitsevat tõmbetungi võiks asendada 2 biljoni (s. o. $2 \cdot 10^{12}$) terastrossiga, igaüks läbimõõduga 5 meetrit. Alles niisugune terastrosside mets suudaks Maad ja Päikest sama tugevasti siduda, kui seda teeb gravitatsioonitung.

Mõned Newtoni biograafid väidavad, et eelkirjeldatud õunalugu ei olegi anekdoot, vaid on tõesti aset leidnud sündmus. On isegi välja uuritud, missugune see puu oli. Kuulus õunapuu püsis elusana 1814. aastani, kuid sellega ei lõppenud veel tema suguvõsa. Traditsioone austavad inglased vääristasid sellelt varem võetud pookokstega teise puu. 1940. aastal võeti viimaselt omakorda rida oksi, mis poogiti uute puude külge. Nii on tekkinud juba terve õunapuude suguselts, mille esiisa oskas õigel ajal Newtonile oma vilja jalge ette pillata. Kõigi nende puude üle peetakse hoolikat arvestust. Aga ka kuulsat gravitatsiooni-õunapuud ennast ei lastud jäägitult kaduda. Selle puu tükikesi hoitakse alal Inglise Kuninglikus Ühingus.

Eelkirjeldatu annab meile pildi küll inglaste traditsioonidearmastusest, kuid ülemaailmse gravitatsiooniseaduse avastamise ajaloolisest käigust räägib ta üsna vähe. Teaduses ei toimu midagi juhuslikult. Siin ei juhtu kunagi nii, et tuleb geenius ja ehitab hiiglasuure avastuste hoone

tühjale kohale. Teadust ehitatakse lugematute põlvkondade visa tööga; uus põlvkond algab sealt, kus lõpetas eelmine. Geeniused on need, kes suudavad võtta eelkäijate tööst kõik olulise ning arendada seda märgatavalt edasi.

Ka Newton ei avastanud gravitatsiooniseadust üksinda, vaid ta tugines oma eelkäijate uurimustele. Taani astronoom Tycho Brahe jättis järele rikkalikud vaatlusandmed planeetide näiva liikumise kohta taevavõlvil. Tuginedes nendele ning Koperniku õpetusele, avastas Kepler planeetide liikumise seadused. Need seadused (nn. Kepleri seadused) ütlevad muuhulgas ka seda, et planeedid liiguvad ümber Päikese ellipsikujulisi orbiite mööda. See oli üks uurimuste ahel. Teiselt poolt väitis Galilei, et Maa tõmbab kõiki tema lähedal olevaid kehi enda poole. Newton võttis nüüd Galilei seisukoha kehade tõmbest Maa poole ja üldistas seda, väites, et maailmas k õ i k kehad tõmbuvad üksteise poole. Seejuures ta rõhutas, et külgetõmme kahe keha vahel on vastastikune: kivi tõmbab Maad sama tugevasti kui Maa kivi. Et gravitatsiooniseadus just niisuguse kujuga peab olema nagu näitab valem (10), seda tõestas Newton Kepleri seadustele tuginedes (kuna planeetide liikumise ainukeseks põhjuseks on gravitatsioonitung, siis peab gravitatsiooniseadus olema niisugune, et temast järelduksid Kepleri seadused). Lõpuks avastas Newton küll gravitatsiooniseaduse (10), kuid tal ei õnnestunud määrata selles seaduses esineva konstandi C väärtust. Seda tegi alles 1798. aastal Cavendish. Olgu märgitud, et selle konstandi tundmine on oluline ainult taevakehade massi määramisel, mujal ei mängi see mingisugust rolli.

Gravitatsiooniseaduse avastamine oli etapiliseks sündmuseks astronoomia ja füüsika arengus. Planeedi keerukas liikumine taevavõlvil seletus nüüd ainult gravitatsioonitungiga Päikese ning teiste planeetide poole. Planeetide orbiitide arvutamine muutus põhimõtteliselt lihtsaks.

Suurimaks triumfiks Newtoni gravitatsiooniseadusele oli planeet Neptuuni avastamine.

Varsti pärast planeet Uraani avastamist 1783. aastal märgati selle liikumises korrapäratusi, mida polnud võimalik seletada ühegi tuntud planeedi mõjuga. Ainuke võimalus: veel kaugemal kui Uraan pidi liikuma ümber Päikese senitundmatu planeet. Oletades, et Uraani lii-

kumise häired on tingitud tundmatust planeedist, ning kasutades Newtoni gravitatsiooniseadust, arvutas Leverrier uue planeedi asukoha. 1846. aastal saatis ta oma arvutuste tulemused Berliini observatooriumile. Kohe esimesel õhtul, kui astronoom Galle oma pikksilma suunas taevavõlvil juhatatud kohta, leidis ta sealt otsitud planeedi. Uus planeet, mis «avastati sule otsaga», sai nimeks Neptuun.

Ülemaailmne gravitatsiooniseadus näitas, et kõik taevakehad peavad liikuma täpsete seaduspärasuste kohaselt. Taevakehade liikumises peab valitsema range korrapärasus. Astronoomia sai teistele teadustele eeskujuks oma ranguse ning täpsuse poolest. Peavalu tekitasid astronoomidele ainult meteoorid, mis näisid liikuvat täiesti korrapäratult. Ei saa olla võimalik, et kosmilised kehad nii korrapäratult liiguvad! Nii tekkis arvamus, et looduses meteoore olemas ei olegi, on ainult mingisugused illusioonid. Seda vaadet, mis muuseas oli Pariisi Teaduste Akadeemia ametlik seisukoht, ei kõigutanud isegi iidsest ajast peale leitud rohkearvulised meteoriidid. Alles pärast seda, kui 1803. aastal Prantsusmaale langes suur hulk meteoriite, oli Pariisi Akadeemia sunnitud oma seisukohta korrigeerima.

3. MIKS LANGEVAD KÕIK KEHAD ÜHTEVIISI?

Kõik kehad langevad õhutühjas ruumis ühteviisi. Aga küsime nüüd edasi: «M i k s langevad kõik kehad ühteviisi? Miks on vabalt langeva keha kiirendus sõltumatu keha massist?» Et vastata neile küsimustele, tuleb meil lähemalt järele mõelda sõna «mass» tähenduse üle.

Peatume kõigepealt Galilei mõttekäigu juures, millega ta püüdis tõestada, et kõik kehad langevad ühteviisi. Kas me ei jõuaks sama arutluse teel ka järeldusele, et elektriväljas liiguvad kõik laengud ühteviisi?

Olgu meil suur ja väike elektrilaeng, ning oletame, et antud elektriväljas liigub suur laeng väikesest kiiremini. Ühendame need laengud. Kuidas peaks nüüd liikuma saadud liitlaeng, kas suurest laengust kiiremini või aeglasemalt? Üks on kindel, et liitlaengu laeng on suurem kui oli suurel laengul, seega liitlaengule mõjub elektriväljа poolt suurem tung kui mõjus kummalegi laengule

eraldi. Keha kiirenduse määramiseks nendest andmetest veel ei piisa, vaid selleks on tarvis teada ka liitlaengu massi[98]. Andmete puudumise tõttu peame oma arutluse liitlaengu liikumisest katkestama.

Miks ei sattunud Galilei samasugustesse raskustesse, kui ta arutles raske ja kerge keha langemist? Mille poolest erineb siis massi liikumine gravitatsiooniväljas laengu liikumisest elektriväljas? Osutub, et mingisugust põhimõttelist erinevust siin ei ole.[99] Laengu liikumise määramiseks elektriväljas peame teadma laengu suurust ja massi: esimene neist määrab elektrivälja poolt laengule avaldatava tungi suuruse[100], kuna teine määrab keha kiirenduse antud tungi korral. Keha liikumise määramiseks gravitatsiooniväljas tuleb arvestada samuti kahte suurust: keha gravitatsioonilist laengut ja massi. Gravitatsiooniline laeng määrab gravitatsioonivälja poolt kehale avaldatava tungi suuruse[101], kuna mass määrab keha kiirenduse antud tungi korral. Et Galilei oma arutluses ainult ühe suurusega hakkama sai, tuli sellest, et ta luges gravitatsioonilise laengu massiga võrdseks.[102]

Harilikult füüsikud terminit «gravitatsiooniline laeng» ei kasuta, vaid ütlevad selle asemel «raske mass». Et vältida segiminekut selle massiga, mis antud tungi korral määrab keha kiirenduse, nimetatakse viimast «inertseks massiks». Nii näiteks mass, millest räägitakse erirelatiivsusteoorias, on inertne mass.

Iseloomustame rasket ja inertset massi veidi lähemalt.

---

[98] Newtoni teine seadus ütleb, et keha kiirendus on võrdeline temale mõjuva tungiga ja pöördvõrdeline keha massiga.

[99] Elektrilaengute vahel valitsevat mõju seletatakse teatavasti järgmiselt: iga elektrilaengut ümbritseb elektromagnetiline väli. Niipea, kui asetame sellesse välja teise elektrilaengu, mõjub väli temale teatud tungiga. Elektromagnetiline väli kannab üle mõju, mida laengud üksteisele avaldavad.

Täiesti analoogiliselt käsitletakse vastastikust mõju masside vahel. Iga massi ümbritseb väli, mida nimetatakse gravitatsiooniväljaks. Sellesse välja asetatud teisele massile mõjub väli samuti tungiga. Gravitatsiooniväli on seega kahe massi vahel valitseva mõju edasikandja.

[100] Tung, millega elektriväli potentsiaaliga ϕ mõjub elektrilaengule e, avaldub järgmiselt: $F = e\phi$.

[101] Tung, millega gravitatsiooniväli potentsiaaliga g mõjub gravitatsioonilisele laengule m_g avaldub järgmiselt: $F = m_g \cdot g$.

[102] Mõni lehekülg edasi näeme, et niisugune eeldus tõepoolest viib järeldusele kõikide kehade ühesugusest langemisest.

Mida me mõistame näiteks kilogrammise leivapätsi all? See on leib, mida Maa tõmbab enda poole ühekilogrammise tungiga (sama tugevasti tõmbab muidugi ka leivapäts Maad). Miks siis tõmbab Maa mõnda leiba kilose, teist aga näiteks kahekilose tungiga? Sellepärast, et kahekiloses pätsis on leiba rohkem kui ühekiloses, või nagu öeldakse: kahekilose leivapätsi mass on suurem (täpsemini öeldes kaks korda suurem) kui ühekilose pätsi mass.

Iga keha võime iseloomustada tema raskusega, viimane sõltub aga keha raskest massist. Raske mass on keha karakteristik, mis määrab tema raskuse, või veelgi täpsemini: raske mass määrab tõmbetungi suuruse, mida avaldavad vaadeldavale kehale teised kehad. Suurused *m* ja *M*, mis esinevad valemis (10), on seega rasked massid. Tuleb silmas pidada, et raske mass on kindel karakteristik, mis iseloomustab kehas peituva mateeria hulka. Keha raskus seevastu sõltub välistest tingimustest.

Igapäevases elus mõistame raskuse all keha tungi Maa poole, s. o. me mõõdame keha raskust Maa suhtes. Sama hästi võiksime rääkida ka keha raskusest Kuu, Päikese või mõne muu keha suhtes. Igapäevases elus niisugused asjad meid ei huvita, kuid põhimõtteliselt pakuvad nad suurt huvi. Kui inimesel õnnestub kunagi jõuda teistele planeetidele, siis on tal ilmekas võimalus selles veenduda, et keha raskus sõltub teisest massist, mille suhtes raskust mõõdetakse. Oletame, et Marsile sõitjad võtsid Maalt kaasa kilose leivapätsi. Kaaludes sama leiba Marsi pinnal, veenduvad nad, et see kaalub ainult 380 grammi. Leiva raske mass ei ole kosmilise reisi ajal muutunud, kuid leiva kaal on vähenenud peaaegu 3 korda. Selle põhjus on arusaadav: Marsi raske mass on Maa raskest massist väiksem, seega tõmbab ta leiba väiksema tungiga, kui seda teeb Maa.

Maast suurema massiga planeetidel kaaluks leib rohkem kui Maal. Näiteks ületab Jupiteri mass Maa massi. Seetõttu maapealsete inimeste arusaamise järgi kilone leivapäts kaalub Jupiteril 2,64 kilo.[103] Kõhtu täidab leib aga ühteviisi, ükskõik kas süüa teda Maa peal, Marsil või

[103] Valem (10) määrab kahe keha vahel valitseva gravitatsioonitungi sel juhul, kui kehade läbimõõdud on väikesed, võrreldes kaugusega kehade vahel. Seetõttu seda valemit ei saa kasutada näiteks keha kaalu määramiseks mingil planeedil, mille juures tuleb arvestada

Jupiteril. See näitab, et keha ei tule iseloomustada tema raskuse, vaid just raske massi abil. Meie mõõtühikute süsteem on nii valitud, et keha raskus (Maa suhtes) on arvuliselt võrdne raske massiga; ainult selle tõttu ei tarvitse me igapäevases elus raske massi ja raskuse vahel vahet teha.

Jaama saabub lühike kaubarong. Vedur pidurdab korraks, ning rong jääb kergelt seisma. Teisel päeval toob sama vedur raskekaalulist rongi. Nüüd saab vedur tükk aega pingutada ning pidurdada, enne kui rong seisma on jäänud. Miks peatus üks rong kiiresti, kuna teisel kulus selleks tükk aega? Harilikult vastatakse, et teine rong oli esimesest raskem — seepärast võttis tema seismajätmine rohkem aega. See vastus ei ole täpne. Mis on veduril tegemist rongi raskusega![104] Vedurijuhti huvitab ainult see, kui palju avaldab rong vastupanu kiiruse vähendamisele või üldse kiiruse muutmisele. Miks peaksime arvama, et see rong, mida Maa tõmbab tugevamini enda poole, paneb ka kiiruse muutmisele tõrksamalt vastu. Tõsi küll, igapäevase elu tähelepanekud näitavad, et see on nii, kuid võib-olla juhuslikult. Loogiliselt ei näe me mingisugust seost rongi raskuse ja selle vastupanu vahel, mida rong avaldab kiiruse muutmisele.

Niisiis, raskusega me seda põhjendada ei saa, et ühe ja sama tungi mõjul üks keha muudab oma kiirust hõlpsasti, kuna teisel kehal kulub selleks tükk aega. Tuleb otsida muud põhjust. Keha omadust vastu panna kiiruse muutmisele nimetatakse inertsiks. Eespool juba märkisime, et ladina keeles sõna «inertia» tähendab laiskust, loidust. Kui keha on loium, s. o. muudab oma kiirust aeglasemalt, siis öeldakse, et tal on suurem inerts. Nägime, et väikese massiga rongil on inerts väiksem kui suure massiga rongil. Jälle oleme tarvitanud sõna mass, kuid eelmisest erinevas tähenduses. Eespool iseloomustas mass keha tõmmet teiste kehade poole, siin aga keha inertsi. Et vältida segadust ühe ja sama sõna «mass» tarvitamisel kahes

---

ka planeedi tihedust. Nii näiteks on Jupiteri mass Maa massist 316,9 korda suurem, kuid oma pinnal olevale kehale avaldab Jupiter ainult 2,64 korda suuremat tungi kui seda teeb Maa.

[104] Raskema rongi hõõrdumine rööbastel on suurem kui kergel rongil ja seetõttu ka seda pidurdav tung on suurem kerget rongi pidurdavast tungist.

tähenduses, räägitaksegi «raskest massist» ja «inertsest massist». Raske mass on niisugune karakteristik, mis iseloomustab keha gravitatiivset tõmmet teiste kehade poole, inertne mass aga iseloomustab keha inertsi. Kui suurendada kaks korda keha rasket massi, suureneb kaks korda gravitatiivne külgetõmme, mida avaldavad temale teised kehad. Kui suurendada kaks korda keha inertset massi, siis väheneb kaks korda kiirendus, mille omandab keha antud tungi mõjul. Kui suurendada kaks korda keha inertset massi ja nõuda, et keha kiirendus jääks endiseks, tuleb kehale rakendada kaks korda suuremat tungi.

Mis juhtuks, kui kõigi kehade inertne mass oleks võrdne raske massiga? Vaatame näiteks rauatükki ja kivi, kusjuures rauatüki inertne mass olgu kivi inertsest massist kolm korda suurem. See tähendab, et neile kehadele võrdse kiirenduse andmiseks tuleb rauatükile rakendada kolm korda suuremat tungi kui kivile. Oletame nüüd, et inertne mass on alati võrdne raske massiga. See tähendab, et rauatüki raske mass on kolm korda suurem kivi raskest massist; rauatükile mõjub Maa külgetõmme kolm korda tugevamalt kui kivile. Kuid just kolm korda suuremat tungi oligi vaja võrdse kiirenduse saamiseks. Rauatükk ja kivi langevad maa poole võrdse kiirendusega. [105]

Eelnevast on näha, et inertse ja raske massi võrdsuse korral langevad kõik kehad Maa poole ühe ja sama kiirendusega. Teiselt poolt katse näitab, et kõikide kehade kiirendus vabal langemisel on ühesugune. Siit tuleb järeldada, et kõigil kehadel on inertne mass võrdne raske massiga.

Inertne mass ja raske mass on erinevad mõisted, milledel, loogiliselt võttes, pole teineteisega midagi tegemist. Kumbki neist iseloomustab keha teatud omadust. Kui katse näitab, et inertne ja raske mass on võrdsed, siis tähendab see, et tegelikult oleme kahe mõiste abil iseloomustanud keha ühte ja sedasama omadust. Kehal on olemas ainult üks mass. Et me talle varem kahte liiki massi omistasime, oli tingitud ainult puudulikust looduse tundmisest. Täie õigusega võime käesoleval ajal öelda, et keha raske mass on ekvivalentne inertse massiga. Vahe-

[105] Arutlus viib samale tulemusele, kui nõuda, et inertne mass on ainult võrdeline raske massiga; võrdsust pole tarviski.

kord raske massi ja inertse massi vahel on seega teatud mõttes analoogiline vahekorraga massi (täpsemini öeldes inertse massi) ja energia vahel.

Newton oli esimene, kes näitas, et Galilei avastatud vaba langemise seadused kehtivad tänu inertse ja raske massi võrdsusele. Kuna see võrdsus on katseliselt kindlaks tehtud tõsiasi, siis tuleb siin tingimata rääkida ka ebatäpsusest, mis iga mõõtmise juures paratamatult tekib. Newtoni hindamiste kohaselt ühekilogrammise raske massiga kehal võis inertne mass ülimalt ühe grammi võrra kilost erineda.

Saksa astronoom Bessel kasutas inertse ja raske massi vahekorra uurimiseks pendlit. On võimalik näidata, et juhul kui kehade inertne mass ei oleks võrdne raske massiga, sõltuks pendli väikeste võngete periood pendli raskusest. Mitmesuguste kehadega, muuhulgas ka elusolenditega teostatud täpsed mõõtmised näitasid, et niisugust sõltuvust olemas ei ole. Raske mass peab olema võrdne inertse massiga. Arvestades ka oma katsete täpsust, võis Bessel väita, et kilose keha inertne mass võib raskest massist erineda ülimalt 0,017 grammi võrra. 1894. aastal õnnestus ungari füüsikul R. Eötvösil eriliste kaalude abil võrrelda kehade inertset ja rasket massi õige suure täpsusega. Mõõtmistest järeldus, et kilose keha inertne mass võib raskest massist erineda ülimalt 0,005 mikrogrammi võrra (mikrogramm on miljondik grammi). Nii suur mõõtmistäpsus annab juba aluse väita, et inertne ja raske mass on tõepoolest võrdsed.

Eriti huvitavad olid hollandlase Zeemanni katsed 1918. aastal, mil ta uuris raske ja inertse massi vahekorda radioaktiivsetes uraani ühendites. Uraani tuumad on ebastabiilsed ja muutuvad aja jooksul plii ja heeliumi tuumadeks. Selles radioaktiivse lagunemise protsessis vabaneb energiat. Ligikaudne hindamine näitab, et ühe grammi [106] puhta uraani muundumisel pliiks ja heeliumiks vabaneb 0,0001 grammi energiat (eespool nägime, et energiat võib grammides mõõta). Seega võiks öelda, et üks gramm uraani sisaldab tegelikult 0,9999 grammi inertset massi ja 0,0001 grammi energiat. Zeemanni mõõtmised näitasid, et niisuguse uraanitüki raske mass on üks gramm. See tähendab, et 0,0001 grammile energiale

[106] Mõeldud on üks gramm inertset massi.

mõjub 0,0001 grammine Maa külgetõmme. See on tulemus, mida võiski oodata. Eespool nägime, et energia ja inertse massi eristamisel pole mõtet, sest nad kirjeldavad keha ühte ning sedasama karakteristikut. Seepärast ütleme lihtsalt, et uraanitüki inertne mass on üks gramm. Sama suur on ka tema raske mass. Ka radioaktiivsetel kehadel on inertne ja raske mass võrdsed. Inertse ja raske massi võrdsus on kõigi looduses olevate kehade ühine omadus.

Olgu lõpuks möödaminnes meelde tuletatud, et sünkrotroni nimetamine «raskendajaks», millest oli eespool juttu, tugineb just inertse ja raske massi võrdsusele. Sünkrotronis suureneb elektroni energia ja järelikult ka elektroni inertne mass; kuna aga inertne ja raske mass on alati võrdsed, siis järeldub siit, et sünkrotronis suureneb ka elektroni raske mass. Riist võiks õigusega raskendaja nime kanda, kuna ta muudab elektrone tõepoolest raskemaks. Kiirendajast väljuvaid elektrone tõmbab Maa enda poole mitusada korda suurema tungiga kui paigalseisvat elektroni.

4. LANGEVAS LIFTIS

Eve Curie jutustab ühest 1913. aasta suvel toimunud matkast, millest võtsid osa tema ema Marie Curie ja Albert Einstein:

«Irene ja Eve tabavad vahel lennult lauseid, mis näivad neile pisut imelikkudena. Hajameelne Einstein sammub neid nägemata piki lõhestikke, ronib järskudele kaljutippudele. Peatudes äkki ja haarates Marie käe, hüüab ta: «Te saate aru, madame, mul on tarvis teada, mis täpselt sünnib liftis olijatega, kui see langeb tühjusse...»»

On teadmata, kui palju sisaldab see seik tõtt, kui palju kirjaniku fantaasiat. Kuid igal juhul on õige, et Einstein juurdles neil aastatel probleemide kallal, millede lähtepunkti võib tõepoolest viia tagasi langeva lifti juurde. Mille poolest erineb siis vabalt langev lift paigalseisvast liftist?

Kujutleme hetkeks end kinnises liftis seisvat. Katkegu tross ning hakaku lift vabalt maa poole langema. Samal hetkel, kui lift hakkab langema, pillame käest raamatu. Kuna lift ja raamat langevad maa poole ühesuguse kii-

rendusega (vabal langemisel on kõigi kehade kiirendus üks ja seesama) ja nad alustasid langemist ühekorraga, siis lähenevad nad mõlemad maale ühe ja sama kiirusega. Raamatu asend lifti suhtes ei muutu, s. o. me näeme raamatut õhku rippuma jäävat. Järelikult puudub vabalt langevas liftis raskustung.

Fantastilistes romaanides räägitakse vahel ainest, mida gravitatsioonitung ei suuda läbistada. Asetatuna niisugusest ainest kasti, kaotavad kõik asjad oma raskuse. Tegelikult kaalu kaotavat ainet olemas ei ole. Raskustungi ei saa kõrvaldada ühestki materjalist ekraani ega seina abil. Ja ometi on olemas kast, milles raskustung puudub, see kast on vabalt langev lift (või üldse iga vabalt langev kast). Raskustungi ei ole küll võimalik ekraneerida, kuid seda saab liikumise abil lihtsalt kõrvaldada. Liikumise abil raskustungi kõrvaldamisest kirjutas juba Galilei. Tema «Dialoogide» kangelane Salviati räägib:

«Me tunneme raskust õlal siis, kui seisame vastu liikumisele, mida püüab see raskus, kuid kui me laskuksime allapoole sama kiirusega, millega liigub vabalt langev koorem, kuidas saaks siis raskus meile rõhuda? Kas te ei näe, et siin on samasugune olukord nagu siis, kui tahaksime odaga tabada kedagi, kes jookseb oda kiirusele võrdse või veelgi suurema kiirusega . . .»

See Galilei tähelepanek ühtib oma sisu poolest Einsteini kaalutlustega, mis said aluseks üldisele relatiivsusteooriale. Einstein ei piirdunud üksnes tõiga märkimisega, et vabalt langevas liftis raskustung puudub, vaid ta arendas seda mõtet edasi.

Kujutleme, et viibime kinnises ruumis ning näeme seal kõiki vabakslastud kehi liikuvat põranda poole ühesuguse kiirendusega 10 m/sek^2. Kuidas seda nähtust seletada? Ühed ütlevad, et ruum, milles me viibime, on inertsiaalruum (s. o. ta liigub inertsiaalsüsteemide suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt) ning asetseb gravitatsioonivälja, mis annab kõigile kehadele ühesuguse kiirenduse 10 m/sek^2. Teised ei ole sellega nõus, vaid ütlevad, et mingisugust gravitatsioonivälja olemas ei ole, kuid ruum ise liigub inertsiaalsüsteemide suhtes kiirendusega 10 m/sek^2 lae poole. Kehade langemine põranda poole on ainult ruumi liikumise vastupeegeldus.

Kuidas mõlemad pooled ka ei püüaks oma arvamust

läbi suruda, see ei õnnestuks. Vaidlejate argumendid on võrdse kaaluga. Kinnises ruumis viibijal ei ole üldse võimalik kindlaks teha, kas ruum asub gravitatsiooniväljas või liigub kiirendusega inertsiaalsüsteemide suhtes. Oluline on seejuures, et ruum oleks küllalt väike, nii et kõigis tema punktides oleks gravitatsiooniväli ühe ja sama tugevusega. Samuti tuleb vaatlusi nii lühikese aja jooksul teostada, et raskustung ruumis ei saaks oluliselt muutuda.

Eelöeldu võime lühidalt kokku võtta järgmiseks printsiibiks, mis kannab ekvivalentsuse printsiibi nime.

Küllalt väikeses ruumiosas ja küllalt lühikese ajavahemiku jooksul gravitatsiooniväljas kulgeva protsessi kirjeldamine inertsiaalsüsteemi taustal annab täpselt samasuguse pildi kui protsessi kirjeldamine inertsiaalsüsteemide suhtes sobivalt valitud kiirendusega liikuvas taustsüsteemis. Ekvivalentsuse printsiip ütleb sisuliselt, et sobiva taustsüsteemi valikuga saame gravitatsioonivälja antud ruumipunktis suvakohaselt muuta.

Olgu näiteks ühes inertsiaalsüsteemis gravitatsiooniväli niisugune, et ta annab kõigile kehadele kiirenduse 12 m/sek^2. Kehade liikumist selle välja mõjul nimetame langemiseks allapoole. Teistes taustsüsteemides on gravitatsiooniväli teistsugune. Näiteks süsteemis, mis liigub inertsiaalsüsteemide suhtes kiirendusega 12 m/sek^2 allapoole, gravitatsiooniväli puudub. Süsteemis, mis liigub inertsiaalsüsteemide suhtes kiirendusega 8 m/sek^2 allapoole, on gravitatsiooniväli kolm korda nõrgem kui inertsiaalsüsteemides, sest ta annab kehadele kiirenduse ainult 4 m/sek^2. Lugejal ei ole raske ise juurde mõelda süsteeme, kus gravitatsiooniväli oleks soovitava suurusega. Kiirendatud liikumine inertsiaalsüsteemide suhtes võimaldab raskustungi [107] suurust muuta või koguni kaotada. Kiirendatud liikumine inertsiaalsüsteemide suhtes võimaldab raskustungi ka kunstlikult tekitada. Viimasel asjaolul on igapäevases elus suur praktiline tähtsus.

---

[107] Kuna me läheme üle igapäevase elu küsimuste juurde, siis räägime gravitatsioonitungi asemel raskustungist.

Kunstliku raskustungi tekkimine kiirendatud liikumisel ei tohiks lugejale uudiseks olla; seda võib ta märgata igal sammul.

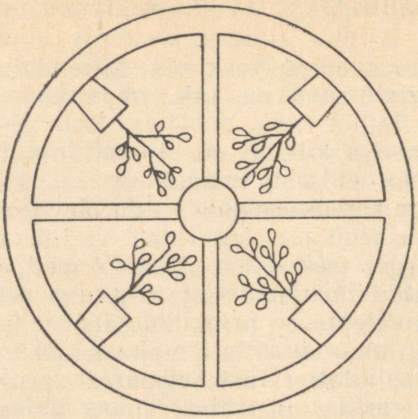
Suure kiirusega kihutav mootorrattur võtab kurvi ja keegi ei imesta, et tema sõiduk on sel ajal tugevasti kaldu. Proovige korraks püsida kaldu oleval mootorrattal! See ei õnnestu senikaua, kui ratas on liikumatu. See ei õnnestu ka sirgel teel sõites. Ainult kurvil, kus mootorratta kiirendatud [108] liikumisest tingituna tekib lisatung (mida me ekvivalentsuse printsiibi järgi võime nimetada raskustungiks), muutub rattale mõjuva raskustungi suund. Mootorrattur kallutab ratast seejuures vaistlikult nii, et kõrvalt mõjuv raskustung ratast ümber paisata ei saaks.

Kunstlikku raskustungi kasutatakse väga paljudes masinates. Üheks lihtsamaks neist on koorelahutaja. Igaüks teab, et täispiimale tõuseb mõne aja möödumisel koor peale. Koore molekulid on piima moodustavate ainete molekulidest kõige kergemad. Maa tõmbab neid nõrgemini ligi kui teisi ja nii juhtubki, et mõne aja pärast on kõik koore molekulid piima ülemistesse kihtidesse jäänud. Koor on piimale peale tõusnud ning perenaine võib selle ära korjata. Piimatööstuses niisugune aeglane moodus ei kõlba. Siin on tarvis lühikese ajaga suur hulk piima läbi töötada. Koore molekulide eraldumise kiirendamiseks pole muud vaja, kui suurendada piimale mõjuvat raskustungi. Seda tehakse nii, et piim pannakse erilises trumlis kiiresti pöörlema. Piimale mõjub seejuures üsna suur kunstlik raskustung, mis on suunatud trumli seinte poole. Selle tungi mõjul koor tõuseb kiiresti «peale», s. o. koor liigub trumli tsentri poole, kus ta kõrvale juhitakse.

Niisuguse pöörleva liikumisega tekitatud raskustungiga võib «petta» ka loomi ja taimi. Rohkem kui sada aastat tagasi tegi inglise botaanik Knight järgmise katse. Kiiresti pöörleva ratta külge kinnitati mullaga täidetud potid, kuhu külvati ube. Mõne aja pärast ilmusid idulehed ja juured ning taimed hakkasid hoogsalt kasvama, aga kuidas kasvama! Noorte ubade varred olid suunatud

---

[108] Tuletame meelde, et kiirenduseta on ainult niisugune liikumine, kus kiirus ei muutu suuruse ega suuna poolest. Kui muutub liikumise suund, on tegemist juba kiirendatud liikumisega.



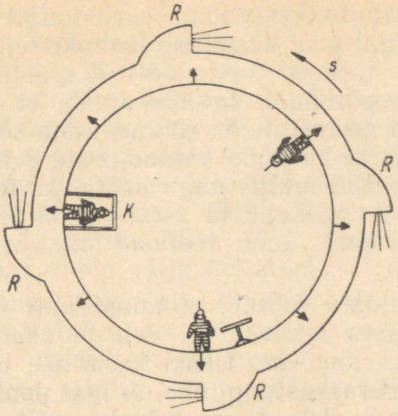
Joon. 48. Pöörleval rattal kasvanud taimed.

ratta tsentri poole, juured aga väljapoole (joon. 48). Süvenemine küsimusse näitab, et just nii see peabki olema. Taim kasvab alati ülespoole, s. o. raskustungi mõjumisele vastassuunas. Ratta pöörlemisest tingitud raskustung suundub tsentrist väljapoole, taim kasvab järelikult tsentri poole.

Kunstlikku raskustungi ei oska loomulikust eristada ka mesilased. Vaatlused näitavad, et mesilased ehitavad oma kärjed alati püstloodis ülevalt alla. Kui mesilased pandi elama pöörlevale rattale [109], muutus kärgede suund. Mesilased orienteerusid kärgede ehitamisel nüüd kunstliku raskustungi järgi (kui loomulik raskustung on kunstlikust palju väiksem, siis mesilased jätavad esimese üldse tähele panemata).

Üks tülikatest asjadest, mida tuleb arvestada tuleviku kosmilistel lenduritel, on raskustungi kadumine. Niipea, kui rakettlennuk on jõudnud Maast küllalt kaugele, lülitatakse mootorid välja. Rakett liigub algul inertsi mõjul, edasi aga hakkab üha enam mõju avaldama planeedisihtjaama külgetõmme. Kosmiline lennuk langeb vabalt eesmärgiks oleva planeedi poole. Vaba langemise ajal

[109] Harilikult kasutatakse taolisteks katseteks ratta asemel erilist seadeldist, nn. klinostaati.



Joon. 49. Üks võimalustest, kuidas kosmilises lennukis luua kunstlikku gravitatsioonivälja. Joonisel on esitatud kosmilise lennuki ristlõige. Tähega *R* on tähistatud pöörlemist tekitavaid rakette, kuna nool *s* näitab pöörlemise suunda. Väikesed noolekesed näitavad kunstliku raskustungi mõjumise suunda.

kõigil kehadel kaal puudub. Kuidas mõjub kaalutu olek inimese organismile? Teadlaste arvamused on siin mitmesugused. Ühed arvavad, et kaalu kadumisel võib inimene elada ainult mõne minuti. Teised seevastu väidavad, et kaalutu olekuga võib väga hästi ära harjuda. Kuid lõppude lõpuks see probleem ei olegi nii väga oluline. Raskustungi võib kosmilisel lennukil tekitada ka väikeste lisarakettide abil, mis panevad lennuki oma telje ümber pöörlema (joon. 49).[110] Valides sobiva pöörlemise kiiruse, saame luua raketi sees sama tugeva gravitatsioonivälja kui Maa peal. Näiteks peaks kümnemeetrise läbimõõduga rakettlennuk selleks tegema ühe täispöörde 4,5 sekundi jooksul.

---

[110] Olgu märgitud, et kosmilisi lennukeid projekteeritakse (muidugi fantastilistes projektides) ka ühendatud raketipaaridena, mis ühise keskpunkti ümber pöörlevad. Igal juhul on pöörlemise eesmärgiks kunstliku raskustungi tekitamine raketi sees.

Eelkirjeldatud viisil loodud raskustungil on omapäraks, et ta mõjub igal pool kosmilise lennuki seina suunas. See tähendab, et inimesed tunnevad end igal pool raketi seinal nii nagu põrandal. Igaüks arvab, et just see seina osa, millele tema toetub, on rõhtne, kuna sõbrad kõnnivad kõik nagu kärbsed mööda kalduolevaid seinu. Sammudes edasi jääb reisijal mulje, nagu sammuks ta mööda elastset palli: iga koht, kuhu ta astub, võtab otsekohe rõhtsa asendi, kuna koht, kuhu toetusid jalad varem, muutub kallakuks.

Kõik kirjeldatu näitab, et kunstlikult loodud raskustungi kosmilises lennukis ei saa pidada teiste kehade gravitatiivseks tõmbeks. Ükski kosmilise lennuki reisijatest ei arva, et raskustung, mis on igal pool lennuki seina poole suunatud, oleks teiste kehade poolt tekitatud. Igaüks seletab seda lennuki pöörlemisega. Kas see ei räägi vastu ekvivalentsuse printsiibile? Ei räägi. Universumi rändurid eraldavad kunstlikku raskustungi loomulikust ainult seetõttu, et nad vaatlevad korraga küllalt suurt ruumiosa — tervet raketi sisemust. Kui üks meestest sulgeks enda väikesesse kinnisesse kasti K, kust ta oma seltsimehi ei näe, siis oleks tal võimatu öelda, kas kastis olev gravitatsiooniväli on loomulik või kunstlik, sest raskustung mõjub kogu ruumis põranda poole. Kui kinnine kast kosmilises lennukis on veel liiga suur, nii et gravitatsiooniväli pole kõigis punktides ühetugevune, siis vähendame kasti 100, 1000 või veelgi rohkem kordi. Kui kamber on juba küllalt väike, on ka gravitatsiooniväli kogu selle ulatuses üks ja seesama. Kambris asuv kujuteldav reisija ei saa enam öelda, millise päritoluga on temale mõjuv raskustung. Kinnises küllalt väikeses ruumipiirkonnas pole võimalik loomuliku ja kunstliku raskustungi vahel vahet teha — just seda ütlebki ekvivalentsuse printsiip. Et vahetegemine suures ruumipiirkonnas võimalik on, selle vastu ei räägi ekvivalentsuse printsiip.

6. ÜLDINE RELATIIVSUSPRINTSIIP

Üldise relatiivsusteooria loomine on inimvaimu kõigi aegade kõige suuremaks saavutuseks. Kui erirelatiivsusteooria järele tekkis tungiv vajadus — uued eksperimentaalsed faktid ei mahtunud enam vana füüsika süsteemi —,

siis üldise relatiivsusteooria loomist ei nõudnud ükski katse. Vajadust selle teooria järele ei tundnud ka füüsikud. Ainult Albert Einstein üksinda nägi kõrvaldamist vajavaid lünki erirelatiivsusteooria ehituses. Erirelatiivsusteooria avaldamisele järgnevad aastad kuluvadki tal veelgi üldisema teooria loomiseks. Esimene töö, milles on uue teooria algeid, kannab nimetust «Raskustungi mõju valguse levimisele» ja ilmub 1911. aastal. Selles töös on veel ekslikke seisukohti. Alles 1916. aastaks on üldise relatiivsusteooria alged välja töötatud.

Mis kaalutlustel võttis siis Einstein ette erirelatiivsusteooria üldistamise? Eespool juba märkisime, et ükski loodusnähtus seda otseselt ei nõudnud.

Kujutleme end asuvat maailmaruumis vabalt liikuvas kastis. Kastile mõjuvad ainult taevakehade külgetõmbed, mis summeerudes mõjuvad kindla suunaga raskustungina. Meie kast liigub vabalt selle raskustungi mõjul. Eespool nägime, et raskustungi mõjul vabalt liikuvas kastis raskustung puudub (tuletame meelde lifti näidet). Meile võib seetõttu jääda mulje, et kastile üldse raskustung ei mõju, vaid kast liigub maailmaruumis ühtlaselt ja sirgjooneliselt [111], s. o. kast on inertsiaalkeha. Ka aknast välja vaatamine ei aita siin midagi. Taevakehad mööduvad meist küll ebaühtlase kiirusega ning kõverjooneliselt liikudes, kuid see ei tarvitse olla kasti liikumise vastupeegeldus. Pole sugugi võimatu, et taevakehad inertsiaalkehade suhtes just niisugusel viisil liikuma peavadki.

Oletame nüüd, et maailmaruumis on veel teine niisugune rändav kast. Ka teise kasti reisijad arvavad, et just nemad liiguvad ühtlaselt ja sirgjooneliselt, kuna meie näeme neid ilmselt ebaühtlaselt liikuvat. Kellel on õigus, kas neil või meil — see on küsimus, millele on võimatu vastata. Oma seisukohalt on õigus mõlemal. Kõik meie mõõtmised annavad alust väita, et just m e i e kast liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt inertsiaalsüsteemide suhtes, võõras kast aga mitte. Võõra kasti reisijad on täpselt vastupidisel arvamusel. Siit järeldub paratamatult, et mõistel «ühtlane ja sirgjooneline liikumine» on ainult relatiivne sisu. Inertsiseadus oma vanal kujul kaotab mõtte.

Mille järgi võiks vaatleja otsustada, et ta ei liigu üht-

[111] Mõeldud on muidugi liikumist inertsiaalsüsteemide suhtes.

laselt ja sirgjooneliselt? Võib-olla selle järgi, et niisugusel liikumisel tekib lisatung, nn. kunstlik raskustung. Aga kust võib vaatleja teada, et tegemist on liikumisest tingitud kunstliku raskustungiga? Võib olla mõjub temale teiste kehade gravitatsiooniline külgetõmme. Toome veel teise näite.

Kas Päike tegelikult tõmbab Maad enda poole, või on see tõmbetung ainult inertsiseaduse päästmiseks välja mõeldud? Me väidame, et vaba keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Kuna Maa seda ei tee, siis peab talle mõjuma Päikese külgetõmme. On ilmne niisuguse seletuse kunstlikkus, sest nii vaba keha kui ka ühtlase ja sirgjoonelise liikumise mõiste tuginevad nõrgale alusele. Loomulikum oleks kehade liikumise õpetus üles ehitada ilma nendeta.

Loobumegi ühtlase ning sirgjoonelise liikumise eelistamisest ja räägime selle asemel kehade loomulikust liikumisest, mis toimub nii, et kehaga kaasaliikuv vaatleja ei avasta teiste kehade gravitatsioonilist tõmbetungi. Teiste sõnadega: keha liigub loomulikult, kui tema lähemas ümbruses teiste kehade poolt loodud gravitatsiooniväli puudub; olemas on ainult keha enda gravitatsiooniväli.[112] Inertsiseadus tuleb nüüd asendada teise seadusega: keha liigub loomulikult senikaua, kuni kokkupuutumine teiste kehadega seda loomulikku liikumist ei takista.

Niisugune inertsiseadus on mõistusele palju enam vastuvõetav kui ühtlasele ja sirgjoonelisele liikumisele tuginev seadus. Ühtlast ja sirgjoonelist liikumist pole keegi kusagil näinud, loomulik liikumine on aga igapäevane nähtus. Loomulikult liiguvad taevakehad, loomulikult liiguvad ka vabalt langevad kehad (kui õhutakistus välja arvata).

Loomulik liikumine, mis üldises relatiivsusteoorias asendab inertsiaalset liikumist, ei ole ühtlane ja sirgjooneline. Siit järgneb, et inertsiaalsüsteemide eelistamisel puudub igasugune alus. Kõik taustsüsteemid, ükskõik kuidas nad ka ei liiguks, peavad olema samaväärsed. Veendume eelöeldus loogilise arutelu abil.

Kujutleme, et kogu maailmas on olemas ainult üks

[112] Nii näiteks liigub loomulikult vabalt langev lift, sest temas gravitatsiooniväli puudub. Täpsemini tuleks öelda, et liftis on ainult gravitatsiooniväli, mille tekitab lifti seina moodustav mass, kuid see väli on ülinõrk.

keha, mille valime taustkehaks seal toimuvate protsesside kirjeldamisel. Erirelatiivsusteooria vaatekohalt on meil oluline teada, kas see keha on inertsiaalkeha või mitte. Inertsiaalkeha peab liikuma inertsiaalsüsteemide suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, ilma seejuures pöörlemata. Kuid kas me saame rääkida üheainsa keha pöörlemisest või mitteühtlasest liikumisest? Tegelikult üheainsa keha korral pole mõtet pöörlemist mittepöörlemisest eristada, samuti pole mõtet kõikvõimalike liikumiste hulgast ühtlast ja sirgjoonelist liikumist eraldi esile tõsta. Kui maailmas oleks ainult üks keha, oleksid selle keha kõikvõimalikud liikumised samaväärsed.

Kui maailmas on ühest rohkem kehi (nii nagu see tegelikult ongi), siis saame küll rääkida näiteks ühe keha pöörlemisest teise suhtes, kuid missugune keha just pöörleb, missugune mitte, selle üle me jälle otsustada ei saa. Kriteeriumiks ei saa siin kuidagi kasutada pöörlemisel tekkivat lisatungi, sest kui me vaatame teda küllalt väikeses ruumipiirkonnas küllalt väikese ajavahemiku jooksul, siis ekvivalentsuse printsiibi kohaselt võib see väga hästi olla tingitud mitte pöörlemisest, vaid eemalolevate masside külgetõmbest. Kuidas me ka ei vaataks, inertsiaalse liikumise ning inertsiaalsüsteemide eelistamiseks pole mingisugust alust.[113] Eespool toodud arutlused viivad kõik ühele ja samale tulemusele: kõik taustsüsteemid peavad olema looduses toimuvate protsesside kirjeldamisel ühteviisi sobivad. Üldine relatiivsusprintsiip nõuab: kõik loodusseadused tuleb sõnastada nii, et nad oleksid kõikvõimalikes taustsüsteemides ühteviisi kehtivad. Teisiti öeldes tuleb loodusseadused sõnastada nii, et iga vaatleja, ükskõik kuidas ta ka ei liiguks, leiaks selle seaduse oma vaatlustega kooskõlas olevat. Kui erirelatiivsusteooria põhiprintsiip rääkis ainult taustsüsteemide ühtlasest ja sirgjoonelisest liikumisest, siis üldine relatiivsusprintsiip

[113] Teoreetiline füüsika kirjeldab loodusnähtusi alati esmalt väikeses ruumiosas ja lühikese ajavahemiku jooksul. Jätkates üksteise otsa lühikesi ajavahemikke ning väikesi ruumiosi, saab eelmisest kirjeldusest tuletada protsessi kirjelduse suures ruumipiirkonnas pika aja kohta. Esimene kirjeldus määrab juba teise. Niisugusel juhul, nagu näha, ei ole ekvivalentsuse printsiibi piiratud kehtivus (et see on õige ainult väikestes ruumipiirkondades lühikese aja jooksul) meie arutelus mingisuguseks kitsenduseks.

lubab ükskõik missugust liikumist. Selles seisnebki üldistuse mõte, mida annab üldine relatiivsusteooria eriteooriaga võrreldes.

Üldine relatiivsusteooria loeb kõiki liikumisi samaväärseiks, seetõttu võib seda teooriat nimetada ka liikumise relatiivsuse teooriaks kõige üldisemas mõttes või teisiti veel kiirenduse relatiivsuse teooriaks (kõik liikumised on samaväärsed, ükskõik missugune on nende kiirendus). Erirelatiivsusteooria oli ainult kiiruse relatiivsuse teooria — kiirendusi loeti seal absoluutseteks. Tuleb aga rõhutada olulist erinevust nende teooriate vahel. Kiirus oli erirelatiivsusteoorias relatiivne seetõttu, et meil polnud võimalik avastada liikumise absoluutset kiirust. Kiirendusest tingitud efekte, nagu lisatungi ilmumine, me võime avastada, kuid me ei tea, kas on tegemist kiirendusest tingitud tungiga või teiste kehade külgetõmbetungiga (muidugi sel juhul, kui vaatlusi teostame väikeses ruumipiirkonnas lühikese aja jooksul). Kiirendus on relatiivne ainult gravitatsiooninähtuste taustal. Seetõttu on üldine relatiivsusteooria loodusnähtuste teooria, mis arvestab kehade gravitatsioonilist tõmmet üksteise poole, kuna erirelatiivsusteooria jätab selle tähele panemata. Siit ilmneb, et üldine relatiivsusteooria ei ole erirelatiivsusteooriaga vastuolus, vaid ainult täiendab viimast. Protsesse, kus raskustung märgatavat mõju ei avalda, tuleb uurida erirelatiivsusteooria abil. Raskustungi mõju arvestamine viib aga alati üldisele relatiivsusteooriale.

Üldise relatiivsusteooria sisu kohta ei ole uurijad veel üksmeelsele otsusele jõudnud. Osa nõukogude füüsikuid eesotsas akadeemik V. A. Fockiga arvab, et üldine relatiivsusteooria on ainult gravitatsiooninähtuste teooria, kuna kiirenduse relatiivsusega pole siin midagi tegemist. Rajatagused teadlased ning osa nõukogude uurijatest aga väidavad, et akadeemik Focki seisukoht on liiga kitsas. Kaalukaid argumente on mõlemal poolel ning vaidlusele tõenäoliselt niipea lõppu ei tule. Igal juhul on kindel, et seni on üldises relatiivsusteoorias olulisi tulemusi saadud ainult raskustungist tingitud nähtuste seletamisel. See ei tarvitse aga sugugi tähendada, ning tõenäoliselt ei tähendagi, et üldise relatiivsusteooria sisu ainult raskusnähtustega piirdub. Üldise relatiivsusteooria arendamisel on uurijail veel palju ära teha.

Kui erirelatiivsusteoorias kasutatav matemaatika on võrdlemisi lihtne — sellest saavad aru juba keskkoolide vanemate klasside õpilased —, siis üldises relatiivsusteoorias on lugu sootuks teine. Matemaatika, mida siin kasutatakse, on üks kõige komplitseeritumatest. Einstein kirjutas: «Mida lihtsamaks ja põhilisemaks muutuvad meie oletused, seda keerulisemaks läheb meie arutluste matemaatika; tee teoorialt vaatlusele muutub pikemaks, kitsamaks ning keerulisemaks. See kõlab küll paradoksaalsena, kuid me võime öelda: kaasaegne füüsika on lihtsam kui vana füüsika, ja seetõttu ta näib olevat raskem ja segasem.»

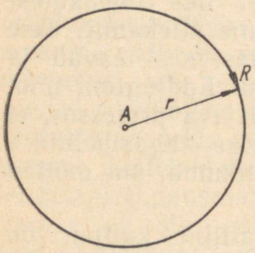
Poola füüsik Leopold Infeld jutustab Esimese maailmasõja ajal Cambridge'is toimunud üldisele relatiivsusteooriale pühendatud ettekandest, millega esines sir Arthur Eddington: «Pärast ettekannet üks füüsikutest ütles sir Arthurile: «See oli suurepärane ettekanne. Teie olete üks neist kolmest selles maailmas, kes teavad ja tunnevad üldist relatiivsusteooriat.» Kui Eddingtoni näol avaldus kahtlus, märkis too füüsik: «Härra professor, ei ole tarvis hämmelduda, teie olete liiga tagasihoidlik.» Sir Arthur vastas: «Ma ei ole hämmeldunud, ma mõtlen ainult, kes võiks olla see kolmas.»»

Tänapäeval, kus füüsikute matemaatiline kultuur on Esimese maailmasõja aegsest tunduvalt kõrgem, ei paku üldisest relatiivsusteooriast arusaamine kuigi suuri raskusi. Käesolevas raamatus ei saa me selle teooria matemaatilist külge siiski esitada. Siin tuleb meil piirduda ainult teooria tulemuste kirjeldamisega, kuna matemaatilistele valemitele tuginev loogiline põhjendus peab kõrvale jääma.

7. KÕVER MAAILM

Pöördume nüüd jälle küsimuse juurde maailmaruumi geomeetriast. Kas maailmaruumis konstrueeritud geomeetriliste kujundite arvutamisel saame kasutada Eukleidese geomeetria lauseid, või tuleb siin arvestada Lobatševski või Riemanni geomeetriat? Eukleidese geomeetria on meile koolikursusest hästi tuntud. Siin kehtivad näiteks laused, et kolmnurga sisenurkade summa on 180 kraadi, või et ringjoone ümbermõõt on $2\pi r$, kus

r on ringjoone raadius. Riemanni ja Lobatševski geomeetrias niisuguseid lauseid ei ole. Seega põhimõtteliselt on maailma geomeetria üle otsustamine lihtne. Selleks tuleb ainult mõõta kosmilises ruumis konstrueeritud geomeetrilisi kujundeid, ning teha kindlaks, kas mõõtmistulemused vastavad Eukleidese geomeetriale või mitte. Kui näiteks konstrueerida hiiglasuur kosmiline ringjoon raadiusega R ja mõõta selle pikkust, võime otsekohe teha järeldusi ruumi geomeetriliste omaduste kohta. Kui ringjoone pikkus on $2\pi R$, siis kehtib maailmaruumis ilmselt Eukleidese geomeetria. Kui aga ringjoone pikkus tuleb sellest arvust suurem või väiksem, tuleb järeldada, et maailmaruumi geomeetria erineb Eukleidese geomeetriast. Peatumegi lähemalt ringjoone pikkuse mõõtmise probleemi juures.



Joon. 50.

Joonisel 50 on kujutatud ringjoon raadiusega r. Oletame, et see ringjoon liigub inertsiaalsüsteemide suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, s. t. leidub niisugune inertsiaalsüsteem, milles ringjoon on täiesti liikumatu. Ringi keskpunktis A asetsegu kaks vaatlejat: üks neist olgu ringjoone suhtes liikumatu, teine aga pöörelgu nurkkiirusega ω. Kui me küsitleme esimest vaatlejat, vastab ta kõhklemata, et ringjoone raadius on r ning pikkus $2\pi r$. Kuidas aga hindab ringjoone pikkust pöörlev vaatleja? Tema arvates liiguvad kõik ringjoone osad kiirusega $v = \omega r$. Kuna iga väikene ringjoone lõik pikkusega l liigub ots ees kiirusega ωr, siis valemi (4) põhjal selle lõigu pikkus pöörleva vaatleja poolt mõõdetuna tuleb

$$l\sqrt{1-\frac{\omega^2 r^2}{c^2}}.$$

Iga väikene ringjoone osakene on lühenenud

$$\sqrt{1-\frac{\omega^2 r^2}{c^2}}$$

korda, niisama palju kordi peab siis olema lühenenud ka kogu ringjoon. Pöörleva vaatleja mõõtmine näitab seega, et ringjoone pikkus on:

$$s = 2\pi r \sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{c^2}}.$$

Samal ajal ringjoone raadius kui liikumise ristsihis olev lõik on ka pöörleva vaatleja arvates pikkusega r.

Saadud valemit, mis võimaldab ringjoone raadiuse r järgi arvutada ringjoone pikkuse s, ei tunne eukleidiline geomeetria. Pöörleva vaatleja arvates ei kehti ruumis eukleidiline geomeetria, või nagu öeldakse: ruum ei ole eukleidiline.

Esitatud arutlus on ligikaudne, kuid sellele vaatamata viitab ta väga olulisele tõsiasjale: mitteinertsiaalsetes taustsüsteemides ei kehti Eukleidese geomeetria. Teiselt poolt eelmistes punktides nägime, et taustsüsteemi mitteinertsiaalsus avaldub tungina, mida me väikeses ruumipiirkonnas ning lühikese ajavahemiku jooksul raskustungist eraldada ei saa. Selle asemel, et rääkida mitteinertsiaalsest taustsüsteemist, võime rääkida inertsiaalsüsteemist, milles mõjub raskustung. Siit järeldub, et ka gravitatsioonivälja olemasolu ruumis tingib ruumi mitteeukleidilisuse. Mida tugevam on gravitatsiooniväli vaadeldavas ruumipiirkonnas, seda enam erineb selle piirkonna geomeetria Eukleidese geomeetriast.

Maailmaruumis on olemas gravitatsiooniväli, järelikult see ei ole eukleidiline ruum. Eukleidilisest geomeetriast erineva geomeetriaga ruume nimetatakse kõverateks ruumideks. Tegelik maailmaruum on kõver ruum — kuidas me peame sellest väljendusest aru saama?

Vaatame lähemalt ühte fantastilist näidet. Igaüks on käinud kinos ning näinud ekraanil liikuvaid inimesi. Need on kahemõõtmelised inimesed, sest nende suurus on määratud ainult pikkuse ja laiusega; kolmas mõõde, nagu tegelikel inimestel, puudub neil. Laskume korraks fantaasiavalda ning oletame, et need kahemõõtmelised inimesed, kes ekraanil liiguvad, on tegelikult olemas: nad kõnnivad ekraanil, mõtlevad ning uurivad kõike ümbritsevat. Ruum, milles need inimesed liiguvad, on kahemõõtmeline ekraan, sellest väljaspool ei ole neil mingisuguseid võimalusi vaatlusi teostada. Kahemõõtmelised ekraani-inimesed ei suuda ette kujutada kolmemõõtmelist ruumi, nii nagu meie ei suuda seda teha neljamõõtmelisega. Niisugused inimesed teavad küll, mis on kõverad jooned — niisuguseid on ekraanil olemas —, kuid kõveraid

pindu nad ette kujutada ei suuda. Teostades mitmesuguste geomeetriliste kujundite mõõtmisi, veenduvad need ekraani-inimesed, et maailmas kehtivad täpselt niisugused geomeetria seadused, nagu õpetab planimeetria. Teiste sõnadega on nende ruum kahemõõtmeline eukleidiline ruum.

Olgu ekraan valmistatud elastsest materjalist, nii et me võime teda siit ja sealt välja venitada. Tasase ekraani saame muuta niiviisi kõveraks pinnaks. Ekraani «asustajad» niisuguse deformatsiooni teostumist otseselt ei märka, kuid mitmesugused mõõtmised näitaksid, et nende ekraanil kehtiva geomeetria seadused ei ole enam hariliku planimeetria lausedi. Nii näiteks tuleks kolmnurga sisenurkade summa suurem kui 180 kraadi [114]. Kahemõõtmelised inimesed võivad õigusega väita, et nende maailm ei ole enam eukleidiline, sest seal asuvatel kehadel on teised omadused kui Eukleidese geomeetria kujundeil.

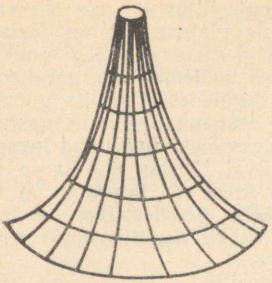
Kui ekraan, millel liiguvad viirastuslikud inimesed, oleks väga suur, siis võiks juhtuda, et ekraani väikese tüki kõverus ei hakka praktiliselt üldse silma (nii näiteks me ei loe kõveraks väikest tükki Maa pinnast). Nii võiks juhtuda, et kahemõõtmelised inimesed on kaua aega veendumusel, nagu oleks nende maailm tasane. Alles sedamööda, kui uurimise alla võetakse ikka suuremaid ja suuremaid tükke ekraanist, ilmneb, et maailm on tegelikult siiski kõver. See kõverus on ainult nii väike, et väikeste ekraanitükkide uurimisel jääb ta kahe silma vahele.

Meie oleme suurel määral samasuguses olukorras nagu ekraani-inimesed. Erinevuseks on ainult see, et meie ruum ei ole kahemõõtmeline, vaid kolmemõõtmeline. Nii nagu kahemõõtmelised inimesed ei saanud näitlikult ette kujutada oma ruumi kõverust, nii ei saa seda ka meie. Ruumi kõverus avaldub ainult selles, et seal konstrueeritud geomeetrilisi kujundeid tuleb arvutada mitteeukleidilise geomeetria lausete järgi, kuna harilik eukleidiline geomeetria ei anna tegelikkusega kooskõlas olevaid tulemusi.

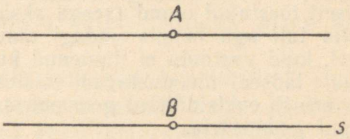
Kõverate pindade uurimisel saame rääkida nende kõverusest. Matemaatikud näitavad, et analoogiliselt võib

---

[114] Kahemõõtmeliste inimeste mõõtmistulemustes võib igaüks näitlikult veenduda. Märkige näiteks käsipallile kolm punkti ja ühendage nad omavahel kõige lühemat teed mööda. Saate kolmnurga kahemõõtmelises kõveras ruumis. Mõõtes nurki kolmnurga tippude juures, võite kergesti veenduda, et nende summa on suurem kui 180 kraadi.



Joon. 51. Tükikene negatiivse kõverusega pinnast. Niisugusele pinnale joonistatud kolmnurga sisenurkade summa on väiksem kui 180°.



Joon. 52. Geomeetria nullkõverusega ruumis. Läbi antud punkti A saame tõmmata sirgele s ainult ühe paralleelsirge.

kasutada ka ruumi kõveruse mõistet. Kui ruumi kõverus on null, on tegemist ruumiga, milles kehtivad eukleidilise geomeetria laused. Sel juhul öeldakse, et tegemist on tasase ruumiga. Mida suurem on ruumi kõverus, seda enam erinevad seal kehtivad geomeetria laused Eukleidese geomeetria lausetest. Kõveraid ruume jagatakse veel kahte liiki: positiivse ja negatiivse kõverusega ruumid. Kummalgi neist on oma iseärasused.[115]

Kooligeomeetria kursusest teame näiteks aksioomi: väljaspool sirget s asetsevast punktist A saame läbi tõmmata ühe ja ainult ühe sirge, mis on sirgega s samal tasapinnal, kuid ei lõika viimast (joon. 52). Negatiivse kõverusega ruumis kõlab sama aksioom hoopis teisiti: väljaspool sirget s asetsevast punktist A saame läbi tõmmata vähemalt kaks sirget, mis on sirgega s samal tasapinnal, kuid ei lõika viimast (täiendavalt saab tõestada, et niisuguseid sirgeid on tegelikult lõpmata palju). See tähendab, et negatiivse kõverusega ruumis saab tõmmata läbi punkti A sirgele s lõpmata hulga erinevaid paralleelsirgeid, kuna tasases ruumis on niisuguseid paralleelsirgeid ainult üks. On huvitav märkida, et just sellest nn. paralleelide aksioomist lähtudes ehitas Bólyai üles oma mitteeukleidilise geomeetria (Lobatševski mõttekäigud olid analoogilised).

Aksioom selle kohta, et punkti A läbib ainult üks sirgele s tõm-

[115] Teatud kujutluse erineva kõverusega ruumide geomeetriast saame siis, kui tuletame meelde, et kahedimensionaalne nullkõverusega ruum on harilik tasapind. Kahedimensionaalne positiivse kõverusega ruum on näiteks kera pind, kuna kahedimensionaalse negatiivse kõverusega ruumi tükk on kujutatud joonisel 51.

matud paralleelsirge, pole praktiliselt kontrollitav — me ei saa ju jälgida lõpmata pikki sirgeid kogu nende ulatuses. Selles tõsiasjas tuleb veenduda teoreetilisel teel. Bólyai tegi oletuse, et läbi punkti *A* läheb vähemalt kaks erinevat sirget, mis mõlemad on paralleelsed sirgega *s*, ja lootis, et sellele eeldusele tuginedes jõuab ta geomeetriliste arutluste teel vastuolule. Soovitav aksioom oleks siis vastuväiteliselt tõestatud olnud (seega aksioom oleks õieti muutunud lauseks). Välja tuli aga hoopis midagi muud. Bólyai tõestas ühe lause teise järel, kuid vastuolu ei ilmnenud kusagil. Alles siis taipas ta, et tõestatud laused moodustavad vastuoludevaba geomeetrilise süsteemi, mis erineb eukleidilisest geomeetriast. Nii tekkis negatiivse kõverusega ruumi geomeetria.

Analoogiliselt saab konstrueerida positiivse kõverusega ruumi geomeetriat. Selleks tuleb vaadeldud aksioom asendada järgmisega: iga sirge, mis asetseb sirgega *s* ühel tasapinnal, lõikab viimast. See tähendab, et sirgele *s* ei saa läbi punkti *A* tõmmata ühtegi paralleeli.

Põhimõtteliselt rääkides on meil lihtne kontrollida, kas maailmaruum on positiivse või negatiivse kõverusega või on ta koguni tasane. Selleks tuleb silmas pidada, et valguskiir levib tühjas ruumis alati mööda sirget joont. Vaatlejad, kes soovivad kindlaks teha maailmaruumi geomeetriat, peaksid siis toimima järgmiselt.

Esimene vaatlejatest saadab välja valguskiire. Seejärel saadab samas tasapinnas valguskiire välja ka teine vaatleja, kusjuures ta püüab seda nii suunata, et kiir oleks esimesega paralleelne. Kui see üldse võimalik ei ole, s. o. kui teine kiir alati esimest lõikab, siis on maailmaruumi kõverus positiivne. Kui teisel vaatlejal õnnestub ainult ühe paralleelkiire väljasaatmine, siis on maailmaruum eukleidiline, s. o. tema kõverus on null. Lõpuks kui teine vaatleja saab välja saata lõpmatu hulga kiiri, mis asetsevad küll samal tasapinnal kui esimese vaatleja valguskiir, kuid ei lõika viimast, siis on maailmaruumi kõverus negatiivne.

Kirjeldatud kontroll muidugi ei ole praktiliselt teostatav, vaid siin on tarvis kasutada teisi, kaudseid meetodeid. Hiljem näeme, et üldine relatiivsusteooria on mitmete vaatlustega kooskõlas. Seega tuleb selle teooria väidet, et maailmaruum on igal juhul kõver ruum, kaudselt kinnitatuks lugeda. Kas maailmaruumi kõverus on positiivne või negatiivne, selle kohta ei tea me praegu veel midagi öelda.

Võib-olla mõnel lugejal tekib nüüd arvamus, et kooligeomeetria õppimine on tarbetu, kuna tegelikus ruumis valitsevad hoopis teistsugused geomeetria seadused. Nii see siiski ei ole; siin tuleb eristada küsimuse põhimõtte-

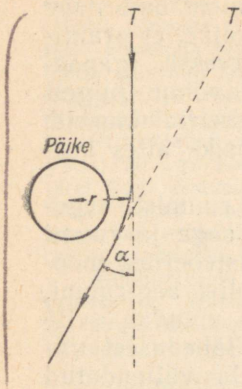
list külge praktilisest. Põhimõtteliselt on meid ümbritsev ruum küll kõver, kuid see kõverus on nii väike, et praktiliselt ei tule ta igapäevases elus üldse arvesse. Igapäevaste toimingute ning mõõtmiste juures võime julgelt kasutada koolis õpitud Eukleidese geomeetria lauseid. Ruumi mitteeukleidiline iseloom tuleb ilmsiks alles kosmiliste kujundite mõõtmisel.

Me oleme kogu aeg rääkinud ainult ruumist, tegelikult aga üldine relatiivsusteooria uurib aega ja ruumi ühtse tervikuna. Samuti nagu erirelatiivsusteoorias, moodustavad ka siin aeg ja ruum neljamõõtmelise aeg-ruumi. Seejuures osutub, et masside juuresolek muudab selle neljamõõtmelise ruumi kõveraks. Masside lähedusest tingitud aeg-ruumi kõverus on geomeetria keeles väljendatud tõsiasi, mis muuhulgas tähendab seda, et ruumis olev gravitatsiooniväli muudab nii aja voolamise kiirust kui ka ruumilisi pikkusi.

8. ESIMENE TUNNISTAJA ÜLDISE RELATIIVSUSTEOORIA KASUKS

Üldine relatiivsusteooria oma põhilises osas kujunes välja juba 1916. aastaks. See oli põhiliselt ainult loogilistele arutlustele tuginev, matemaatiliselt range ning harmooniline õpetus, millel polnud ühtegi katselist ega vaatluslikku kinnitust. Viimased ei lasknud end aga kaua oodata.

Juba erirelatiivsusteoorias selgus, et energiaga käib alati kaasas inertne mass. Ekvivalentsuse printsiibist järeldub nüüd, et energiaga on seotud ka raske mass — inertne ja raske mass on ju alati võrdsed. Näiteks on valguskiirel olemas teatud energia ja järelikult on tal olemas ka raske mass. Gravitatsioonitung peab valguskiire levimisele mõju avaldama. Selle põhjal võiks oodata, et maailmaruumis liikuv valguskiir kaldub masside poole. Arvutused, mida Einstein tegi juba 1911. aastal, näitasid, et valguskiire kõrvalekalle taevakehade mõjul on üldiselt väga väike; märgatav võib see olla ainult siis, kui valguskiir läheb küllalt suure massiga taevakehast õige lähedalt mööda. Võtame näiteks Päikese. Päikese läbimõõt on 1,4 miljonit kilomeetrit. See tähendab, et Päikesest möödumisel on valguskiir ligi viis sekundit tema vahetus läheduses, kus külgetõmme on eriti suur. Einsteini arvutused



Joon. 53. Valguskiire paindumine Päikesest möödumisel. Kiire paindenurk α on joonisel tugevasti suurendatud, tegelikult peaks see olema väiksem kui 1,75 kaaresekundit.

näitasid, et Päikesest möödunud valguskiire kõrvalekalle peab olema veidi vähem kui üks kaaresekund.

Edasised uurimused täiendasid esialgset pilti. 1915. aastal Einstein näitab, et tänu ruumi kõverusele Päikese ümber peab valguskiire kõrvalekalle Päikesest möödumisel olema suurem kui esialgu arvatud, ja nimelt $1{,}75\frac{r_0}{r}$ kaaresekundit, kus r_0 on Päikese raadius ja r — mööduva valguskiire kaugus Päikese tsentrist. Täpselt päikeseketta äärest mööduva valguskiire kõrvalekalle peab seega olema 1,75 kaaresekundit.

Einsteini ennustatud valguskiire paindumise vaatluslik kontroll on põhimõtteliselt lihtne: tuleb vaadelda kinnistähtedelt lähtunud valguskiiri, mis mööduvad väga lähedalt Päikesest. Valguskiire kaldumine Päikese poole tekitab seejuures vaatlejas arvamuse, nagu oleks täht Päikesest eemaldunud. See selgub joonise 53 vaatlemisel. Me näeme tähte selles suunas, kust tuleb silma sattunud valguskiir. Silm ei näe seega tähte tegelikus asendis T, vaid näivas asendis T'.

Loomulikes tingimustes me päikeseketta lähedal olevaid tähti vaadelda ei saa, sest nad kaovad Päikese eredasse valgusesse. Teine olukord on täieliku päikesevarjutuse ajal. Siis katab Kuu päikeseketta meie silmade eest kinni ja taevas hakkavad särama tähed. Täielik päikesevarjutus kestab lühikest aega, ainult mõned minutid. Selle ajaga jõuab aga parajasti fotografeerida tähistaevast koos varjutatud Päikesega. Mõne kuu pärast, kui Päike on taevavõlvil edasi nihkunud ning meid huvitavaid tähti on võimalik juba öösel vaadelda, fotografeeritakse neid uuesti. Saadud plaatide võrdlemine [116] võimaldab nüüd otsekohe kindlaks teha, kas Päikesest möödunud valguskiired tegelikult kaldusid kõrvale või ei. Kui tähed asuvad

[116] Astronoomilised mõõtmised tehakse otsekohe negatiiv-plaatidelt, ilma positiive valmistamata.

mõlemal plaadil täpselt samadel kohtadel, siis ei ole Päike möödunud valguskiirtele mingisugust mõju avaldanud. Kui aga varjutuse ajal võetud plaadil on tähed päikesekettast eemale nihkunud, tuleb Einsteini ennustatud efekti kinnitatuks lugeda. Tähtede kõrvalenihkumise suuruse järgi saame arvutada nurga α, mille võrra valguskiir kaldus Päikesest möödumisel kõrvale.

Valguskiir pidi olema üldise relatiivsusteooria proovikiviks. Kui näiteks mõõtmistest oleks selgunud, et tegelikult valguskiir Päikese lähedalt möödudes ei paindu, oleks ühel hoobil kogu üldine relatiivsusteooria valeks tunnistatud.

Päikesest möödunud valguskiir kavatseti ristküsitluse alla võtta juba 1914. aasta 21. augusti päikesevarjutuse ajal, mil täisvari pidi läbima Skandinaavia, Läti, Venemaa kuni Krimmi poolsaareni, ning kaduma Armeenias. Kuid 1. augustil algas Esimene maailmasõda, mis tõmbas teaduslikele ekspeditsioonidele kriipsu peale. Vaatlusi ei õnnestunud teostada ka sõja lõpu poole, 1918. aasta 8. juuni päikesevarjutuse ajal. Sõda nihutas üldise relatiivsusteooria kontrollimise järjest edasi. Vahepeal oli juba selgunud, et planeet Merkuuri liikumine kinnitab Einsteini teooriat, kuid see avastus ei leidnud kuigi laialdast vastukaja. Peamised lootused jäid ikka valguskiirele.

Pool aastat pärast sõja lõppu, 29. mail 1919. aastal oli jälle oodata täielikku päikesevarjutust, seekord eriti soodsat, sest Päike asus varjutuse ajal taevavõlvi üsna täherikkal kohal. Selleks varjutuseks saatsid inglased välja kaks ekspeditsiooni, ühe Brasiiliasse, teise aga Lääne-Aafrika rannikul asuvale Principe saarele. Mõlemal rühmal õnnestus varjutuse ajal teha korralikke ülesvõtteid. Järgnes õige täpne plaatide uurimine. Üks millimeeter tähe asukoha nihkumist plaadil tähendas valguskiire paindumist juba 60 kaaresekundi võrra. Siit on näha, kui peenelt tuli teostada mõõtmisi, et avastada rohkem kui kolmkümmend korda väiksemat kõrvalekallet. Principe saarel teostatud ülesvõtetest järgnes, et päikeseketta äärest möödunud valguskiir oli paindunud nurga võrra, mis on kusagil 1,31 ja 1,91 kaaresekundi vahel. Brasiilia ülesvõtted andsid paindumise suuruseks 1,86 kuni 2,10 kaaresekundit. Need tulemused küll ei langenud omavahel täpselt ühte, kuid nad olid õige lähedal teoreetiliselt ennustatud väärtusele — 1,75 kaaresekundit. Üldine rela-

tiivsusteooria oli leidnud kindla katselise kinnituse. Einsteini nimi sai erakordselt populaarseks. On arvata, et tema populaarsuse kasvule aitas kaasa ka rahvahulkade tüdimus verisest sõjast. Alles olid Saksamaa ja Inglismaa vaenujalal, kuid nüüd juba töötavad nende õpetlased koos. Inglaste vaatlused kinnitavad saksa teoreetiku mõttekäike, ning ühiste jõupingutustega avastatakse uus loodusseadus — selles peegeldub nii selgesti rahvaste sõpruse ning koostöö idee.

Vaatlustehnikat täiustati. 1922. aasta 21. septembri päikesevarjutust jälgis Austraalias Ameerika ekspeditsioon. Valguskiire kõrvalekaldumise suuruseks tuli siin nurk 1,66 ja 1,84 kaaresekundi vahel. On huvitav, et Einsteini poolt ennustatud väärtus asetseb just nende arvude keskel. Veelgi väärtuslikum oli see, et suudeti mõõta ka niisuguste valguskiirte paindumist, mis möödusid päikesekettast veidi kaugemalt. Nende kiirte kõrvalekalle oli muidugi väiksem, aga just nii palju väiksem, kui seda ennustas üldine relatiivsusteooria. See oli hiilgavaks kinnituseks teooriale. Ka hilisemad mõõtmised ei ole siin märgatavat ebakõla avastanud. 1952. aasta 25. veebruari päikesevarjutuse ajal tehtud võtted annavad päikesekettast möödunud valguskiire kaldumisnurgaks 1,70 kaaresekundit. See on veidi väiksem Einsteini poolt ennustatud väärtusest, kuid tuleb silmas pidada, et viga viimaste mõõtmiste juures võis olla kuni 0,10 kaaresekundit. Seega mõõtmistäpsuse piires ühtib valguskiire mõõdetud kõrvalekalle teoreetiliselt ennustatuga.

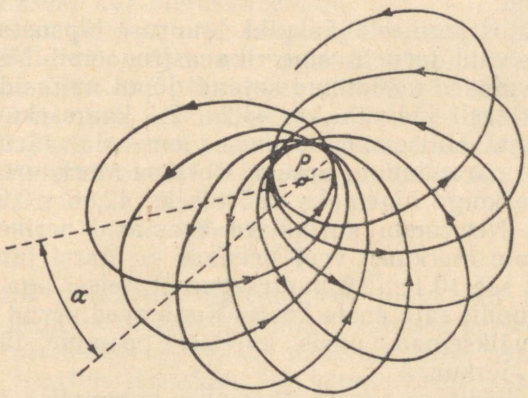
Huvitav on märkida, et valguskiire kõrvalekaldumise mõõtmised kinnitavad otseselt ruumi kõverdumist Päikese ümbruses. Teooria näitab, et tasase ruumi korral oleks kiire kaldenurk väiksem kui üks kaaresekund; ainult kõveras ruumis võib see olla 1,75 kaaresekundit.

Kui omal ajal Leverrier' arvutuste järgi avastati uus planeet Neptuun, siis oli see triumfiks Newtoni gravitatsiooniteooriale. Valguskiire tegeliku paindumise suurepärane kooskõla üldise relatiivsusteooria teoreetiliste ennustustega jätab aga veelgi vapustavama mulje. Leverrier tugines oma arvutustes juba poolteist sajandit varem avastatud raskustungi seadusele, mis oli leidnud planeetide liikumise seletamisel mitmekordset kinnitust. Einstein lõi aga täiesti uue teooria, millel polnud esialgu ühtegi otsest katsete või vaatlustega kinnitatud tugipunkti. Ja

esimene selle teooria ennustustest täitus üllatava täpsusega. Kas võib olla veel paremat näidet selle kohta, kui võimsaks vahendiks on inimmõistus looduse tõdede tundmaõppimisel.

9. MERKUURI MOISTATUS

Keplerist peale on teada, et planeet liigub ümber Päikese ellipsikujulist teed mööda. See tähendab, et ühe täistiiru jooksul muutub kogu aeg planeedi kaugus Päikesest.



Joon. 54. Planeedi orbiit liikumisel ümber Päikese *P*. Nurk α tähistab periheeli nihet ühe tiiru jooksul.

Kui planeedi kaugus Päikesest on kõige väiksem, ütleme, et planeet on oma orbiidi periheelis. Veel Newton oli kindlal arvamusel, et periheeli punkt püsib ruumis paigal, s. o. et planeet liigub kogu aeg ühte ja sedasama kinnist ellipsikujulist teed mööda. Hilisemad vaatlused avastasid aga midagi muud: periheeli punkt nihkub iga tiiruga planeedi liikumise suunas veidi edasi.

Seega planeedi orbiit ei ole kinnine ellips, vaid tuletab meelde rosetti [117] (joon. 54).

---

[117] Planeedi liikumist ümber Päikese saab lihtsalt demonstreerida hariliku pendli abil. Selleks tuleb pendel panna võnkuma mitte ühes tasapinnas, vaid nii, et pendli keha joonistaks ruumis ellipsi. Nüüd võib varsti märgata, et see ellips aeglaselt pöördub. Pendli keha lii-

Periheeli nihkumine avastati esmakordselt Merkuuri juures. Vanade vaatlusandmete võrdlemine uuematega näitas, et Merkuuri orbiidi periheelipunkt oli saja aasta kohta umbes 565,3 kaaresekundi võrra planeedi liikumise suunas edasi nihkunud. Leverrier hakkas uurima selle nihkumise põhjust. Selgus, et põhiline osa Merkuuri periheeli nihkest oli tingitud teiste planeetide, peamiselt Veenuse ja Maa häirivast mõjust. Kõigi planeetide kogumõju tingis aga ainult 527 kaaresekundi suuruse periheeli nihke saja aasta kohta. Kust tuli ülejäänud 38,3 kaaresekundit? See oli mõistatus, mis kõitis paljudeks aastateks teadlaste tähelepanu.

Merkuuri periheeli jääknihke suuruse täpsustamisel on silmapaistvaid teeneid ameerika astronoomil Newcombil. Tema arvutused möödunud sajandi lõpul näitasid, et Merkuuri periheeli jääknihe on $41{,}2 \pm 2{,}1$ kaaresekundit saja aasta kohta. Hilisemad uurimised on seda väärtust ainult õige vähe parandanud; praegu loetakse Merkuuri periheeli jääknihke kõige õigemaks väärtuseks $42{,}56 \pm 0{,}94$ kaaresekundit. Newcombi uurimused avastasid periheeli jääknihke peale Merkuuri veel Veenuse ja Marsi juures. Esimesel oli see $10{,}1 \pm 2{,}9$ kaaresekundit, teisel aga $8{,}0 \pm 3{,}7$ kaaresekundit saja aasta kohta. Kuna need arvud olid suhteliselt väiksemad, püsis uurijate peamine tähelepanu endiselt Merkuuril.

Mida kõike ei tehtud Merkuuri kummalise käitumise seletamiseks. Nii näiteks oletas Leverrier, et seespool Merkuuri orbiiti peaks liikuma veel üks planeet, mis põhjustabki Merkuuri periheeli jääknihke. See hüpotees ei õigustanud end. Selgus, et niisugune planeet oleks pidanud esinema rohkearvulistel fotodel, mis on tehtud Päikese ümbrusest. Nüüd muudeti veidi Leverrier' hüpoteesi ja oletati, et päris Päikese läheduses liigub suur hulk väikesi planeete, mis fotoplaadile ei jää. Ka see seletus osutus ebaõigeks. Selgus, et niisugune väikestest planeetidest koosnev rõngas peaks avaldama tugevat häirivat mõju ka Veenusele, mida tegelikult ei avastatud. Tehti veel terve rida teisi katseid seletada Merkuuri periheeli jääknihet. Nii näiteks oletati, et häiriva mõju tekitajaks

---

gub samuti nagu planeet ümber Päikese. Olgu rõhutatud, et analoogia piirdub siin ainult liikumise välise pildiga (ja sedagi mitte päris täpselt). Pendli keha orbiidi pöörlemise põhjus ei lange ühte planeedi orbiidi pöörlemise põhjusega.

on Päikese lapikus või jälle seniavastamata kuu olemasolu Merkuuril, kuid ka need katsed ei kannatanud välja tõsist kriitikat.

Kõige edukam näis esialgu olevat 1906. aastal Seeligeri poolt püstitatud teooria, mis nägi planeetide jääknihke põhjusena Päikesesüsteemis planeetide vahel liikuvat kosmilist tolmu. Sobivalt valitud tolmu tiheduse korral õnnestus tal seletada periheeli jääknihet nii Merkuuril kui ka Veenusel ja Marsil. Kuid sellelgi teoorial oli oma Ahhilleuse kand. Fotomeetrilised mõõtmised näitasid, et kosmilise tolmu tihedus on tegelikult sada miljonit korda väiksem kui oletas Seeliger.

Oma sisu poolest olid kõige huvitavamad Newcombi enda püüdlused möödunud sajandi lõpul, kes proovis täpsustada Newtoni gravitatsiooniseadust. Juba Newton ise uuris küsimust, kas raskustungi valemis (10) ei peaks astmenäitaja 2 asemel esinema mõni teine arv n, mis üsna vähe erineb arvust 2. Seadus avalduks siis kujul

$$F = C\frac{mM}{r^n}.$$

Newtoni arvutused näitasid, et juhul kui n erineb arvust 2, peab planeetide liikumisel esinema periheeli nihe. Sel ajal planeetide periheeli nihe oli alles avastamata, ning siit Newton järeldaski, et astmenäitaja raskustungi valemis peab olema täpselt 2. Newcomb haaras sellest mõttest kinni ning näitas, et Merkuuri periheeli jääknihke seletamiseks tuleb võtta $n = 2{,}00000016$. Kuu liikumise uurimine tõmbas aga ka sellest katsest kriipsu läbi. Selgus, et Kuu liikumise seletamiseks peab n olema väiksem kui 2,00000004. Pole võimalik astmenäitajat n nii valida, et ülalkirjutatud valem annaks võimaluse kirjeldada õigesti nii Merkuuri kui ka Kuu liikumist. Merkuuri mõistatus jäigi lahendamata.

10. MERKUURI MÕISTATUSE LAHENDUS

Newton avastas küll gravitatsiooniseaduse, kuid ta ei osanud vastata küsimusele, m i k s peaksid kõik kehad üksteisele tõmbetungidega mõjuma. Alles üldine relatiivsusteooria suutis sellele küsimusele mõnesugust valgust heita.

Iga keha kõverdab oma ümber olevat ruumi seda rohkem, mida suurem on keha oma mass. Päikesesüsteem pole seega midagi muud kui kõveras ruumis paiknevate kehade kogum. Eriti suur on ruumi kõverus Päikese ümbruses, kuna planeedid oma suhteliselt väikeste massidega märgatavat ruumi kõverdumist ei suuda esile kutsuda. Planeetide liikumist tuleb nüüd vaadata kui lihtsalt vabade kehade inertsiaalset liikumist kõveras ruumis. Kõik liikumise iseärasused on seega määratud juba ruumi struktuuriga, viimane omakorda sõltub aga masside paigutusest ning nende liikumisest.

Newtoni gravitatsiooniteoorias räägitakse gravitatsiooniväljast. Relatiivsusteoorias asendab gravitatsioonivälja ruumi kõverdumine, kuid on võimalik näidata, et ruumi kõverdumise asemel võib ka siin vabalt rääkida ruumis asetsevast gravitatsiooniväljast. Neid mõlemaid nähtusi (ruumi kõverdumist ning gravitatsioonivälja) kirjeldab üldises relatiivsusteoorias üks ja seesama matemaatiline suurus. Rääkida gravitatsiooniväljast või rääkida ruumi kõverdumisest — see on ainult ühe ja sellesama füüsikalise realiteedi nimetamine erinevate nimedega. Olgu seejuures märgitud, et üldise relatiivsusteooria võrrandite poolt määratud gravitatsiooniväli on palju keerulisema ehitusega kui gravitatsiooniväli Newtoni teoorias. Vahekord nende väljade vahel on jämedates joontes samasugune nagu elektromagnetilise välja ja elektrostaatilise välja vahel.

Päikesesüsteemi kehade liikumine toimub üldise relatiivsusteooria järgi nii, et süsteem tervikuna määrab tingimused, mille mõjul iga keha liigub.[118] Seejuures planeetide (ja ka Päikese) liikumine on loomulik liiku-

---

[118] Newtoni gravitatsiooniteoorias kasutatakse kahte üksteisest täiesti sõltumatut võrrandit. Esimene neist võimaldab antud masside paigutuse järgi ruumis arvutada gravitatsioonivälja kõigis ruumi punktides, teine aga määrab antud gravitatsiooniväljas oleva massi liikumise. Teine võrrand pole seega midagi muud kui Newtoni teise seaduse matemaatiline väljendus. Gravitatsioonivälja määrav võrrand ning keha liikumise võrrand on Newtoni teoorias täiesti sõltumatud. Üldises relatiivsusteoorias on need küsimused palju lihtsamad, sest siin gravitatsioonivälja võrrand määrab nii välja kuju kui ka masside liikumise väljas. Newtoni teine seadus tuletub juba automaatselt välja määravast võrrandist. Liikumise võrrandi sidumine välja võrrandiga on üldise relatiivsusteooria üks huvitavamaid tulemusi.

mine, s. o. niisugune liikumine, kus planeedi lähemas ümbruses teiste taevakehade gravitatsiooniväli puudub.[119] Et öeldu tõepoolest õige on, selles võime igal sammul veenduda. Riputame näiteks nööri otsa kilogrammise keha. Saame pendli, mida Maa tõmbab enda poole ühekilogrammise tungiga. Valemi (10) abil võib arvutada, et Päikese külgetõmme sellele pendlile peaks olema 0,6 grammi. Kui niisugune tõmbetung tõepoolest olemas on, siis peaksime märkama järgmisi nähtusi.

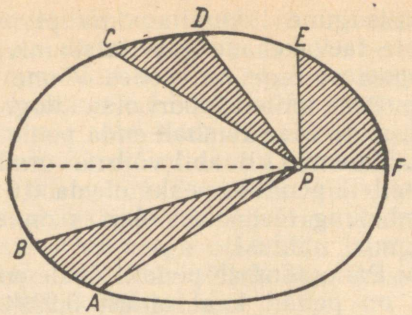
Päeval, kui Päike tõmbab pendlit ühele poole, Maa aga teisele poole, on pendli kaal ainult 0,9994 kilogrammi. Öösel seevastu mõjub Päikese külgetõmme samas suunas kui Maa külgetõmmegi, ning pendel kaalub 1,0006 kilogrammi. Kilogrammise pendli kaal kõigub ööpäeva jooksul 1,2 grammi ulatuses. Peale selle, seoses Päikese asukoha muutumisega taevavõlvil, muudab vabalt rippuv pendel ka oma suunda. Taolisi nähtusi pole keegi kunagi märganud. See on otseseks tõenduseks, et Maa liigub ruumis täpselt nii, nagu on vajalik teiste taevakehade gravitatsioonivälja kõrvaldamiseks tema lähemas ümbruses.[120]

Arvutused näitavad, et planeetide loomulik liikumine ümber Päikese ei toimu täpselt nii, nagu järgneb Newtoni gravitatsiooniseadusest, vaid siin on olemas väikesed erinevused. Nii näiteks ei ole planeedi orbiit ellips, vaid erineb mõnevõrra sellest. Seoses sellega täpsustas üldine relatiivsusteooria ka Kepleri seadusi. Nii näiteks ütleb Kepleri teine seadus: planeeti Päikesega ühendav mõeldav sirge katab võrdsete ajavahemike jooksul võrdsed pindalad (joon. 55). Relatiivsusteooria näitab, et need pindalad ei

---

[119] Eespool nägime, et gravitatsioonivälja saab alati kõrvaldada liikumise abil. Kõik planeedid just liiguvadki nii, et nende lähemas ümbruses teiste kehade gravitatsiooniväli puudub; on ainult planeedi oma gravitatsiooniväli.

[120] Täpsemalt öeldes liigub Maa nii, et tema keskpunktis pole võimalik avastada teiste taevakehade, näiteks Kuu gravitatsioonivälja. On teada, et Kuu poole pööratud Maa pinnal on Kuu gravitatsiooniväli veidi tugevam, Kuust eemale pööratud pinnal aga veidi nõrgem kui sama väli Maa keskpunktis. Kui nüüd Maa liikumine kompenseerib gravitatsioonivälja Maa keskpunktis, siis Kuu poole pööratud pinnal jääb nõrk väli kompenseerimata. Selle välja mõjul tekib meres tõusulaine. Vastupidi, Kuust eemale pööratud Maa pinnal Maa liikumine kompenseerib gravitatsioonivälja rohkem kui seda seal on. Nii tekib seal gravitatsiooniväli, mis on vastassuunaline Kuu gravitatsiooniväljale. Selle välja mõjul tekib teine tõusulaine.



Joon. 55. Illustratsioon Kepleri teise seaduse juurde. Kui planeet katab lõigud *AB*, *CD* ja *EF* võrdsete ajavahemike jooksul, siis on kõik viirutatud pinnad omavahel võrdsed.

ole täpselt võrdsed. Mida lähemal on planeet Päikesele, seda väiksema pindala katab mõeldav sirge ajaühiku jooksul. See parandus Kepleri teisele seadusele on aga nii väike, et kaasaegsete astronoomiliste riistadega pole seda võimalik tegelikult avastada.

Üldine relatiivsusteooria näitab veel, et planeedi loomulikul liikumisel orbiidi periheel peab nihkuma liikumise suunas. Ka see nihe on väga väike, kuid see-eest on ta kogu aeg ühesuunaline. Paljude aastate möödumisel võib väikeste periheeli nihete kuhjumisel tekkida juba mõõdetav efekt. Üldise relatiivsusteooria valemid näitavad, et Merkuuri periheeli nihe loomulikul liikumisel peab olema 40,03 kaaresekundit saja aasta kohta. See arv langeb üllatavalt suure täpsusega ühte Merkuuri periheeli jääknihkega. Merkuuri mõistatuslik käitumine, mille põhjendamisel töötati tagajärjetult üle 50 aasta, leidis üldises relatiivsusteoorias hoopiski lihtsa seletuse. Merkuuri periheeli jääknihke teoreetilise väärtuse hea kooskõla tegelikult vaadelduga kinnitab seda, et üldine relatiivsusteooria kirjeldab planeetide liikumist täpsemalt kui Newtoni gravitatsiooniteooria.

Relatiivsusteooria valemite abil võib arvutada periheeli jääknihked ka teiste planeetide jaoks. Arvutustulemused on esitatud tabelis 13. Tabelist nähtub, et kõigil teistel planeetidel on periheeli jääknihe väiksem kui Merkuuril.

Selle põhjuseks on, et need planeedid liiguvad Merkuurist aeglasemalt ja seetõttu relatiivsusteooria poolt ennustatud efektid on nende juures vastavalt ka väiksemad. Mõju avaldab veel see, et kõik teised planeedid teevad saja aasta jooksul vähem täistiire kui Merkuur; seetõttu kuhjub periheeli väikesi nihkeid saja aasta jooksul ka vähem.

Tabel 13

Planeetide periheeli jääknihe relatiivsusteooria järgi ning tegelikult mõõdetuna.

Planeet	Periheeli jääknihe kaaresekundites saja aasta kohta (relatiivsusteooriast järgnev väärtus)	Mõõdetud periheeli jääknihe kaaresekundites saja aasta kohta
Merkuur	40,03	42,56 ± 0,94
Veenus	8,63	10,1 ± 2,9
Maa	3,8	4,6 ± 2,7
Marss	1,35	8,0 ± 3,7
Jupiter	0,06	—

Kui võrdleme planeetide periheelide jääknihete teoreetilisi väärtusi tegelikult mõõdetutega, siis näeme, et Veenuse korral on kooskõla väga hea. Hea on kooskõla ka Maa korral, kus uuemad mõõtmised on avastanud periheeli jääknihke 4,6 ± 2,7 kaaresekundit saja aasta kohta. Vingerpussi mängib ainult Marss: teoreetiliselt võiks tema periheeli jääknihe olla 1,35 kaaresekundit, mõõdetud on aga 8 kaaresekundit. Mis tingib niisuguse ebakõla, seda on praegu võimatu öelda. Nähtavasti on siin tegemist ebatäpsustega periheeli jääknihke tegelikul määramisel — jääknihke väärtuse juurde on ekslikult jäetud mõned teistest taevakehadest tingitud periheeli nihked. Praegu on käsil eriti hoolikas ning täpne Marsi liikumise uurimine. Loodetavasti selgitab see ka põhjuse, millest nimetatud ebakõla on tingitud.

Viimasel ajal on avaldatud arvamusi selle kohta, et orbiidi periheeli nihe peaks olema hästi mõõdetav 1949. aastal avastatud väikeplaneedi Icaruse juures. Väikeplaneedid või asteroidid, nagu neid teisiti nimetatakse, on väikesed taevakehad, mis liiguvad üldiselt Marsi ja

Jupiteri orbiitide vahel.[121] Eriti pikliku kujuga orbiit on aga Icarusel; periheelis asetseb ta koguni seespool Merkuuri orbiiti. Relatiivsusteooria ennustab, et Icaruse periheeli jääknihe peab olema 10,05 kaaresekundit saja aasta kohta. Tänu eriti piklikule orbiidile, peaks Icaruse periheeli nihke mõõtmistäpsus olema isegi suurem kui Merkuuril. (Mida piklikum on ellips, seda kergem on märgata tema pöördumist. Ringikujulise orbiidi korral periheeli nihe seevastu poleks üldse avastatav.) Kuna Icaruse liikumist jälgitakse alles mõni aasta, siis tema periheeli nihet pole veel mõõdetud.

11. AJA VOOLAMISE KIIRUS MAA PEAL JA PÄIKESEL

Lisaks eelmistele on teada veel üks vaatluslik efekt, mis näib kinnitavat üldist relatiivsusteooriat. See efekt, nõndanimetatud spektrijoonte gravitatsiooniline nihe, on seotud aja voolamise kiirusega eri taevakehadel.

Üldises relatiivsusteoorias ilmneb, et mida tugevam on vaadeldavas ruumipunktis olev gravitatsiooniväli, seda aeglasemalt voolab seal aeg. See tähendab, et suurtel taevakehadel voolab aeg alati aeglasemalt kui väikestel taevakehadel. Öeldus pole iseendast midagi imelikku. Mõtleme korraks järele, mida tähendaks aeg sel juhul, kui maailmas ei oleks ühtegi materiaalset eset, millega toimuvad aja jooksul mitmesugused protsessid. Kas sel juhul üldse on mõtet rääkida ajast? Näib, et ei ole. Aeg oleks sel juhul ainult sõna; muuseas ei oleks siis ka inimest, kes seda sõna tarvitab. Kui maailmas puuduks mateeria, ei oleks olemas ka aega ja ruumi. Engels kirjutab: «Aeg (nii nagu ruumgi) on mateeriast eraldamatu; aeg ilma mateeriata pole midagi, tühi abstraktsioon, mis on olemas ainult inimese peas.» Et aeg on mateeriast eraldamatu, see peegeldub konkreetsete seoste olemasolus massi ja aja vahel. Kõik protsessid massidega toimuvad aja muutudes, aja voolamise kiirus omakorda sõltub aga lähedalolevate masside suurusest.

Vaatame nüüd lähemalt, kuidas mõõdetakse aja voolamise kiirust teistel taevakehadel.

---

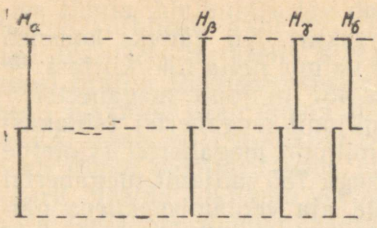
[121] Üldse on tuntud üle 1600 väikeplaneedi, neist kõige suurema läbimõõt on 770 kilomeetrit.

Iga elemendi aatom kiirgab välja kindlaid, ainult sellele elemendile omaseid valguskiiri. Nii näiteks koosneb vesiniku aatomi poolt kiiratud valgus nelja liiki kiirtest: [122] esimene neist on sagedusega 457 miljonit megahertsi [123] (punane kiir), teine — 617 miljonit megahertsi (sinakasroheline kiir), kolmas — 691 miljonit megahertsi (violetne kiir) ja lõpuks neljas sagedusega 755 miljonit megahertsi (nõrk violetne kiir). Kui nüüd aja voolamise kiirus näiteks Päikesel on aeglasem kui Maal, siis peavad seda arvestama ka aatomid. Aatom Päikesel saadab välja valguskiiri, mille sagedus on arvestatud Päikesel voolava aja järgi, Maa peal asetsev aatom peab silmas aga Maa aega. Päikeselt tuleva valguse sagedus erineb seega maapealsest allikast saadud valguse sagedusest. Vaatame seda küsimust konkreetsemalt.

Oletame, et Päikesel asetsevad vesiniku aatomid kiirgavad valgust, mis igas Päikese sekundis teeb 457 000 000 miljonit võnget. See valguskiir jõuab Maa peale. Ka siin on tema sagedus 457 000 000 miljonit võnget ühes Päikese sekundis. Kuna Maa peal voolab aeg kiiremini kui Päikesel, siis Päikese sekund on Maa sekundist pikem. Maa peale jõudnud valguse mõõtmine näitab, et see teeb 457 000 000 miljonit võnget pikema aja kui Maa sekundi jooksul; võngete arv Maa sekundis on tal siis muidugi väiksem. Konkreetne arvutus näitab, et sama valgus, mis tegi Päikesel 457 000 000 miljonit võnget sekundis (Päikese sekundis), teeb Maa peal 1000 miljoni võnke võrra sekundi (Maa sekundi) jooksul vähem. Samal ajal aga Maa peal asetsevad vesiniku aatomid kiirgavad valgust sagedusega 457 000 000 miljonit võnget Maa sekundis. Valguse kiir, mis tuleb Päikeselt, on väiksema sagedusega kui sama valguse kiir maapealsest valgusallikast saaduna. Kuna sageduse vähenemisega muutub valguse värvus punasemaks, siis võib piltlikult öelda, et kõik Päikeselt tulevad valguskiired peaksid olema punasemad kui maapealsest allikast lähtunud kiired. Kui võrrelda Päikeselt tuleva valguse spektrit maapealse valguse spektriga, siis peaks hakkama silma erinevus: spektrijooned Päikese spektris peavad olema nihutatud pikemate

[122] Tegelikult jagunevad need kiired veel omakorda, kuid see ei paku meile käesolevas huvi. Me ei käsitle ka infrapunaseid ja ultravioletseid kiiri, mida vesiniku aatom samuti kiirgab.

[123] Üks megaherts tähendab sagedust miljon võnget sekundis.



Joon. 56. Vesiniku spekter maapealsest allikast (ülemine riba) võrreldu na sama spektriga Päikeselt saaduna (alumine riba). Näitlikkuse mõttes on alumiste spektri joonte nihet ülemiste suhtes umbes 10 000 korda suurendatud. Joonisel tähistab H_α spektri punast, H_β — sinakasrohelist, H_γ — violetset ja H_δ — nõrka violetset joont.

lainete poole kui nad on maapealse valguse spektris. Spektrite võrdlemine annaks umbes niisuguse pildi, nagu on joonisel 56, kus ülemises ribas on kujutatud Maa peal asetseva vesiniku spektri silmaga nähtavad jooned, alumises ribas aga samad jooned Päikesel oleva vesiniku spektrist. Näitlikkuse mõttes on alumiste joonte nihet ülemiste suhtes umbes 10 000 korda suurendatud.

Kas niisugune spektrijoonte nihkumine on tõepoolest olemas? Et vastata sellele küsimusele, tuleks võrrelda tähtedelt tuleva valguse spektrit maapealse valgusallika spektriga. Raskus on siin aga selles, et spektrijoonte nihkumise põhjuseks peale erinevuse aja kulgemise kiiruses on veel terve rida teisi nähtusi. Kui näiteks täht eemaldub meist, on tema poolt kiiratud valguse spektrijooned punase poole nihutatud; läheneva tähe korral, vastupidi, nihkuvad spektrijooned violeti poole (nn. Doppleri efekt). Tähe kiirus mõni kilomeeter sekundis kutsub esile juba suuremaid spektrijoonte nihkeid, kui võiks olla joonte gravitatsiooniline nihe Päikese taoliste tähtede spektris. Peale selle liiguvad aatomid tähtedel väga suure kiirusega — ühed aatomid hetkel lähenevad meile, teised aga eemalduvad. Seetõttu nihkub aatomite kiiratud spektrijoonest osa punase, osa violeti poole. Spektrijoon muutub laiaks, mis takistab tema asukoha ning nihke suuruse täpset määramist. Praegu siiski näivad mõõtmised viitavat sellele, et Päikeselt kiiratud valguse spektrijooned on tõepoolest veidi punase poole nihkunud. Ka nihke mõõdetud suurus näib ühtivat teoreetiliselt ennustatuga.

Paremini kui Päikesel, on spektrijoonte punanihke efekt märgatav Siiriuse väiksema komponendi spektris. Siirius on kaksiktäht, mille üks komponentidest on väga tihe: selle mass on võrdne umbes Päikese massiga, kuid

läbimõõt on ainult 0,008 Päikese läbimõõdust. Üks kuupsentimeeter Siiriuse tihedat komponenti sisaldab paar tonni massi. Sellise massi kontsentreerumise tõttu on raskustung Siiriuse tiheda komponendi pinnal üle 20 korra suurem kui Päikese pinnal, s. o. aeg voolab siin tunduvalt aeglasemalt Päikese ajast. Sellest tingituna peavad Siiriuse tiheda komponendi spektrijooned mitukümmend korda rohkem nihkunud olema kui Päikese omad. See nihkumine on tõepoolest avastatud. Kas nihke suurus vastab täpselt teoreetiliselt ennustatule, seda ei saa siiski veel öelda, sest Siiriuse komponendi läbimõõt ning mass ei ole küllaldase täpsusega teada (spektrijoonte nihke suurus üldise relatiivsusteooria järgi sõltub tähe massist ja läbimõõdust). Igal juhul kinnitavad aga vaatlused, et üldise relatiivsusteooria poolt ennustatud spektrijoonte gravitatsiooniline nihe on tõepoolest olemas. See kinnitab vastuvaidlematult, et suurte masside läheduses voolab aeg aeglasemalt kui väiksemate masside juures.

12. MAA KUNSTLIK KAASLANE JA ÜLDINE RELATIIVSUSTEOORIA

Kolm eelkirjeldatud efekti — valguskiire paindumine Päikese läheduses, planeetide periheeli nihe ning tähtede spektrijoonte gravitatsiooniline nihe — on ainukesed üldise relatiivsusteooria vaatluslikud kinnitused. Kõik teised selle teooria ennustused räägivad niisugustest vaevaltmärgatavatest nähtustest, mida kaasaegne mõõtmistäpsus ei võimalda avastada. See muidugi ei tähenda, nagu oleks üldise relatiivsusteooria osatähtsus kaasaegses teaduses väike. Hoopis vastupidi: on vähe teooriaid, mis oleksid nii palju kaasa aidanud looduse mõistmiseks kui just üldine relatiivsusteooria. Tuletame siin meelde näiteks maailmaruumi kõveruse küsimusi. Et niisugused järeldused ei ole ainult inimese fantaasia, vaid peegeldavad tegelikkust, seda näitab teooria kooskõla vaatlustega kõigis neis küsimustes, kus vaatlus suudab teooriat kontrollida.

Üldises relatiivsusteoorias on veel palju lahtisi küsimusi, mille lahendamisel töötavad paljude maade, teiste hulgas ka Eesti teadlased. Suureks abiks oleks siin loodusest võetud faktiline materjal. Iga teooriat tuleb ikka ja

jälle kontrollida uute katsete ning vaatluste abil. See on tee, mis võimaldab teooriat edasi arendada ning hiljem, kui vaja, asendada seda uue, loodust veelgi täpsemalt kirjeldava teooriaga. Niisugune on looduse tundmise tee, kus teooria ja praktika sammuvad käsikäes. Eriti huvitav oleks uute vaatluslike kinnituste leidmine üldisele relatiivsusteooriale, sest seniseid kinnitusi on väga vähe.

Huvitavad ja väga perspektiividerikkad ideed üldise relatiivsusteooria edasiseks kontrollimiseks andis nõukogude füüsik V. L. Ginzburg, kes soovitas selleks kasutada Maa kunstlikku kaaslast, lunoidi.

Lunoid liigub ümber Maa täpselt samuti nagu planeet ümber Päikese; see tähendab, et tema orbiidiks on ellips. Mitmesugused kõrvalised häired kutsuvad esile lunoidi orbiidi perigee[124] nihkumise ruumis. Nii näiteks Päikese mõjul peaks Maa kunstliku kaaslase perigee nihkuma 7,6 kaaresekundit saja aasta jooksul. Perigee nihe, mida ennustab üldine relatiivsusteooria, on aga võrratult suurem, ulatudes kuni 1500 kaaresekundini saja aasta kohta. Mitmesugused kaalutlused näitavad, et Maa kunstliku kaaslase jälgimine ühe aasta jooksul annab võimaluse üldist relatiivsusteooriat täpsemini kontrollida kui Merkuuri periheeli nihke mõõtmine saja aasta jooksul.

Eespool märkisime, et gravitatsiooniväli relatiivsusteoorias erineb gravitatsiooniväljast Newtoni teoorias umbes samuti nagu elektromagnetiline väli elektrostaatilisest väljast. Vaatame näiteks laetud kera. Elektrostaatiline väli kera ümber ei sõltu sellest, kas kera pöörleb või ei, küll aga sõltub pöörlemisest kera ümbritsev elektromagnetiline väli. Kui kera ei pöörle, ümbritseb teda ainult puhas elektrostaatiline väli, kuna pöörlemine toob juurde ka magnetivälja.[125] Täpselt samasugune on lugu gravitatsiooniväljaga Newtoni teoorias ja üldises relatiivsusteoorias. Newtoni teoorias on ükskõik, kas gravitatsioonivälja tekitav kerakujuline keha pöörleb oma telje ümber või ei — väli on ikka ühesugune. Üldise

---

[124] Kui keha tiirleb ümber Maa, siis orbiidi punkti, kust keha kaugus Maani on kõige väiksem, nimetatakse orbiidi perigeeks.

[125] Kui laetud keha pöörleb, on meil tegemist liikuvate elektrilaengutega, s. o. elektrivooluga. Igasuguse elektrivooluga käib aga alati kaasas magnetiväli.

relatiivsusteooria järgi aga pöörleva kera gravitatsiooniväli erineb mittepöörleva kera väljast.

Päikese pöörlemine [126] ümber oma telje tekitab üldise relatiivsusteooria järgi täiendava gravitatsioonivälja, mis omakorda peaks esile kutsuma Merkuuri periheeli täiendava nihkumise. See nihe on aga nii väike (0,01 kaaresekundit saja aasta kohta), et pole mingisugust lootust lähemal ajal seda tegelikult mõõta. Ka siin võib lunoid suure teene osutada. 400 kilomeetri kõrgusel liikuva kunstliku kaaslase perigee nihe, mis on tingitud Maa pöörlemisest ümber oma telje, peaks olema 43 kaaresekundit saja aasta kohta. Kaasaegsete vaatlusriistadega peaks see nihe mõõdetav olema. Tsentraalkeha pöörlemisest tingitud perigee nihe — see on täiesti uus efekt, mida ennustab üldine relatiivsusteooria ning mida loodetakse lunoidi liikumise jälgimisel avastada. See oleks neljas vaatluslik kontroll üldisele relatiivsusteooriale.

Kuna Maa gravitatsiooniväli lunoidi orbiidi kohal on nõrgem kui maapinnal, siis peab lunoidil aeg kiiremini voolama kui Maal. Seda efekti saab mõõta järgmiselt.

Lunoidi ehitamisel monteeritakse viimasele raadiosaatja, mis saadab välja laineid kindla sagedusega ν. Niipea, kui lunoid oma orbiidile asub, hakkab saatja tööle. Saatja poolt kiiratud laine teeb igas sekundis (lunoidi aja järgi) ν võnget. Maal voolab aeg aeglasemalt kui lunoidil, seetõttu ajavahemik, mille jooksul Maale jõudnud laine teeb ν võnget, on vähem kui sekund (Maa aja järgi). Sekundi jooksul on võngete arv Maa peal seega suurem kui ν. Lunoidilt Maale levimisel elektromagnetilise laine sagedus peaks suurenema. Kui võrrelda Maal vastuvõetud laine sagedust sagedusega ν, saame otsustada, kui palju kulgeb aeg kaaslasel kiiremini ajast Maal. See võimaldab kontrollida, kas relatiivsusteooria arvestab õigesti gravitatsioonivälja tugevuse

---

[126] Üldises relatiivsusteoorias, kus kõik taustsüsteemid on samaväärsed, tuleb täpsustada, missuguse taustsüsteemi suhtes me Päikese pöörlemist mõtleme.

Kui minna küllalt kaugele Päikesest, siis muutub viimase gravitatsiooniväli väga nõrgaks, praktiliselt mittemärgatavaks. Küllalt kaugel Päikesest puudub praktiliselt Päikese gravitatsiooniväli. Siin võime rakendada erirelatiivsusteooriat, mis muuseas asetab inertsiaalsüsteemid eelistatud olukorda. Just nende, Päikesest küllalt kaugel määratud inertsiaalsüsteemide suhtes me pöörlemist mõtlemegi.

mõju aja kulgemise kiirusele. Aja voolu kiiruste võrdlemine tähtede spektrijoonte gravitatsioonilise nihke kaudu on kaasajal kaunis ebatäpselt teostatav. On lootusi, et kunstlikul kaaslasel töötava raadiosaatja sageduse uurimine võimaldab siin täpsust tunduvalt tõsta. Osutub, et eriti soodsad oleksid selles suhtes Maast võimalikult kaugel liikuvad kaaslased.

13. KAS VÕITLUS KOPERNIKU MAAILMASÜSTEEMI EEST OLI ASJATU?

Üldine relatiivsusteooria erineb kõigist teistest füüsikalistest teooriatest selle poolest, et sel pole ühtegi kitsamas mõttes praktilist rakendust. See tähendab, et üldise relatiivsusteooria tulemusi ei ole seni rakendatud üheski tööstusharus ja niisugust rakendamist ei ole ka ette näha. See muidugi ei tähenda, nagu ei oleks üldine relatiivsusteooria üldse kusagil rakendatav. Hoopis vastupidi: see teooria võimaldab lahendada kõige raskemaid printsipiaalseid küsimusi, mis teistele teooriatele üle jõu käivad. Võtame näiteks Päikesesüsteemi stabiilsuse probleemi. Kas on karta, et mõni planeetidest võib kunagi teise planeedi või Päikesega kokku põrkuda, või on garanteeritud Päikesesüsteemi püsimine praegusel kujul?

Päikesesüsteemi stabiilsuse küsimust uuris juba XVIII sajandil prantsuse matemaatik Laplace ning jõudis tulemusele, et Päikesesüsteemi hävingut pole karta. Nii nagu ta on liikunud tänaseni, nii liigub ta edasi ka ülikauges tulevikus. Ei tohi aga unustada, et Laplace tugines oma arvutustes Newtoni gravitatsiooniseadusele,[127] mis teatavasti kirjeldab taevakehade vahel valitsevaid tunge ainult ligikaudu. Päikesesüsteemi stabiilsuse probleem tuleks uuesti lahendada üldise relatiivsusteooria abil. Kahjuks ülisuurte matemaatiliste komplikatsioonide tõttu on see küsimus tänaseni lahendamata.

Kui üldist relatiivsusteooriat peab tõsiselt arvestama konkreetsete küsimuste lahendamisel, siis seda enam tuleb temale tugineda üldiste probleemide käsitlemisel.

---

[127] Peale selle tegi ta probleemi uurimisel ka teisi väikesi lihtsustusi.

Üks niisugustest on näiteks päris raamatu alguses püstitatud probleem Koperniku maailmasüsteemi eelistamisest Ptolemaiose maailmasüsteemile. Kas on niisugune eelistamine põhjendatud või mitte?

Eespool nägime, et Koperniku süsteem erineb Ptolemaiose süsteemist ainult taustkeha valiku poolest. Kuna üldine relatiivsusteooria väidab, et kõik taustsüsteemid on üheõiguslikud, siis järgneb siit otseselt: üldise relatiivsusteooria seisukohalt on Koperniku maailmasüsteem samaväärne Ptolemaiose süsteemiga. Teiste sõnadega, on ükskõik, kuidas öelda, kas «Maa tiirleb ümber Päikese» või «Päike tiirleb ümber Maa».

On karta, et paljud lugejad ei nõustu öelduga ja vastavad: «Me oleme harjunud kujutlusega, et Päike sunnib Maad oma ümber tiirlema. Kuidas nüüd aru saada sellest, et eelneva asemel võib niisama hästi öelda: «Maa sunnib Päikest oma ümber tiirlema.» Viimane väide tundub esimesega võrreldes naeruväärselt vähe põhjendatud olevat. Kuidas saab Maa-sugune kääbus sundida Päikesehiiglast liikuma! Tahtmatult meenuvad siin A. France'i read:

«Ja püha mees punus oma stoola lõngast väga peenikese neljakümne jala pikkuse nööri. Ühe nööriotsa köitis ta kaljunuki ümber, mis rannaliivast välja ulatus, ja astus teist otsa peos hoides kivikünasse.

Küna libises merele ja tõmbas Pingviinide saare põhjast lahti. Pärast üheksa päeva kestnud meresõitu jõudis Maël õnnelikult Bretagne'i kallastele, tuues saare endaga kaasa.»

Pühal mehel Maëlil õnnestus väikese küna tõmbega suure saare teise kohta viimine ainult pühade jõudude kaasabil. Kuidas siis mõtlevad relativistid seda, et väike Maa sunnib suurt Päikest ümber Maa liikuma?

Vastuseks toodud arutlusele olgu öeldud, et üldise relatiivsusteooria seisukohalt Maa ei sunnigi Päikest tiirlema, samuti kui Päike ei sunni Maad. Päike, samuti Maa, Marss ja teised planeedid liiguvad ruumis loomulikult, s. o. nii, et nende lähemas ümbruses pole teiste taevakehade gravitatsioonivälja märgata. Niisugust loomulikku liikumist võib täielikult võrrelda inertsiaalse liikumisega. Loomulik liikumine pole midagi muud, kui tegelikus kõveras ruumis toimuv «inertsiaalne» liikumine. Me ei räägi inertsiaalse liikumise juures, et üks

keha sunnib teist ühtlaselt ja sirgjooneliselt liikuma. Samuti pole mõtet rääkida sellest, et üks taevakeha sunnib teist loomulikult liikuma. Loomulik liikumine on see, mida keha teostab ilma välismõjudeta, paiknedes konkreetsete omadustega (näiteks konkreetse kõverusega) ruumis. Ruumi omadused omakorda on määratud kõigi läheduses asuvate taevakehade poolt.[128]

Miks tundub kujutlus Päikese ümber tiirlevast Maast meile siiski vastuvõetavamana kui ükski teine pilt Päikesesüsteemi liikumisest? Seepärast, et oleme seda juba lapsepõlvest peale õppinud, oleme sellega nii harjunud, et raske on temast loobuda. Muide, loobuda pole siin tarviski, on vaid vaja endale selgeks teha, et põhimõtteliselt on ka teised kujutlused Päikesesüsteemi liikumisest niisama õiged. Looduses on olemas liikuv Päikesesüsteem. Selle süsteemi kirjeldamisel saadav pilt oleneb sellest, missuguse taustsüsteemi me valime. Kuna taustsüsteemid on põhimõtteliselt samaväärsed, siis on ka saadavad liikumise pildid samaväärsed. Igaüks neist peegeldab õigesti Päikesesüsteemi liikumist. See on mõte, millega inimestel paratamatult tuleb harjuda, ükskõik kui kaua see ka aega võtaks. Olgu meelde tuletatud, et Koperniku süsteemiga harjumine võttis samuti aega. Kujutlus maailma tsentris seisvast Maast näis esimesel pilgul olevat liiga loomulik ja silmanähtavalt õige, et temast otsekohe loobuda.

Probleemi sügavam uurimine näitab, et teatud eeldustel on siiski võimalik Päikesega seotud taustsüsteemi (s. o. Koperniku süsteemi) teistele süsteemidele eelistada.

Oletame, et maailmas pole midagi muud peale Päikesesüsteemi. Sel juhul viimase ruumi kõverdav mõju ei ulatu praktiliselt lõpmatuseni; küllalt kaugel Päikesesüsteemist on ruum juba tasane. Siin tasases ruumis võime kasutada liikumise uurimiseks inertsiaalsüsteeme ja rakendada erirelatiivsusteooriat. Kui uurida nüüd Päikesesüsteemi liikumist nende inertsiaalsüsteemide taustal, selgub, et Päike liigub praktiliselt kiirenduseta (s. o. ühtlaselt ja sirgjooneliselt), kuna kõigi planeetide liikumine on kõverjooneline. Ainult Päikest võime lugeda inertsiaalkehaks, see tähendab, et ainult temaga seotud taustsüsteem on inert-

---

[128] Põhimõtteliselt rääkides on ruumi omadused määratud kõigi maailmas olevate kehade poolt, kuid tegelikult kaugete kehade mõju ruumi struktuuri määramisel on väga väike.

siaalsüsteem,[129] kuna planeetidega seotud süsteemid seda ei ole. Erirelatiivsusteooria seisukohalt on seega Päikese valik taustkehaks õigustatud. Koperniku süsteem on tõepoolest teistest maailmasüsteemidest eelistatud olukorras.

Kogu eelneva mõttekäigu aluseks oli eeldus, et Päikesesüsteem paikneb maailmaruumis teistest süsteemidest täiesti isoleeritult. See eeldus ei ole tegelikkusega kooskõlas. Päike moodustab koos teiste Linnutee süsteemi kuuluvate kinnistähtedega ühtse terviku, kus iga täht liigub loomulikult. Seda loomulikku liikumist võib vaadata kui tiirlemist ümber Linnutee masskeskme; Päike näiteks teeb täistiiru umbes 230 miljoni aasta jooksul.[130] See näitab ilmselt, et Päikesesüsteem pole teistest taevakehadest isoleeritud. Eeldus, et maailmaruumis eksisteerib omaette Päikesesüsteem, pole ligikaudugi õige. Seetõttu ei ole ka õige temast tulenev järeldus, nagu oleks Päikesesüsteemi kirjeldamisel Koperniku maailmasüsteem teistest põhimõtteliselt eelistatud. Iseasi on muidugi praktiline eelistatus.

Inimkonna praktika seisukohalt on alati otstarbekohane mingisugust kindlat taustsüsteemi teistele süsteemidele eelistada. Igapäevases elus räägime näiteks päikese tõusust, loojumisest või päikese liikumisest taevavõlvil. Teiste sõnadega: igapäevases elus kasutame Ptolemaiose geotsentrilist maailmasüsteemi. Astronoomid seevastu leiavad otstarbekama olevat Koperniku süsteemi kasutamise: selles süsteemis on Päikesesüsteemi kehade liikumise pilt kõige lihtsam. Kuid kõik niisugused taustsüsteemi eelis-

---

[129] Kõver ruum toob sisse mõningaid moonutusi, mida me käesolevas ei puuduta. Seepärast nimetuse inertsiaalsüsteem kasutamine pole siin päris täpne; selle asemel tarvitatakse harilikult väljendust «harmooniline taustsüsteem».

[130] Analoogiliselt eelnevale väide, et kinnistähed tiirlevad ümber Linnutee masskeskme, oleks absoluutse tähendusega ainult sel juhul, kui kogu maailmaruumis eksisteeriks ainult Linnutee tähesüsteem. Kuna see nii ei ole, siis ei ole ka põhjust Linnutee masskeskmega seotud taustsüsteemi teistele süsteemidele eelistada ning ülalöeldu on ainult üks võimalikest väljendusviisidest. Õigem oleks öelda: kõik kehad maailmaruumis liiguvad loomulikult, s. o. nii, et nende lähemas ümbruses teiste kehade gravitatsioonivälja pole võimalik avastada. Olgu märgitud, et seda loomulikku liikumist võivad häirida kosmilises ruumis esinevad elektri- ja magnetiväljad. Nende väljade mõju uurimine on hoogu võtnud alles viimastel aastakümnetel, kuid juba praegu on selge, et nende osatähtsus, eriti väikeste osakeste liikumisel, on palju suurem, kui arvati varem.

valikud on teostatud ainult kitsalt-praktilistel kaalutlustel. Põhimõtteliselt rääkides on kõik taustsüsteemid Päikesesüsteemi kirjeldamisel samaväärsed.

Kui nüüd Koperniku süsteem on Ptolemaiose süsteemiga põhimõtteliselt samaväärne, kas tähendab siis see, et Koperniku pooldajate omaaegne võitlus selle süsteemi eest oli asjatu? Kas Giordano Bruno laskis end elusalt põletada ainult seepärast, et ta ei tundnud üldist relatiivsusteooriat? Kas Galileo Galilei võitlus kirikutegelastega oli tingitud ainult eksitusest — kumbki pool ei teadnud, et nende seisukohad on samaväärsed? Kõigile taolistele küsimustele saab vastata ainult kindla «ei». Nii võiks asja käsitleda ainult skolastik, kes asetab kõik sündmused väljapoole aega ja ruumi. Ptolemaiose ja Koperniku maailmasüsteemid on kaasajal ainult erinevad taustsüsteemid, XVII sajandil kehastas esimene neist aga surnud ning skolastilist teadust, kuna võitlus teise eest oli võitlus uue, teadusliku maailmavaate nimel. Koperniku süsteemi lipu all toimus rünnak kõikvõimsale katoliku kirikule ja tema dogmaatilisele maailmavaatele. See oli üks heroilisemaid etappe teaduse ajaloos, ning sellisena on selle tähtsust isegi tänapäeval raske ülehinnata. Tuletame siin meelde Galilei «Dialoogide» kangelase Salviati tuliseid sõnu, mis kõlavad vägagi kaasaegselt:

«Kas pole naeruväärne, kui vaidluses mingisuguse tõestamist vajava asja üle keegi esitab äkki tsitaadi, mis kuulub sageli hoopis teisele alale, ja sellega suleb oma vastase suu? Kui tahate nii jätkata teaduses, siis ärge nimetage end filosoofideks, vaid ... tuupimise doktoriteks. Kes kunagi ei filosofeeri, sel pole õigust kanda filosoofi austavat tiitlit.»

Üldine relatiivsusteooria näitab, et Ptolemaiose ja Koperniku maailmasüsteemid on põhimõtteliselt samaväärsed, kuid see ei vähenda põrmugi Galilei ja tema mõttekaaslaste võitluse ajaloolist tähtsust. Just vastupidi. Galilei võitles teaduse ja teadusliku mõtte vabaduse eest ning ta poleks kunagi olnud nõus väljavaatega, et tema oma õpetus muutub dogmaks. «Dialoogides» Salviati ütleb: «Ma ei kahtle selles, et kui Aristoteles elaks meie ajal, ta muudaks oma vaateid.» Samuti võib öelda Galilei kohta. Ta ei oleks sugugi kurb, et tema võitlus Koperniku maailmasüsteemi eest osutus formaalselt mõttetuks, vaid ta näeks selle võitluse ajaloolist tähtsust. Kes kaasajal

ei taha saada Galilei alustatud võitluse reetjaks, peab julgelt arendama teadust, vaatamata sellele, kas selle tulemused on kooskõlas Galilei omaaegsete vaadetega või mõne teise juba varem loodud õpetusega. Teadus peab alati sammuma edasi ning ignoreerima kõiki juba varem ette seatud tõkkeid.

14. MAAILMAST KUI TERVIKUST

Üldine relatiivsusteooria on praegu ainuke teooria, mis annab õigeid tulemusi maailma suurtes piirkondades toimuvate liikumiste kirjeldamisel. Tahtmatult tekib nüüd lootus, et see teooria kirjeldab õigesti ka kogu maailma tervikuna. Kas see lootus õigustab end, seda saab otsustada ainult teooria tulemusi vaatlusandmetega kõrvutades. Järgnevas peatume lühidalt tulemuste juures, mis on saadud maailma kui terviku kirjeldamisel üldises relatiivsusteoorias.

Vaatlused näitavad, et tähesüsteemide jaotus maailmaruumis on enam-vähem ühtlane. Sellele tuginedes võime oletada, et mateeria tihedus on üle kogu maailmaruumi üks ja seesama.[131] Aja jooksul võib see tihedus mitmesugustel põhjustel muutuda. Missugused on niisuguse maailma omadused? Seda küsimust on üldise relatiivsusteooria abil uurinud nõukogude füüsik A. A. Friedmann. Refereerime lühidalt tema tulemusi.

Ainult masside jaotuse etteandmisest ei piisa maailma kui terviku omaduste uurimiseks. Lisaks tuleb teha veel eeldus selle kohta, kas lugeda maailma suletud või lahtiseks süsteemiks. Vaatame, missugustele järeldustele viib kumbki neist eeldustest.

Maailma käsitlemine suletud süsteemina tähendab, et tema ruumala on lõplik, samuti sisaldab ta lõpliku hulga mateeriat. Maailma ruumala lõplikkus seejuures ei tähenda sugugi seda, nagu oleks ruum kusagil äärega piiratud. Kuigi ruum on lõplik, pole meil kusagil võimalik leida ruumi serva, samuti pole võimalik ruumist välja minna.

---

[131] Kui võtame ruumalaühiku nii suure, et ta haarab endasse kümneid galaktikaid, siis ükskõik kus kohal meile tuntud maailmaruumi osas me selle ruumalaühiku ka valime, ikka on temas oleva mateeria hulk praktiliselt üks ja seesama.

Ruum on lõplik seetõttu, et ta on iseendas kinnine.[132] Kui valguskiir niisuguses ruumis kogu aeg otse edasi liigub, võib ta lõpuks oma lähtepunkti tagasi jõuda. Iseendas kinnine ruum tuletab teatud mõttes meelde Maa pinda. Ükskõik mis suunas me maad mööda edasi liigume, maapinna äärt ei leia me kusagil. Ometi on maakera pindala lõpliku suurusega.

Olgu märgitud, et mõnel pool levinud arvamus, nagu oleks kujutlus kinnisest maailmast lõivu maksmine idealismile, on põhjendamata.

Maailma käsitlemine lahtise süsteemina tähendab seda, et tema ruumala on lõpmatu, samuti on lõpmatu maailmas oleva mateeria hulk. Valguskiir, liikudes ruumis otse edasi, eemaldub kogu aeg oma lähtepunktist. Huvitav on märkida, et sõltumatult sellest, kas maailm on kinnine või lahtine süsteem, on meil korraga võimalik vaadelda ainult lõplikku (kuigi tohutu suurt) osa maailmaruumist. Niisugune «vaatevälja piiratus» on tingitud valguskiirte levimise iseärasustest kõveras ruumis. Tegelikult kaasaegsed pikksilmad pole jõudnud veel kaugeltki selle «vaatevälja piirini», millest räägib üldine relatiivsusteooria.

Oletame, et maailma kõverus aja jooksul kahaneb, s. o. et maailmaruum muutub üha vähem erinevaks kujuteldavast tasasest ruumist. Arvutused näitavad, et ruumi kõveruse vähenemine ilmneb vaatlejale nii, nagu eemalduksid taevakehad temast radiaalsuunas — mida kaugem keha, seda suurema kiirusega. Seejuures eemalduvate tähtede spektrijooned peavad olema nihutatud suuremate lainepikkuste poole (spektrijoonte punanihe).

Spektrijoonte punanihet võiks seletada a i n u l t valgust kiirgava keha eemaldumisega — siis oleks tegemist puhta Doppleri efektiga [133]. Üldine relatiivsusteooria näitab aga, et punanihe kaugete tähesüsteemide spektris ei ole puhas Doppleri efekt. Peale tähesüsteemide eemaldu-

---

[132] Nii nagu lõpliku pindalaga, kuid ilma äärteta saab olla ainult kõver pind, nii ka lõpliku ruumalaga, kuid ilma äärteta saab olla ainult kõver ruum.

[133] Doppleri efekt võimaldab igasugust spektrijoonte punanihet mõõta kiiruse kaudu. Näiteks punanihe 10 kilomeetrit sekundis tähendab niisugust spektrijoonte nihet punase poole, mis oleks tingitud kiirgava keha radiaalsuunalisest eemaldumisest kiirusega 10 kilomeetrit sekundis.

mise kutsuvad spektrijoonte punanihet esile veel teised, tõsi küll, palju väiksemad põhjused.

Punanihe kaugete tähesüsteemide spektrites on tõepoolest avastatud; avastaja auks nimetatakse seda nähtust Hubble'i efektiks. Mõõtmised näitavad, et miljoni valgusaasta kaugusel asuvate tähesüsteemide spektrites on punanihke suuruseks umbes 53,4 kilomeetrit sekundis, kuna kaks, kolm jne. korda kaugemate objektide spektrites on ka punanihe vastavalt kaks, kolm jne. korda suurem. Punanihe kauge tähesüsteemi spektris on võrdeline selle süsteemi kaugusega.

Üldine relatiivsusteooria annab valemi, mis seob punanihke suuruse kaugete tähesüsteemide spektris mateeria keskmise tihedusega maailmas. Kui võtta punanihke suuruseks 53,4 kilomeetrit sekundis miljoni valgusaasta kohta, siis arvutus vastava valemi järgi annab mateeria keskmiseks tiheduseks maailmas ühe kümnemiljondiku grammi miljonis kuupkilomeetris. Maa ruumala kohta tuleks maailmaruumis keskmiselt 0,1 grammi ainet. See arv ühtib võrdlemisi hästi teiste meetoditega hinnatud keskmise ainetihedusega maailmaruumis.

Friedmann võttis aluseks spektrijoonte punanihke kaugete tähesüsteemide spektris ning arvutas sellest lähtudes mateeria keskmise tiheduse maailmaruumis. Kuna mateeria tihedus tuli välja enam-vähem õige, siis peame järeldama, et Friedmanni arvutused sisaldavad tubli portsjoni tõtt maailma kui terviku ehituse kohta.

Friedmanni teooria leidis hiljuti veel teisegi vaatlusliku kinnituse. Arvutused näitavad, et spektrijoonte punanihe kasvab võrdeliselt tähesüsteemide kaugusega ainult suhteliselt väikestel kaugustel. Küllalt kaugel peab punanihke kasvamise kiirus vähenema. Uuemad vaatlusandmed kinnitavad tõepoolest seda ennustust: kui esialgu spektrijoonte punanihe tähesüsteemi kauguse iga miljoni valgusaasta kohta on 53,4 kilomeetrit sekundis, siis suurtel kaugustel muutub see arv väiksemaks.

Eespoolkirjeldatust on näha, et Friedmanni teooria on kahes punktis leidnud vaatluslikke kinnitusi. See näitab, et üldine relatiivsusteooria võib anda mõistlikke tulemusi isegi maailma kui terviku uurimisel. Teiselt poolt ei saa aga märkimata jätta, et Friedmanni teooria viib ka tervele reale tõsistele raskustele. Võtame näiteks maailma «vanuse» küsimuse.

Kaugete tähesüsteemide spektrijoonte punanihe viitab sellele, et maailma kõverus kahaneb, s. o. maailm on praegu paisuvas olekus. Lihtne arvutus näitab, et maailma paisumine ei saa olla kestnud kauem kui umbes miljard aastat. Miljardi aasta eest pidi kogu maailm olema koondunud tihedasse kobarasse, milles valitsesid hoopis teistsugused loodusseadused kui praegu. See «vanus» maailma jaoks on aga ilmselt liiga väike. Juba Maa koore vanuse määramine radioaktiivsete ainete koostise uurimise teel annab 5 miljardit aastat. Tuleb välja, et Maa koor on vanem kui kinnistähed! Kinnistähtede evolutsiooni uurimine annab viimaste jaoks samuti palju kõrgema ea kui üldisele relatiivsusteooriale tuginevad kaalutlused. See kõik näitab, et maailma «vanuse» hindamisel üldine relatiivsusteooria ei vii meid õigetele tulemustele. Relatiivsusteooria rakendamine maailma kui terviku uurimisel ei anna alati tegelikkusele vastavaid resultaate. Sel alal tuleb uurijail veel palju ära teha; eelkõige tuleb kindlaks teha, kas üldine relatiivsusteooria maailmale tervikuna üldse rakendatav on. Praegu võime öelda, et üldine relatiivsusteooria on teooria maailma suurtes piirkondades toimuvatest masside liikumistest, kuid kas ta ka tervet maailma korraga haarata suudab, seda me veel ei tea.

15. MÕNI SÕNA GRAVITATSIOONIVÄLJAST JA TEISTEST VÄLJADEST

Üldine relatiivsusteooria andis uue lähtekoha gravitatsiooninähtuste seletamiseks. Tekkis uus, nõndanimetatud relativistlik gravitatsiooniteooria, mis peegeldab taevakehade liikumist paremini kui Newtoni teooria. Uus gravitatsiooniteooria omandas füüsikaliste teooriate hulgas erilaadse koha: oma loogilise ranguse ning seesmise ilu poolest ületab ta kõiki teisi teooriaid, kuid kontakt vaatlusandmetega on nõrk. Harilikult võib leida teooria kinnitamiseks sadu fakte, kuna relativistliku gravitatsiooniteooria järeldustest on kontrollitud oluliselt ainult kolme. Nõrk vaatluslik kontroll ei ole käesoleval juhul etteheiteks teooriale endale, vaid ennem vaatlejatele. Relativistlik gravitatsiooniteooria on nii sügavale looduse peensustesse tunginud, et katsed ja vaatlused ei suuda talle järele jõuda.

Rohkem paneb mõtlema relativistliku gravitatsiooniteooria teine iseärasus, mis seisneb tema isoleerituses teistest teooriatest. Sellele vastavalt on tekkinud ka kujutlus, et gravitatsioonivälja on looduses täita eriline koht. Kui näiteks elektromagnetilist välja käsitletakse teatud lainetusnähtusena, millel on ka kindlad korpuskulaarsed omadused (footonite esinemine), siis gravitatsioonivälja on ainuüksi ruumi kõveruse määraja. Niisugune eraldatud olukord tekitab rahulolematuse tunnet, mis iseendast võib-olla polegi küllalt põhjendatud. Igal juhul on tehtud katseid selle isoleerituse likvideerimiseks. Siin võiks esile tuua kahte põhisuunda.

Esimeseks nendest olid katsed elektromagnetilist välja gravitatsioonivälja ga ühendada ja luua nn. ühtse välja teooriat. Selle vaatekoha järgi on ka elektromagnetiline väli seotud ruumi struktuuriga. Ühtse välja teooria loomisel on töötanud mitmed tuntud teoreetikud, kõige rohkem Albert Einstein ise. Kuigi probleemi on uuritud juba 40 aastat, pole rahuldavaid tulemusi veel saadud. Kõige kaugemale jõudis vast Einstein ise oma 1953. aastal avaldatud uurimustes.

Teine suund on esimesele diametraalselt vastupidine. Siin püütakse gravitatsioonivälja käsitleda samuti osakeste voona, nagu seda näiteks elektromagnetilise välja juures tehakse (elektromagnetilise välja käsitlemine footonite koguna). Gravitatsioonivälja osakesed on saanud isegi eraldi nimetuse — g r a v i t o n i d. Niisuguse käsitluse juures läheb muidugi kaduma gravitatsioonivälja osa ruumi kõveruse määrajana. Ühtse välja teooria vaatekohalt mingisuguseid välju olemas ei ole, on ainult masside ja elektrilaengute poolt määratud ruumi kõverus. Siin, vastupidi, oletatakse, et ruum on tasane, temas asuvad aga elektromagnetiline väli, gravitatsioonivälja ja teised väljad. Viimane vaatekoht on uuem, sellega tegeldakse alles kümne aasta ümber. Üks selle nn. gravitatsioonivälja kvantteooria looja on Moskva Riikliku Ülikooli professor D. D. Ivanenko, kes praegugi juhib nende küsimustega tegelevat rühma. Puudutaksime lühidalt selle teooria mõningaid tulemusi.

Gravitonidel, samuti nagu footonitelgi on seisumass null. See tähendab, et gravitonid võivad liikuda ainult kiirusega c; sellele vastavalt on ka gravitatsioonivälja levimise kiiruseks c. Gravitatsiooniline tõmbetung kehade

vahel tekib sellest, et ühe keha kiiratud gravitonid neelduvad teises kehas. Kehad nagu märgiksid palli gravitonidega, mille tulemusena tekibki tõmbetung. Nagu teised elementaarosakesed, nii on ka gravitonid omamoodi libahuntideks. Graviton võib muunduda näiteks elektronist ja positronist koosnevaks paariks ja vastupidi: elektron-positron paar võib muunduda gravitonideks. Samuti on võimalikud vastastikused muundused teiste osakeste, näiteks footonite ja gravitonide vahel.

Gravitatsioonivälja kvantteooria küsimusi uuritakse ka Tartu Riikliku Ülikooli teoreetilise füüsika kateedris. Siin saadud tulemustest on eriti huvitav see, et valguskiire paindumist Päikese läheduses võib seletada footonite põrkumisega gravitonidelt. Valguskiirt moodustavad footonid põrkuvad Päikese ümber olevate gravitonide vastu, seetõttu muutub footonite liikumise suund ja järelikult ka valguskiire levimise suund.

Gravitatsioonivälja kvantteooria suureks puuduseks on see, et seda on seni arendatud ainult nõrkade väljade jaoks, kuna tugevate gravitatsioonivälja korral põrgatakse kokku väga suurte, seni ületamatute raskustega. Ka ei ole sellel teoorial ühtegi katselist ega vaatluslikku kinnitust; gravitonid on nii väikese energiaga osakesed, et seni pole õnnestunud looduses avastada ei neid endid ega ka nende poolt esile kutsutud efekte. [134]

Gravitonidest tingitud efektide väiksust iseloomustavad järgmised arvud: miljardi aasta jooksul on kaksiktähed, tänu gravitonide kiirgamisele, kaotanud ühe tuhandiku oma esialgsest energiast. Proovige arvutada, kui suure osa oma energiast kaotavad nad 10 või 100 aasta jooksul. See on nii väike suurus, et selle avastamiseks praeguste mõõtmisvahenditega pole mingisugust lootust. Või teine näide.

Selleks et elektron-positron paari muutumine gravitonideks toimuks niisama tihti kui muutumine footoniteks, peaks elektroni ja positroni koguenergia olema 10^{21} korda [135] suurem kui elektroni seisuenergia. Nii suurt ener-

---

[134] Valguskiire paindumine gravitatsioonivälja on nähtus, millel on kaks seletust. Seda võib vaadata kui footonite ja gravitonide põrkamisest tingitud efekti, kuid samuti kui raske ja inertse massi võrdsuse ning ruumi kõveruse järeldust. Gravitonide olemasolu kinnituseks seda efekti seetõttu lugeda ei saa.

[135] 10^{21} tähendab arvu 21 nulliga; seda nimetatakse triljardiks.

giat ei ole avastatud isegi kõige kiirematel kosmosest Maa peale lendavatel osakestel, rääkimata elektronide kiirendajatest, kus elektroni energia muutub seisuenergiaga võrreldes ainult mõnesaja kuni tuhande kordseks. Väikeste energiate korral on tõenäosus selleks nii väike, et elektronist ja positronist koosnev paar muutuks gravitonideks, et seda ei saa üldse praktiliselt arvestada. Kui näiteks kaasaja kõige võimsamast sünkrotronist väljunud positron ja elektron annihileeruvad, siis 10^{72} annihileerumise protsessi kohta tekivad ainult üks kord gravitonid; ülejäänud juhtudel muutuvad elektron ja positron alati footoniteks. Kui kujutleda, et inimene suudaks jälgida 1000 annihilatsiooni sekundis, siis tuleks tal oodata 10^{59} sajandit selleks, et kord näha elektroni ja positroni muutumist gravitonideks. (Olgu võrdluseks meelde tuletatud, et Maa vanus on ainult 10^{7}—10^{8} sajandit.) Toodud näide annab pildi sellest, kuivõrd vähe lootusi on meil gravitonide tegelikuks avastamiseks; praktiliselt on see täiesti lootusetu.

Gravitonide puht-hüpoteetiline iseloom ja piiratud rakendatavus (ainult nõrkade gravitatsioonivälja korral) ei ole gravitatsioonivälja kvantteooria ainukesteks puudusteks. Ka loogilise ranguse poolest jääb see teooria oma praegusel arendusastmel üldisele relatiivsusteooriale tuginevast gravitatsiooniteooriast tugevasti maha. See kõik asetab teooria niisuguse arengusuuna tugeva kahtluse alla. Kas gravitonide teooria peegeldab loodust õigesti, on vägagi küsitav. Põhiliselt on probleem muidugi lihtne: kas looduses on gravitone või mitte? Kahjuks meie käsutuses olev katsetehnika ei anna sellele küsimusele niipea vastust. Seepärast tulebki piirduda loogiliste arutlustega, mis küll võivad selgitada ühe või teise teooria nõrku ja tugevaid külgi, kuid mis ei anna lõplikku vastust küsimusele: kumb teooria suund peegeldab loodust paremini, kas ühtse välja teooria või gravitatsioonivälja kvantteooria. Seda küsimust saab lahendada ainult otsese või kaudse eksperimendi teel. Ja lõpuks pole sugugi võimatu, et tulevikus leitakse mingisugune kolmas, täiesti uus suund gravitatsioonivälja teooria lähendamiseks elektromagnetilise välja teooriale.

Kõrvaltvaatajale võib tunduda arusaamatuna, miks on paljude teooriate iga suhteliselt lühike. Seisukohad, mida lühema või pikema aja jooksul loeti õigeiks, heidetakse korraga kõrvale. Ühe teooria rusud kuhjuvad teise järel ja neil varemeil kasvavad uued teooriad, et mõne aja pärast omakorda tagasi astuda ja järgnevatele teooriatele teed anda. Aristoteles näiteks kirjutas: «Liikuv keha jääb paigale, kui teda tõukav tung lakkab mõjumast», — see oli inertsiseadus enne Galileid. Kuni Galileini arvasid ka looduseuurijad, et mida suurem on kehale mõjuv tung, seda suurem on keha kiirus. Galilei ei jätnud vanadest seisukohtadest kivi kivi peale, vaid näitas, et õige on inertsiseadus niisugusel kujul, nagu meie seda tunneme. Samuti püstitas ta uue kehade liikumise seaduse: mida suurem on kehale mõjuv tung, seda suurem on keha kiirendus. Möödus veel peaaegu sajand, enne kui Newton fikseeris kehade liikumise õpetuse põhilaused juba vajaliku rangusega. Seejuures jättis ta täiesti kõrvale liikumise relativistliku mõistmise. Newtoni poolt rajatud baasile ehitati üles terve klassikaline mehaanika. Möödus veel paar sajandit, ja teooriate kolikambrist otsiti uuesti üles Galilei relatiivsusprintsiip, avardati seda ning rajati sellele alusele terve relatiivsusteooria. Tekkis teooria, mis kirjeldab loodust paremini kui klassikaline füüsika. Kas see tähendab, et kõik eelnev oli asjatu? Kas see tähendab, et teooriate püstitamine on üldse kasutu — varem või hiljem tuleb neid asendada teiste teooriatega? Võib-olla oleks mõistlik piirduda füüsikas ainult vaatluste ja katsete resultaatidega, mis kunagi ei muutu; muutuda võib ainult katseandmete täpsus.

On selge, et otsene kontakt loodusega on ainuke, mis võib anda looduseuurijale täiesti usaldusväärseid fakte. Kuid faktid ei ole veel teadus. Teadus peab suutma luua korda faktide hulgas, peab neid süstematiseerima, tegema üldistusi ning näitama kätte kohad, kust tuleks otsida uusi tõsiasju. Süstematiseerimata faktide kogul on niisama vähe ühist teadusega kui kivihunnikul majaga.

Loodus on lõpmatult mitmekesine, ammendamatu. Me võime koguda loodusest otsatu hulga fakte, kuid kas need on üldse vajalikud? Võimalused katsete korraldamiseks on piiratud, seepärast tuleb uurida ainult olulisi punkte.

Mis on aga oluline, mis mitteoluline, seda saab öelda ainult teooria. H. Poincaré võrdleb füüsikat raamatukoguga, «mis peab lakkamatult kasvama; raamatukoguhoidja käsutuses on ostudeks vaid piiratud krediidid; ta ei tohi neid raisata.

Katselise füüsika ülesandeks on ostude tegemine; ta üksi võib rikastada raamatukogu.

Mis puutub matemaatilisse füüsikasse, siis on selle ülesandeks kataloogi koostamine. Kui see kataloog on hästi tehtud, siis ei muutu raamatukogu selle tõttu veel rikkamaks. Küll aga võib ta aidata lugejat nende rikkuste kasutamisel.

Näidates raamatukoguhoidjale tema kogude lünki, võimaldab kataloog isegi teostada krediitide otstarbekohast kasutamist; see on väga tähtis, kuna krediidid on piiratud.

Säärane on järelikult matemaatilise füüsika osa; ta peab juhtima üldistamist nõnda, et see ... tõstaks teaduse kasutegurit.»

Toodud tsitaadis on selgesti sõnastatud üks teooria põhilistest ülesannetest: süstematiseerida juba olemasolevaid fakte ning juhatada teed uute faktide otsimiseks.[136] Seejuures teooria ütleb harilikult ka ette, missugune peaks olema ühe või teise katse tulemus. Mõnikord osutub ennustus õigeks, kuid juhtub ka nii nagu näiteks Michelson-Morley katsega, kus mõõteaparaadid näitavad midagi muud kui oodati. Niisugune fakt on vana teooria kriisi saabumist kuulutav esimene pääsuke. Varem või hiljem tekib uus teooria, mis üldreeglina on oma eelkäijast laiem ja haarab rohkem fakte. Just see on oluline. Siit järgneb, et teooriad ei ole inimeste meelevaldsed konstruktsioonid, vaid nad peegeldavad loodust. Iga uus teooria teeb seda paremini eelmisest. Vanade teooriate asendamine uutega pole midagi muud kui järkjärguline tõele lähenemine.

Teooriate vaheldumise protsessis ilmneb veel üks huvitav nähtus: uued teooriad püüavad esialgu end rüütada vanast teooriast pärinevate mõistete ning kujutluste vormi. Nii nagu esimesed elektrimootorid ehitati täpselt aurumasina-kujulised, nii ka uus teooria kasutab vana

---

[136] Toodud tsitaat seevastu ei rõhuta küllaldaselt teooria osatähtsust uute tõdede avastamisel. Palju loodusseadusi on avastatud ainult teoreetiliste arutluste teel. Loomulikult kontrollitakse teoreetiliselt avastatud seadusi hiljem ka katseliselt. Teooria viimaseks proovikiviks on ikka ainult katse ja vaatlus.

elemente, ühendades neid niisugusel kujul nagu talle on vajalik. Juhtniidiks on seejuures matemaatilised arutlused. Nii tekib uus teooria tihti kimääri-taolise moonutisena. Kõrvaltvaatajale tundub seejuures müstilisena, kuidas saab niisugune värdjaliku kujuga ehitus peegeldada loodust. Tegelikult viga on siin ainult välistes hilpudes, mis varem või hiljem kõrvaldatakse.

Oli aeg, kus aatomit kujutati päikesesüsteemi-taolise moodustusena. Seejuures tekkis uurijail rida arusaamatusi: aatom oli «päikesesüsteem», kuid ennenägematult kummaliste omadustega. Sellele vaatamata seletas päikesesüsteemi-taolise aatomi teooria väga hästi vesiniku spektri struktuuri ja tekkimist. Tänapäeva teadlane on leidnud aatomi kirjeldamiseks palju sobivamad mõisted ning kujutlused, kui olid tarvitusel päikesesüsteemi-taolise aatomimudeli ajal, kuid vesiniku spektri struktuur järeldub kaasaegsest teooriast samasugusena nagu tema eelkäijastki.

Oli aeg, kus elektrinähtusi peeti erilise keskkonna — eetri — mehaaniliseks liikumiseks. See teooria andis valemid, mida me loeme õigeks veel tänapäevalgi, kuid naiivse kujutluse eetrist oleme ammugi kõrvale jätnud.

Ka relatiivsusteoorias on olukord analoogiline. Paljud selle teooria tulemustest tunduvad esimesel pilgul arusaamatutena ning kummalistena, kuid seda ainult seetõttu, et me püüame neist aru saada vanade, Newtoni mehaanikasse kuuluvate kujutluste abil. Jättes kõrvale vanad harjumuslikult kujunenud kujutlused ja mõisted ning asendades nad otstarbekohaselt valitud uutega, saame ilusa kristallselge teooria. Kui inimene on relatiivsusteooriast arusaamises nii kaugele jõudnud, siis ütleme, et ta on harjunud relativistlikult mõtlema. See on palju elulisem saavutus kui üksikute relatiivsusteooria alale kuuluvate faktide tundmaõppimine. Relativistlikult mõtlev inimene ei näe relatiivsusteoorias midagi üllatavat ega ebatavalist, vaid ranget ja arusaadavat süsteemi. Just relativistliku mõtteviisi elemente püüdis autor käesolevas raamatus esitada. Kuivõrd see on õnnestunud, selle üle otsustab juba lugeja.

V

ALBERT EINSTEIN

Kõik oluline, mida ma olen elu jooksul taotlenud, rühmitub küsimuse ümber: missugustele metoodilistele järeldustele füüsikas viib valguse levimise universaalne seadus ning inertse ja raske massi võrdsus?

Princeton,
31. jaanuar 1955

A. Einstein

Kerge on kirjutada kuulsast maadeavastajast või väejuhist. Siin vaheldub elu kronoloogia kirevate ning huvitavate piltidega küll aastaid kestnud merereisidest, küll rahvaste saatusi otsustanud lahingutest. Niisugustel juhtudel ühiskonna dünaamika tungjooned nagu koonduksid ühte isikusse. Suhteliselt lihtne on siis näidata oma kangelast keskkonnas, kus ta elas ja liikus, lihtne on valgustada teda ajendanud tõukejõude.

See ei ole vist juhus, et inimkonna suurimate vaimude elukäik, kurvastuseks nende biograafidele, on välise sündmustiku poolest vaene. Sündis, õppis, elas, töötas ja suri. Järele jättis suure kuhja raamatuid, millega elulooolased pahatihti midagi peale ei oska hakata. Kokkuvõttes tuleb suurmehe elulugu välja midagi horoskoobi-taolist, ainult selle erinevusega, et ta on koostatud tagantjärele. Ja ometi on ka niisuguste inimeste elu olnud täidetud igapäevase kangelaslikkusega, inimlike nõrkustega, rõõmudega õnnestumiste üle ning masendushoogudega nurjumiste korral. Just see inimlik suurvaimudes, mis iseendast on võib-olla kõige tähtsam — me austame ju eelkõige inimest, mitte tema geniaalset loomingut —, jääb tihti meie eest varjule.

Üheks kõige tänamatumaks kujuks biograafidele on vist küll Albert Einstein. Ligi 300 teaduslikku tööd kõige keerulisemate teoreetiliste probleemide üle ei ole mingisugune tänuväärne materjal elulooolasele. Raske on nende tööde põhjal tema teooriatesse mittepühendatuile näidata Albert Einsteini kui suurt inimest; palju ei aita ka tema publitsistika ja kirjavahetus. Pole siis ime, et mõned autorid joonistavad temast pildi kui õhus hõljuvast geeniusest, kes lõi oma teooriad tühjale kohale. Teised jälle esitavad teadlase kuju, kes nooruses oli erakordselt vil-

jakas, kuid kellel elu teisel poolel loomingulised jõud kuivama hakkasid. Õige pole ei see ega teine.

Järgnevad read ei pretendeeri Einsteini elu kronoloogia täielikule esitamisele, ammugi on nad võimetud teda kui suurt inimest lugeja ette tooma. Ainuke, mida autor taotleb, on üksikute kildude visandamine, mis kas või ligikaudugi püüaksid esile manada selle suure õpetlase kontuure.

Albert Einstein sündis 14. märtsil 1879. aastal Ulmi linnas Saksamaal kaupmehe perekonnas. Keskharidust taotleb ta esialgu Müncheni gümnaasiumis, kuid lahkub siit 1894. aasta lõpul protestiks preisi drilli vastu. Küpsustunnistuse omandab 1896. aastal Aarau linnas Šveitsis.

Vanad keeled olid Einsteinile gümnaasiumi päevil tõsiseks pähkliks. Asi läks koguni nii hulluks, et ladina keele õpetaja Münchenis oli sunnitud prohvetlikult ennustama: «Einstein, teist ei tule kunagi midagi mõistlikku.» Mis aga eraldas noort Einsteini kooli «mustadest lammastest», oli tema erakordne kiindumus matemaatikasse ja füüsikasse. Oma autobiograafias kirjutab Einstein:

«12—16-aastaselt ma tutvusin matemaatika elementidega, kaasa arvatud diferentsiaal- ja integraalarvutuse alged. Seejuures oli mul õnn sattuda raamatutele, kus põhiideede võimalikult selgema väljatoomise huvides ei pööratud liiga suurt tähelepanu loogilisele rangusele.»

Juba neil aastail tekkisid Einsteinil ideed, mis hiljem viisid relatiivsusteooria loomisele. Ta kirjutab, et jõudis relatiivsusteooriani «pärast kümme aastat kestnud mõtisklusi paradoksi üle, millega puutusin kokku juba 16-aastaselt: kui ma liigun koos valguskiirega kiirusega *c* (valguse kiirus vaakuumis), kas ma näen siis seda kiirt kui ruumis liikumatult võnkuvat elektromagnetilist välja. Kuid nii katse kui ka Maxwelli võrrandid näitavad, et arvatavasti seda ei juhtu. Mulle oli algusest peale intuitiivselt selge, et niisuguse vaatleja seisukohalt kõik peab toimuma samade seaduste järgi nagu Maa suhtes liikumatugi vaatleja arvates.»

Keskkooli päevilt saab alguse ka Einsteini innukas muusikaharrastus, mis jäigi peamiseks vahelduseks pingsale vaimsele tööle. Oma viiulist ei loobunud Einstein elu lõpuni, kasutades puhkehetki musitseerimiseks küll üksinda küll koos sõpradega. Hitlerlikult Saksamaalt põgenenud sakslaste heaks andis ta kord isegi avaliku viiuli-

kontserdi. Einsteini lemmikheliloojateks olid Bach, Vivaldi, Mozart ning Schubert. Ükski kingitus ei rõõmustanud teda nii palju, kui 75-aastaseks sünnipäevaks saadud kogu kauamängivaid heliplaate vanade meistrite helitöödest.

17-aastaselt astub Einstein Zürichi tehnikaülikooli. Oma õpinguid iseloomustab ta järgmiselt:

«Seal olid mul suurepärased õpetajad (näiteks Hurwitz, Minkowski), nii et ma oleksin võinud saada soliidse matemaatilise hariduse. Kuid olles innustunud vahetust kontaktist katsetega, töötasin ma enamiku ajast füüsikalaboratooriumis. Ülejäänud aja kasutasin peamiselt selleks, et kodus õppida Kirchhoffi, Helmholtzi, Hertzi jt. töid.» Rääkides füüsikast, kirjutab ta edasi: «Hiiglasuur nõrgalt seostatud empiiriliste faktide kogu mõjus ka siin rõhuvalt. Kuid varsti õppisin ma välja otsima seda, mis võib viia sügavusse, ja kõrvale jätma kõike ülejäänut, kõike niisugust, mis koormab mõistust ja juhib tähelepanu peamiselt kõrvale. Kuid siin oli ka oma konks, ja nimelt, et eksamiks tuli kogu see tarkus tahes või tahtmata endasse tuupida. Niisugune sundus heidutas mind niivõrd, et terve aasta pärast lõpueksameid oli teaduslikele probleemidele mõtlemine mulle vastumeelt. Seejuures peab ütlema, et meie Šveitsis kannatasime selle teaduslikku tööd lämmatava sunduse all tunduvalt vähem kui paljud üliõpilased teistes kohtades. Kokku oli ainult kaks eksamit, kuna ülejäänud osas võisid teha mida tahtsid. Eriti hea oli neil, kel nii nagu minul, oli sõber, kes korralikult käis kõigil loengutel ja hoolikalt töötas läbi nende sisu. See andis mulle õppimise vabaduse, välja arvatud mõni kuu enne eksameid, vabaduse, mida ma ohtralt kasutasin; sellega seotud musta südametunnistust võtsin kui vältimatut, igal juhul väiksemat pahet. Õieti öelda on peaaegu ime, et kaasaegsed õpetamismeetodid ei ole veel täielikult lämmatanud püha teadmishimu, sest see õrn taimeke nõuab peale ergutamise eelkõige vabadust.»

On selge, et niisugune avalik, kuigi õigustatud opositsioon kehtiva õppesüsteemi vastu viis mõnevõrra ebameeldivatele tulemustele. Tehnikaülikooli lõpetab Einstein keskmise hindega 4,91 (kuuepallise hindesüsteemi juures). Lõpetasid seekord korraga neli noormeest ja nendest kolm said otsekohe assistendi kohad sama ülikooli juures. Ainult Einsteini polnud ükski professoreist nõus enda juurde jätma. Järgneb kaks aastat juhuslikku

tööd keskkooliõpetajana, peale seda eksperdi koht Berni patendibüroos.

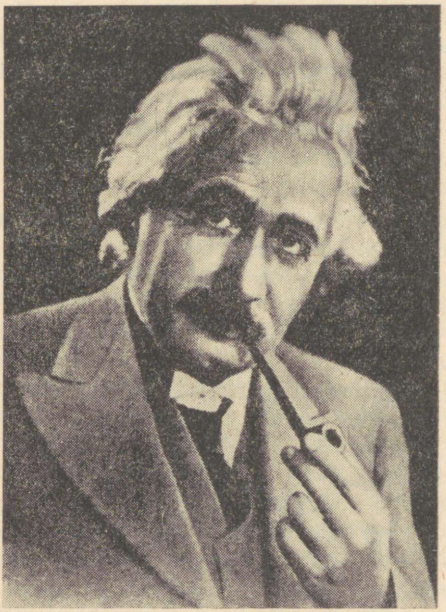
Neil aastail algab ka Einsteini teaduslik looming. Esimene uurimus, mis käsitleb kapillaarsuse nähtusi, ilmub trükist 1901. aastal. Järgmised artiklid, nagu hiljem selgub, kordavad juba varem ilmunud Gibbsi tööd, mida Einstein ei tundnud. Ja siis korraga 1905. aastal ilmub 26-aastase teadlase sulest kolm artiklit, milledest igaühest üksikult piisaks juba füüsika ajalukku minemiseks. Need on tööd kvantide teooriast, Browni liikumisest ja relatiivsusteooriast.

Artikkel «Valguse tekkimist ja muutumist puudutavast heuristilisest vaatekohast», mis valmis märtsikuus, oli üheks tähtsaks etapiks kvantide teooria loomisel. Valguse kvandi mõiste tõi füüsikasse Max Planck juba 1900. aastal. Planck arvas, et valgusallikad ei kiirga valgust pidevalt, vaid üliväikeste portsjonite, nn. kvantide kaupa. Einstein läks siit julgelt edasi. Einsteini järgi valguse portsjonid ei esine ainult kiirgumisel või neeldumisel, vaid mittepidevus on midagi valguse loomusega kaasaskäivat. Valgus ise, sõltumatult valgusallikast, koosneb kvantidest, mida tinglikult võiksime nimetada ka valguse osakesteks. Einsteini seisukoht leidis suure hulga katselisi kinnitusi. Valguse kvant-iseloomu loeme tänapäeval kindlalt tõestatud faktiks.

Varasem valguse teooria ei suutnud seletada fotoelektrilist efekti, s. o. nähtust, kus valgusega kiiritatava metalli pinnast väljuvad elektronid. Tuginedes oma uuele vaatekohale valguse olemusest, õnnestus Einsteinil fotoelektriliste nähtuste täielik seletamine. Nende tööde eest sai ta hiljem, 1921. aastal, Nobeli füüsikaauhinna.

Järgnevatel aastatel pöördus Einstein veel mitmel korral kvantide teooria juurde tagasi. 1917. aastal leiab ta seose valguse kiirgumise ja neeldumise tõenäosuste vahel. Avastatud seadus kannab tänapäevani Einsteini seaduse nime. Koos india füüsiku Bosega töötab ta välja reeglid statistiliste meetodite rakendamiseks valguse kvantide uurimisel. Edasi juhtub aga kummaline lugu. Kõik teadlased peale väheste erandite on vaimustatud kvantide teooria üha kiirematest edusammudest, kuid Einstein asub siin ootamatult vastupidisele seisukohale. Palju aastaid vaidleb ta ühega aatomiteooria rajajaist — Niels Boh-

riga — väites, et füüsikaline pilt, mida annab see teooria, on ebatäielik. Sellele arvamusele jäi ta oma elu lõpuni. Kas Einsteinil oli õigus, selle kohta ei saa me praegu midagi öelda. On fakt, et kaasaegne aatomite ning kvantide teooria, vaatamata oma edusammudele loodusnähtuste seletamisel, ei ole loogilise ranguse ning lõpetatuse poolest võrreldav relatiivsusteooriaga. Kas see õigustab aga kvantide teooria hukkamõistmist, on küsitav.



Albert Einstein.

Teine töö, mis valmis Einsteinil 1905. aastal (maikuus), käsitles vedelikus hõljuvate väikeste aineosakeste korrapäratut liikumist (nn. Browni liikumist), mida on võimalik jälgida mikroskoobi all. See artikkel avas Browni liikumise olemuse kui vedeliku molekulide põrgete tagajärje ja viis molekulide olemasolu katselisele kinnitamisele. Tuginedes sellele tööle, osutus hiljem võimalikuks katseliselt määrata antud ruumalas oleva gaasi molekulide arvu.

30. juunil 1905. aastal saab ajakirja «Annalen der

Physik» toimetus Einsteinilt juba kolmanda uurimuse selle aasta jooksul. Töö, mis valmis 5—6 nädala jooksul, kannab pealkirja: «Liikuvate kehade elektrodünaamikast». Siin on esitatud kõik erirelatiivsusteooria põhiseisukohad. Töö ise on kirjutatud erakordse selgusega, nii et teda loetakse veel tänapäevalgi üheks paremaks erirelatiivsusteooria esituseks.

Lorentz, Poincaré ja mõned teised uurijad püüdsid Michelson-Morley katse tulemust seletada mitmesuguste kunstlike hüpoteeside abil (näiteks oletati, et kiiruse kasvamisel elektroni liikumissuunalised mõõted vähenevad), loobumata sissejuurdunud kujutlustest ruumi ja aja kohta. Einstein seevastu nägi selgesti, et uus teooria peab olema eelkõige just uus ruumi ja aja teooria. Uue teooria aluseks võttis ta kaks vaatlustega kooskõlas olevat postulaati.

1. Loodusseadused avalduvad kõigis inertsiaalsüsteemides täpselt ühtemoodi.

2. Valguse kiirus vaakuumis on kõigis inertsiaalsüsteemides üks ja seesama.

Nendest kahest postulaadist tuletus täiesti rangelt terve relatiivsusteooria.

Esimesed neli aastat pärast erirelatiivsusteooria ilmumist valitseb vaikus. Alles 1909. aastal ilmub korraga terve laviin teaduslikke töid, mis kõik käivad relatiivsusteooria kohta. Paljudele füüsikutele tunduvad relatiivsusteooria järeldused nii ebatavalistena, et nendega ei suudetud harjuda. Tekib erakordselt äge teaduslik diskussioon. Mõnekümne-leheküljelise töö vastukajana ilmub teaduslikus kirjanduses tuhandeid lehekülgi küll relatiivsusteooria poolt, küll vastu. Kurioosumina tundub, et veel 1938. aastal, kui Ives avaldas oma eespoolkirjeldatud katse tulemused, ei uskunud ta ise relatiivsusteooriasse, vaid püüdis mõõtmise resultaate seletada klassikalise füüsika kujutluste abil. Ometi on Ivesi katse üks kindlamatest relatiivsusteooria kinnitustest. On ka huvitav, et Nobeli auhinda ei juletud Einsteinile anda relatiivsusteooria eest, kuigi see on tema töödest kahtlemata kõige kaugemale ulatuva mõjuga.

Tuleb öelda, et katsed sõdida relatiivsusteooria vastu ulatuvad kuni tänapäevani. Harva küll, kuid ikkagi ilmub teaduslikus kirjanduses üksikuid artikleid, kus püütakse relatiivsusteooriast mööda minna. Need katsed on rela-

tiivsusteooriaga võrreldes nii abitud, et nende juures pole mõtet peatuda.

Kõige selle umbusu taustal, mida üksikud õpetlased relatiivsusteooria vastu tundsid, polegi liiga imekspandav seisukoht, mida avaldas 1939. aastal üks Eestis ilmunud raamat («Nobeli auhind», Tartu, 1939):

«Et relatiivsusteooria kuulub suurel määral tunnetusteoreetilisele alale, siis on sellest eriti filosoofid huvitatud olnud. Enamik filosoofe pooldas Einsteini seisukohti, ainult Bergson asus kahtlevale seisukohale. Relatiivsusteooria pole erilist kinnitust leidnud, samuti pole teda ümber lükatud, ja kõmu selle ümber on suurel määral asjatu olnud.»

Need laused ei vaja kommentaare. Siin on ilmselt tegemist vastukajaga sellele ajajärgule, kus relatiivsusteooria üle rääkisid kõik, nii asjatundjad kui võhikud. «On väga iseloomulik, et Aristarchosest kuni Einsteinini mitte ükski füüsikalistest teooriatest ei ole pannud ühiskonna laiu ringe nii lainetama kui teooriad, mis puudutasid sisseharjunud vaateid ajale ja ruumile.» [137]

Huvitav on Einsteini oma pool-humoristlik arvamus relatiivsusteooria loomise kohta:

«Kui ma endalt küsisin, millest see tuleb, et just mina relatiivsusteooria leidsin, siis näib mulle vastus järgnevas peituvat: normaalne täiskasvanu ei mõtle aja ja ruumi probleemidest. Kõik, mida siin mõelda on, arvab ta end juba varases nooruses mõelnud olevat. Mina seevastu arenesin nii aeglaselt, et hakkasin aja ja ruumi üle mõtisklema alles siis, kui juba täiskasvanu olin. Loomulikult tungisin ma siis sügavamale nendesse probleemidesse, kui seda harilikult laps teeb.»

Einsteini teaduslik looming kasvab lühikese aja jooksul üsna soliidseks. 1907. aasta lõpuks on tal ilmunud juba 22 teaduslikku tööd, kuid töökoht Berni patendibüroos on endine. Einstein ise oli seisukohal, et teaduslikku tööd saab teha kõikjal. Esinedes rea aastate pärast Londonis kõnega hitlerlikult Saksamaalt pagenud teadlaste küsimuses, juhtis ta tähelepanu sellele, et peale ülikoolide on teadlaste jaoks veel palju töökohti. Näitena tõi ta tuletornivalvuri, kellel peaks jääma küllalt aega teaduslikuks uurimistööks.

137 Tsitaat M. Laue raamatust «Füüsika ajalugu».

Uute teooriate edu viib Einsteini lähemasse kontakti teaduslike ringkondadega. 1908. aastal saab ta loengute pidamise õiguse Berni ülikoolis. Talvel 1908/1909 loeb ta seal oma esimest kursust «Kiirgusteooria» neljast kuulajast koosnevale auditooriumile. 1909. aasta sügisel on Einstein juba Zürichi ülikooli teoreetilise füüsika erakorraline professor, 1911. aastal aga korraline professor Praha saksa ülikoolis. Suvel 1912 pöördub Einstein tagasi Zürichisse, kus ta asub matemaatilise füüsika professorina tööle samasse tehnikaülikooli, mille ta ise 12 aastat tagasi lõpetas. 1913. aastal valitakse ta Preisi Teaduste Akadeemia liikmeks ja aasta hiljem saab äsja-avatud Keiser Wilhelmi nimelise Füüsikainstituudi (nüüd Max Plancki nimeline Instituut) direktoriks. Samal ajal on ta ka Berliini ülikooli professoriks.

Neil aastail hakkab Albert Einstein eriti intensiivselt töötama üldise relatiivsusteooria loomisel. Üks Einsteini lähemaid kaastöölisi, poola füüsik L. Infeld jutustab, et probleem «mis toimub vabalt langevas liftis» kerkis Einsteinil juba 16-aastase noormehena. Taoliste probleemide süvendatud uurimisele asus ta varsti pärast erirelatiivsusteooria loomist.

Vajadust erirelatiivsusteooria järele tundsid sajandi algul paljud füüsikud, üldine relatiivsusteooria seevastu ei surunud end kellelegi peale. Võib öelda, et Einstein oli ainuke inimene, kes nägi erirelatiivsusteoori küündimatust ning vajadust üldisema teooria järele. Isegi Max Planck ütles Einsteinile: «Nüüd on kõik nii hästi välja selgitatud, milleks te veel tegelete nende probleemidega.» Kuid Einstein ei loobunud. Newtoni gravitatsiooniseadus ei mahtunud erirelatiivsusteooriasse, see õhutas Einsteini uute radade rajamisele. Järk-järgult koorus tõde lagedale, ning 1916. aastal ilmunud tööga «Üldise relatiivsusteooria alused» sai alguse üldine relatiivsusteooria niisugusel kujul, nagu me seda tänapäeval tunneme. Einstein ise arvas, et ilma temata oleks üldine relatiivsusteooria tänaseni loomata, ning siin on tal vististi õigus. Erirelatiivsusteooria oleks varsti loodud ka ilma temata, üldist relatiivsusteooriat aga niipea mitte.

Üldise relatiivsusteooria üheks olulisemaks tulemuseks on äratundmine, et meid ümbritsev maailm on mitteeukleidilise iseloomuga (s. o. kõver maailm). Tegelikus maailmas kehtivad geomeetria seadused pole nii lihtsad, nagu

arvati aastatuhandeid. Materialistidele on eriti oluline üldise relatiivsusteooria seisukoht, et maailma geomeetrilised omadused on määratud maailmas oleva mateeria poolt. Nende tõdede äratundmine tekitas teadlaste arusaamistes sõna tõsises mõttes revolutsiooni, mida võib võrrelda ühe varemtoimunud murranguga, ja nimelt avastusega, et Maa ei ole tasane, vaid kerakujuline. Et maapind on kõver kerapind, sellega on juba ammu kõik harjunud. Kaugeltki pole aga harjutud sellega, et ka maailmaruum võiks olla kõver.

Üldise relatiivsusteooria ümber tekkis võib-olla veelgi ägedam mõtetevahetus kui selle eelkäija, erirelatiivsusteooria üle. Max Laue kirjutas 1921. aastal: «Palju kiitust ja palju pahandamist — see on üldise relatiivsusteooria osa käesoleval ajal. Iseloomulik on seejuures, et kõige suuremad lärmajad nii ühelt kui teiselt poolt peaaegu mitte midagi sellest teooriast aru ei saa.» Tänapäevaks on olukord muidugi palju muutunud, kuid ikkagi ilmub siin ja seal artikleid, mis püüavad gravitatsiooniprobleemi lahendada ilma üldise relatiivsusteooria abita. Oma loogilise ranguse ning matemaatilise ilu poolest ükski nendest katsetest ei kannata välja võrdlust relatiivsusteooriaga.

Kaunis arvukas on füüsikute rühm eesotsas nõukogude akadeemiku V. A. Fockiga, kes võtavad omaks küll üldise relatiivsusteooria matemaatilise osa, kuid tõlgendavad seda erinevalt Einsteinist. Ka see rühm ei ole suutnud oma seisukohti üldtunnustatuiks teha. Liiga kaalukad on Einsteini pooldajate, sealhulgas ka suure hulga silmapaistvate nõukogude teoreetikute argumendid.

Üldine relatiivsusteooria on erakordselt rikkaliku sisuga. Teaduslikus kirjanduses ilmub pidevalt selle teooria edasiarendamisele pühendatud töid, kuid teha on jäänud veel väga palju.

Pärast seda, kui 1919. aasta päikesevarjutuse ajal teostatud mõõtmised kinnitasid üldise relatiivsusteooria ennustust valguskiire kõrvalekaldumise kohta Päikese gravitatsiooniväljas, saavutas Einstein oma kuulsuse tipu. Tema ise märkas seda võib-olla kõige vähem. Jätkus innukas töö üldise relatiivsusteooria küsimuste juures. Samal ajal võtab ta osa paljudest teaduslikest ning patsifistlikest kongressidest, teostab maailmareise ja peab külalisloenguid võõrastes linnades ning ülikoolides. Einstein valitakse paljude maade teaduslike seltside liikmeks. 1926.

aastal saab ta ka Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliikme nimetuse. Kõik see väline edu ei sega Einsteini teaduslikku tööd, seda tänu tema suurele energiale ning erakordsele kontsentreerumisvõimele. Nõukogude akadeemik A. F. Joffe näiteks jutustab:

«Mulle meenub sageli juhtum, mis näitab, kuidas Einstein ehitab oma maailmapilti: kunagi ta huvitus minu uurimustest kristallide omaduste kohta ning palus neid endale esitada. Kell 3 päeval asusin ma selle ülesande juurde ning lõpetasin kahe tunni pärast. Siis algas erakordne uute faktide ja ideede omandamise protsess, nende vastandamine Einsteini enda füüsikalise maailmapildi kõige erinevamatele külgedele, ja see kõik kestis 9 tundi — kuni kella kaheni öösel. Kogu see aeg oli Einstein sedavõrd haaratud oma mõtetest, et ta kõike ümbritsevat peaaegu üldse tähele ei pannud: ta õhtustas näiteks nii, et naise käsu peale võttis kahvliga toitu ja pistis seda suhu, ise vaevalt taibates, mida ta sööb.»

Einsteini erakordset kontsentreerumisvõimet näitab veel järgmine episood Zürichi ülikoolis peetud loengutelt, millest jutustab üks tema kuulajatest:

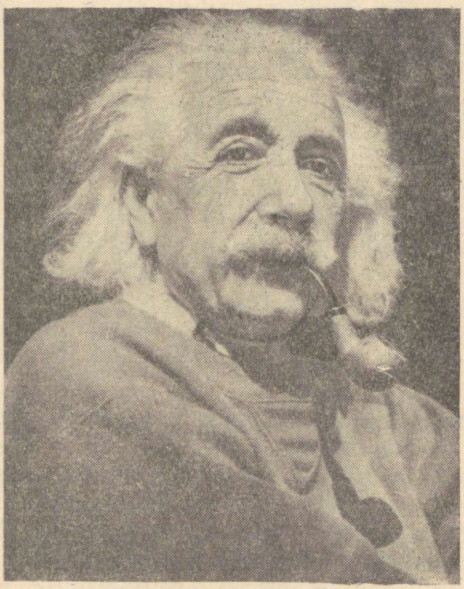
«Kogu selle aja jooksul jäi Einstein minu mälestuse järgi ainult ühel korral kimpu. Ta peatus äkki keset loengut ja ütles: «Siin peab olema üks rumal matemaatiline teisendus, mida ma praegu kuidagi ei leia. Võib-olla keegi härradest näeb seda?» Loomulikult me ei näinud. «Siis jätke veerand lehekülge vahele! Ei maksa aega kaotada. Tulemus on niisugune . . .» Umbes kümme minutit hiljem hüüdis Einstein ühe arenduse keskel: «Käes!» Me ei saanud esialgu aru, mis on käes. Komplitseeritud edasise arenduse jooksul leidis ta veel aega järele mõelda, kuidas küll võiks otsitav teisendus välja näha. See oli tüüpiline joon Einsteini juures.»

Sama Einsteini loengute kuulaja jutustab veel teise huvitava juhtumi:

«Ma külastasin teda järgmisel päeval. Ta istus oma töötoas matemaatiliste valemitega täidetud paberikuhja ees. Parema käega kirjutades ja vasakul käel oma nooremat poega hoides andis ta seejuures veel vastuseid ehitusklotsidega mängivale vanemale pojale. Sõnadega «Üks silmapilk, ma olen kohe valmis» andis ta lapsehoidja ameti mõneks minutiks mulle üle ja töötas edasi.»

Einsteini viljaka töö Berliinis katkestab ootamatult

fašistide võimuletulek Saksamaal. Einstein oli sel ajal parajasti Šveitsis. 1933. aasta märtsikuus teatab ta, et ei pöördu enam tagasi maale, kus valitseb vägivald ja reaktsioon. Protestiks lahkub ta Preisi ja Baieri akadeemiatest. Baieri akadeemiat süüdistab ta, et see jäi ükskõikseks õpetlaste ja üliõpilaste tagakiusamise ajal. «Ma ei taha kuuluda ühtegi ühingusse, kes käitub niimoodi, isegi kui teda selleks sunnitakse välise survega,» kirjutab ta oma kirjas.



Albert Einstein oma viimastel eluaastatel.

Hitlerlik Saksamaa ei taha tunnustada mitteaaria rassi kuuluvat õpetlast ega ka tema relatiivsusteooriat. Nördimust äratavad reaktsioonilised esinemised relatiivsusteooria kriitika sildi all, mis A. Sommerfeldi sõnade järgi «viisid teaduslikud koosolekud antisemiitlike massimiitingute tasemele». Fašismi rünnakuid relatiivsusteooria ja Einsteini vastu võib võrrelda ainult Galilei ja tema õpetuse jälitamisega inkvisitsiooni poolt.

Samal ajal organiseeritakse Ameerika Ühendriikides Princetonis uus teadusliku uurimise instituut (Institute for Advanced Studies), kuhu kutsutakse tööle rida Saksamaalt emigreerunud matemaatikuid ja füüsikuid. Einstein võttis kutse vastu ning 1933. aastast alates kuni elu lõpuni saab tema koduks Princeton. Siin jätkab ta mõne lähema kaastöölise abil — laialdast koolkonda pole Einsteinil kunagi olnud — üldise relatiivsusteooria edasiarendamist, mida kroonib ka edu. Peamine tähelepanu on tal siiski mujale suunatud.

Einstein on alati vaadanud loodusele kui ühtsele tervikule; järelikult peab ka füüsika moodustama ühtse süsteemi. Selle süsteemi avastamisele, mis algas juba Berliini päevil, pühendab ta ligi 40 viimast aastat oma elust. Einsteini püüdeks on luua teooriat, mis kirjeldaks korraga nii elektromagnetilist kui ka gravitatsioonivälja. Tema arvates moodustavad need kaks välja kokku ühtse füüsikalise objekti, ühtse välja. Ühtse välja teooria loomisel aga, Einsteini oma sõnade järgi, jättis õnn ta maha. Mitu korda näib, et siht on saavutatud, kuid hiljem selgub ikkagi, et tulemused pole rahuldavad. Einstein iseloomustab ühtse välja teooria loomise protsessi järgmiste sõnadega: «On olemas ainult üks tõde, kuid lõputu hulk eksiteid.»

1945. aastal läheb Einstein erru, kuid pingeline töö ühtse välja teooria loomisel jätkub. 1953. aastaks näib, et teooria alused on loodud, põhivõrrandid on koostatud. Tõsi küll, Einstein ise ütleb, et ta ei tea, kuidas neid võrrandeid lahendada, veelgi enam, ta ei tea isegi, kuidas näidata, et nendel võrranditel üldse lahendeid on. Sellele vaatamata on ta tuleviku suhtes optimistlikult häälestatud. Seda optimismi ei jaga enamik füüsikuid, kes loevad ühtse välja teooria loomise katsed viljatuks. Siin on siiski veel vara otsustada. Probleem ise on vundamentaalne ja vastavalt sellele võib selle lõplik lahendamine ka palju aega võtta. Et probleem siiski õigesti püstitatud on, selle kohta on olemas mitmeid viiteid.

Einsteinile olid alati kallid humanismi, inimkonna hüvangu ning rahu ideed — neid on ta kaitsnud jõudu säästmata kogu oma elu jooksul. On rumalus Einsteini süüdistada aatomipommi ilmumises; avastas ju relatiivsusteooria massi ja energia ekvivalentsuse seaduse näol aatomipommi energia-allikad. Et aatomienergiat rakenda-

taks inimeste hävitamiseks, selle vastu on Einstein alati olnud. 1939. aastal pöördub ta kirjaga Ameerika Ühendriikide presidendi Roosevelti poole, milles hoiatab, et tõenäoliselt õnnestub fašistidel varsti aatomipommi valmistamine. See kiri oli kahtlemata üheks ajendiks, mis viis aatomituuma uurimise forsseerimisele Ameerika Ühendriikides. Einstein ei säästnud jõudu, et ära hoida aatomienergia kuritarvitamist. Pärast sõda kirjutab ta: «Meil õpetlastel, kes vabastasid selle koletusliku jõu, lasub hiiglasuur vastutus selle eest, et suunata aatomienergia inimkonna hüvangu, mitte aga hävitamise teenistusse.» Sajad esinemised, artiklid ning intervjuud iseloomustavad Einsteini kui ühte esimestest maailma progressiivsete jõudude ridades.

1954. aastal pühitseti teadusemaailmas Einsteini 75-aastast sünnipäeva. 1955. aasta suvel, mil möödus 50 aastat erirelatiivsusteooria sünnist, oli oodata veelgi suurejoonelisemat juubelit. Ootamatult tõmmati sellele kavatsusele must leinakriips: 18. aprillil 1955. aastal lahkub Albert Einstein. Suri inimene, kelle kohta A. Sommerfeld ütles:

«Filosoofilise mõtlemise niisuguse sügavuse ja järjekindlusega, mida pole looduseuurijate peades varem olnud, Gaussi ja Riemanni meenutava matemaatilise jõuga, püstitas Einstein kümne aasta jooksul hoone, mille ees meie ... seisame, tundes hämmastust ja peapööritust.»

ELEMENTAAROSAKESTE TABEL

Osakese liik	Osakese nimetus	Tähis	Elektrilaeng	Mass	Eluiga sekundites	Lugemisskeemid
	graviton	(g)	0	0	püsiv	
	footon	γ	0	0	püsiv	
Leptonid	neutriino	ν	0	0	püsiv	
	antineutriino	$(\tilde{\nu})$	0	0	püsiv	
	elektron	e^-	-1	1	püsiv	
	positron	e^+	$+1$	1	püsiv	
	μ-mesonid	μ^-	-1	207	$2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \to e^- + \nu + \nu$
		μ^+	$+1$	207	$2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^+ \to e^+ + \nu + \nu$
Mesonid	π-mesonid	π^-	-1	273	$3 \cdot 10^{-8}$	$\pi^- \to \mu^- + \nu$
		π^+	$+1$	273	$3 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \to \mu^+ + \nu$
		π^0	0	264	$\sim 10^{-16}$	$\pi^0 \to \gamma + \gamma$
						$\pi^0 \to e^- + e^+ + \gamma$
	K-mesonid	K^-	-1	966	$1 \cdot 10^{-8}$	$K^- \to \mu^- + \nu$
		K^+	$+1$	967	$1 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \to \mu^+ + \nu$
		K^0	0	965	$1 \cdot 10^{-10}$	$K^0 \to \pi^+ + \pi^-$
		$\overline{K}^0$	0	965	$\sim 5 \cdot 10^{-8}$	$K^0 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$
Barüonid	nukleonid	prooton	p^+	$+1$	1836	püsiv
		antiprooton	p^-	-1	1836	püsiv
		neutron	n	0	1°39	1120	$n \to p^+ + e^- + \nu$
		antineutron	$\tilde{n}$	0	1839	?	$\tilde{n} \to p^- + e^+ + \tilde{\nu}$
	hüperonid	Λ-hüperon*	Λ^0	0	2182	$3 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \to p^+ + \pi^-$
							$\Lambda^0 \to n + \pi^0$
		Σ-hüperonid	Σ^-	-1	2342	$2 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^- \to n + \pi^-$
			Σ^+	$+1$	2328	$1 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^+ \to p^+ + \pi^0$
							$\Sigma^+ \to n + \pi^+$
			Σ^0	0	2326	$\sim 10^{-12}$	$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma$
		Ξ-hüperonid	Ξ^-	-1	2585	$\sim 10^{-10}$	$\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-$
			Ξ^0	0	?	?	$\Xi^0 \to \Lambda^0 + \pi^0$

* Kõnes nimetatakse hüperone järgmiselt: lambda-hüperon, sigma-hüperonid ja ksi-hüperonid.

Tabelis on toodud kõik elementaarosakesed, mis on avastatud kuni 1958. aastani. Osakesi, mille tähis on paigutatud sulgudesse, ei ole seni veel eksperimentaalselt avastatud, kuid nende olemasolu on väga tõenäoline. Peale selle on kindel, et looduses peab esinema ka igale hüperonile vastav antihüperon; tabelis neid toodud ei ole.

Elektrilaeng —1 tähendab, et osakese laeng on võrdne elektroni laenguga, kuna +1 tähendab, et osakese laeng on absoluutväärtuselt elektroni laenguga võrdne, kuid vastasmärgiline. Elektrilaeng 0 tähendab, et osake on neutraalne.

Tabelis on toodud osakese seisumass. Seisumass 0 tähendab seda, et osake ei saa paigal olla, vaid liigub alati valguse kiirusega. Massi mõõtmisel on ühikuks võetud elektroni mass, s. o. tabelis toodud arvud näitavad, mitu korda on osake elektronist raskem. Kas neutriino ja antineutriino mass on täpselt null või erineb sellest õige vähe, pole veel selge.

Märk $\sim$ osakese eluea ees tähendab seda, et tegemist on ainult väga ligikaudse arvuga. Kui osakese eluea kohal on märgitud «püsiv», siis tähendab see, et osake iseenesest ei lagune. Küll võib ta aga teiste osakestega koos muunduda. Tuletame meelde näiteks elektroni ja positroni annihileerumist, milles oli eespool juttu. Annihilatsiooniprotsessi skeem on järgmine: $e^+ + e^- \to \gamma + \gamma$.

Tabeli viimases veerus on antud osakeste lagunemisskeemid. Näiteks skeem $\mu^- \to e^- + \nu + \nu$ tähendab seda, et negatiivselt laetud μ-mesoni lagunemisel tekivad elektron ja kaks neutriinot. Analoogiliselt tuleb tõlgendada ka teisi lagunemisskeeme.

Mõõtmised näitavad, et 98,8% neutraalsetest π-mesonitest laguneb skeemi $\pi^0 \to \gamma + \gamma$ kohaselt, kuna 1,2% laguneb skeemi $\pi^0 \to e^- + e^+ + \gamma$ kohaselt. Üsna tühine osa neutraalsetest π-mesonitest laguneb veel järgmise skeemi kohaselt.

$$\pi^0 \to e^+ + e^+ + e^- + e^-,$$

mida tabelis ei ole märgitud. Samuti ei esine tabelis skeeme $\pi^+ \to e^+ + \nu$ ja $\pi^- \to e^- + \nu$, mille järgi laguneb väike osa laetud π-mesonitest.

Kaks erinevat lagunemisskeemi on ka Λ-hüperonil ja positiivselt laetud Σ-hüperonil. Skeemi $\Lambda^0 \to p^+ + \pi^-$ kohaselt laguneb 68% Λ-hüperonidest, kuna ülejäänud lagunevad teise skeemi järgi. Positiivsetest Σ-hüperonidest laguneb kummagi skeemi järgi umbes pool.

Õige palju lagunemisviise on avastatud K-mesonitel. Järgnevas tabelis on toodud olulisemad praegu teadaolevatest K-mesonite lagunemisskeemidest ja protsent, mis näitab kui suur osa K-mesonitest antud skeemi järgi laguneb.

Olgu veel rõhutatud, et lagunemisskeemide olemasolu ei tähenda seda, nagu koosneksid ühed elementaarosakesed teistest. Näiteks skeem $\Lambda^0 \to p^+ + \pi^-$ ei tähenda Λ-hüperoni koosnemist prootonist ja negatiivsest π-mesonist. Λ-hüperon on jagamatu tervik, mis $3 \cdot 10^{-10}$

sekundit pärast tekkimist muundub prootoniks ja π-mesoniks. Just selles muundumisprotsessis avaldub osakese libahundi-loomus, millest raamatus juttu on.

Lagunemisskeem	Antud skeemi järgi lagunevate osakeste protsent	Lagunemisskeem	Antud skeemi järgi lagunevate osakeste protsent
$K^+ \to \mu^+ + \nu$	59	$K^- \to e^- + \pi^0 + \nu$	?
$K^+ \to \pi^+ + \pi^0$	27,5	$K^0 \to \pi^+ + \pi^-$	85
$K^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$	6,1	$K^0 \to \pi^0 + \pi^0$	15
$K^+ \to e^+ + \pi^0 + \nu$	3,3	$\overline{K}^0 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	?
$K^+ \to \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$	2,2	$\overline{K}^0 \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$	?
$K^+ \to \mu^+ + \pi^0 + \nu$	1,9	$\overline{K}^0 \to \mu^+ + \pi^- + \nu$	?
$K^- \to \pi^+ + \pi^- + \pi^-$	?	$\overline{K}^0 \to \mu^- + \pi^+ + \nu$	?
$K^- \to \pi^- + \pi^0$	?	$\overline{K}^0 \to e^+ + \pi^- + \nu$	?
$K^- \to \mu^- + \nu$	?	$\overline{K}^0 \to e^- + \pi^+ + \nu$	?

RAAMATUS ESINEVAID ISIKUNIMESID

Arago, Dominique François (1786—1853) — prantsuse astronoom, füüsik ja poliitik. Uuris eriti valguse polarisatsiooni ning magnetismi nähtusi.

Aristarhhos, Samosest (umbes 320—250 e. m. a.) — vanakreeka astronoom. Tema vaadete kohaselt asetses maailma keskpunktis Päike, kuna Maa ja teised planeedid liikusid ringikujulisi teid mööda ümber Päikese. Arvestas ka Maa pöörlemist ümber oma telje. Kinnistähti luges ta kaugele liikumatule taevasfäärile kinnitunuiks. Mõõtis Kuu ja Päikese kauguse Maast, kuid instrumentide puudulikkusest tingituna sai ebaõiged tulemused.

Aristoteles (384—322 e. m. a.) — vana-kreeka filosoof, orjandusliku korra peamine ideoloog. Kõikus materialismi ja idealismi vahel. Aristotelese õpetus, muudetuna katoliku kiriku poolt dogmaks, oli keskajal kammitsaks teaduse arengule.

Bacon [*beikön*], Francis (1561—1626) — inglise filosoof-materialist ja riigimees. Võitles keskaegse skolastika vastu.

Baer [*bäär*], Karl (1792—1876) — üks XIX sajandi silmapaistvamaid loodusteadlasi. Sündis Eestis, kõrgema hariduse sai Tartu ülikoolis. 1828. aastast alates Peterburi akadeemia liige. Töötas mitmesugustes õppe- ning teaduslikes asutustes nii Venemaal kui ka väljaspool. Suri Tartus. Baer on embrüoloogia rajaja. Silmapaistvad on ka tema geograafia-alased tööd.

Bergson, Henri (1859—1941) — prantsuse filosoof-idealist.

Bessel, Friedrich Wilhelm (1784—1846) — saksa astronoom. Uuris kinnistähtede omaliikumisi jm. Bessel töötas välja astronoomiliste riistade vigade teooria. Märkimisväärsed on ka tema geodeesia-alased tööd.

Bohr [*boor*], Niels (sünd. 1885) — taani füüsik, üks kvantide teooria rajajatest. On avaldanud rea uurimusi aatomite, molekulide ja aatomituumade teooriast. 1929. aastal valiti ta Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliikmeks. 1943. aastal lahkus salaja hitlerlaste poolt okupeeritud Taanist ja asus esimese aatomipommiga seotud teoreetiliste küsimuste lahendamisele.

Bólyai [*boo'jai*] János (1802—1860) — ungari matemaatik. Jõudis juba 1825. aastaks mitteeukleidilise geomeetria põhialusteni; trükist ilmus vastav töö 1832. aastal. Palju jõudu pühendas ta geomeetria aluste loomisele, kuid tolleaegne geomeetria tase ei olnud selle ülesande lahendamiseks küllaldane — seda tehti alles 50 aas-

tat hiljem. Suri 5 aastat enne seda, kui tema ja Lobatševski ideed leidsid üldise tunnustuse.

Bose, S. N. (sünd. 1892) — india füüsik. On avaldanud teedrajavaid uurimusi statistilise füüsika alal.

Bradly [*brädli*], James (1693—1762) — inglise astronoom, 1742. aastast alates Greenwichi observatooriumi direktor. Avastas tähtede aastase aberratsiooni ja Maa telje võnkumise.

Brahe, Tycho (1546—1601) — taani astronoom. Teostas oma aja kohta ülitäpseid planeetide, komeetide ja kinnistähtede vaatlusi. Tema vaatlusandmetele tuginedes avastas Kepler planeetide liikumise seadused. Brahe ei tunnistanud heliotsentrilist maailmasüsteemi; tema arvates Päike ja Kuu liiguvad ümber Maa, kuna kõik teised planeedid liiguvad ümber Päikese.

de Broglie [*debrolji*], Louis Victor (sünd. 1892) — silmapaistev prantsuse füüsik-teoreetik, Pariisi Teaduste Akadeemia alaline sekretär, Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliige. 1924. aastal ilmunud tööga «Uurimused kvantide teooriast» pani ta aluse kaasaegsele aatomiteooriale.

Broun [*braun*], Robert (1773—1858) — inglise botaanik. Avastas muuseas vedelikus hõljuvate väga väikeste aineosakeste korrapäratu liikumise, nn. Browni liikumise.

Bruno, Giordano (1548—1600) — itaalia mõtleja, materialist ja ateist. Arendas edasi Kopterniku õpetust ja väitis, et Päike on ainult üks kinnistähtedest ja et maailmal ei ole piire, ta on lõpmatu. Inkvisitsioon süüdistas Brunot ketserluses ja põletas ta elusalt.

Cavendish [*kävöndiš*], Henry (1731—1810) — inglise füüsik ja keemik. Uuris elektrinähtusi ning gravitatsiooni. Tal õnnestus kindlaks määrata Maa mass. Cavendishi töödest keemia alal võiks märkida vee keemilise koostise kindlakstegemist, põlemisprotsessi uurimist jm.

Curie [*kürii*] Marie (1867—1934) — silmapaistev poola päritoluga füüsik ja keemik, töötas Pariisis. Tema tööd panid aluse radioaktiivsuse igakülgsele teaduslikule uurimisele. Avastas koos oma mehega kaks uut radioaktiivset elementi — polooniumi ja raadiumi. Marie Curie oli kahekordne Nobeli preemia laureaat ja paljude maade teaduslike ühingute liige. 1926. aastast alates ka Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliige.

Raamatus nimetatud Irène ja Eve olid tema tütred. Neist Irène Joliot-Curie (1897—1956) sai silmapaistvaks radioaktiivsuse ja aatomituuma uurijaks.

Diogenes, Sinoopest (ligikaudsed eluaastad 404—323 e. m. a.) — vana-kreeka filosoof, elas Ateenas ja Korintoses. Õpetas tagasipöördumist looduse ja lihtsa elu juurde, et vabastada inimese seesmist mina.

Dirac [*dirak*], Paul Adrien Maurice (sünd. 1902) — inglise füüsik-teoreetik, Cambridge'i ülikooli professor, 1933. aasta Nobeli preemia laureaat. Dirac on üks kvantmehaanika, samuti ka kvantelektrodünaamika rajajatest. Märkida tuleb ka töid statistilise füüsika jm. aladel. 1931. aastast Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliige.

Doppler, Christian (1803—1853) — austria füüsik ja astronoom, uuris peamiselt valgusnähtusi. 1842 aastal põhjendas teoreetiliselt

nn. Doppleri printsiipi akustikas ja optikas, mis seisneb selles, et vaatleja poolt vastuvõetud õhuvõngete (või elektromagnetilise laine võngete) arv sekundis sõltub võnkumisallika liikumisest vaatleja suhtes. Relatiivsusteooria täpsustas Doppleri poolt saadud valemit.

Eddington [*ediŋtən*], Arthur Stanley (sünd. 1882) — silmapaistev inglise astronoom, Cambridge'i ülikooli professor. Eddington on tuntud teoreetiliste töödega tähtede seesmise ehituse ja relatiivsusteooria alalt.

Empedokles (490—430 e. m. a.) — vana-kreeka filosoof, arst ja luuletaja. Õpetas, et maailm koosneb neljast elemendist: maast, veest, õhust ja tulest.

Eukleides (umbes 315—255 e. m. a.) — vana-kreeka matemaatik. Kogus kõik oma aja matemaatilised teadmised 15-köitelisse teosesse «Elemendid», mis on avaldanud mõju matemaatika arengule kuni uuema ajani. Geomeetria aksiomaatiline ülesehitus Eukleidese töös on olnud eeskujuks geomeetria aluste uurijaile.

Eötvös [*ötvöš*], Loránd (1848—1919) — ungari füüsik. Uuris peamiselt gravitatsiooninähtusi, milleks leiutas erilised kaalud. Oma uurimustega näitas ta raske ja inertse massi ekvivalentsust.

Fizeau [*fizoo*], Armand Hippolyte Louis (1819—1896) — prantsuse füüsik. Tuntud on tema katse valguse kiiruse määramiseks laboratoorsel teel. Uuris mitmesuguseid valgusnähtusi ja leiutas meetodi kehade soojusliku paisumise mõõtmiseks.

Fitzgerald [*fitsdže'rəld*], George (1851—1901) — inglise füüsik. On avaldanud rea uurimusi valguse elektromagnetilisest teooriast.

Fock, Vladimir Aleksandrovitš (sünd. 1898) — üks silmapaistvamatest nõukogude füüsikutest-teoreetikutest, akadeemik. On avaldanud arvukalt uurimusi kvantmehaanika, elektrodünaamika, valguse difraktsiooni teooria, üldise relatiivsusteooria jm. kohta.

Foucault [*fukoo*], Jean Bernard Léon (1819—1868) — prantsuse füüsik. Uuris induktsioonivoole massiivsetes metallkehades (Foucault' voolud). Koos Fizeau'ga teostas mitmesuguseid eksperimente valguse uurimisel. Kuulus on ka Foucault' pendlikatse.

Fresnel [*frenel*], Augustin Jean (1788—1827) — prantsuse füüsik. Arendas välja valguse kui lainetusnähtuse teooria ja kinnitas seda katsetega. Uuris valguse difraktsiooni, interferentsi, polarisatsiooni, kaksikmurdumist jm.

Friedmann, Aleksandr Aleksandrovitš (1888—1925) — nõukogude matemaatik, avaldas töid teoreetilise mehaanika, matemaatika ja relatiivsusteooria kohta. Üks kaasaegse turbulentsuse teooria ja dünaamilise meteoroloogia loojatest.

Galilei, Galileo (1564—1642) — silmapaistev itaalia füüsik ja astronoom. Vaatles esimesena taevast teleskoobi abil, kusjuures avastas neli Jupiteri kuud, päikeselaigud, Päikese pöörlemise ümber oma telje, Kuu pinna ehituse jm. Formuleeris esimesena kiiruse ja kiirenduse mõisted täiesti üldisel juhul. Avastas inertsiseaduse, kehade vaba langemise seaduse ja keha liikumise seaduse. Väljendas esimesena ideed liikumise relatiivsest iseloomust. Oli silmapaistev võitleja katoliku kiriku poolt dogmatiseeritud Aristotelese õpetuse vastu ning uue renessansiaegse teaduse eest. Ko-

perniku õpetuse kaitsmise pärast oli kaks korda inkvisitsiooni kohtu all. Tema peateosed on «Dialoog kahest maailmasüsteemist» (1632) ja «Vestlused ja matemaatilised tõestused kahest uuest teadusest» (1638).

Galle, Johann Gottfried (1812—1910) — saksa astronoom, meteooride ja komeetide uurija.

Gauss, Karl Friedrich (1777—1855) — silmapaistev saksa matemaatik, kes on avaldanud töid ka astronoomia, geodeesia ja füüsika alalt. 1807. aastast kuni oma elu lõpuni oli ta Göttingeni ülikoolis matemaatika ja astronoomia kateedri juhatajaks. Oma elu esimesel perioodil uuris ta matemaatika probleeme. Muuhulgas andis meetodi, kuidas konstrueerida sirkli ja joonlaua abil korrapärast 17-nurka. Edasi järgnesid tööd astronoomia ja geodeesia alalt. Gaussi loetakse kõrgema geodeesia rajajaks; see on teadus, mis uurib Maa pinna tõelist kuju. Gaussi füüsika-alastest töödest tuleks esile tõsta elektromagnetismi nähtuste uurimist.

Gibbs [*gibz*], Josiah Willard (1838—1903) — ameerika füüsik-teoreetik. Avaldas teedrajavaid uurimusi termodünaamika ja statistilise füüsika alalt.

Ginzburg, Vitali Lazarevitš (sünd. 1916) — nõukogude füüsik-teoreetik, Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige. On avaldanud rea töid astrofüüsika, relatiivsusteooria jm. alalt.

Hamilton [*hämiltn*], William Rowan (1805—1865) — inglise matemaatik, 1827. aastast alates Dublini ülikooli astronoomia professor, hiljem Iiri teaduste akadeemia president. On avaldanud töid arvuteooria, mehaanika jt. aladelt.

Helmholtz, Hermann (1821—1894) — saksa füüsik ja füsioloog. Formuleeris matemaatiliselt energia jäävuse seaduse, uuris kuulmise ja nägemise mehhanismi, esitas värvide tajumisteooria, leiutas erilised resonaatorid hääle koostistoonide analüüsimiseks jm.

Hertz, Heinrich Rudolf (1857—1894) — saksa füüsik. Tõestas eksperimentaalselt elektromagnetiliste lainete olemasolu ja uuris nende omadusi. Näitas, et valgus pole midagi muud kui elektromagnetiline laine.

Hubble [*häbbl*], E. — ameerika astronoom, avastas 1929. aastal punanihke kaugete udukogude spektrijoontes (nn. Hubble'i efekt).

Hurwitz, Adolf (1859—1919) — saksa matemaatik, 1892. aastast alates Zürichi tehnikaülikooli professor. Töötas matemaatilise analüüsi ja arvuteooria alal.

Huygens, [*höighöns*] Christian (1629—1695) — hollandi füüsik, matemaatik ja astronoom. Valguse kui lainetusnähtuse teooria looja. Leiutas pendelkella. Tegi silmapaistvaid avastusi optiliste süsteemide, eriti pikksilmade konstrueerimisel.

Infeld, Leopold (sünd. 1898) — poola füüsik, on avaldanud rea uurimusi elektrodünaamika, relatiivsusteooria jt. aladelt. Oli üks Einsteini lähematest kaastöölistest. Praegu Poola Teaduste Akadeemia president.

Ivanenko, Dmitri Dmitrievitš (sünd. 1904) — nõukogude füüsik-teoreetik, Moskva ülikooli professor. Oletas esimesena, et aatomituum koosneb prootonitest ja neutronitest. On arendanud tuumatungide teooriat jm. Eriti tuleb märkida tema töid gravitatsiooninähtuste teoreetilisel käsitlemisel.

Ives [*aivs*], H. E. — ameerika füüsik, avastas 1938. aastal nn. transversaalse Doppleri efekti.

Joffe, Abram Fjodorovitš (sünd. 1880) — nõukogude füüsik, akadeemik. On avaldanud uurimusi väga mitmesuguste probleemide üle. Viimasel ajal töötab pooljuhtide uurimisel.

Kepler, Johannes (1571—1630) — silmapaistev saksa astronoom. Oma raske ning kireva elu jooksul jõudis ta teha suure hulga silmapaistvaid avastusi. Siia kuuluvad nn. Kepleri seaduste avastamine ja terve rida töid planeetide liikumise ning optika alalt. Kepleri tööd kinnitasid lõplikult heliotsentrilise maailmasüsteemi õigsust.

Kirchhoff, Gustav Robert (1824—1887) — saksa füüsik, üks teoreetilise füüsika arendajaid. Uuris elastsusnähtusi, optika küsimusi, elektrivoolu seadusi jm., oli kaastegev spektraalanalüüsi meetodi väljatöötamisel.

Knight [*nait*], Andrew (1759—1838) — inglise botaanik, uuris mitmesuguseid taimede hübridiseerimisega seotud küsimusi. Tegi kindlaks raskustungi osatähtsuse taimede kasvuprotsessis.

Kopernik, Mikolaj (1473—1543) — poola astronoom, matemaatik ja arst, silmapaistev eriti heliotsentrilise maailmasüsteemi loojana. Uue maailmasüsteemi ideed tekkisid tal juba aastatel 1507—1512, kuid nende matemaatiline läbitöötamine nõudis tublisti aega. Lõplikul kujul ilmus uue maailmasüsteemi kirjeldus trükist alles 1543. aastal raamatus «Taevasfääride pöörlemisest». Kuna heliotsentriline süsteem oli vastuolus katoliku kiriku dogmadega, kanti see raamat 1616. aastal keelatud kirjanduse nimekirja, kus ta püsis kuni 1822. aastani. Kopernik ei arendanud uut maailmapilti kaugemale kui see oli vajalik praktilise astronoomia jaoks. Nii näiteks ei loobunud ta kujutlusest, et maailm lõpeb kinnistähtede sfääriga.

Lagrange [*lagraž*], Joseph Louis (1736—1813) — prantsuse matemaatik ja mehaanik. Avaldas töid variatsiooniarvutuse, algebraliste võrrandite, analüütilise mehaanika jm. aladelt.

Landau, Lev Davidovitš (sünd. 1908) — nõukogude füüsik-teoreetik, 1946. aastast alates akadeemik. On teostanud silmapaistvaid uurimusi tahke keha teooria ja ülijuhtivuse, samuti ka tuumafüüsika ja kosmiliste kiirte alal.

Laplace [*lapla'ss*], Pierre Simon (1749—1827) — prantsuse matemaatik ja astronoom. Avaldas suure hulga töid matemaatika, astronoomia ja füüsika alalt. Eriti tuntuks said tema uurimused planeetide ja nende kaaslaste liikumise ning tõenäosusteooria alalt.

Laue, Max (sünd. 1879) — saksa füüsik. Avastas röntgenikiirte interferentsi ja tõestas seega röntgenikiirte lainelise iseloomu. Avaldas töid ka relatiivsusteoorias. Laue on 1914. aasta Nobeli preemia laureaat. 1930. aastast Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliige.

Leverrier [*löveri'e*], Joseph (1811—1877) — prantsuse astronoom. Uuris Päikesesüsteemi stabiilsuse küsimusi ning planeetide liikumise teooriat.

Lobatševski, Nikolai Ivanovitš (1792—1856) — tuntud vene matemaatik, oli aastatel 1827—1846 Kaasani ülikooli rektoriks. 1826. aastal esines ta Kaasani ülikoolis ettekandega uuest geomeetriast, mida tänapäeval nimetatakse Lobatševski geomeetriaks. Vastavasisuline töö ilmus trükist 1830. aastal. Lobatševski tööd võeti algul vastu umbusuga, ja alles 12 aastat pärast autori surma leidsid nad üldise tunnustuse.

Lorentz, Hendrik Antoon (1853—1928) — hollandi füüsik. Sai

tuntuks oma töödega elektroniteooria ja elektromagnetiliste nähtuste teooria alalt. Lorentz pani aluse liikuvate kehade elektrodünaamikale, kuid ei osanud seda lõpuni arendada. Ta leidis teisendused (nn. Lorentzi teisendused), mis kirjeldavad üleminekut ühest inertsiaalsüsteemist teise, ja näitas, et elektromagnetismi seadused on kõigis inertsiaalsüsteemides ühesugused.

Maxwell [*mäksuõl*], James Clerk (1831—1879) — inglise füüsik. Tema väljapaistvamad tööd kuuluvad gaaside kineetilise teooria ja elektromagnetilise välja teooria alale. Teoreetilistel kaalutlustel ennustas valguse kiirusega levivate elektromagnetiliste lainete olemasolu looduses. Juba 1865. aastal avaldas mõtte, et valgus pole muud kui elektromagnetiline lainetus.

Michelson [*maikelson*], Albert Abraham (1852—1931) — ameerika füüsik, sai tuntuks oma töödega optika alal. 1927. aastal määras väga suure täpsusega valguse kiiruse. Tema katsed, mille eesmärgiks oli Maa liikumise määramine absoluutse ruumi suhtes, said aluseks erirelatiivsusteooriale.

Minkowski, Hermann (1864—1909) — saksa matemaatik ja füüsik. Avaldas rea uurimusi geomeetria alalt. Sai eriti tuntuks erirelatiivsusteooria geomeetrilise esituse loojana.

Morley [*morli*], E. W. — ameerika füüsik, teostas 1887. aastal koos A. A. Michelsoniga katse, mis näitas, et Maa liikumine ruumis ei mõjuta valguskiire kiirust Maa suhtes. See katse sai aluseks erirelatiivsusteooriale.

Newcomb [*njukom*], Simon (1835—1909) — ameerika astronoom, töötas Washingtonis. Uuris peamiselt planeetide ning nende kaaslaste liikumisega seotud küsimusi.

Newton [*njuutn*], Isaac (1643—1727) — suur inglise füüsik, astronoom ning matemaatik. Formuleeris lõplikul kujul juba Galilei töödes esinevad kaks liikumisseadust (nn. esimene ja teine Newtoni seadus) ning lisas neile kolmanda seaduse mõjust ja vastumõjust. Avastas gravitatsiooniseaduse ning näitas sellest lähtudes, et taevakehad liiguvad tsentraalkeha ümber kas ellipsi, parabooli- või hüperbooli-kujulisi teid mööda. Avastas, et päikesevalgus laguneb prismas mitmevärvilisteks kiirteks. Newton arvas, et valgus on osakeste voog, kuid samal ajal avastas ta ka terve rea valguse lainelisi omadusi. Ta oli esimene, kel õnnestus mõõta valguse lainepikkust. Suure tähtsusega on Newtoni matemaatika-alased tööd. Siia kuuluvad diferentsiaal- ja integraalarvutuse loomine, võrrandite ligikaudse lahendamise meetod, nn. Newtoni binoomvalem jt. Tema rohkearvuliste tööde hulgast on tähtsamad «Loodusfilosoofia matemaatilised printsiibid» (1687) ja «Optika» (1704).

Nobel, Alfred (1833—1896) — rootsi tööstur ja leiutaja. Leiutas menetluse nitroglütseriini tööstuslikuks valmistamiseks, dünamiidi, paukželatiini, suitsuta püssirohu jm. Määras surres oma suure varanduse nn. Nobeli auhinna asutamiseks. Igal aastal jagatakse selle kapitali protsentidest välja viis auhinda: kolm auhinda füüsika, keemia ja arstiteaduse või füsioloogia alal, üks kirjandusauhind ja üks rahuauhind.

Nuut, Jüri (1892—1952) — eesti matemaatik, Eesti NSV Teaduste Akadeemia tegevliige. Erilist märkimist väärivad tema uurimused mitteeukleidilise geomeetria ning selle rakenduste alalt (osalt

veel avaldamata). Teenete eest eesti teaduse arendamisel omistati talle 1945. aastal nimetus «Eesti NSV teeneline teadlane».

Pauli, Wolfgang (sünd. 1900) — šveitsi füüsik-teoreetik. Tema peamised tööd on pühendatud kvantide teooriale ja tuumatungide mesonteooriale.

Planck, Max (1858—1947) — silmapaistev saksa füüsik-teoreetik. Tema tähtsamad tööd kuuluvad soojusliku kiirguse teooriasse. Hakkas esimesena kasutama kiirguskvandi mõistet, kuigi kitsamas tähenduses kui seda tehakse tänapäeval.

Poincarè [*puäŋkaree*], Henri (1854—1912) — silmapaistev prantsuse matemaatik, uuris ka taevamehaanika probleeme. 1905. aastal avaldas töö «Elektroni dünaamikast», milles arendas relatiivsusteooria formaalseid aluseid.

Ptolemaios (ligikaudsed eluaastad 90—160 m. a. j.) — kreeka astronoom ja matemaatik, kes enamiku elust veetis Aleksandrias. Tema 13-köiteline töö «Almagest» oli oma täpsete astronoomiliste tabelite tõttu kuni Keplerini kõigi astronoomide ja meremeeste käsiraamatuks. Ptolemaios rõhutab, et tähtede liikumist võib võrdsel viisil seletada nii Maa pöörlemisega kui ka «kogu ülejäänud maailma» pöörlemisega, kuid õpetlaste mitmesugused tähelepanekud kinnitavad Maa liikumatust. Sellest tingituna loeb ta Päikesesüsteemi tsentriks (ja ka maailma tsentriks) Maad.

Püthagoras (ligikaudsed eluaastad 580—500 e. m. a.) — vana-kreeka matemaatik. Hakkas geomeetrias süstemaatiliselt kasutama tõestust. Andis muuhulgas sarnaste kujundite teooria ning nn. Püthagorase lause, mille sõnastas järgmiselt: täisnurkse kolmnurga hüpotenuusile konstrueeritud ruudu pindala on võrdne kaatetitele konstrueeritud ruutude pindalade summaga.

Riemann, Georg Friedrich Bernhardt (1826—1866) — silmapaistev saksa matemaatik. Sai eriti tuntuks oma uurimustega kompleksmuutuja funktsioonide teooria, samuti geomeetria alal. 1854. aastal avaldas töö «Geomeetria alushüpoteesidest», kus arendas täiesti üldist geomeetriat, mille erijuhtudeks on Lobatševski geomeetria, Eukleidese geomeetria ja nn. Riemanni geomeetria kitsamas mõttes. Seda üldist geomeetriat nimetatakse ka Riemanni geomeetriaks laiemas mõttes.

Rutherford [*raðöföd*], Ernest (1871—1937) — silmapaistev inglise füüsik, pani oma töödega aluse radioaktiivsuse ja aatomi ehituse uurimisele. Jälgides α-osakeste hajumist aatomitelt, määras ta kindlaks aatomituuma mõõtmed. 1919. aastal teostas esimese kunstliku tuumareaktsiooni. Rutherford oli Londoni Kuningliku Ühingu ja terve rea teiste teaduste akadeemiate liige, muuhulgas ka Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia auliige. Teaduslike teenete eest omistati talle 1932. aastal lord Nelsoni tiitel.

Rømer [*römer*], Ole (1644—1710) — taani astronoom, mitmesuguste astronoomiliste instrumentide leiutaja. Jupiteri kuude varjutuste järgi määras ta esimesena valguse levimise kiiruse.

Seeliger, Hugo (1849—1924) — saksa astronoom. Uuris peamiselt stellaarastronoomia, astrofüüsika ja taevamehaanika küsimusi.

Sommerfeld, Arnold (1868—1951) — saksa füüsik-teoreetik. Arendas edasi Bohri loodud aatomiteooriat. Uuris metallide elektronteooriat jm.

Zeemann, Pieter (1865—1943) — hollandi füüsik, uuris mitmesuguseid valguse murdumise ning neeldumisega seotud probleeme. 1896. aastal avastas spektrijoonte lõhenemise välise magnetivälja toimel (nn. Zeemanni efekt).

Zenon, Eleast (ligikaudsed eluaastad 490—430 e. m. a.). Sai eriti tuntuks oma apooriatega (kokku 45 tükki), milledest 9 on tänapäevani tuntud.

Tšerenkov, Pavel Aleksandrovitš (sünd. 1904) — nõukogude füüsik, avastas 1934. aastal nn. Tšerenkovi helenduse mingis keskkonnas valgusest kiiremini liikuvate elektronide juures.

Vavilov, Sergei Ivanovitš (1891—1951) — silmapaistev nõukogude füüsik ja ühiskonnategelane, oli aastast 1945 Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia presidendiks. Vavilov on avaldanud üle saja teadusliku töö, mis kuuluvad peamiselt füüsikalise optika valdkonda. Ligi 30 aastat oma elust pühendas ta luminestsentsi nähtuste uurimisele ja sai vastava koolkonna rajajaks Nõukogude Liidus.

Veksler, Vladimir Jossifovitš (sünd. 1907) — nõukogude füüsik, röntgenikiirte, aatomituuma ja kosmiliste kiirte uurija. Kõige enam on tuntud Veksleri uurimused elementaarosakeste kiirendajate teoorias. Tema poolt 1944. aastal avastatud autofaseerimise printsiip avas tee elementaarosakeste kiirendamiseks väga suurte kiirusteni. 1946. aastast Nõukogude Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige.

Sisukord

Eessõna 3
Lugejale 5

I. Uut igapäevases 7
1. Reaalne ja ebareaalne fantaasia 9
2. Liikumisest ja paigalolekust 12
3. Taustsüsteemi valik 15
4. Mille poolest erineb Ptolemaiose maailmasüsteem Koperniku maailmasüsteemist 19
5. Kas liikumist on üldse olemas? 24
a) Dihhotoomia 24
b) Ahhilleus ja kilpkonn 25
c) Nool 25
d) Staadionid 25
6. Inertsiseadus 29
7. Inertsiaalsüsteemid 33
8. Klassikaline relatiivsusprintsiip 37
9. Kas Maa on inertsiaalsüsteem? 41
10. Klassikalise relatiivsusprintsiibi rakendusi tehnikas . . . 44
a) Tuleviku kõnniteed 44
b) Rong, mis jaamas ei peatu 45
c) Ohutu ülesõit raudteest 46
d) Uute lennukitüüpide sepikojas 47
e) Kosmilises lennukis 47
11. Klassikalise relatiivsusprintsiibi rakendusi teoorias 48
a) Munakoksimise teooria 48
b) Veel kord Ahhilleusest ja kilpkonnast 49
c) Elastse põrke seadused 50
12. Missugune on keha trajektoor? 52
13. Ruum ja aeg 54
14. Klassikaline kiiruste liitumise seadus 58

II. Looduseuurija laboratooriumis 61
1. Valguse kiirus 63
2. Küsimus kaksiktähtedele 66
3. Keskkond taustsüsteemina 68
4. Tähtede aberratsioon 70
5. Fizeau' katse 73
6. Michelson-Morley katse 76

III. Erirelatiivsusteooria 81
1. Erirelatiivsusprintsiip 83
2. Suurte kiiruste liitumise seadus 89
3. Suurim kiirus looduses 94
4. Mis toimus varem, mis hiljem? 96
5. Põhjus ja tagajärg 103
6. Kui kiiresti voolab aeg? 107
7. Mida võib rääkida samapaiksetest sündmustest 119
8. Liikuva keha mõõtmed 121
9. Relatiivsusteooria ja geomeetria 126
10. Relatiivsusteooria ja klassikaline füüsika 129
11. Neljamõõtmeline maailm 134
12. Kuidas säilitada noorust 143
13. Kas elektrivälja saab lahutada magnetiväljast? 147
14. Mass 149
15. Televiisor ja relatiivsusteooria 152
16. Elektronmikroskoop 155
17. Suurte kiiruste jahil 158
18. Energia 162
19. Mass ja energia 166
20. Kuidas relatiivsusteooria näitas teed tuumaenergia vabastamiseks 169
21. Uute osakeste otsinguil 175
22. Aatomist ja antiaatomist 178
23. Osakestest-libahuntidest 180

IV. Üldine relatiivsusteooria 187
1. Algame jälle Galileiga 189
2. Ülemaailmne gravitatsiooniseadus 191
3. Miks langevad kõik kehad ühteviisi? 194
4. Langevas liftis 200

5. Koorelahutajast ja kosmilisest lennukist 203
6. Üldine relatiivsusprintsiip 206
7. Kõver maailm 211
8. Esimene tunnistaja üldise relatiivsusteooria kasuks 217
9. Merkuuri mõistatus 221
10. Merkuuri mõistatuse lahendus 223
11. Aja voolamise kiirus Maa peal ja Päikesel 228
12. Maa kunstlik kaaslane ja üldine relatiivsusteooria 231
13. Kas võitlus Koperniku maailmasüsteemi eest oli asjatu? . 234
14. Maailmast kui tervikust 239
15. Mõni sõna gravitatsioonivälјast ja teistest väljadest . . . 242
16. Looduse saladuste tundmaõppimise tee 246

V. Albert Einstein 249
Lisa 1: Elementaarosakeste tabel 264
Raamatus esinevaid isikunimesid 267

Ыиглане Харри Хейнрихович
БЕСЕДА О РЕЛАТИВНОЙ ТЕОРИИ
На эстонском языке
Художественное оформление Э. Пикка
Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10
*
Toimetaja H. Rębemaa
Kunstiline toimetaja I. Torn
Tehniline toimetaja E. Kaitsa
Korrektorid M. Sepp ja P. Hiie

Ladumisele antud 28. VIII 1958. Trükkimisele antud 8. XII 1958. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 17,5. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 14,35. Arvutuspoognaid 15,64. Trükiarv 5000. MB-08346. Tellimise nr. 2540. Hans Heidemanni nim. trükikoda, Tartu, Vallikraavi 4.

Hind rbl. 5.70

2—3

Rbl. 5.70

A-22349

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00405761 0