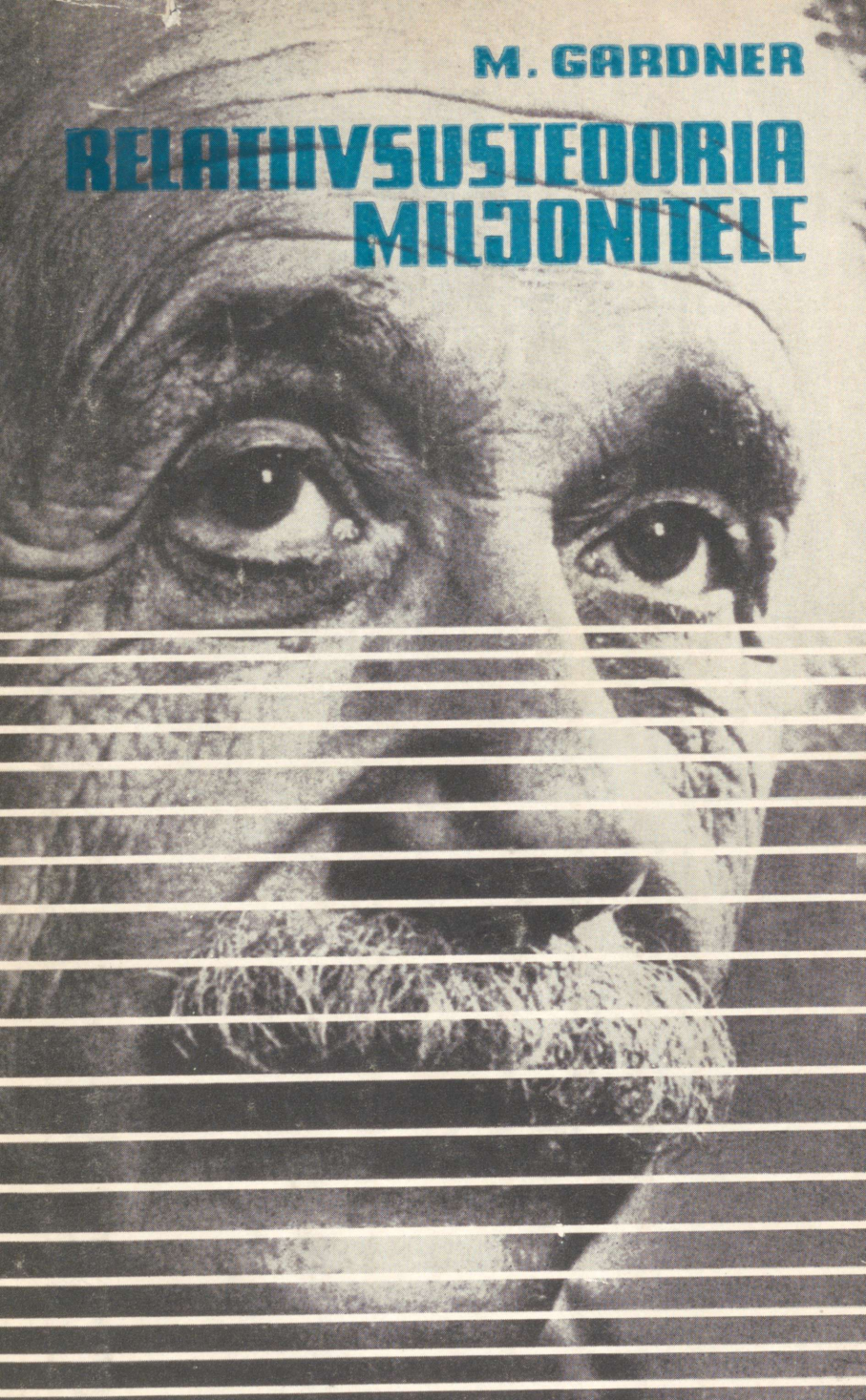
M. GARDNER

RELATIIVSUSTEOORIA MILJONITELE



Tagastage raamat õigeaegselt!
Возвратите книгу вовремя!
122600

U. H. 1154. II 65. 100.000.

RELATIIVSUSTEOORIA MILJONITELE

1968

A-29625

MARTIN GARDNER

RELATIIVSUSTEOORIA MILJONITELE

KIRJASTUS „VALGUS" • TALLINN 1968

53
G 10

Originaali tiitel:

Relativity for the Million
by Martin Gardner
Illustrated by Anthony Ravielli
The MacMillan Company New York
MacMillan New York, London

Tõlkinud E.-R. Tammet
Kaane kujundanud J. Arrak
Illustreerinud Anthony Ravielli

N
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
122600

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

2-3-2
27-68

«Kuskil seal väljaspool oli olemas see hiiglaslik maailm, mis eksisteerib sõltumatult meist inimestest ja mis kerkib meie ette nagu igavene hiiglaslik mõistatus, vähemalt osaliselt tajutav ja kättesaadav meie mõistusele. Selle maailma tundmaõppimine ahvatles nagu vabanemine . . . !»

ALBERT EINSTEIN

«Autobiograafilised märkmed»

Eessõna venekeelsele väljaandele

M. Gardneri raamat kujutab endast eri- ja üldrelatiivsusteooria populaarset esitust, mis tõepoolest on mõeldud miljonitele lugejatele. Köitvalt ja lihtsalt kirjutatuna on ta arusaadav kõigile, kaasa arvatud vanemate klasside õpilased. Eriti tuleb esile tõsta oivalisi illustratsioone, mistõttu raamat muutub nagu albumiks «Relatiivsusteooria piltides». Muuseas, just niisugune peabki olema tõeliselt populaarne raamat.

Teose suureks väärtuseks on see, et autor räägib üsna palju relatiivsusteooria tekkimise ajaloost. Alati on tore teada saada nii tõde ennast kui ka seda, mil viisil selleni jõuti, millised inimesed sellest osa võtsid, missuguseid hüpoteese tehti. Nii näiteks räägitakse raamatus pikalt nn. Machi printsiibist. Enamik õpetlasi on sellest ammu lahti öelnud, kuid omal ajal avaldas Machi printsiip suurt mõju ja ilma selle meenutamiseta kujuneks ajalooline osa ebatäielikuks.

Eraldi tuleb mainida fakti, et autor räägib peale väljakujunenud, kõigi poolt tunnustatud seisukohtade veel mitmetest vaidlusalustest küsimustest, millele praegu veel vastust ei teata. Seepärast näeb Gardneri raamatut lugev inimene elavat, arenevat teadust, mis võlub oma mõistatustega. Juba üksi see tõstab käesoleva teose esile paljude teiste relatiivsusteooria populaarsete esituste seast.

Esituse populaarsusel on ka oma varjukülg: Gardner peab tahes-tahtmata tegema lihtsustusi, tekib palju ebatäpsusi ja mitmetest asjadest minnakse vaikides mööda. Mõnel neist probleemidest on printsipiaalne iseloom ja need võivad viia asja olemuse vääriti mõistmisele. Paari sõnaga tehakse sellest juttu raamatu lõpus.

Füüsika-matemaatikadoktor A. Baz

Sissejuhatus

Relatiivsusteooriast on kirjutatud juba nii palju populaarseid raamatuid, et lugeja võib küsida: «Milleks siis veel üks?» Sellele on mul kolm vastulauset.

1. Parimad sissejuhatused elementaarsesse relatiivsusteooriasse on kirjutatud palju aastaid tagasi ja tänapäevaks juba vananenud. Tõsi küll, teoorias eneses pole tehtud kuigi olulisi muudatusi, ent on ilmunud uued katseandmed, uus suhtumine mõningatesse probleemidesse, uued kosmoloogilised mudelid. Kõik see peab leidma kajastuse kaasaegses raamatus relatiivsusteooriast.

2. Isiklikult minu jaoks osutus kiusatus proovida keerulisi ja tähtsaid probleeme võimalikult lihtsalt ja köitvalt selgitada väga tugevaks.

3. Ühtki raamatut relatiivsusteooriast pole illustreeritud nii oskuslikult. Anthony Ravielli meisterlikkus tõstab käesoleva teose esile kõigi teiste hulgast.

Panin vastu kiusatusele lõpetada raamat relatiivsusteooria filosoofilistele järeldustele pühendatud peatükiga, sest arvan, et sõna «filosoofiline» üldtunnustatud tähenduses pole relatiivsusteoorial järeldusi. Relatiivsusteoorial on oluline osa ilmselt tunnetusteoorias ja teaduse filosoofias peaasjalikult sellepärast, et ta näitab aegruumi matemaatilise struktuuri määramise võimatust teisiti kui ainult vaatluste ja katsete kaudu. Ent mis puutub filosoofia suurtesse traditsioonilistesse küsimustesse — jumal, surematus, tahtevabadus, hea ja kuri jne. —, siis selle koha pealt pole relatiivsusteoorial absoluutselt mitte midagi öelda. Absurdne on arvata, et relatiivsusteooriast järeldub kõige, näiteks kas või antropoloogia ja moraali suhtelisus. Tegelikult toob relatiivsusteooria sisse terve hulga uusi «absoluute».

Mõnikord kinnitatakse, nagu oleks relatiivsusteooria tõttu raskem ette kujutada, et väljaspool meid eksisteerib «hiiglaslik maailm», millel on korrastatud struktuur ja mida saab osaliselt kirjeldada teaduse seaduspärasustega. «Selle distsipliini (relatiivsusteooria) arenemise vältel,» kirjutab inglise astronoom James Jeans raamatus «Füüsikateaduse areng»,* «saab selgeks, et loodusnähtused määrasime pigem meie ise oma kogemuse põhjal, mitte aga mehhaaniline universum väljaspool meid ja sõltumatult meist.»

Niisuguse «subjektivismi» või «idealismi» või kuidas me seda ka ei nimetaks, et eristada teda töötavate teadlaste «realismist»; seovad mõned väljapaistvad õpetlased viimasel ajal miskipärast relatiivsusteooriaga. Küllaltki lugupidamist vääriv metafüüsiline positsioon, kuid see ei leia pisimatki toetust teoorialt eneselt. Ka Einstein ise arvas kahtlemata teisiti, selles veendute kohe, kui loete läbi tsitaadi käesoleva raamatu alguses. Ma ei hakka siinkohal mainitud küsimust pikemalt arutama. Kui lugeja selle vastu huvi tunneb, siis leiab ta veenva vastuse kahe kaasaja juhtiva teadusefilosoofi Adolf Grünbaumi ja Philipp Franki töödest (vastavalt kogumikus «Teaduse filosoofia» ilmunud artikkel ja raamatu «Teaduse filosoofia» seitsmes peatükk).

Olen tänulik John Stachelile, füüsikaprofessorile Pittsburghi ülikoolist, kes käsikirja läbi luges ja väärtuslikke parandusi ning ettepanekuid tegi. Muidugi ei ole ta mingil määral vastutav minu arvamuse eest vaidlusalustes küsimustes.

Martin Gardner

---

* «The Growth of Physical Science».



1. Absoluutne või relatiivne?

Kaks meremeest Joe ja Moe sattusid pärast laevahukku asustamata saarele. Möödusid aastad. Ühel päeval leidis Joe lainete poolt kaldale uhutud pudeli. See oli üks neist uutest hiiglasuurtest kokakoola pudelitest. Joe läks näost valgeks.

«Hei, Moe!» hüüdis ta. «Meie sinuga oleme väiksemaks jäänud.»

Sellest naljast võib ammutada tõsise õppetunni: ühegi asja suuruse üle ei saa otsustada, võrdlemata teda mõne muu esemega. Liliputid pidasid Gulliveri hiiglaseks. Brobdingnagi elanikele paistis Gulliver kääbusena. Kas piljardikuul on suur või väike? Loomulikult on ta aatomiga võrreldes ääretult suur, aga maakera kõrval ülimalt väike.

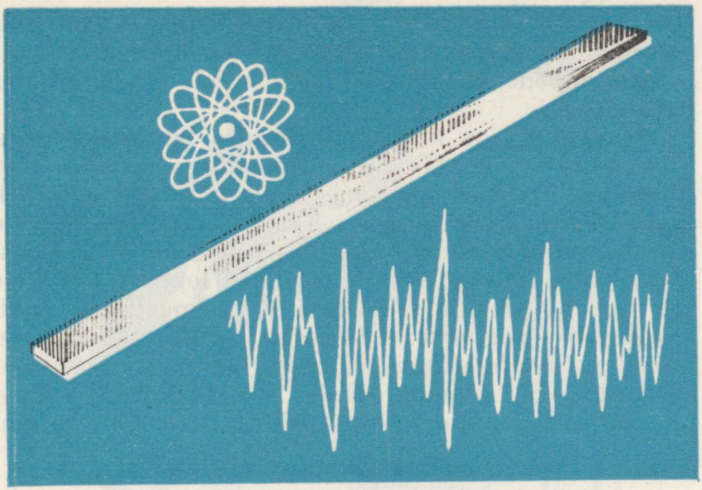
Jules Henri Poincaré, kuulus prantsuse 19. sajandi matemaatik, kes ennetas paljusid relatiivsusteooria seisukohti, lähenes mainitud küsimusele järgmiselt (teadlased nimetavad niisugust lähenemisviisi mõtteliseks katseks; see on eksperiment, mida võib küll kujutleda, mitte aga tegelikkuses sooritada). Oletame, väitis Poincaré, et öösel, kui te sügavasti magasite, muutus kõik universumis tuhat korda suuremaks. Kõige all

mõistab Poincaré tõepoolest *igasuguseid* asju: elektrone, aatomeid, valguse lainepikkust, inimest ennast, tema voodit, maja, maakera, päikest, tähti. Kas oskaksite ärgates öelda, et midagi on teistmoodi? Kas võite teha katse, mis tõendaks, et teie mõõtmed on muutunud?

Ei, väidab Poincaré, sellist katset teha ei saa. Tõepoolest, universum oleks täpselt niisamasugune nagu enne. Poleks mõtet isegi rääkida, et ta on suuremaks muutunud. «Suuremaks muutuma» tähendab kasvamist millegi suhtes. Antud juhul niisugust «midagi» olemas ei ole. Niisama mõttetu oleks muidugi väita. et kogu universum on kokku tõmbunud.

Seega on suurus suhteline mõiste. Pole olemas mitte mingisugust *absoluutset* viisi mõne eseme mõõtmete määramiseks ega saa öelda, et keha absoluutsed mõõtmed on nii- ja niisugused. Millegi suurust saab mõõta ainult teiste suuruste, nagu joonlaua või meetripulga abil. Aga kui pikk on meeter? Enne 1962. aasta 1. jaanu-





ari defineeriti meetrit plaatinavarda teatud kindla pikkuse kaudu, kusjuures säärast varrast hoiti kindlal temperatuuril Sèvres'i keldris Prantsusmaal. Alates 1. jaanuarist 1962 on uueks meetri etaloniks võetud krüptoon 86 aatomi poolt vaakuumis kiiratava oranži valguse 1656 763,83-kordne lainepikkus.

Kui kõik maailmaruumis, kaasa arvatud kiirguse lainepikkus, suureneks kaks korda, siis ei leiduks loomulikult mitte ühtki eksperimentaalset viisi niisuguse muutuse avastamiseks.

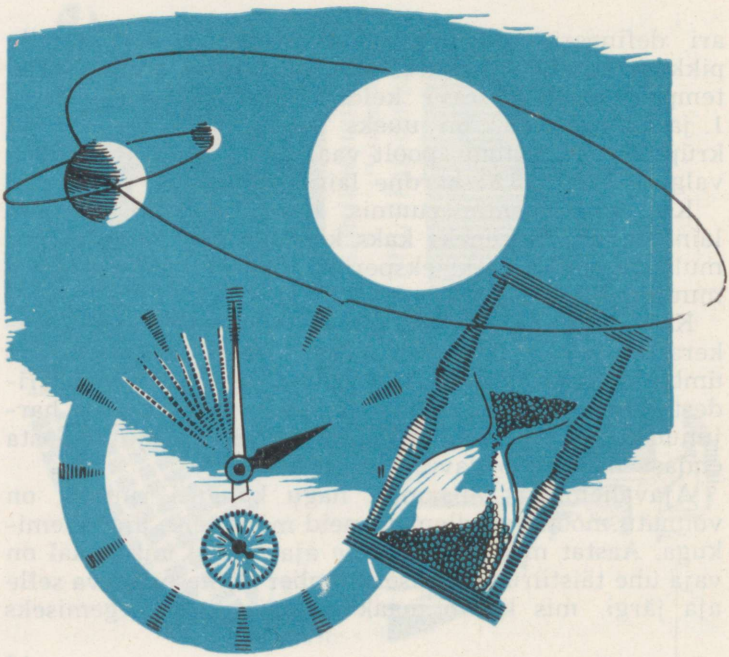
Kõik öeldu on õige ka ajavahemike kohta. Kas maakeral kulub «palju» või «vähe» aega üheks tiiruks ümber Päikese? Mudilasele tundub aeg ühtedest nääridest järgmisteni igavikuna. Geoloogi jaoks, kes on harjunud aega arvestama miljonites aastates, kujutab aasta endast üksnes möödavilksatavat hetke.

Ajavahemikke, niisamuti nagu kaugusi ruumis, on võimatu mõõta, võrdlemata neid mõne teise ajavahemikuga. Aastat mõõdetakse selle aja põhjal, mis Maal on vaja ühe täistiiru tegemiseks ümber Päikese, päeva selle aja järgi, mis kulub maakeral täispöörde tegemiseks

oma telje ümber, tundi ajavahemiku põhjal, mis kulub pikemal kellaosutil ühe täispöörde tegemiseks.

Alati mõõdetakse ühte ajavahemikku tema võrdlemise teel teisega.

H. G. Wells on kirjutanud kuulsa fantastilise jutustuse «Uus kiirendaja». Siit võib saada samasuguse õppetunni nagu naljast meremeestega, ainult et see ei käi mitte ruumi, vaid aja kohta. Teadlane avastab viisi, kuidas kiirendada kõiki organismis toimuvaid protsesse. Tema süda töötab kiiremini, mõte lendab rutem jne. Te taipate juba, mis juhtub. Kõik maailmas tundub tema jaoks aeglustuvat peaaegu täieliku seiskumiseni. Teadlane läheb jalutama ja peab liikuma üsna aeglaselt, et tema püksid õhuhõõrdumise tõttu ei süttiks. Tänavad on täis liikumatuid inimesi. Keegi mees on tardunud





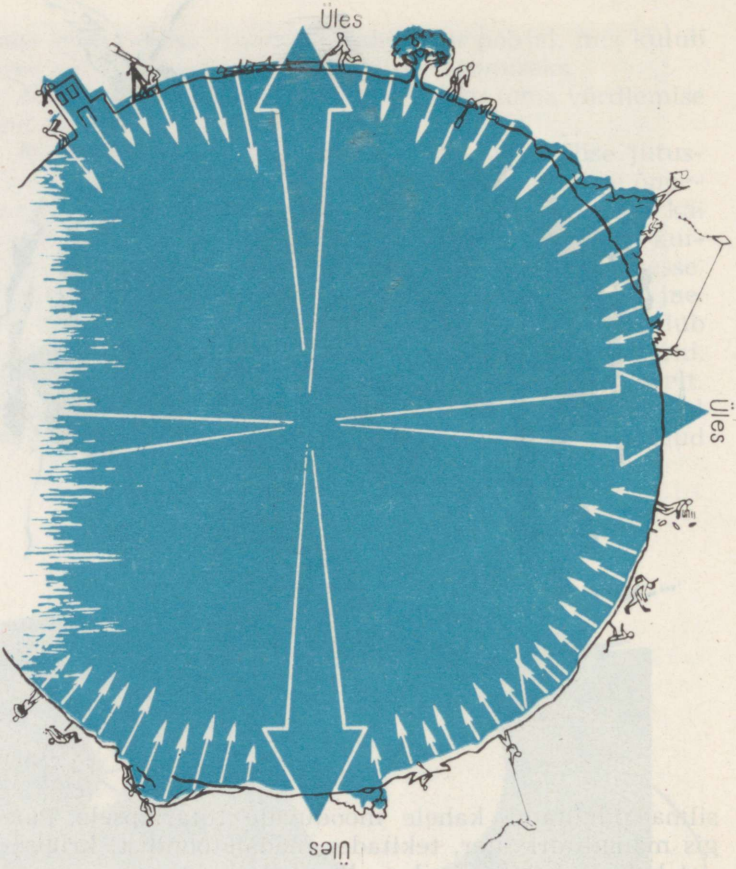
silma pilgutama kahele mööduvale tütarlapsele. Pargis mängib orkester, tekitades madalatoonilist, krigisevat heli. Sumisev mesilane liigub teo kiirusega.

Teeme õige veel ühe katse.

Oletame, et teatud hetkel hakkab kõik kosmoses liikuma kas aeglasemalt, kiiremini või jääb mõneks miljoniks aastaks hoopis seisma, alustades seejärel uuesti liikumist. Kas muutus on märgatav? Ei, pole olemas ühtki katset, mis niisugust nähtust avastada võimaldaks. Tõepoolest, väide, et selline muutus on aset leidnud, osutub mõttetuks. Aeg, niisamuti nagu kaugus, on suhteline suurus.

Paljud teisedki igapäevasest elust tuttavad mõisted on suhtelised.

Vaatleme mõisteid «üleval» ja «all». Minevikus oli

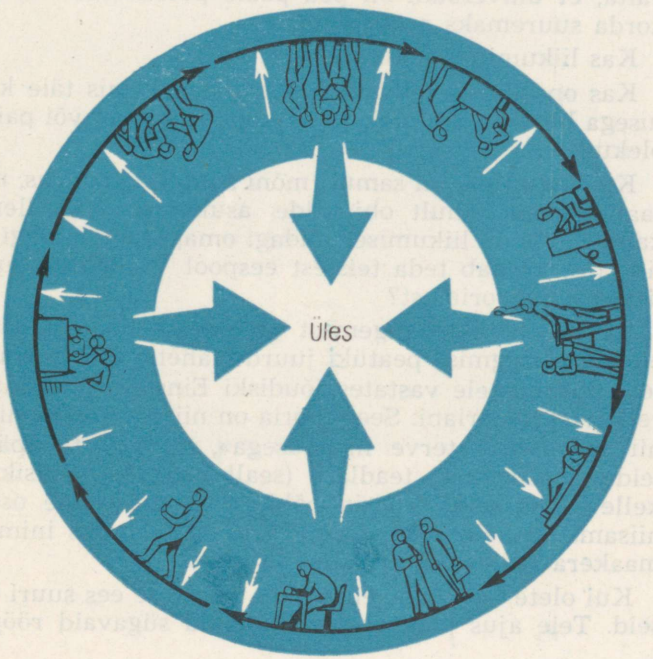


raske taibata, miks maakera vastasküljel olevatel inimestel, kes ripuvad, pea alaspidi, veri pähe ei tungi. Ta napäeva lastel, kes esmakordselt kuulevad, et maakera on ümmargune, on sellest niisama raske aru saada. Kui Maa oleks läbipaistvast klaasist ja meil õnnestuks teleskoobiga otse sellest läbi vaadata, siis näeksime tõepoolest inimesi seismas, jalad vastu klaasi, pea alaspidi. See tähendab, nad on pead alaspidi *meie suhtes*. Muidugi asume meie jälle *nende suhtes* pead alaspidi.

Maapinnal tähendab mõiste «üleval» suunda Maa keskpunktist kaugemale, «all» märgib aga suunda Maa keskme poole. Tähtedevahelises ruumis pole olemas absoluutset «üleval» ja «all», sest seal pole planeeti, mis võiks «taustkehaks» olla.

Kujutlegem päikesesüsteemis lendavat kosmoselaeva, mis sarnaneb hiiglasliku rõngassaiaga ja pöörleb oma telje ümber, nii et kesktõukejõud loob kunstliku raskuse. Laeva sees võib kosmonaut jalutada rõnga välisseina mööda nagu põrandal. «All» märgib nüüd suunda laeva keskmest eemale, «üleval» suunda laeva keskme poole. Olukord on vastupidine sellega, mis valitseb pöörleval planeedil.

Niisiis pole universumis mõistetel «üleval» ja «all» absoluutset tähendust. Need on ainult suunad, mis määratakse gravitatsioonivälja mõjumise suuna suhtes. Mõttetu on rääkida, et sel ajal, kui me magasime, on



kogu kosmos pea peale pöördunud, sest ei saa leida taustsüsteemi, mis võimaldaks otsustada kosmose asendi üle.

Teine suhtelise muutuse tüüp on objekti muutumine oma peegelpildi suhtes. Kui suur R on trükitud tagurpidi, nagu Я, siis tunnete selles otsekohe ära R-i peegelpildi.

Aga kui kogu universum (kaasa arvatud teie ise) muutuks äkki oma peegelpildiks, siis pole olemas ühtki võimalust niisuguse muutuse avastamiseks.

Kui ainult üks isik muutub oma peegelpildiks (H. G. Wellsil on jällegi vastavateemaline jutustus «Plattneri lugu»), kosmos aga jääb samaks, siis tundub sellele inimesele, et kosmos on pea peale pöördunud. Ta peaks hoidma raamatut peegli ees, selleks et lugeda.

Kui aga kõik on ümber pööratud, siis pole ühtki katset, mille abil niisugust muutust avastada võiks. Sellisest pöördumisest rääkida on niisama mõttetu nagu väita, et universum on pea peale pöördunud või kaks korda suuremaks muutunud.

Kas liikumine on absoluutne?

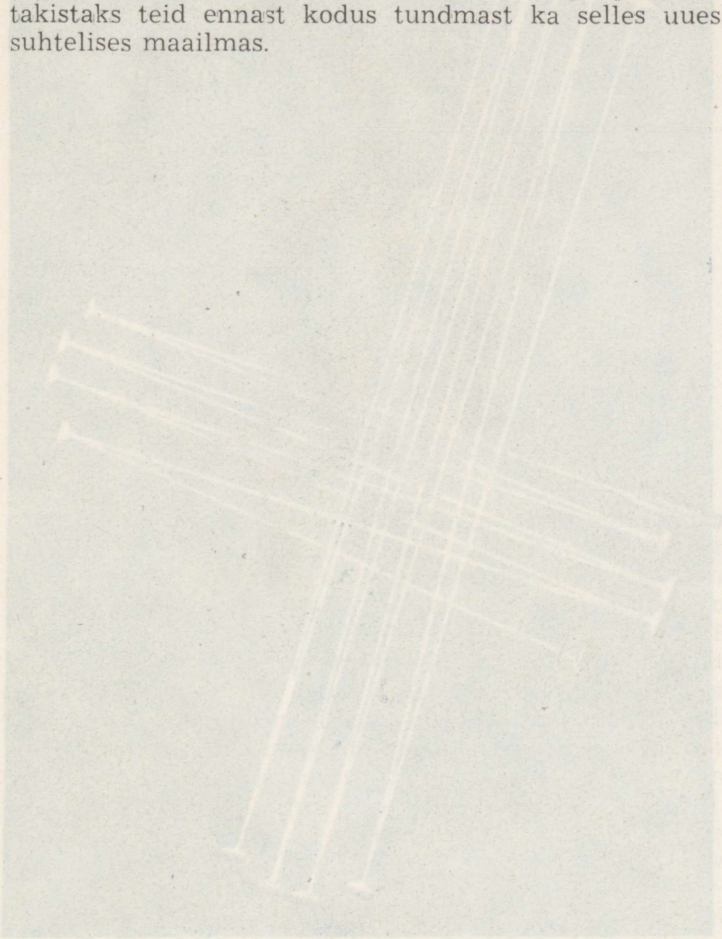
Kas on olemas mingisuguseid katseid, mis täie kindlusega lubaksid kindlaks teha keha liikumist või paigalolekut?

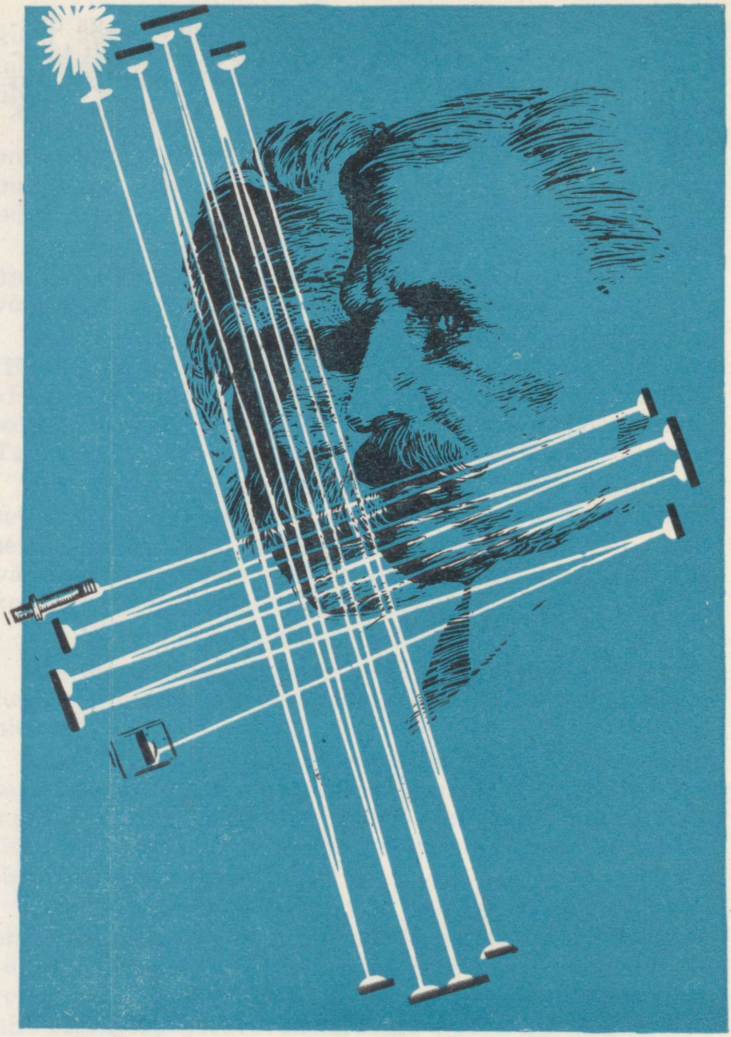
Kas liikumine on samuti mõni suhteline suurus, mida saab mõõta ainult objektide asukohtade võrdlemise kaudu? Või on liikumises midagi omapärast, midagi sellist, mis eristab teda teistest eespool vaadeldud suhtelistest kategooriatest?

Lakake hetkeks lugemast ja mõelge hoolega järele, enne kui järgmise peatüki juurde lähete. Just niisugustele küsimustele vastates jõudiski Einstein oma kuulsa relatiivsusteooriani. See teooria on nii revolutsiooniline, nii vastuolus «terve mõistusega», et isegi tänapäeval leidub tuhandeid teadlasi (sealhulgas ka füüsikuid), kelle jaoks selle teooria põhialuste mõistmine osutub niisama raskeks nagu lapsel aru saada, miks inimesed maakera vastasküljelt «alla» ei kuku.

Kui olete noor, on teil nende teadlaste ees suuri eeliseid. Teie ajus pole veel kujunenud sügavaid rööpaid,

mida mööda mõte sageli liikuma on sunnitud. Aga ükskõik kui vana te ka ei ole — kui teil jätkub ainult tahtmist oma ajurakukesi treenida, siis pole põhjust, mis takistaks teid ennast kodus tundmast ka selles uues, suhtelises maailmas.

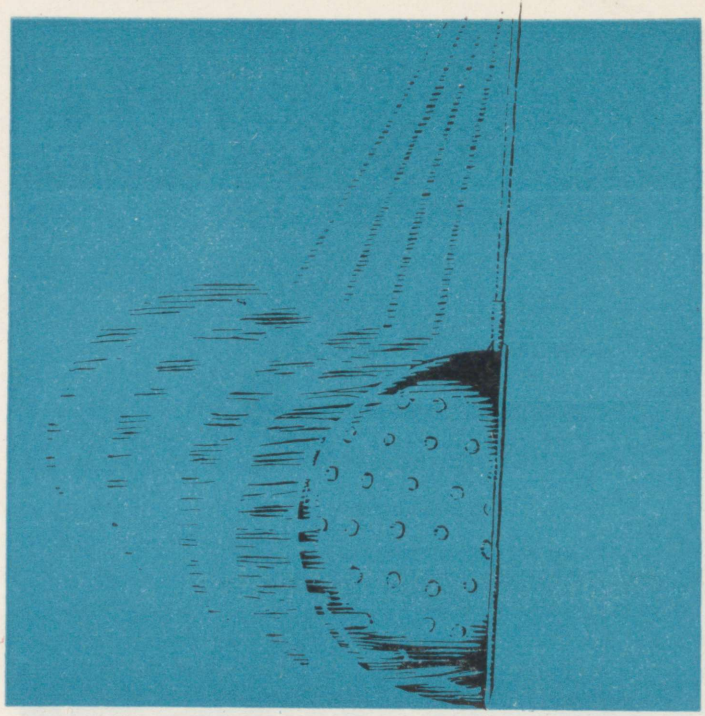




2. Michelson-Morley katse

Kas liikumine on suhteline? Mõninga mõtisklemise järel kaldute vastama: «Muidugi on ta seda!» Kujutlege rongi, mis liigub kiirusega kuuskümmend kilomeetrit tunnis põhja poole. Rongis jalutab mees kiirusega kolm kilomeetrit tunnis lõuna poole. Millises suunas ja millise kiirusega mees liigub? Otsekohe on selge, et niisugusele küsimusele ei saa vastata, ilma et me taustsüsteemi ei määraks. Rongi suhtes liigub mees lõuna poole kiirusega kolm kilomeetrit tunnis. Maapinna suhtes liigub ta põhja poole kiirusega kuuskümmend miinus kolm ehk viiskümmend seitse kilomeetrit tunnis.

Kas võime väita, et mehe kiirus maapinna suhtes (viiskümmend seitse kilomeetrit tunnis) on tema tõeline, absoluutne kiirus? Ei, sest on olemas veel teised, suuremad taustsüsteemid. Maakera ise liigub. Ta pöörleb ümber oma telje ja tiirleb samal ajal ümber Päikese. Päike tõttab koos kõigi planeetidega läbi Galaktika. Galaktika pöörleb ja liigub teiste galaktikate suhtes. Galaktikad omakorda moodustavad galaktikate kogumikke, mis üksteise suhtes liiguvad. Keegi ei tea täpselt, kui kaugele niisugust liikumiste ahelat võib jätkata. Ei



paista olevat ühtki võimalust kindlaks teha mõne keha absoluutset liikumist, see tähendab, pole olemas mingit kindlat, lõplikku taustsüsteemi, mille suhtes saaks mõõta kõiki liikumisi. Liikumine ja paigalseis, niisamuti nagu suur ja väike, aeglane ja kiire, üleval ja all, vasakul ja paremal, näivad olevat täiesti suhtelised. Ei paista leiduvat võimalust mõõta mingi keha liikumist, võrdlemata seda mõne teise keha liikumisega.

Kahjuks pole asi niisama lihtne! Kui liikumise relatiivsusest rääkides saaks piirduda seniöelduga, siis poleks Einsteinil mingit vajadust olnud relatiivsusteooriat välja töötada. Füüsikutel oleks teooria juba ammu valmis olnud.

Asja keerukuse põhjus peitub järgmises: ilmneb, et on olemas kaks väga lihtsat viisi absoluutse liikumise

määramiseks. Üks neist kasutab valguse omadusi, teine mitmesuguseid inertsinähtusi, mis esinevad juhul, kui liikuv keha muudab trajektoori või kiirust. Einsteini erirelatiivsusteooria tegeleb esimese meetodiga, üldrelatiivsusteooria teisega. Käesolevas ja kahes järgmises peatükis vaadeldakse esimest meetodit, mis võib olla võtmeks absoluutse liikumise mõistmisele, meetodit, mis kasutab valguse omadusi.

Üheksateistkümnendal sajandil, enne Einsteini, kujutlesid füüsikud, et ruumi täidab liikumatu ja nähtamatu aine — eeter. Sageli nimetati seda «valgust kandvaks eetriks», pidades silmas tema omadust valguslaineid edasi kanda. Eeter täitis kogu universumit. Ta tungis kõigisse materiaalsetesse kehadesse. Kui klaaskupliga kellast kogu õhk välja pumbata, jääb kuppel siiski täidetuks — ta on täis eetrit. Aga kuidas muidu saaks valgus levida vaakuumis? Valgus on lainetus, peab olema miski, mis lainetust edasi kannab. Eeter ise, ehkki ta peab võnkuma, liigub teiste kehade suhtes harva (kui niisugust liikumist üldse esineb), ennem juba liiguvad need kehad läbi eetri nagu sõel läbi vee. Tähe, planeedi või ükskõik millise keha absoluutne liikumine — nii arvasid tolle ajastu füüsikud — muutub lihtsamaks, kui vaadata liikumist tolle nähtamatu ja liikumatu eetrimere suhtes.

Nüüd võite aga küsida: kui eeter on mittemateriaalne substants ja teda ei saa näha, kuulda, kompida, nuusutada ega maitsta, kuidas saab siis määrata kas või näiteks Maa liikumist tema suhtes? Vastus on lihtne. Maa liikumise määramiseks tuleb seda võrrelda valguskiire liikumisega.

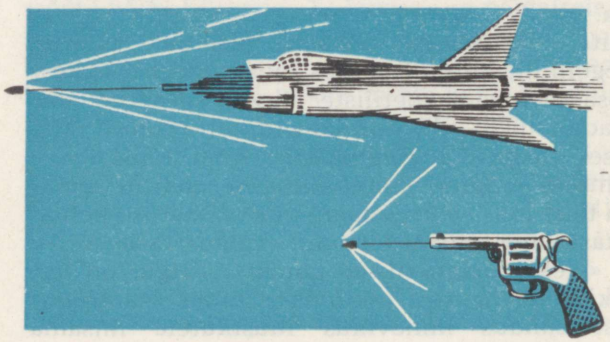
Selle väite mõistmiseks vaatleme lähemalt valguse olemust. Tegelikult kujutab valgus endast üksnes väikest nähtavat osa elektromagnetiliste lainete spektrist, mis sisaldab raadiolaineid, ultralühilaineid, infrapunast ning ultravioletset kiirgust ja gammakiiri. Kõik, mida käesolevas raamatus valguse kohta öeldakse, kehtib samavõrd ka iga teist liiki elektromagnetilise lainetuse kohta, seepärast kasutame lihtsalt terminit «valgus», sest see on lühem kui «elektromagnetilised lained». Valgus on lainetus. Rääkida niisugusest liikumisest lahus materiaalsest eetrist tundus minevikus füüsikutele niisama

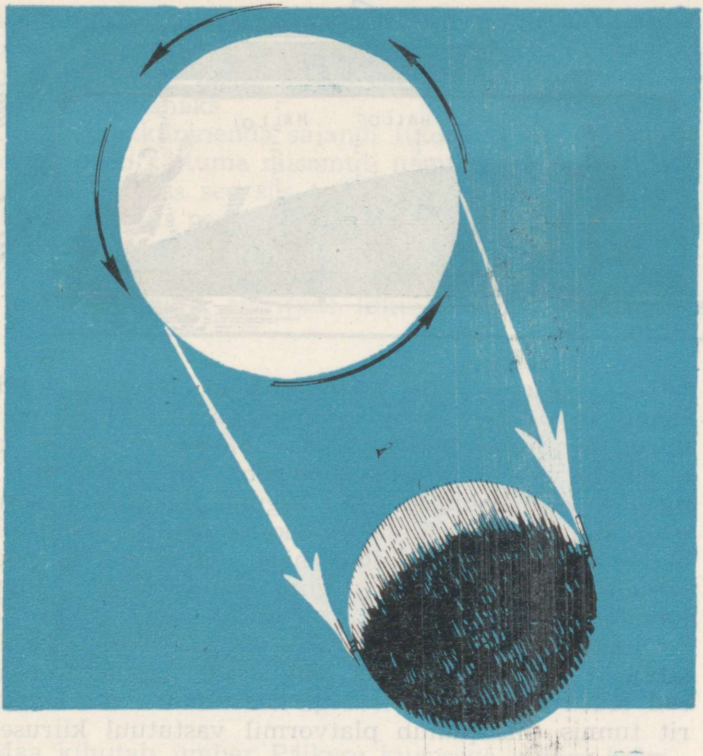


absurdsena nagu mõelda veelainetest, mõtlemata seejuures veest endast.

Kui tulistada kihutavast reaktiivlennukist otse ette, liigub kuul maapinna suhtes kiiremini kui kuul, mis lastakse välja maapinnal. Kuuli kiiruse maapinna suhtes saame, kui lennuki kiirusele liidame kuuli kiiruse. Valguse puhul ei sõltu aga kiire kiirus valgusallika kiirusest. See fakt tõestati veenvalt möödunud sajandi viimastel ja käesoleva sajandi esimestel aastatel ning on korduvalt kinnitust leidnud. Viimati kontrollisid seda 1955. aastal nõukogude astronoomid, kes kasutasid pöörleva päikeseketta vastasservadelt saabuvaid valguskiiri. Üks päikeseketta serv liigub alati meie poole, teine aga eemaldub. Tehti kindlaks, et valgus jõuab Maale kummastki servast ühesuguse kiirusega. Analoogilised katsed teostati aastakümneid tagasi pöörlevatelt kaksiktähtedelt saabuva valgusega. Vaatamata valgusallika liikumisele jäi valguse kiirus vaakuumis alati samaks: veidi väiksemaks kui 300 000 kilomeetrit sekundis.

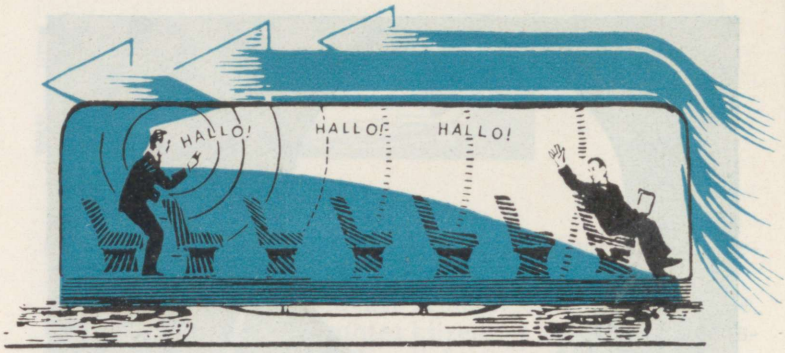
Kas näete, kuidas niisugune asjaolu annab teadlasele (nimetame teda siinkohal vaatlejaks) võimaluse välja





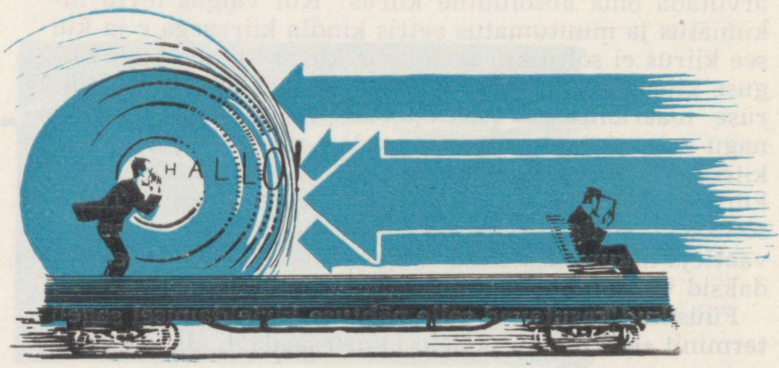
arvutada oma absoluutne kiirus? Kui valgus levib liikumatus ja muutumatus eetris kindla kiirusega *c* ja kui see kiirus ei sõltu kiirgava keha kiirusest, siis võib valguse kiirust kasutada etalonina vaatleja absoluutse kiiruse määramiseks. Vaatleja, kes liigub samas suunas nagu valguskiir, leiaks kiire endast mööduvat, kui tema kiirus on *c*-st väiksem; kiirele vastu liikuv vaatleja leiab kiire endale lähenevat suurema kiirusega kui *c*. Teiste sõnadega, valguse kiirus peaks muutuma, olenevalt vaatleja liikumisest tema suhtes. Need muutused peegeldaksid vaatleja tõelist, absoluutset liikumist eetris.

Füüsikud kasutavad selle nähtuse kirjeldamisel sageli terminit «eetrituul». Selleks et aru saada, mida nad mõt-



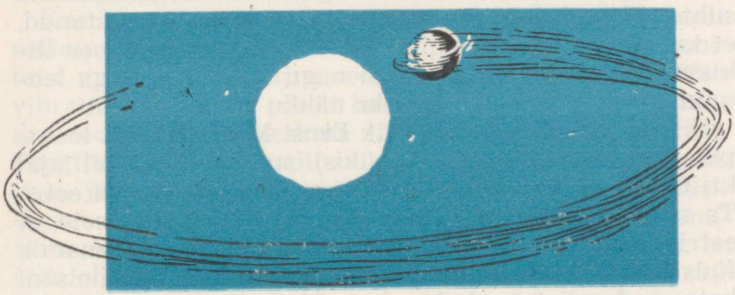
levad, vaatleme jälle liikuvat rongi. Nägime, kuidas rongis kolmekilomeetrise tunnikiirusega jalutava mehe kiirus on rongi suhtes alati jääv, olenemata sellest, kas ta jalutab veduri või rongi lõpu poole. Seesama kehtib ka hääle kiiruse kohta kinnises vagunis. Hääl on lainetus, mida kannavad edasi õhu molekulid. Et vagun viib sees oleva õhu kaasa, siis liigub hääl vagunis põhja poole niisama suure kiirusega (vaguni suhtes), nagu ta liigub lõunasse.

Olukord muutub, kui läheme kinnisest vagunist üle lahtisele platvormile. Õhk pole enam vagunis isoleeritud. Kui rong liigub kiirusega kakskümmend kilomeetrit tunnis, siis puhub platvormil vastutuul kiirusega



kuuskümmend kilomeetrit tunnis. Selle tuule tõttu osutub vaguni lõpust algusse liikuva hääle kiirus normaalsest väiksemaks, hääle kiirus eest tahapoole aga normaalsest suuremaks.

Üheksateistkümnenda sajandi füüsikud olid kindlad, et eeter peab käituma niisamuti nagu vaguni kohal liikuv õhk. Kuidas see siis teisiti saaks olla? Kui eeter oleks paigal, siis peaks iga keha, mis sellest läbi liigub, kohtama vastassuunas puhuvat eetrituult. Valgus kujutab endast lainete liikumist liikumatus eetris. Muidugi mõjutab niisugune eetrituul liikuval kehal mõõdetud valguse kiirust.



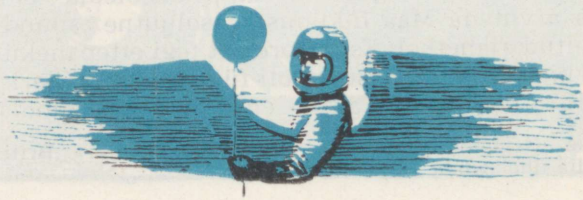
Maa kihutab ümber Päikese kiirusega umbes kolmkümmend kilomeetrit sekundis. Niisugune liikumine, arutlesid füüsikud, peaks looma eetrituule, mis puhub Maa aatomite vahelises ruumis kiirusega kolmkümmend kilomeetrit sekundis. Selleks et mõõta Maa absoluutset liikumist — tema liikumist paigalseisva eetri suhtes —, on vaja lihtsalt mõõta maapinnal vastassuundades liikuvate valguskiirte kiirused. Eetrituule tõttu liiguks valgus ühes suunas kindlasti kiiremini kui teises. Võrreldes eri suundades kiiratud valguse kiirust, peaks olema võimalik välja arvutada Maa liikumise absoluutne suund ja suurus antud ajahetkel. Esmakordselt tegi ettepaneku korraldada niisugune katse suur šoti füüsik James Clerk Maxwell* 1875. aastal, neli aastat enne Einsteini sündi.

* Niisuguse ettepaneku tegi Maxwell artiklis «Eeter» Briti Entsüklopeedia üheksanda väljaande jaoks.

1881. aastal teostas Albert Abraham Michelson, noor Ameerika Ühendriikide mereväeohvitser, just niisuguse katse. Michelson sündis Saksamaal, tema vanemad olid poolakad. Isa kolis Ameerikasse, kui poeg oli kaheaastane. Pärast USA Mereväeakadeemia lõpetamist Annapolises ja kaheaastast teenistust merel sai temast füüsika- ja keemiaõpetaja samas akadeemias. Võtnud pikema puhkuse, sõitis ta õppima Euroopasse. Berliini ülikoolis, kuulsa saksa füüsiku Hermann Helmholtzi laboratooriumis tegi noor Michelson esimese katse eetrituule avastamiseks. Oma suureks üllatuseks ei märganud ta mingit erinevust kiirustes, millega valgus liikus edasi-tagasi kõikvõimalikes suundades kompassinõela suhtes. See oli umbes sama, nagu oleks kala avastanud, et ta võib ujuda meres igas suunas, märkamata vee liikumist oma keha suhtes, või nagu avatud luugiga lennukis istuv lendur ei tunneks näkku puhuvat tuult.

Silmapaistev austria füüsik Ernst Mach (temast loeme pikemalt seitsmendas peatükis) suhtus juba sel ajal kriitiliselt kujutlusse absoluutsest liikumisest läbi eetri. Ta sai teada Michelsoni katsest ja jõudis järeldusele, et eetri mõiste tuleb kõrvale heita. Ometi keeldus enamik füüsikuist niisugust julget sammu astumast. Michelsoni katseseade oli üsna kohmakas. Oli küllalt alust arvata, et paremini ja tundlikuma aparatuuriga korraldatud eksperiment annab positiivsed tulemused. Ka Michelson ise arvas sedasama. Ta oli pettunud katse «ebaõnnestumisest» ja tahtis kõigest hingest seda korrata.

Michelson loobus sõjaväeteenistusest ja sai professoriks Case'i rakendusteaduste koolis (praegune Case'i Instituut) Clevelandis, Ohio osariigis. Lähedal asuvas Western Reserve'i ülikoolis õpetas Edward Williams Morley keemiat. Neist said head sõbrad.



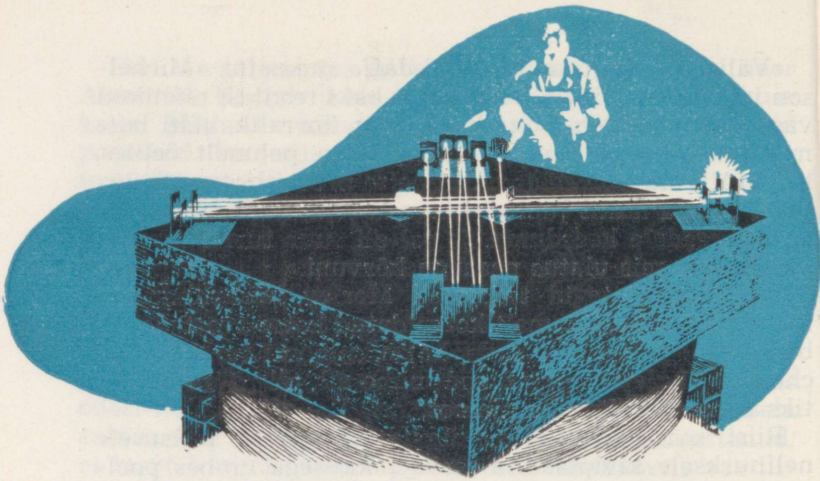
«Väliselt,» kirjutas Bernard Jaffe raamatus «Michelson ja valguse kiirus», «olid need kaks teadlast täielikud vastandid... Michelson oli meeldiv, korralik, alati laitmatult raseeritud mees. Morley käis, pehmelt öeldes, hooletult riides ja sobis hajameelse professori prototüübiks. ... Ta laskis juustel kasvada seni, kuni need hakkasid õlgadele keerduma, ja tal oli suur turris punane mokahabe, mis ulatus peaaegu kõrvuni.»

1887. aastal tegid teadlased Morley laboratooriumi keldris teise, hoolikamalt korraldatud katse avastada tabamatut eetrituult. Nende katse, mis sai tuntuks Michelson-Morley eksperimendi nime all, oli pöördepunktiks kaasaegse füüsika ajaloos.

Riist seati üles kolmekümne sentimeetri paksusele nelinurksele kiviplaadile serva pikkusega umbes poolteist meetrit. Plaat ujus vedelas elavhõbedas. See vältis vibratsiooni, hoidis plaati horisontaalasendis ja võimaldas seda kergesti keskosa läbiva telje ümber pöörata. Peeglite süsteem plaadil suunas valguskiire sinna, kuhu vaja, ja peale selle pendeldas kiir kaheksa korda edasitagasi. (Seda tehti kiire tee maksimaalseks pikendamiseks, kusjuures riista mõõtmed säilisid sellistena, et teda oli veel võimalik kergesti pöörata.) Samal ajal saatis teine peeglite süsteem teise kiire niisama pikale teekonnale, ainult ristsuunas esimese kiirega.

Oletati, et kui plaat on asendis, kus üks kiir liigub edasi ja tagasi *paralleelselt* eetrituulega, siis kulub tal selleks rohkem aega kui teisel kiirel sama vahemaa läbimiseks *risti* tuulega. Algul näib, et õige peaks olema vastupidine oletus. Kujutlege valgust, mis liigub päri- ja vastutuult. Kas tuul ei suurenda kiirust ühel teelõigul niisama palju, kui vähendab seda teisel? Kui aga lugu on nii, siis kiirendamised ja aeglustumised kompenseeruvad vastastikku ning terveks retkeks kulub niisama palju aega nagu siis, kui üldse mingit tuult poleks olemas.

Tõepoolest, tuul peaks suurendama valguse kiirust ühes suunas niisama palju, kui vähendab seda teises, ent — ja see on kõige tähtsam —, ta vähendab kiirust *pikema aja jooksul*. Arvutused näitavad, et selle vahemaa katmiseks vastutuult kulub tal rohkem aega kui tuule puudumisel. Tuul avaldab pidurdavat mõju ka



tuulega risti liikuvale kiirele. Sedagi mõju on kerge välja arvutada. Selgub, et aeglustav mõju on väiksem kui tuulega paralleelselt liikuva kiire korral.

Polnud kahtlust, et *juhul kui* Maa lendab läbi liikumatu eetrimere, siis tekib kohe ka eetrituul, kui aga eetrituul on olemas, siis registreerib Michelson-Morley seade seda silmapilkselt. Tegelikult olid mõlemad teadlased veendunud, esiteks, et nad avastavad selle tuule, ja teiseks, et nad võivad niisama kergesti määrata (pöörates plaati senikaua, kuni leiavad asendi, kus valguse liikumiseks kulunud aja erinevus on mõlemas suunas maksimaalne) maakera eetris liikumise täpse suuna igal ajahetkel.

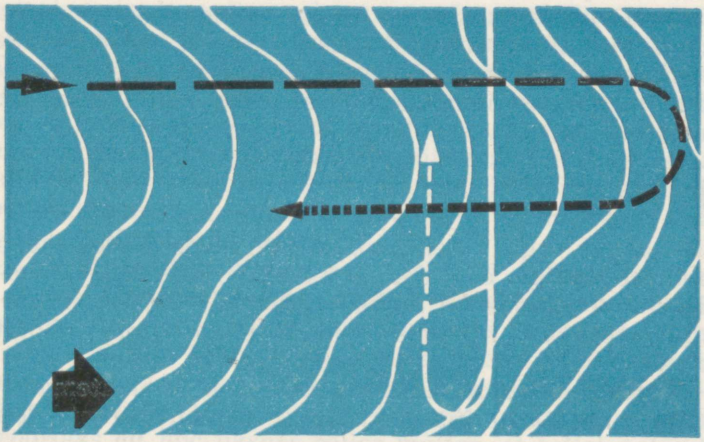
Tuleb märkida, et Michelson-Morley seade ei mõõtnud valguskiirte tegelikku kiirust. Kaks kiirt, liikunud vajalik arv kordi edasi-tagasi, liideti üheks kiireks, mis suunati väiksesse teleskoopi. Seade pandi aeglaselt pöörlema. Igasugune muutus kiirte suhtelises kiiruses oleks esile kutsunud tumedate ja heledate ribade nihkumise interferentspildis.

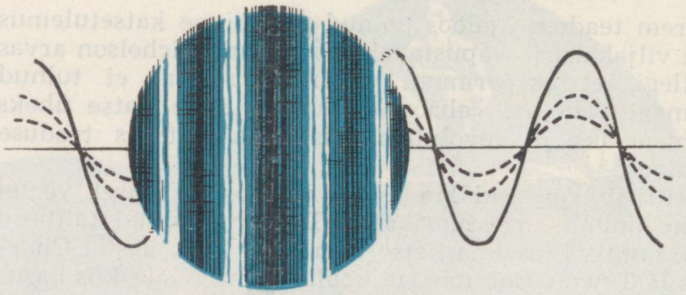
Jälle oli Michelson üllatunud ja pettunud. Sel korral hämmastusid juba terve maailma füüsikud. Kuidas Michelson ja Morley oma seadet ka ei pööranud, ometi ei leidnud nad mingit jälge eetrituulest! Mitte kunagi

varem teaduse ajaloos polnud negatiivne katsetulemus nii viljakaks ja vapustavaks osutunud. Michelson arvas jällegi, et eksperiment ebaõnnestus. Tal ei tulnud kunagi pähe, et «ebaõnn» muudab selle katse üheks tähtsamaks ja revolutsioonilisemaks katseks teaduse ajaloos.

Hiljem kordasid Michelson ja Morley katset veelgi täiuslikuma aparatuuri abil. Teised füüsikud talitasid niisamuti. Täpseima katse korraldas 1960. aastal Charles H. Townes Columbia ülikoolis. Tema seade, kus kasutati maserit (molekulide võnkumisel põhinevat aatomikella), oli nii tundlik, et selle abil oleks avastatud eetrituul isegi juhul, kui Maa kiirus võrdunuks $^{1}/_{1000}$ tegelikust. Niisugusest tuulest ei leitud jälgegi.

Füüsikuid rabas Michelson-Morley katse negatiivne tulemus esialgu sedavõrd, et nad hakkasid leiutama kõikvõimalikke seletusi, selleks et päästa eetrituule teooriat. Muidugi, oleks katse tehtud mõni sajand varem, nagu märgib G. J. Whitrow oma raamatus «Universumi struktuur ja areng», siis oleks igaühel otsekohe pähe turgatanud väga lihtne seletus: Maa ei liigugi! Kuid niisugune seletus paistis nüüd ebatõepärasena. Parimana tundus teooria (palju vanem kui esimene Michelson-Morley katse), et Maa tõmbab eetrit kaasa nii





nagu kinnine vagun õhku. Sedasama oletas ka Michelson. Ent teised katsed, millest ühe sooritas teadlane ise, välistasid sellegi võimaluse.

Kõige kummalisema seletuse andis iiri füüsik George Francis FitzGerald. Võib-olla, oletas ta, avaldab eetrituul liikuvale kehale rõhku ja sunnib teda liikumise suunas kokku tõmbuma. Liikuva keha pikkuse määramiseks tuleb tema pikkus paigalolekus korrutada lihtsa avaldisega

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

kus v^2 on keha kiiruse ruut, c^2 aga valguse kiiruse ruut.

Sellest valemist võib näha, et keha lühenemine on tühiselt tilluke väikestel kiirustel, suureneb kiiruse kasvades ja muutub tohutu suureks siis, kui keha kiirus ligineb valguse kiirusele. Seega omandab näiteks pika sigari kujuline suure kiirusega liikuv kosmoselaev lühikese sigari kuju. Valguse kiirus on saavutamatu piir; niisuguse kiirusega liikuva keha puhul omandab avaldis kuju

$$\sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}},$$

see annab aga tulemuseks nulli. Korrutades keha pikkuse nulliga, on tulemuseks jälle null. Teiste sõnadega, kui mõni keha võiks saavutada valguse kiiruse, siis poleks tal liikumise suunas enam üldse mingit pikkust!

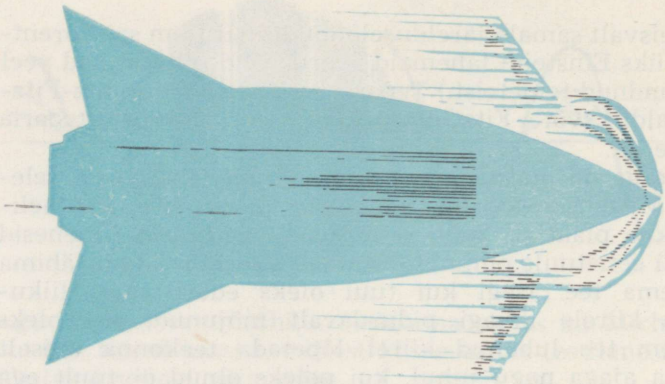
FitzGeraldi teooria rüütas elegantsesse matemaatilisse vormi taani füüsik Hendrik Antoon Lorentz, kes

iseseisvalt samale järeldusele jõudis. (Hiljem sai Lorentzist üks Einsteini lähemaid sõpru, kuid sel ajal nad veel ei tundnud teineteist.) Teooria sai tuntuks Lorentz-Fitz-Geraldi (või FitzGerald-Lorentzi) lühenemisteooria nime all.

Kerge on mõista, mis kombel lühenemisteooria seletas Michelson-Morley katse ebaõnnestumist. Kui nelinurkne plaat ja kogu sellel asuv aparatuur lühenesid veidi eetrituule puhumise suunas, siis pidi valgus läbima lühema tee. Isegi kui tuul oleks edasi-tagasi liikuvale kiirele ikkagi pidurdavalt mõjunud, siis oleks lühem tee lubanud kiirel lõpetada teekonna täpselt sama ajaga nagu juhul, kui poleks olnud ei tuult ega lühenemist. Teiste sõnadega, lühenemine on just täpselt nii suur, et hoiab valguse kiiruse konstantsena, vaatamata suunale, kuhu Michelson-Morley seade on pööratud.

Mispärast, võite nüüd küsida, ei saa teooriat kontrollida lihtsalt seadme pikkuse mõõtmise teel, selleks et märgata, kas ta lüheneb Maa liikumise suunas või mitte? Kuid joonlaud lüheneb ju samas proportsioonis. Tulemusena kujunevad mõõtmistulemused samasuguseks nagu siis, kui mingit lühenemist üldse ei esineks. Liikuval Maal allub *iga keha* lühenemisele. Olukord sarnaneb Poincaré mõttelise katsega (vt. esimene peatükk), kus kosmos muutub järsku tuhandeid kordi suuremaks, ainult selle vahega, et Lorentz-FitzGeraldi teooria põhjal toimuvad muutused üksnes ühes suunas. Et muutuvad kõik kehad, siis pole mingit võimalust seda muutumist avastada. Kindlates piirides (piirid paneb topoloogia — teadus omadustest, mis keha deformeerumisel ei muutu) on kuju niisama suhteline nagu suurus. Katseseadme, niisamuti nagu kõige muu maapealse lühenemist võiks märgata ainult olend, kes ei asu Maal ega liigu koos sellega.

Paljud relatiivsusteooriast rääkinud kirjanikud on Lorentz-FitzGeraldi lühenemishüpoteesi pidanud hüpoteesiks *ad hoc* (ladinakeelne väljend, mis tähendab «ainult antud juhul»), mida ei saa kontrollida ühegi teise katsega. Nagu näitas Adolf Grünbaum, pole niisugune väide täiesti õige. Lühenemisteooria osutus teooriaks *ad hoc* üksnes selles mõttes, et tollal polnud



mingit võimalust seda kontrollida. Põhimõtteliselt pole ta sugugi teooria *ad hoc* ja seda tõestati 1932. aastal, mil Kennedy ja Thorndike sooritasid oma kuulsa katse.

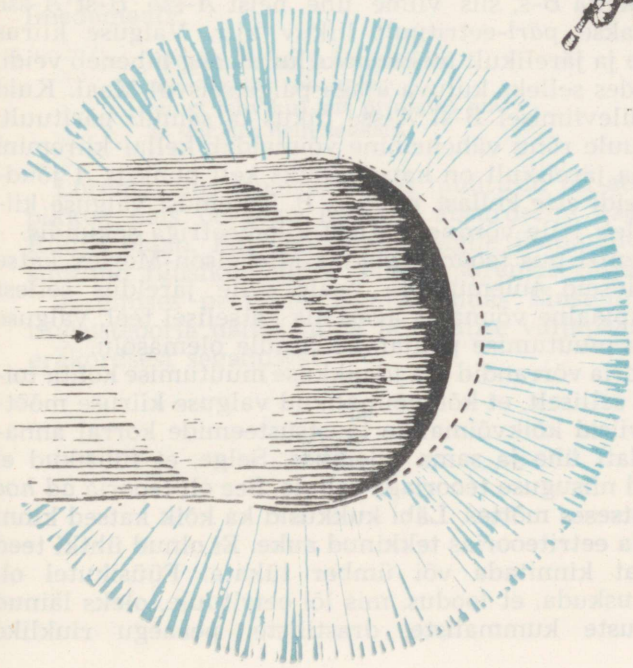
Roy J. Kennedy ja Edward M. Thorndike, kaks ameerika füüsikut, kordasid Michelson-Morley katset ühe olulise erinevusega: selle asemel et seadme õlad maksimaalselt võrdseks teha, muutsid nad õlgade pikkused nii erinevaks kui võimalik. Selleks et avastada erinevust aegades, mis kulub kahel valguskiirel vastassuunaliste teede läbimiseks, pandi riist pöörlema. Vastavalt lühenemisteooriale peaks aegade erinevus seadme pöörlemisel muutuma. See muutus oleks märgatav (nagu Michelsoni katseski) kahe kiire liitumisel tekkiva interferentspildi muutumise järgi. Niisugust muutust aga ei avastatud.

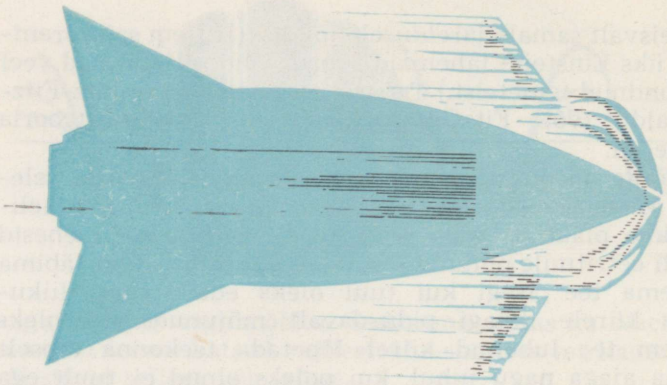
Kõige lihtsam oleks lühenemisteooriat olnud kontrollida sel teel, et mõõta kiirtekimbu kiirused kahel juhul: kui kiir liigub piki Maa liikumise suunda ja sellele vastassuunas. Ilmselt ei muuda tee lühenemine eetrituule avastamist võimatuks, tingimusel, et mingi eetrituul üldse olemas on. Enne hiljaaegu avastatud Mössbaueri efekti (sellest tuleb juttu kaheksandas peatükis) takistasid hiiglaslikud tehnilised raskused niisuguse katse korraldamist. 1962. aasta veebruaris, Londoni Kuningliku Seltsi istungil, selgitas professor Christian Møller Kopenhaageni ülikoolist, kui kerge on

taolist katset sooritada Mössbaueri efekti abil. Selleks seatakse elektromagnetiliste võnkumiste allikas ja nende võnkumiste vastuvõtja pöörleva aluse vastasotstesse. Møller näitas, et selline katse võib esialgse lühenemisteooria ümber lükata. Võimalik, et käesoleva raamatu ilmumise ajaks on niisugune katse juba tehtud.

Kuigi seesuguseid eksperimente ei saanud Lorentzi ajal sooritada, nägi ta nende põhimõttelist võimalikkust ja pidas täiesti põhjendatuks oletust, et sellised katsed nagu Michelsoni eksperimentki annavad negatiivse tulemuse. Et niisugust tõenäolist tulemust seletada, tegi Lorentz esialgses teoorias olulise täienduse. Ta tõi sisse ka aja muutumise. Lorentz väitis, et kella käik aeglustub eetrituule mõjul ja just niiviisi, et mõõdetud val-







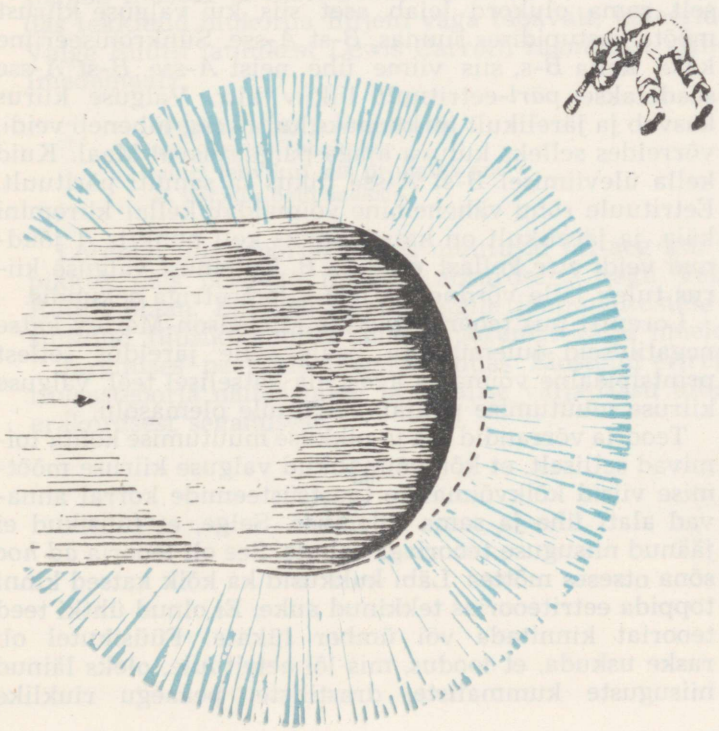
mingit võimalust seda kontrollida. Põhimõtteliselt pole ta sugugi teooria *ad hoc* ja seda tõestati 1932. aastal, mil Kennedy ja Thorndike sooritasid oma kuulsa katse.

Roy J. Kennedy ja Edward M. Thorndike, kaks ameerika füüsikut, kordasid Michelson-Morley katset ühe olulise erinevusega: selle asemel et seadme õlad maksimaalselt võrdseks teha, muutsid nad õlgade pikkused nii erinevaks kui võimalik. Selleks et avastada erinevust aegades, mis kulub kahel valguskiirel vastassuunaliste teede läbimiseks, pandi riist pöörlema. Vastavalt lühenemisteooriale peaks aegade erinevus seadme pöörlemisel muutuma. See muutus oleks märgatav (nagu Michelsoni katseski) kahe kiire liitumisel tekkiva interferentspildi muutumise järgi. Niisugust muutust aga ei avastatud.

Kõige lihtsam oleks lühenemisteooriat olnud kontrollida sel teel, et mõõta kiirtekimbu kiirused kahel juhul: kui kiir liigub piki Maa liikumise suunda ja sellele vastassuunas. Ilmselt ei muuda tee lühenemine eetrituule avastamist võimatuks, tingimusel, et mingi eetrituul üldse olemas on. Enne hiljaaegu avastatud Mössbaueri efekti (sellest tuleb juttu kaheksandas peatükis) takistasid hiiglaslikud tehnilised raskused niisuguse katse korraldamist. 1962. aasta veebruaris, Londoni Kuningliku Seltsi istungil, selgitas professor Christian Møller Kopenhaageni ülikoolist, kui kerge on

taolist katset sooritada Mössbaueri efekti abil. Selleks seatakse elektromagnetiliste võnkumiste allikas ja nende võnkumiste vastuvõtja pöörleva aluse vastasotstesse. Møller näitas, et selline katse võib esialgse lühenemisteooria ümber lükata. Võimalik, et käesoleva raamatu ilmumise ajaks on niisugune katse juba tehtud.

Kuigi seesuguseid eksperimente ei saanud Lorentzi ajal sooritada, nägi ta nende põhimõttelist võimalikkust ja pidas täiesti põhjendatuks oletust, et sellised katsed nagu Michelsoni eksperimentki annavad negatiivse tulemuse. Et niisugust tõenäolist tulemust seletada, tegi Lorentz esialgses teoorias olulise täienduse. Ta tõi sisse ka aja muutumise. Lorentz väitis, et kella käik aeglustub eetrituule mõjul ja just niiviisi, et mõõdetud val-

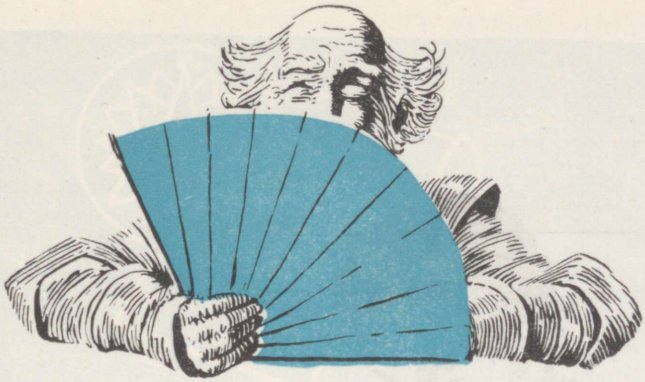


guse kiirus jääb alati võrdseks 300 000 kilomeetriga sekundis.

Toome konkreetse näite. Oletame, et meil on küllalt täpsed kellad, selleks et mõõta valguse kiirust. Valgus saadetakse mööda sirget punktist *A* punkti *B* Maa liikumise suunas. Sünkroniseerime kaks kella punktis *A*, pärast seda viime ühe neist punkti *B*. Märgime ajahetke, mil valguskiir alustab liikumist punktist *A*, ja aja (mõõdetuna teise kella järgi), mil kiir jõuab *B*-sse. Et valgus liiguks sel puhul *vastu* eetrituult, siis peaks ta kiirus vähenema ja retkeks kuluv aeg oleks veidi pikem kui paigalseisva Maa korral. Kas märkasite lünka selles arutelus? *A*-st *B*-sse liikuv kell liigub samuti vastu eetrituult, mis pidurdab kella punktis *B*, nii et see jääb veidi taha, võrreldes kellaga punktis *A*. Tulemus: valguse mõõdetav kiirus jääb samaks — 300 000 kilomeetrit sekundis. Lorentz kinnitab, et täpselt sama olukord leiab aset siis, kui valguse kiirust mõõta vastupidises suunas, *B*-st *A*-sse. Sünkroniseerime kaks kella *B*-s, siis viime ühe neist *A*-sse. *B*-st *A*-sse saadetakse *päri*-eetrituult liikuv kiir. Valguse kiirus kasvab ja järelikult teekonnaks kuluv aeg lüheneb veidi, võrreldes selleks kuluva ajaga paigalseisval Maal. Kuid kella üleviimisel *B*-st *A*-sse liikus ta samuti pärituult. Eetrituule rõhu vähenemine võimaldab kellal kiiremini käia, ja järelikult on katse lõpuks kell punktis *A* jõudnud veidi *ette* kellast punktis *B*. Tulemus: valguse kiirus tuleb jälle võrdne 300 000 kilomeetriga sekundis.

Lorentzi uus teooria selgitas Michelson-Morley katse negatiivseid tulemusi ja peale selle järeldus sellest printsipiaalne võimalus avastada katselisel teel, valguse kiiruse muutumise põhjal, eetrituule olemasolu.

Teooria võrrandid aja ja pikkuse muutumise kohta toimivad selliselt, et kõikvõimalikud valguse kiiruse mõõtmise viisid kõikvõimalike taustsüsteemide korral annavad alati ühe ja sama tulemuse. Selge, et füüsikud ei jäänud niisuguse teooriaga rahule. See oli teooria *ad hoc* sõna otseses mõttes. Läbi kukkusid ka kõik katsed kinni toppida eetriteoorias tekkinud auke. Ei olnud ühtki teed teooriat kinnitada või ümber lükata. Füüsikutel oli raske uskuda, et loodus, mis lõi eetrituule, oleks läinud niisuguste kummaliste, drastiliste, peaaegu riuklike



võteteni, selleks et ainult tuule avastamist takistada. Inglise filosoof ja matemaatik Bertrand Russell kirjeldas tekkinud olukorda hiljem väga tabavalt, tsiteerides Valge Rüütli laulukest Lewis Carrolli raamatust «Alice Imedemaal»:

> «Põskhabeme ja vurrud ka
> ma värviks rohekaks;
> suurt lehvikut siis pruugiks ma,
> et varjata neid saaks!»

Lorentzi uus teooria, milles muutusid nii aeg kui ka pikkus, näis peaaegu niisama absurdsena nagu Valge Rüütli plaan. Ent vaatamata kõigile jõupingutustele ei suutnud füüsikud mitte midagi paremat välja mõelda.

Järgmises peatükis näeme, kuidas Einsteini erirelatiivsusteooria näitas julge ja oivalise väljapääsu tollest erakordsest segadusest.


1905

3. Erirelatiivsusteooria. I osa

1905. aastal avaldas Albert Einstein trükis oma kuulsa artikli sellest, mis hiljem sai tuntuks erirelatiivsusteooria nime all. Sel ajal oli Einstein noor 26-aastane abielumees ja töötas eksperdina Šveitsi patendibüroos. Tema karjäär Zürichi Polütehnilise Instituudi üliõpilasena ei olnud hiilgav. Ta eelistas lugeda, mõelda ning unistada, selle asemel et vaevata oma pead igasuguse tühja-tähjaga eksamite hiilgava sooritamise nimel. Paaril korral katsus ta füüsikat õpetada, kuid osutus üsna kesiseks õpetajaks ja oli sunnitud sellest ametist loobuma.

Lool on ka teine külg. Juba poisikesepõlves oli Einstein sügavalt mõtisklenud looduse põhiseaduste üle. Hiljem meenutas ta kahte lapsepõlve suurimat «imet»: kompassi, mida isa näitas talle, kui ta oli nelja-viieaastane, ja raamatut Eukleidese geomeetriast, mida ta luges kaheteistkümneaastasena. Need kaks «imet» on Einsteini elutöö sümboliteks: kompass on sümboliks füüsikalisele geomeetriale, sellele meist väljapoole jäävale «hiiglaslikule maailmale», mida me iialgi absoluutselt täpselt tundma ei õpi; raamat on sümboliks puhtale geomeetriale, struktuurile, mis on absoluutselt kindel,

kuid ei peegelda täielikult välismaailma. Juba kuueteistkümnendaks eluaastaks olid Einsteinil, peaasjalikult tänu iseenese jõupingutustele, põhjalikud teadmised matemaatikast, sealhulgas analüütilisest geomeetriast ning integraal- ja diferentsiaalarvutusest.

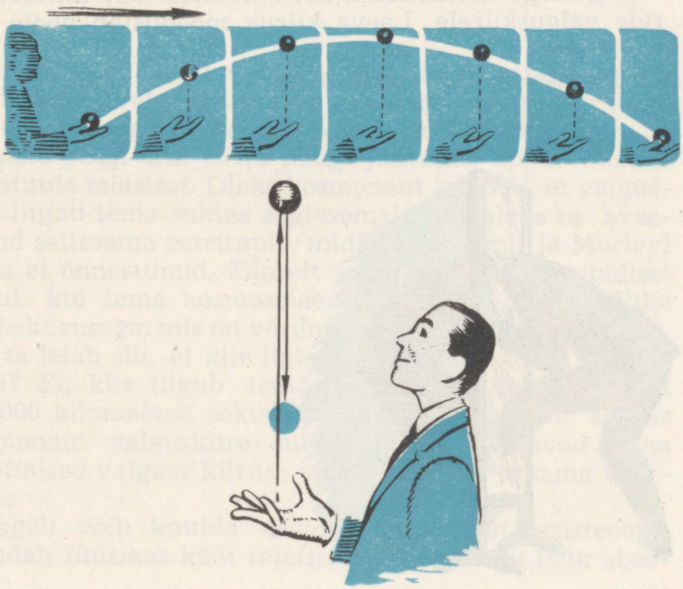
Šveitsi patendibüroos töötades luges ja mõtles ta kõigist valguse ning liikumisega seotud segastest probleemidest. Erirelatiivsusteooria oli suurepäraseks katseks selgitada paljusid seletamatuid eksperimente, mille seast Michelson-Morley katse osutus kõige hämmastavamaks ja tuntumaks. Tuleb alla kriipsutada, et tehti palju teisigi katseid, mis muutsid olukorra elektromagnetiliste nähtuste teoorias äärmiselt kriitiliseks. Kui Michelsoni ja Morley katset poleks kunagi tehtudki, oleks erirelatiivsusteooria ometi ilmunud. Einstein rääkis hiljem ise, kuivõrd tühist osa oli see katse tema aruteludes tegelikult mänginud. Loomulikult, kui Michelson ja Morley oleksid märganud eetrituule olemasolu, siis oleks erirelatiivsusteooria algusest peale mõttetu olnud. Ent katse negatiivne tulemus oli ainult üks neist paljudest asjaoludest, mis Einsteini selle teooriani viisid.

Nägime juba, kuidas Lorentz ja FitzGerald püüdsid eetrituule teooriat päästa oletusega, et selle tuule rõhk kutsub mingil senitundmatul viisil esile liikuvate füüsikaliste kehade lühenemise. Einstein, käies Ernst Machi jälgedes, tegi julgema oletuse. Einstein väitis, et põhjus, miks Michelson ja Morley eetrituule olemasolu avastada ei suutnud, on lihtne: *eetrituult pole olemaski.* Ta ei väitnud, et eetrit pole olemas, ta ütles ainult, et kui eeter tõepoolest eksisteerib, siis ei mõjuta ta mingil moel ühtlase liikumise mõõtmisi. (Hilisematel aastatel on paljud väljapaistvad füüsikud teinud ettepaneku anda terminile «eeter» jälle eluõigus, kuigi mitte vanas, liikumatu taustsüsteemi tähenduses.)

Klassikaline füüsika — Isaac Newtoni füüsika — näitas, et kui te asute ühtlaselt liikuval kehal, näiteks igast küljest suletud vagunis, nii et teil pole võimalust jälgida ümbrust, siis ei leidu mehhaanikas katset, mille abil te oma liikumist saaksite tõestada. (Muidugi eeldab see, et ühtlane liikumine on täiesti sujuv, ilma tõugete ja kiikumiseta, mis võiksid liikumise olemasolule viidata.)

Kui te viskate palli otse üles, tuleb see jälle otse alla tagasi. Kõik toimub täpselt nii nagu siis, kui rong paigal seisab. Kui vaatleja, kes asub väljaspool liikuvat vagunit, maapinnal, suudaks näha läbi vaguni seinte, siis näeks ta palli teed kõverjoonelisena. Ent teie jaoks vaguni sees liigub pall otse üles-alla. Ja väga tore, et kehad sel kombel käituvad. Muidu ei saaks kunagi mängida niisuguseid mänge nagu tennist või pesapalli. Iga kord, kui pall õhku lendab, liiguks Maa tema alt ära kiirusega kolmkümmend kilomeetrit sekundis.

Erirelatiivsusteooria on Newtoni klassikalise relatiivsusteooriaga võrreldes samm edasi. See väidab: vähe sellest, et me ei suuda rongi liikumist *mehhaanikakatsetes* avastada — võimatu on määrata seda ka *optikakatsete* abil, täpsemalt, katsetades elektromagnetilise kiirgusega. Erirelatiivsusteooria olemuse võib lühidalt kokku võtta järgnevas: ühtlast liikumist pole võimalik kindlaks teha ühelgi absoluutsel viisil. Kui me viibime ühtlaselt ja sujuvalt liikuvas rongis, siis tuleb meil oma liikumise



kindlakstegemiseks aknast välja vaadata ja mõnd teist eset, näiteks telefoniposti jälgida. Isegi sel juhul ei või me täiesti kindlad olla, kas möödub rong postist või post rongist. Kõige rohkem, mis me teha saame, on öelda, et rong ja maapind on suhtelises ühtlases liikumises.

Pange tähele: viimases peatükis on pidevalt korratud sõna «ühtlane». Ühtlane liikumine on jääva kiirusega liikumine mööda sirgjoont. Mitteühtlaselt ehk kiirendusega liikuv keha ei liigu mööda sirgjoont ja tema liikumine muutub kas kiiremaks või aeglasemaks (kui liikumine aeglustub, siis öeldakse, et kiirendus on negatiivne). Erirelatiivsusteooria ei ütle kiirendusega liikumise kohta mitte midagi uut.

Ühtlase liikumise suhtelisus paistab küllalt süütu nähtusena, kuid tegelikult viib ta meid otsekohe uude kummalisse maailma, mis esimesel pilgul meenutab Lewis Carrolli mõttetut maailma peegli taga.* Sest kui ei ole meetodit, mille abil teha kindlaks ühtlast liikumist universaalse, paigalseisva taustsüsteemi suhtes, nii nagu seda on eeter, siis peab valgus käituma üsna fantastiliselt, täiesti vastupidi tavalisele kogemusele.

Kujutlege kosmonauti, kelle kosmoselaev kihutab järele valguskiirele. Laeva kiirus moodustab poole val-

* Raamatus «Alice Imedemaal».



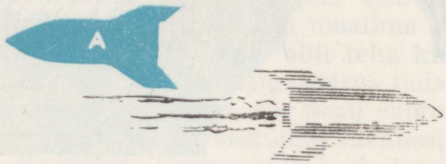


guse kiirusest. Täpsete mõõtmistega teeb kosmonaut aga kindlaks, et valguskiir möödub temast ikkagi kiirusega 300 000 kilomeetrit sekundis. Mõelge hetkeks järele ja te saate peagi aru, et nii pidigi juhtuma, kui loobusime eetrituule mõistest. Oleks kosmonaut leidnud, et valguskiir liigub tema suhtes aeglasemalt, siis oleks ta avastanud sellesama eetrituule, mida Michelsonil ja Morleyl leida ei õnnestunud. Täpselt sama on õige vastupidisel juhul: kui tema kosmoselaev liigub otse valgusallika poole kiirusega, mis on võrdne poolega valguse kiirusest, kas ta leiab siis, et kiir ligineb talle kaks korda nii kiiresti? Ei, kiir liigub tema poole niikuinii kiirusega 300 000 kilomeetrit sekundis. Vaatamata sellele, kuidas kosmonaut valguskiire suhtes liigub, annavad tema mõõtmised valguse kiiruse jaoks alati ühe ja sama väärtuse.

Sageli võib kuulda arvamust, et relatiivsusteooria muudab füüsikas kõik relatiivseks, purustab kõik abso-

luudid. Mitte ükski väide ei saa tõest kaugemal olla. See teooria muudab relatiivseks mõningad mõisted, mis varem arvati absoluutsed olevat, ent toob seejuures sisse uued absoluudid. Klassikalises füüsikas oli valguse kiirus suhteline suurus selles mõttes, et ta pidi muutuma, olenevalt vaatleja liikumisest. Erirelatiivsusteoorias muutub valguse kiirus selles mõttes uueks absoluudiks. Pole oluline, kuidas liigub valgusallikas või kuidas liigub vaatleja — valguse kiirus vaatleja suhtes ei muutu kunagi.

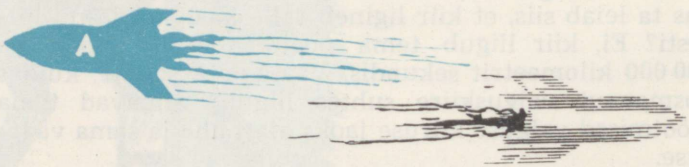
Kujutlege kahte kosmoselaeva *A* ja *B*. Kosmoses ei leidu midagi peale nende laevade. Nad liiguvad ühtlaselt teineteisele vastu. Kas saavad kosmonaudid mingil viisil otsustada, milline järgmisest kolmest olukorrast on «tõene» või «absoluutne»?



1. Laev *A* on paigal, liigub laev *B*;



2. laev *B* on paigal, liigub laev *A*;



3. mõlemad laevad liiguvad.

Einstein vastab: ei, niisugust viisi ei leidu. Ükskõik kumb kosmonaut võib soovi korral valida laeva *A* paigalseisvaks taustsüsteemiks. Pole ühtki katset, kaasa arvatud katsed valguse või mõne teise elektrilise ja magnetilise nähtusega, mis sellise valiku vääraks tunnistaks. Seesama on õige ka juhul, kui ta valib taustsüsteemiks laeva *B*. Kui talle meeldib mõlemat laeva liikuvana vaadelda, siis valib ta taustsüsteemi lihtsalt väljaspool laevu: paiga, mille suhtes mõlemad laevad liiguvad. Pole mõtet küsimusel, milline neist valikuist on «õige» ja milline «väär». Rääkida ühe kosmoselaeva absoluutsest liikumisest tähendab öelda midagi, millel ei ole mõtet. On olemas ainult üks reaalsus: suhteline liikumine, mis toob laevad ühtlaselt teineteisele lähemale.

Seda laadi raamatus nagu käesolev väljaanne on võimatu laskuda erirelatiivsusteooria detailidesse, eriti niisugustesse, mis on seotud matemaatikaga. Me peame rahulduma sellega, et märgime ära mõned kõige rabavamad järeldused, mis tulenevad loogiliselt Einsteini poolt teooria «kaheks põhipostulaadiks» nimetatud seisukohtadest.

1. Pole olemas võimalust otsustada, kas keha on liikumatu eetri suhtes paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt.
2. Vaatamata valgusallika liikumisele liigub valgus tühjas ruumis alati ühe ja sama jääva kiirusega.

(Teist postulaati ei tohi ära segada, nagu seda sageli tehakse, valguse konstantse kiirusega ühtlaselt liikuva *vaatleja* suhtes. See seisukoht *järeldub* postulaatidest.)

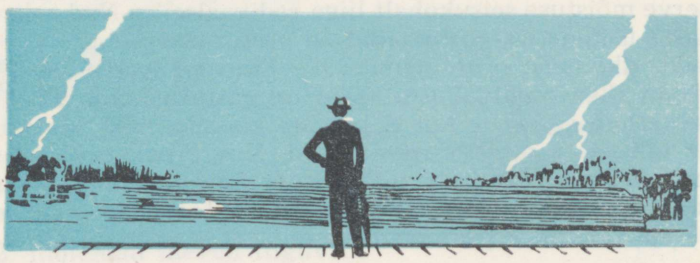
Teised füüsikud on loomulikult samuti neid postulaate uurinud. Lorentz katsus neid kokku sobitada oma teooriaga, milles absoluutne pikkus ja aeg muutusid eetrituule rõhu tõttu. Enamik füüsikuid pidas neid aga terve mõistuse seisukohalt liiga radikaalseiks. Nad eelistasid uskuda, et postulaadid on vasturääkivad ja vähemalt üks neist peab olema vale. Einstein vaatles probleemi sügavamalt. Postulaadid on vasturääkivad ainult sel juhul, väitis ta, kui ei loobuta klassikalisest vaatest, et pikkus ja aeg on absoluutsed. Kui Einstein avaldas oma teooria, siis ta ei teadnud, et Lorentzki oli samas suunas mõelnud, aga nagu Lorentz sai ta aru, et pikkuse ja aja mõõtmine peab olenema objekti ja vaatleja suhte-

lisest liikumisest. Lorentz läbis aga ainult poole teest. Ta säilitas absoluutse pikkuse ja aja mõiste paigalolevate kehade jaoks. Ta arvas, et eetrituul moonutab «tõelist» pikkust ja aega. Einstein läks lõpuni. Ta väitis, et eetrituult ei ole olemas. Absoluutse pikkuse ja aja mõisted on mõttetud. Siin ongi võti Einsteini erirelatiivsusteooria mõistmiseks. Kui ta seda pööras, hakkasid kõik lukud aeglaselt avanema.

Et erirelatiivsusteooriat näitlikult seletada, selleks tõi Einstein oma kuulsa mõttelise katse. Kujutlege, sõnas ta, et vaatleja M seisab raudtee ääres. Kindlal kaugusel on raudteel märgitud punkt A. Samal kaugusel temast on teisel pool märgitud punkt B. Oletame, et punktides A ja B lööb ühel ajal välku. Vaatleja teab, et need sündmused on samaaegsed, sest ta näeb kahte sähvatust ühel ja samal ajahetkel. Et ta asub nii punktist A kui ka punktist B ühekaugusel ja et valguse kiirus on jääv, siis jõuab ta järeldusele, et välku lõi mõlemas paigas üheaegselt.

Nüüd oletame, et välgusähvatuse hetkel liikus rong suure kiirusega A-st B suunas. Sel momendil oli rongis olev vaatleja — nimetame teda M' — täpselt kohakuti tee kõrval seisva vaatlejaga M. Et M' liigub ühe välgu poole ja teisest eemale, siis näeb ta välku B-s enne kui A-s. Olles teadlik oma liikumisest, võtab ta arvesse valguse kiiruse lõplikkuse ja teeb järelduse, et mõlemad välgud sähvatasid üheaegselt.

Kõik on korras. Kuid vastavalt erirelatiivsusteooria kahele põhipostulaadile (mida kinnitab ka Michelson-Morley katse) on meil täpselt samasugune alus oletada,

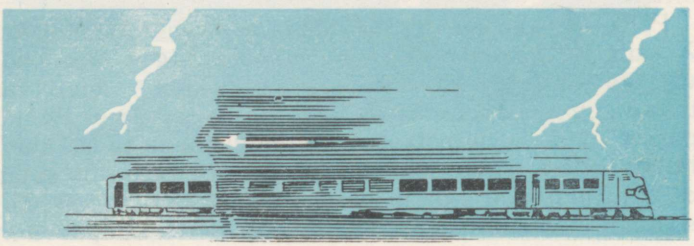




et rong on paigal, kuna maapind liigub kiiresti rataste all tagasi. *Sellest* seisukohast lähtudes jõuab rongis viibiv vaatleja *M′* järeldusele, et välku lõi *B*-s varem kui *A*-s, selles järjekorras, nagu tema neid jälgis. Ta teab, et asub kahe välgu vahepeal, ja kuna ta end paigalolevana vaatleb, peab ta järeldama, et välgulöök, mida ta varem nägi, toimus enne kui see, mida ta hiljem märkas.

M, vaatleja maapinnal, on sunnitud sellega nõustuma. Tõsi küll, ta näeb välgulööke samaaegsetena, kuid nüüd on see tema, kes oletatavasti liigub. Kui ta arvestab valguse kiirust ja seda, et liigub *A*-s toimunud sähvatuse poole, eemale sähvatusest *B*-s, siis jõuab ta järeldusele, et välgulöök pidi *B*-s toimuma enne kui *A*-s.

Seega oleme sunnitud jõudma järeldusele, et küsimusele välkude samaaegsusest ei saa vastata ühelgi absoluutsel viisil. Vastus oleneb taustsüsteemi valikust. Muidugi, kui kaks sündmust on samaaegsed ühes ja samas kohas, siis võib absoluutselt kindlalt väita, et nad on samaaegsed. Kui kaks lennukit õhus kokku põrkavad,



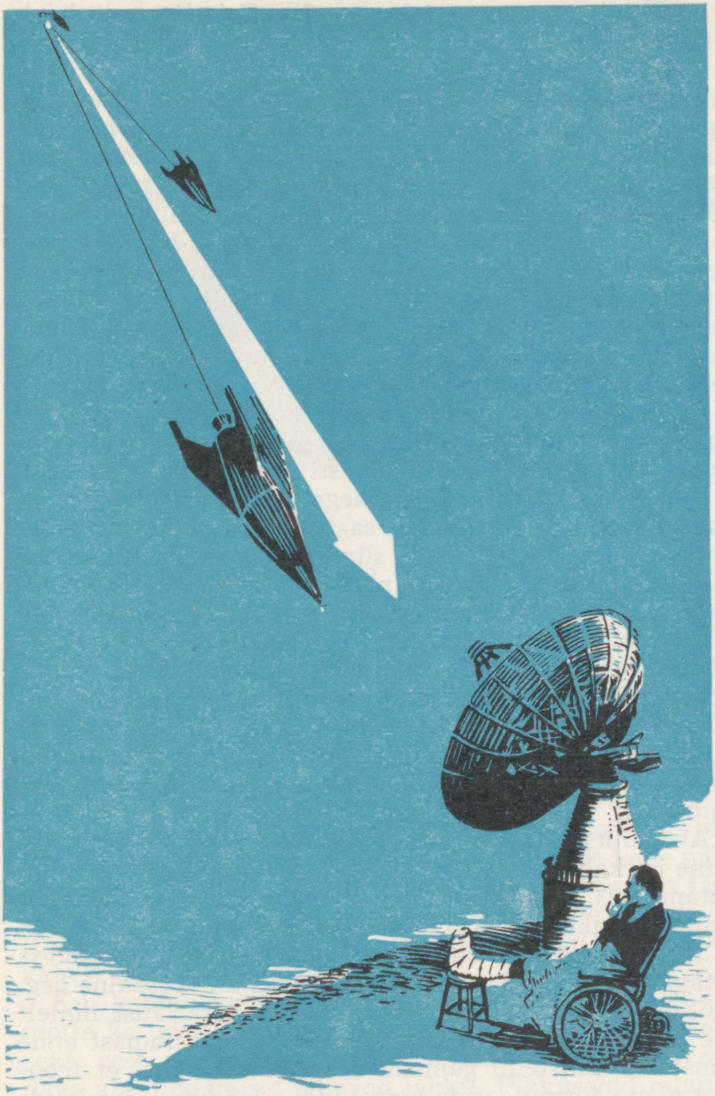
siis ei leidu taustsüsteemi, milles need lennukid puruneksid erinevatel ajahetkedel. Ent mida suurem on vahemaa kahe sündmuse vahel, seda suuremad raskused tekivad samaaegsuse hindamisel. Oluline on mõista, et siin ei ole küsimus mitte selles, nagu ei suudaks me teada saada asjade tõelist olukorda. *Asjade reaalset, tõelist olukorda polegi olemas.* Universumi jaoks pole absoluutset aega, millega saaks mõõta absoluutset üheaegsust. Erinevates ruumipunktides toimuvate sündmuste absoluutne samaaegsus on mõttetu mõiste.

Niisuguse ettekujutuse radikaalsusest võib aru saada mõttelise katse abil, milles vaadeldakse suuri kaugusi ja hiiglaslikke kiirusi. Oletame, et mõni olend Galaktika teises osas asuval planeedil *X* katsub ühendusse astuda Maaga. Ta saadab välja raadiosignaali. See on muidugi elektromagnetiline laine, mis levib ruumis valguse kiirusega. Oletame, et Maa ja planeet *X* on teineteisest 10 valgusaasta kaugusel. Kaksteist aastat enne seda, kui raadioastronoom signaali kätte saab, anti talle Nobeli preemia. Erirelatiivsusteooria lubab meil ilma igasuguste kõhklusteta öelda, et astronoom sai preemia *enne*, kui planeedilt *X* lähetati signaal.

Kümme minutit pärast signaali kinnipüüdmist astronoom aevastab. Erirelatiivsusteooria lubab ükskõik millises taustsüsteemis oleval vaatlejal samuti kõhklemata öelda, et astronoom aevastas *pärast* seda, kui planeedilt *X* saadi signaal.

Nüüd oletame, et mingil ajahetkel selle kümne aasta jooksul, mis signaal Maa poole lendas (oletame näiteks, et kolm aastat enne signaali kinnipüüdmist), kukkus astronoom oma raadioteleskoobilt ja murdis jala. Erirelatiivsusteooria ei luba ilma kitsendusteta öelda, kas ta murdis jala enne või pärast signaali lähetamist planeedilt *X*.

Põhjus on järgnevas. Vaatleja, kes lahkub planeedilt *X* ajal, mil signaal teele saadetakse, ja liigub Maa poole väikese kiirusega, kui mõõta seda Maa suhtes, leiab (vastavalt oma ajamõõtmistele), et astronoom murdis jala pärast signaali väljastamist. Muidugi jõuab ta ise Maale hulga hiljem pärast signaali saabumist, võib-olla sajandeid hiljem. Ent kui ta oma kella järgi arvutab välja signaali väljastamise aja, saab ta varasema kuupäeva kui

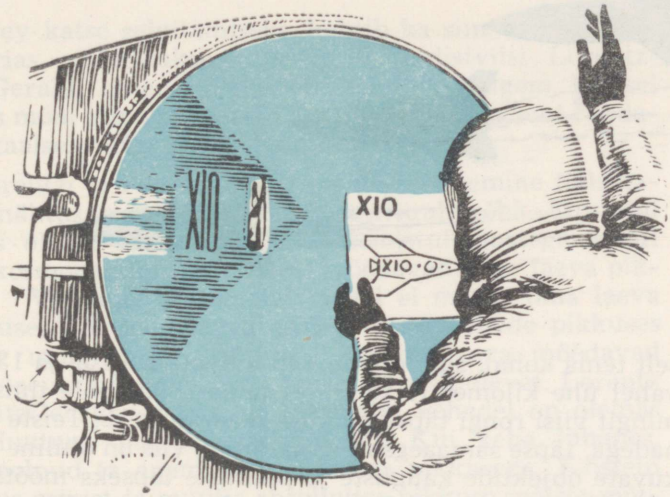


see, millal astronoom jala murdis. Teiselt poolt leiab teine vaatleja, kes samuti lahkus planeedilt *X* hetkel, mil saadeti välja signaal, kuid kes liigub valguse kiirusele lähedase kiirusega, et astronoom murdis jala *enne* signaali väljastamist. Selle asemel et raisata oma teekonnale sajandeid, kulutab ta selleks, oletame, veidi rohkem kui kümme aastat, juhul kui mõõta aega Maa peal. Ent aja aeglustumise tõttu kiiresti liikuvas kosmoselaevas näib kosmonaudile, et ta kulutas lennuks kõigest mõne kuu. Talle jutustatakse Maal, et astronoom murdis jala kolm aastat tagasi. Vastavalt kosmoselaeva kellale asus signaal teele mõni kuu enne seda. Kosmonaut jõuabki järeldusele, et jalg murti aastaid enne seda, kui signaal lahkus planeedilt *X*.

Kui kosmonaut liiguks valguse kiirusega (loomulikult on see ainult hüpotees, reaalselt niisugust võimalust ei esine), siis jääb tema kell täiesti seisma. Talle tundub, et reisiks ei kulunud üldse aega. Tema seisukohast on kaks sündmust — signaali saatmine ja selle vastuvõtmine — samaaegsed. *Kõik* sündmused Maal kümneaastase ajavahemiku jooksul näivad talle juhtunud olevat enne signaali saatmist. Vastavalt erirelatiivsusteooriale ei ole olemas «eelistatud» taustsüsteemi, s. t. pole põhjust eelistada ühe vaatleja seisukohta teise omale. Kiiresti liikuva kosmonaudi arvutused on niisama seaduslikud, täpselt niisama «õiged» kui aeglaselt liikuval kosmonaudilgi. Pole olemas universaalset, absoluutset aega, mida saaks kasutada nende aegade erinevuse määramiseks.

Absoluutse samaaegsuse klassikalise mõiste purustamine on kahtlemata erirelatiivsusteooria kõige «kaunim ootamatus». (Väljend «kaunim ootamatus» on laenatud tuumafüüsiku Edward Telleri hiljaaegu peetud kõnest relatiivsusteooria kohta.) Newton pidas iseenesestmõistetavaks, et kogu kosmoses kehtib üks universaalne aeg. Niisamuti arvasid ka Lorentz ja Poincaré. Just nimelt see takistas neid erirelatiivsusteooriat avastamast enne Einsteini. Einsteini geniaalsus lubas tal näha, et teooriat ei saa formuleerida ammendava loogilise järjekindlusega, täiesti loobumata universaalse kosmilise aja mõistest.

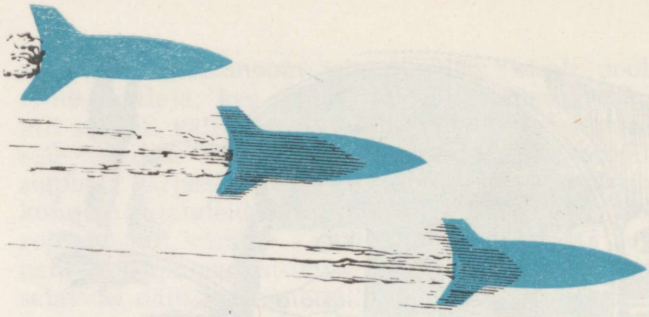
On olemas, rääkis Einstein, ainult kohalikud ajad.



Maa peal näiteks liiguvad kõik kehad ruumis ühesuguse kiirusega, seepärast näitavad kõik kellad üht ja sama «maapealset aega». Seda liiki kohalikku aega niisuguse liikuva keha jaoks, nagu seda on Maa, nimetatakse keha «omaajaks». Selles on olemas oma absoluutsed «enne» ja «pärast» (ilmselt ei hakka ükski kosmonaut surema, enne kui ta on sündinud), ent kui sündmused toimuvad väga kaugetes ruumipunktides, siis on tegemist pikkade ajaintervallidega, mille piires on võimatu öelda, milline sündmus toimus varem, milline hiljem. Vastus oleneb vaatleja liikumisest nende kahe nähtuse suhtes. Muidugi on ühe vaatleja otsustus just täpselt niisama «õige» kui teise vaatleja erinev seisukoht. Kõik see järeldub raudse loogikaga erirelatiivsusteooria kahest põhipostulaadist.

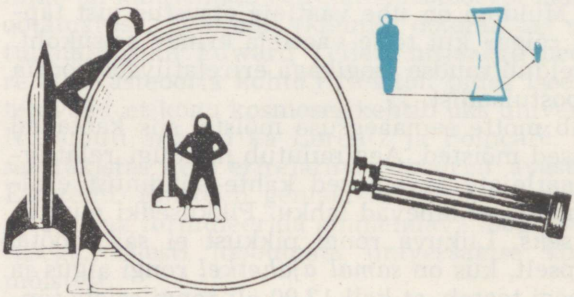
Kui kaotab mõtte samaaegsuse mõiste, siis kaotavad mõtte ka teised mõisted. Aeg muutub muidugi relatiivseks, sest vaatlejate arvamused kahte sündmust eraldava aja hindamisel lähevad lahku. Pikkusedki muutuvad relatiivseks. Liikuva rongi pikkust ei saa mõõta, teadmata täpselt, kus on *samal ajahetkel* rongi algus ja lõpp. Kui keegi teatab, et kell 13.00 oli rongi esiots täp-

TRÜ Raamatukogu
TARTU ÜLIKOOLI RAAMATUKOGU



selt tema kohal, aga lõpp mingil ajahetkel 12.59 ja 13.01 vahel ühe kilomeetri kaugusel temast, siis pole ilmselt mingit viisi rongi täpse pikkuse määramiseks. Teiste sõnadega, täpse samaaegsuse määramise viis on oluline liikuvate objektide kauguste ja pikkuste täpseks mõõtmiseks. Niisuguse meetodi puudumisel muutuvad liikuvate kehade pikkused olenevaks taustsüsteemi valikust.

Näiteks, kui kaks kosmoselaeva on suhtelises liikumises, näeb vaatleja kummalgi laeval teist laeva liikumise suunas lühenenuna. Tavalistel kiirustel on see lühenemine äärmiselt väike. Maa, mis liigub ümber Päikese kiirusega kolmkümmend kilomeetrit sekundis, tõmbub kokku ainult mõne sentimeetri võrra. Kui suhtelised kiirused on väga suured, muutub lühenemine aga märgatavaks. Õnneks selgus, et sama lühenemise valem, mille andsid FitzGerald ja Lorentz Michelson-

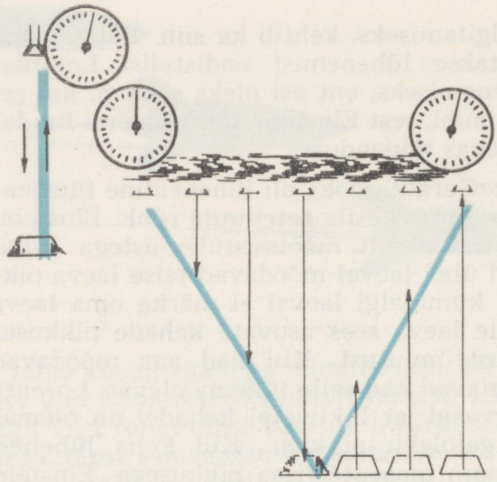


Morley katse selgitamiseks, kehtib ka siin. Relatiivsusteoorias nimetatakse lühenemist endistviisi Lorentz-FitzGeraldi lühenemiseks, ent asi oleks selgem, kui sel oleks mõni teine nimi, sest Einstein andis valemi fundamentaalselt erinevas tõlgenduses.

Lorentzi ja FitzGeraldi jaoks oli lühenemine füüsikaline nähtus, mille kutsus esile eetrituule rõhk. Einsteini jaoks oli ta seotud ainult mõõtmistulemustega: juhul kui kosmonaudid ühel laeval mõõdavad teise laeva pikkust. Vaatlejad kummalgi laeval ei märka oma laeva pikkuses või selle laeva sees asuvate kehade pikkuses mitte mingisugust muutust. Kui nad aga mõõdavad teist laeva, siis leiavad nad selle lühema olevat. Lorentz ja FitzGerald arvasid, et liikuvatel kehadel on olemas absoluutne «paigaloleku pikkus». Kui keha lühenes, siis polnud ta enam oma «tõelise» pikkusega. Einstein loobus eetrist ja muutis absoluutse pikkuse mõiste mõttetuks. Jäi ainult *mõõtmise tulemusena saadud pikkus*, see aga osutus olenevaks keha ja vaatleja suhtelisest kiirusest.

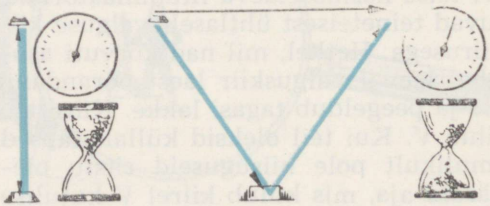
Küsite, mil viisil saab kumbki laev teisest lühem olla. Te ei küsi õigesti. Teooria ei ütle, et kumbki laev on teisest lühem. See väidab ainult, et kosmonaudid kummalgi laeval leiavad mõõtmistel, et teine laev on lühem. See on aga hoopis iseasi. Kui kaks inimest seisavad teine teisel pool hiiglasuurt kaksiknõgusat läätse, siis kumbki näeb teist endast väiksemana, ent see pole sama kui väita, et kumbki on teisest ka *tegelikult* väiksem.

Lisaks näilistele muutustele pikkuses esinevad näilised muutused veel ajas. Kosmonaudid kummalgi laeval leiavad teise laeva kella aeglasemalt käivat. Lihtne mõtteline katse näitab, et niisugune olukord peab tõepoolest aset leidma. Kujutlege, et vaatate läbi ühe kosmoselaeva illuminaatori teise kosmoselaeva illuminaatorisse. Kaks laeva mööduvad teineteisest ühtlaselt valguse kiirusele lähedase kiirusega. Hetkel, mil nad kõrvuti asuvad, saadetakse ühel laeval valguskiir laest põrandani. See langeb peeglile ja peegeldub tagasi lakke. Kiire tee kujutab endast tähte *V*. Kui teil oleksid küllalt täpsed mõõteriistad (loomulikult pole niisuguseid riistu olemas), võiksite määrata aja, mis kulub kiirel *V*-kujulise



tee läbimiseks. Jagades teepikkuse ajaga, saate valguse kiiruse.

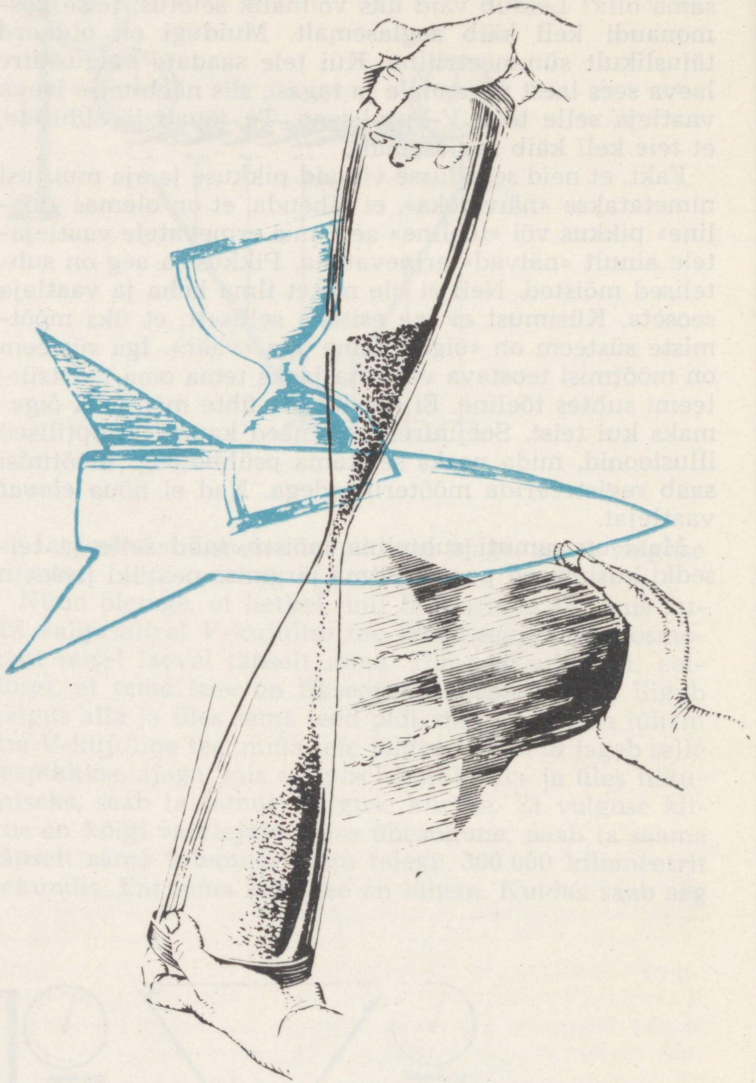
Nüüd oletage, et hetkel, mil fikseerisite aja, mis kulus valguskiirel *V*-kujulise tee läbimiseks, teeb kosmonaut teisel laeval täpselt sama. Tema seisukohast, eeldusel, et *tema* laev on fikseeritud taustsüsteem, liigub valgus alla ja üles sama teed pidi, mis ilmselt on lühem kui *V*-kujuline tee, mida teie jälgisite. Kui ta jagab selle teepikkuse ajaga, mis valgusel kulub alla ja üles liikumiseks, saab ta samuti valguse kiiruse. Et valguse kiirus on kõigi vaatlejate jaoks ühesugune, peab ta saama täpselt sama tulemuse nagu teiegi: 300 000 kilomeetrit sekundis. Ent tema kiire tee on lühem. Kuidas saab aeg

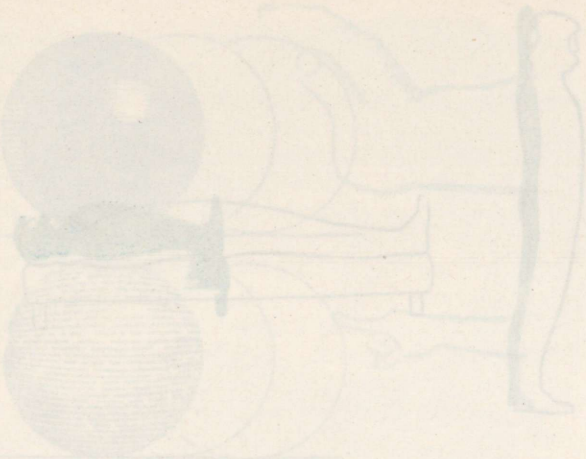


sama olla? Leidub vaid üks võimalik seletus: teise kosmonaudi kell käib aeglasemalt. Muidugi on olukord täiuslikult sümmeetriline. Kui teie saadate valguskiire laeva sees laest põrandale ja tagasi, siis näeb teise laeva vaatleja selle teed *V*-kujulisena. Ta jõuab järeldusele, et *teie* kell käib aeglasemalt.

Fakt, et neid segadusse viivaid pikkuse ja aja muutusi nimetatakse «näivateks», ei tähenda, et on olemas «tõeline» pikkus või «tõeline» aeg, mis erinevatele vaatlejatele ainult «näivad» erinevatena. Pikkus ja aeg on suhtelised mõisted. Neil ei ole mõtet ilma keha ja vaatleja seoseta. Küsimust ei saa esitada selliselt, et üks mõõtmiste süsteem on «õige», teine aga «väär». Iga süsteem on mõõtmisi teostava vaatleja jaoks tema oma taustsüsteemi suhtes tõeline. Ei saa lugeda ühte mõõtmist õigemaks kui teist. Seejuures pole need kaugeltki optilised illusioonid, mida peaks seletama psühholoog. Mõõtmisi saab registreerida mõõteriistadega. Nad ei nõua *elavat* vaatlejat.

Mass on samuti suhteline mõiste, kuid selle ja teisedki küsimused peame jätma järgmise peatüki jaoks.

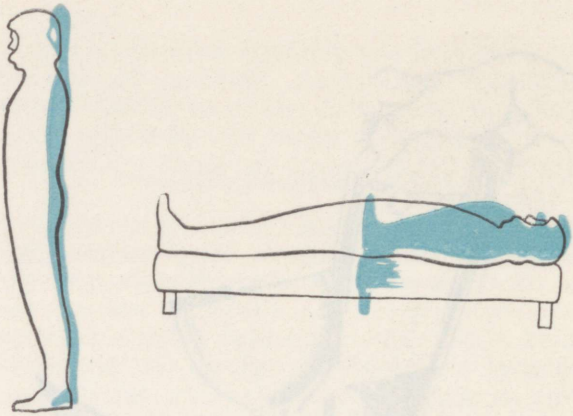




4. Erirelatiivsusteooria. II osa

Nagu nägime eelmises peatükis, on pikkus ja aeg suhtelised mõisted. Kui kaks kosmoselaeva mööduvad teineteisest jääva kiirusega, leiavad vaatlejad kummalgi laeval, et teise laeva kosmonaudid on kõhnunud ja liiguvad aeglasemalt. Kui suhteline kiirus on küllalt suur, paistavad nad liikuvat nagu näitlejad ajaluubis näidatavas filmis. Kõik perioodilised liikumised paistavad aeglustununa: pendlite ja balanssiiride liikumine kellades, südamelöögid, aatomite võnkumine jne. Nagu ütles kord Arthur Stanley Eddington, väljapaistev inglise astronoom, üks Einsteini esimesi ja kirglikumaid pooldajaid, näivad isegi sigarid teisel laeval kauem põlevat. Kahe meetri pikkune kosmonaut, kes seisab horisontaalselt liikuval laeval, on endiselt kaks meetrit pikk, kuid tema keha paistab liikumise suunas õhemana. Kui kosmonaut heidab pikali, nii et ta keha asetseb liikumise suunas, siis säilitab keha normaalse laiuse, kuid näib lühem olevat.

Kui kaks kosmoselaeva võiksid tõepoolest liikuda küllalt suure suhtelise kiirusega, selleks et niisugused muutused oleksid märgatavad, siis teeksid mitmesugused

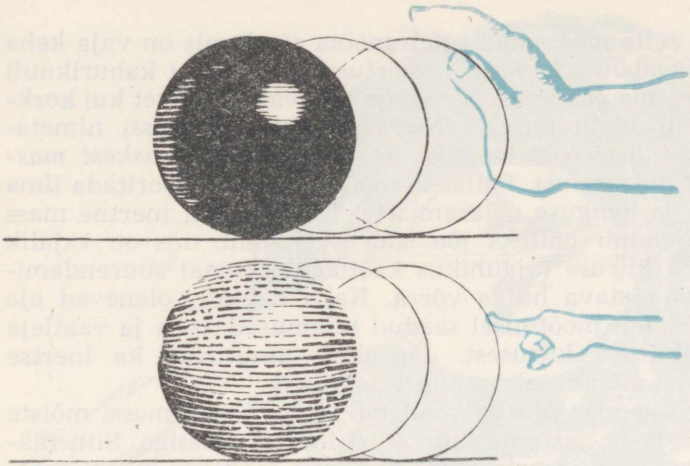


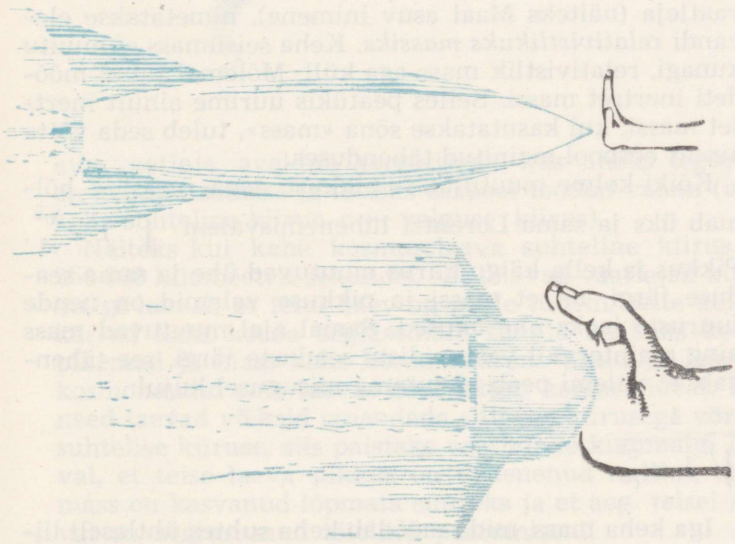
tehnilised raskused nende *nägemise* võimatuks. Kirjanikele meeldib relatiivsust ülilihtsustatud dramaatiliste näidete abil seletada. Need värvikad illustratsioonid ei kirjelda muutusi, mida tegelikult võib jälgida, olgu siis inimsilmaga või mõne kaasajal tuntud instrumendiga. Niisuguste muutuste olemasolust võiksid kosmonaudid printsipiaalselt teada saada ainult täpsete mõõtmiste põhjal, kui eksisteeriksid küllalt võimsad mõõteriistad.

Lisaks pikkuse ja aja muutustele on olemas ka relatiivsed muutused massis. Jämedates joontes võib öelda, et mass on kehas sisalduva aine hulga mõõt. Tinakuul ja korkkuul võivad olla ühesuurused, ent tinakuul on massiivsem, aine kontsentratsioon selles on suurem.

Keha massi mõõtmiseks on kaks viisi. Keha võib ära kaaluda või leida, kui suurt jõudu on vaja kehale kindla kiirendusę andmiseks. Esimene viis pole päris otstarbekohane, sest tulemus oleneb kohaliku raskusvälja tugevusest. Kõrge mäe tippu viidud tinakuul kaalub veidi vähem kui mäe jalamil, ehkki tema mass jääb täpselt samaks. Kuu peal oleks ta kaal tunduvalt väiksem kui Maa peal. Jupiteril kaaluks ta märgatavalt rohkem.

Teine massi mõõtmise viis annab ühe ja sama tulemuse, vaatamata sellele, kas mõõdate Maal, Kuul või Jupiteril, ent selle meetodi kasutamisel tekivad kohe kummalised probleemid. Liikuva keha massi määrami-





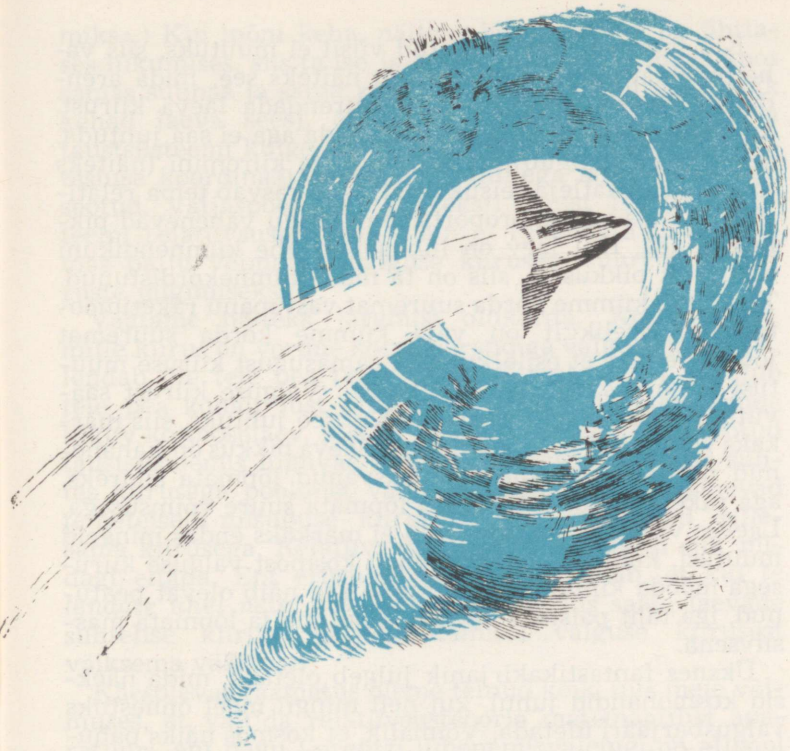
sel selle meetodiga tuleb mõõta jõud, mis on vaja keha kiirendamiseks kindla väärtuseni. Selge, et kahurikuuli veerema panemiseks on vaja tugevamat tõuget kui korkkuuli liigutamiseks. Niiviisi mõõdetud massi nimetatakse *inertseks massiks*, et eristada seda *raskest massist* või kaalust. Selliseid mõõtmisi ei saa sooritada ilma aja ja kauguse määramiseta. Kahurikuuli inertne mass väljendub näiteks jõu suuruse kaudu, mis on vajalik keha kiiruse (ajaühikus kaetud vahemaa) suurendamiseks teatava hulga võrra. Nagu nägime, olenevad aja ja ruumi mõõtmisel saadud tulemused keha ja vaatleja suhtelisest kiirusest. Järelikult muutuvad ka inertse massi mõõtmisel saadud tulemused.

Kuuendas peatükis tuleme tagasi raske massi mõiste juurde ja vaatame selle seost inertse massiga. Siin räägime ainult inertsest massist, mis saadakse mingi vaatleja mõõtmiste tulemusena. Keha suhtes paigal olevate vaatlejate jaoks — näiteks kosmonautide jaoks, kellel on laevas elevant, — jääb keha inertne mass samaks, vaatamata laeva kiirusele. Niisuguste vaatlejate poolt mõõdetud elevandi massi nimetatakse tema *omamassiks* ehk *seisumassiks*. Sama elevandi inertset massi, kui seda mõõdab elevandiga suhtelises liikumises olev vaatleja (näiteks Maal asuv inimene), nimetatakse elevandi *relativistlikuks massiks*. Keha seisumass ei muutu kunagi, relativistlik mass aga küll. Mõlemal juhul mõõdeti inertset massi. Selles peatükis uurime ainult inertset massi; kui kasutatakse sõna «mass», tuleb seda võtta ainult eespool mainitud tähenduses.

Kõiki kolme muutujat — pikkust, aega, massi — hõlmab üks ja sama Lorentzi lühenemisvalem $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Pikkus ja kella käigu kiirus muutuvad ühe ja sama seaduse järgi, nii et massi ja pikkuse valemid on nende suuruste jaoks ühesugused. Samal ajal muutuvad mass ning ajaintervall vastupidiste seaduste järgi, see tähendab, et valemi peab kirjutama niisugusel kujul:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Iga keha mass, mida mõõdab keha suhtes ühtlaselt lii-



kuv vaatleja, avaldub korrutisena, kus üheks teguriks on keha seisumass ja teiseks eespool toodud valem (v — keha suhteline kiirus, c — valguse kiirus).

Näiteks kui kahe kosmoselaeva suhteline kiirus on 260 000 kilomeetrit sekundis, siis leiavad vaatlejad kummalgi laeval, et teine laev on poole lühem, selle kellad käivad kaks korda aeglasemalt, tunnid on kaks korda pikemad ja mass kaks korda suurem. Muidugi leiavad kosmonaudid oma laevas kõik täiesti korras olevat. Kui need laevad võiksid omandada valguse kiirusega võrdse suhtelise kiiruse, siis paistaks vaatlejaile kummalgi laeval, et teise laeva pikkus on vähenenud nullini, et ta mass on kasvanud lõpmata suureks ja et aeg teisel laeval on aeglustunud täieliku peatumiseni!

Kui inertne mass mainitud viisil ei muutuks, siis vahetpidamata mõjuv jõud, nagu näiteks see, mida arendavad raketimootorid, võiks suurendada laeva kiirust, kuni see ületab valguse kiiruse. Seda aga ei saa juhtuda, sest kui laev liigub üha kiiremini ja kiiremini (näiteks maapealse vaatleja seisukohast), siis kasvab tema relativistlik mass samas proportsioonis, nagu vähenevad pikkus ja aeg. Kui laev on lühenenud ühe kümnendikuni esialgsest pikkusest, siis on ta mass kümnekordistunud. Ta osutab kümme korda suuremat vastupanu raketimootoritele, järelikult on vaja kümme korda suuremat jõudu, selleks et esile kutsuda samasugust kiiruse muutust nagu siis, kui laev on paigal. Valguse kiirust saavutada pole kunagi võimalik. Kui see juhtuks, siis märkaks väljaspool asuv vaatleja, et laeva pikkus on kahanenud nullini, tema mass on kasvanud lõpmata suureks, aga raketimootorid töötavad lõpmata suure võimsusega. Laevas viibivad kosmonaudid ei märkaks endas mingeid muutusi, kuid nad näeksid kogu kosmost valguse kiirusega mööda kihutavat, kosmiline aeg näib olevat peatunud, iga täht paistaks kettaks litsutuna ja lõpmata massiivsena.

Üksnes fantastikakirjanik julgeb oletada, mida näeksid kosmonaudid juhul, kui neil mingil moel õnnestuks valgusbarjääri ületada. Võimalik, et kosmos näiks pahupidi pööratuna ja iseenese peegelpildina, tähtedel oleks negatiivne mass ja kosmiline aeg voolaks tagurpidi. Ruttan lisama, et erirelatiivsusteooria valemitest ei järeldu midagi taolist. Kui valguse kiirus ületatakse, annavad valemid pikkuse, aja ja massi jaoks väärtused, mida matemaatikud nimetavad «imaginaararvudeks». Need sisaldavad ruutjuurt miinus ühest. Kes teab? Võibolla satub valgusbarjääri ületanud laev otse imedemaale!

Pärast selle omandamist, et mitte miski ei saa valgusest kiiremini liikuda, satuvad relatiivsusteooriat õppivad tudengid sageli segadusse, jõudes viideteni kiirustest, mis on suuremad kui valguse kiirus. Et selgesti mõista, mida relatiivsusteooria selle kohta ütleb, on kõige parem sisse tuua termin «inertsiaalne taustsüsteem». (Varasemates relatiivsusteooriat käsitlevates teostes nimetati seda «inertsiaal-» ehk «Galilei süstee-

miks».) Kui mõni keha, näiteks kosmoselaev, on ühtlases liikumises, siis ta ise ja kõik kehad, mis temaga koos samas suunas ja sama kiirusega liiguvad (nii nagu kõik kehad laeva sees), öeldakse olevat kinnitatud sama taustsüsteemi külge. Ja edasi: inertsiaalsüsteem on Cartesiuse koordinaatide süsteem, millega kosmoselaev on seotud. Väljaspool seda konteksti erilist inertsiaalsüsteemi relatiivsusteoorias enam ei rakendata ja on olemas palju võimalusi valguse kiirusest suuremate kiiruste jälgimiseks.

Vaatame näiteks järgmist olukorda. Kosmoselaev, mille kiirus on võrdne kolmveerandiga valguse kiirusest, lendab üle teie pea täpselt itta. Samal hetkel möödub teie pea kohalt just niisama kiiresti, kuid otse läände liikuv kosmoselaev. Maaga (inertsiaalsüsteemiga) seotud taustsüsteemis liiguvad mõlemad laevad teineteise suhtes kiirusega poolteist valguse kiirust. Nad liginevad teineteisele niisuguse kiirusega ja eemalduvad sellesama kiirusega. Relatiivsusteooria ei kavatsegi siin midagi eitada. Ent erirelatiivsusteooria nõuab, et *kui te lendate ühel neist kosmoselaevadest*, siis saate laevade suhtelise kiiruse väljaarvutamisel valguse kiirusest väiksema väärtuse.

Käesolevas raamatus oleme teinud kõik, mis meie võimuses, et vältida relatiivsusteooria matemaatilist aparatuuri, ent nagu Lorentzi lühenemisvalemgi on allpool toodav valem liiga lihtne, selleks et teda mitte märkida. Kui x on ühe laeva kiirus Maa suhtes ja y teise laeva kiirus Maa suhtes, siis nende laevade kiirus teineteise suhtes, nii *nagu see Maalt paistab*, on muidugi x pluss y. Ent ükskõik kummal laeval asuv vaatleja peab kiirused liitma järgmise valemi põhjal:

$$\frac{x+y}{1+\frac{xy}{c^2}}.$$

Selles valemis on c valguse kiirus. Kerge on näha, et kui laevade kiirused on valguse kiirusega võrreldes väikesed, siis annab valem peaaegu sama tulemuse kui kahe kiiruse tavaline liitmine. Ent kui laevade kiirused on väga suured, siis saame täiesti erineva resultaadi. Vaatleme piirjuhust ja oletame, et kosmoselaevade ase-

mel on kaks valguskiirt, mis meie pea kohal vastupidistes suundades sööstavad. Maapealsele vaatlejale paistavad nad eemalduvat teineteisest kiirusega $2c$ ehk kahekordse valguse kiirusega. Ent kui ta ühe kiirega kaasa liiguks, siis saaks ta kiiruse välja arvutada niiviisi:

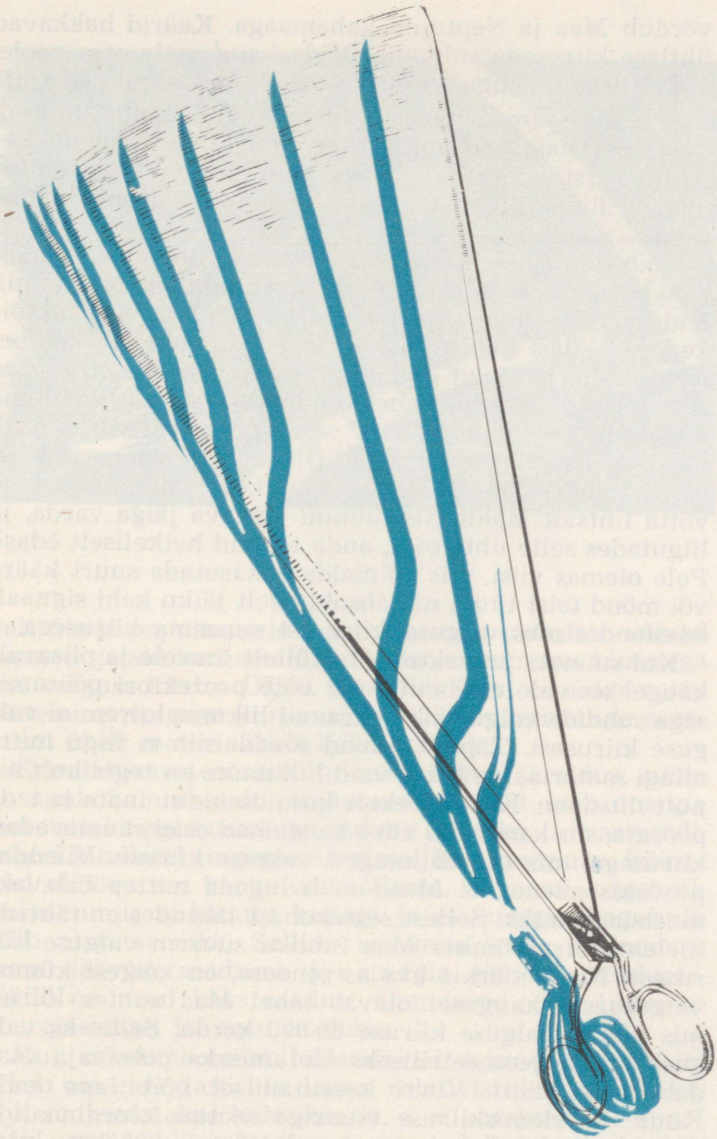
$$\frac{c+c}{1+\frac{c^2}{c^2}},$$

mis annab tulemuseks muidugi c. Teiste sõnadega, ta näeks teist kiirt enesest valguse kiirusega mööduvat.

Oletame, et kiir lendas üle meie pea just hetkel, mil kosmoselaev liigub vastassuunas kiirusega x. Maapealses inertsiaalsüsteemis mööduvad laev ja valgus teineteisest kiirusega c pluss x. Lugeja võib end lõbustada, arvutades toodud valemite põhjal välja valguse kiiruse, nii nagu see paistab kosmoselaevaga seotud inertsiaalsüsteemis. Muidugi osutub see jälle võrdseks c-ga.

Väljaspool erirelatiivsusteooria mõjusfääri, kus ei tegelda üksnes inertsiaalsüsteemidega, on ikkagi võimalik rääkida valguse kiirusest kui absoluutsest piirist. Ent nüüd peab väljenduma teistmoodi: pole olemas võimalust saata *signaali* ühelt materiaalselt kehalt teiseni suurema kiirusega kui valguse kiirus. Sõna «signaal» kasutatakse siinkohal laiemas tähenduses, see hõlmab iga tüüpi põhjuslik-järelduslikku seost, mis võimaldab mingit teadet üle kanda: näiteks läkitada teele mõni füüsikaline keha või mingit liiki energiavoog, nagu häälelaine, elektromagnetiline lainetus, kõvas kehas tekkiv lööklaine jne. Signaali ei saa Marsile läkitada kiiremini valguse kiirusest. Seda ei saa teha ka siis, kui kirjutada kiri ja saata see raketiga teele, sest nagu nägime, peab raketi suhteline kiirus alati olema väiksem valguse kiirusest. Kui kodeerime signaali ja väljastame selle raadiosaatja või radari abil, siis liigub ta *täpselt* valguse kiirusega. Ükski energialiik ei võimalda teadet kiiremini edasi anda.

Ehkki signaal ei saa levida kiiremini valguse kiirusest, on ometi võimalik jälgida kindlat tüüpi relatiivseid liikumisi, mis toimuvad suurema kiirusega kui valguse kiirus. Kujutlege hiiglaslikke kääre, mille harude pikkus



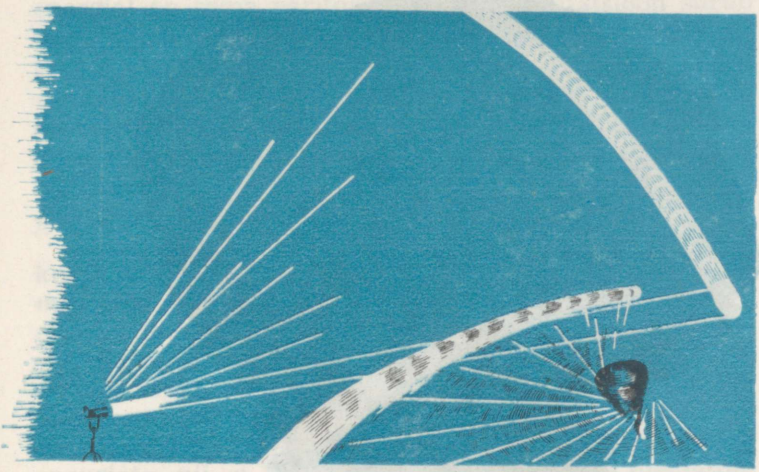
5 Relatiivsusteooria miljonitele

võrdub Maa ja Neptuuni vahemaaga. Käärid hakkavad ühtlase kiirusega sulguma. Mida kaugemale otsa poole, seda kiiremini liigub kääride terade lõikepunkt. Kujutlege end istumas harusid ühendaval liikumatul osal. Teie inertsiaalsüsteemi suhtes eemaldub terade lõikepunkt varsti suurema kiirusega kui valguse kiirus. Muidugi ei liigu siin materiaalne keha, vaid geomeetriline punkt.

Võib-olla tuleb teil niisugune mõte: oletame, et kääride pea paikneb Maal, terade lõikepunkt aga Neptuunil. Kui kääre veidike lõksutada, siis pendeldab harude lõikepunkt edasi-tagasi. Kas ei saaks signaale sel kombel Neptuunile peaaegu hetkeliselt edasi anda? Ei, ei saa, sest terasid liikuma panev impulss peab üle kanduma molekulilt molekulile, aga selle protsessi kiirus jääb väiksemaks valguse kiirusest. Üldrelatiivsusteooria järgi ei ole olemas absoluutselt jäiku kehi. Muidu võiksite võtta lihtsalt Maalt Neptuunini ulatuva jäiga varda, ja liigutades selle ühte otsa, anda teateid hetkeliselt edasi. Pole olemas viisi, mis võimaldaks kasutada suuri kääre või mõnd teist tüüpi nn. absoluutselt jäiku kehi signaali edasiandmiseks valguse kiirusest suurema kiirusega.

Kui suunata prožektorikiir küllalt suurele ja piisavalt kaugel asuvale ekraanile, siis võib prožektori pööramisega sundida valguslaiku ekraanil liikuma kiiremini valguse kiirusest. Täpselt samad sõnad: siin ei liigu mitte mingi materiaalne keha, vaid liikumine on tegelikult ainult illusioon. Kui prožektor kosmosesse suunata ja teda pöörata, siis kanduvad kiire kaugemad osad ruumis edasi kiirusega, mis ületab kaugelt valguse kiiruse. Viiendas peatükis näeme, et Maad võib lugeda mittepöörlevaks taustsüsteemiks. Sellest seisukohast lähtudes on tähtede tiirlemiskiirus ümber Maa tublisti suurem valguse kiirusest. Nagu märkis üks astronoom, on kõigest kümne valgusaasta kaugusel oleval tähel Maa suhtes kiirus, mis ületab valguse kiiruse 20 000 korda. Selliseks valgusbarjääri geomeetriliseks ületamiseks pole vaja vaadata isegi tähti. Vurri keerutamisel võib laps anda Kuule pöörlemiskiiruse (vurriga seotud koordinaatide süsteemi suhtes), mis tunduvalt ületab 300 000 kilomeetrit sekundis.

Kümnendas peatükis tuleb juttu sellest, kuidas vasta-



valt ühele populaarsele maailmaruumi teooriale võivad kauged galaktikad eemalduda Maast suurema kiirusega kui valguse kiirus. Ükski neist näidetest ei räägi vastu väitele, et valguse kiirus on barjääriks signaalide saatmisel ühelt materiaalselt kehalt teisele.

Erirelatiivsusteooriast tuleneb tähtis järeldus, mida ka siinkohal lühidalt puudutame. Nimelt võib energia teatavatel tingimustel muunduda massiks ja, vastupidi, teistel kindlatel tingimustel mass jälle energiaks. Füüsikud olid varem harjunud mõtlema, et massi koguhulk universumis ei muutu kunagi ja et energia koguhulk jääb alati samaks. Selline arvamus leidis väljenduse massi jäävuse seaduses ja energia jäävuse seaduses. Nüüd on need kaks seadust ühendatud väga lihtsasse energia-massi jäävuse seadusse.

Kui raketimootorid kiirendavad kosmoselaeva, siis läheb osa energiast üle laeva relativistlikuks massiks. Kui soojendatakse kohvikannu, s. o. antakse talle energiat juurde, kiirendatakse tema molekule, siis kaalub kann ainult õige veidi rohkem kui enne soojendamist. Kohvi jahtumisel on massi juurdekasv kadunud. Kui me kella üles keerame, siis anname talle energiat juurde



ja talle lisandub sel ajal tegelikult tilluke kogus massi. Kui kell maha käib, kaotab ta ka oma lisamassi. Niisugused massi lisandumised ja kaotamised on sedavõrd kaduvväikesed, et tavalistes füüsikalistes arvutustes ei võeta neid kunagi arvesse. Ent massi muundumine energiaks pole sugugi nii tühine, kui plahvatab näiteks vesinikupomm!

Pommi plahvatamine kujutab endast osa pommi aine järsku muundumist energiaks. Päikese poolt kiirataval

energial on sama päritolu. Tohutu gravitatsioon surub vesinikugaasi Päikese sisemuses nii hiiglasliku rõhu all kokku, tõstab gaasi temperatuuri nii kõrgele, et vesiniku aatomid liituvad ja muutuvad heeliumi aatomiteks. Selle protsessi käigus muundub osa massist energiaks. Võrdust, mis väljendab massi ja energia seost, teab nüüd igaüks:

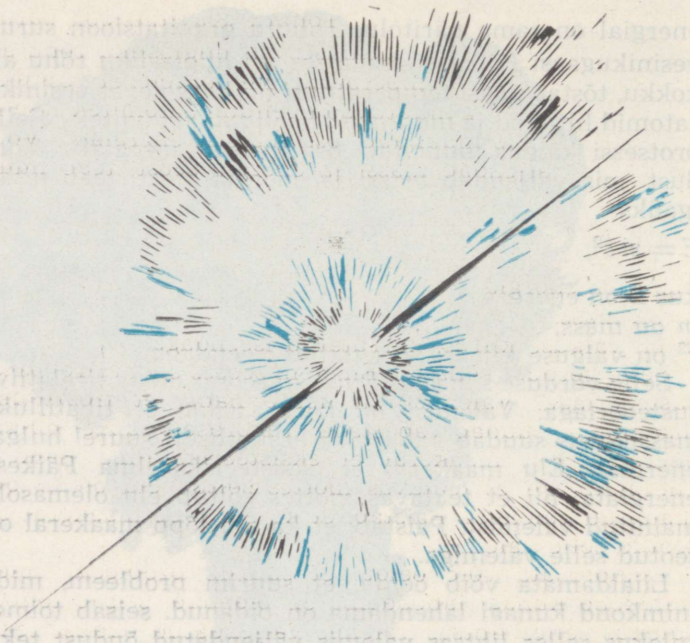
$E = mc^2$,

kus E on energia,
m on mass,
c^2 on valguse kiirus, korrutatud iseendaga.

Selle võrduse sõnastas Einstein seoses oma erirelatiivsusteooriaga. Valemist on kerge näha, et tibatilluke massikogus suudab vabastada erakordselt suurel hulgal energiat. Elu maakeral ei eksisteeriks ilma Päikese energiata, nii et teatavas mõttes sõltub elu olemasolu mainitud valemist. Paistab, et ka elu lõpp maakeral on seotud selle valemiga.

Liialdamata võib öelda, et suurim probleem, mida inimkond kunagi lahendama on pidanud, seisab toimetulekus selles lihtsas valemis väljendatud õudust tekitava faktiga.

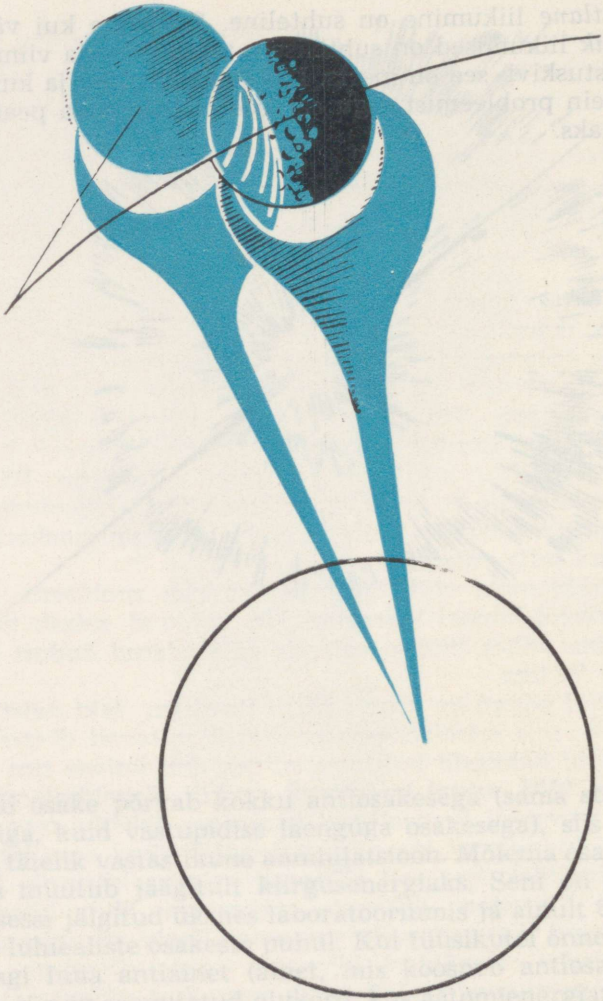
Kuid pomm on ainult kõige ilmekam fakt neist paljudest, mis erirelatiivsusteooriat kinnitavad. Katselised tõendid hakkasid kuhjuma niipea, kui kuivas tint Einsteini 1905. aastal kirjutatud artiklil. Tegelikult on see üks paremini kontrollitud kaasaegse füüsika teooriaid. Seda kinnitavad iga päev aatomifüüsikud oma laboratooriumides, kus nad töötavad valguse kiirusele lähedaste kiirustega liikuvate osakestega. Mida kiiremini osakesed liiguvad, seda suuremat jõudu on vaja nende viimiseks ettenähtud kiiruseni, teiste sõnadega, seda suurem on nende relativistlik mass. Just sellepärast ehitavad füüsikud osakeste kiirendamiseks üha suuremaid seadmeid. Nad vajavad aina tugevamaid ja tugevamaid välju, selleks et ületada osakeste kasvavat massi, sedamööda kui nende kiirus ligineb valguse kiirusele. Elektrone võib nüüd kiirendada 0,999 999 999-ni valguse kiirusest. See annab igale elektronile massi (Maaga seotud inertsiaalsüsteemi suhtes), mis on võrdne umbes 40 000-kordse seisumassiga.



Kui osake põrkab kokku antiosakesega (sama struktuuriga, kuid vastupidise laenguga osakesega), siis toimub täielik vastastikune annihilatsioon. Mõlema osakese mass muutub jäägitult kiirgusenergiaks. Seni on seda protsessi jälgitud üksnes laboratooriumis ja ainult üksikute lühiealiste osakeste puhul. Kui füüsikutel õnnestub kunagi luua antiainet (ainet, mis koosneb antiosakestest), siis on saavutatud olukord, kus aatomienergiat kasutatakse maksimaalsel määral. Tillukese koguse magnetväljades lahustunud antiainet võib vähehaaval ühendada ainega ja sellest veojõust piisab, et kosmoselaev tähtedeni jõuaks.

Erirelatiivsusteooria on katsetega nii hästi ära tõestatud, et raske oleks nüüd leida füüsikut, kes selle teooria õigsuses kahtleks.

Ühtlane liikumine on suhteline. Ent enne kui väita, et *kõik* liikumised on suhtelised, tuleb ületada viimane komistuskivi: see on inerts. Mis siin rasket on ja kuidas Einstein probleemist jagu sai, see ongi viienda peatüki tuumaks.



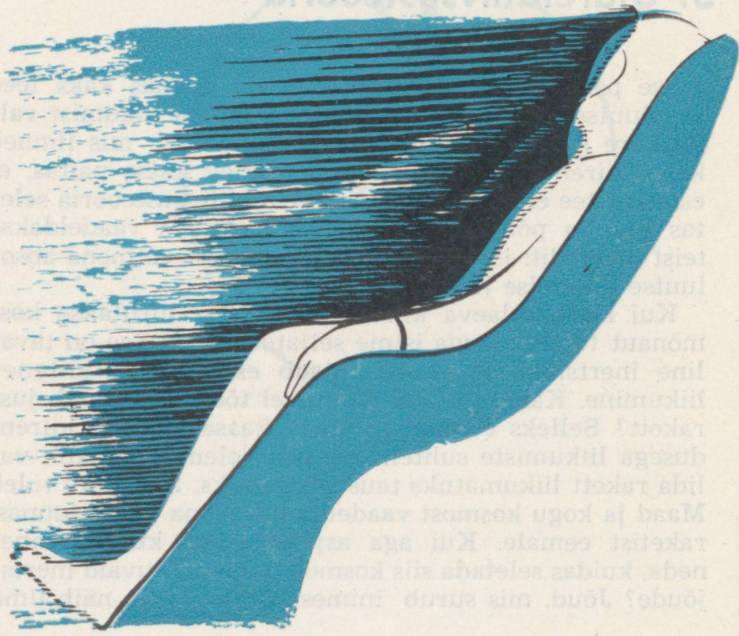
5. Üldrelatiivsusteooria

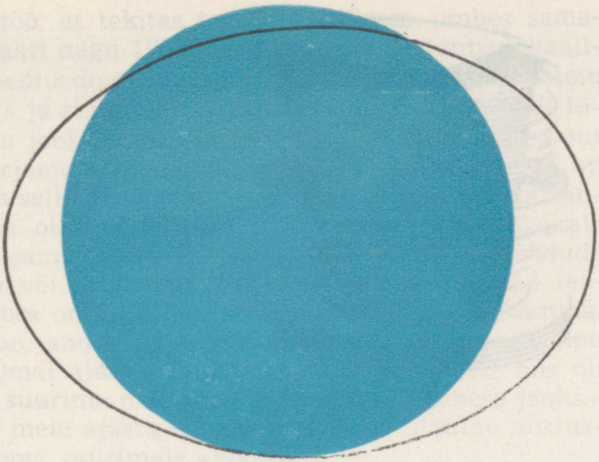
Teise peatüki algul väitsime, et on olemas kaks teed absoluutse liikumise avastamiseks: mõõta liikumist valguskiire suhtes ja kasutada inertsinähtust, mis ilmneb keha kiirendamisel. Michelson-Morley katse näitas, et esimene tee ei kõlba. Einsteini erirelatiivsusteooria seletas ära ka põhjuse. Käesolevas peatükis vaadeldakse teist meetodit: inertsinähtuse kasutamist võtmena absoluutse liikumise juurde.

Kui kosmoselaeva kiirendatakse, siis surutakse kosmonaut tohutu jõuga istme seljatoe vastu. See on tavaline inertsinähtus, mille kutsub esile raketi kiirenev liikumine. Kas mitte see nähtus ei tõesta, et liigub just rakett? Selleks et näidata kõigi, kaasa arvatud kiirendusega liikumiste suhtelisust, peab olema võimalik valida rakett liikumatuks taustsüsteemiks. Sel juhul tuleb Maad ja kogu kosmost vaadelda liikuvana vastassuunas, raketist eemale. Kui aga asjale sellest küljest läheneda, kuidas seletada siis kosmonaudile mõjuvaid inertsjõude? Jõud, mis surub inimest istme vastu, näib ilma

igasuguse kahtluseta tõestavat, et liigub rakett, mitte aga kosmos.

Teiseks veenvaks näiteks võib olla pöörlev Maa. Kesktõukejõud, tähendab inertsinähtus, mis kaasneb pöörlemisega, sunnib maakera ekvaatori kohalt veidi paksemaks muutuma. Kui kõik liikumised on suhtelised, kas ei järeldu siis sellest, et me võime valida maakera liikumatuks taustsüsteemiks, kusjuures kogu kosmos pöörleb tema ümber? Muidugi võib seda kujutleda, aga mis põhjustab siis Maa ekvaatori väljavenimist? Väljavenimine näib tõestavat, et pöörleb just Maa, mitte aga universum. Pealegi pole astronoomid veel kokkuleppele jõudnud, kas kesktõukejõud venitavad Maa ekvaatorit veel kaasajalgi või tekkis see deformatsioon kauges geoloogilises minevikus, mil Maa oli elastsem, ning on nüüd muutunud jäiga Maa omaduseks, mis säiliks isegi siis, kui Maa pöörlemine lakkaks. Kõik on ühel nõul aga sel-

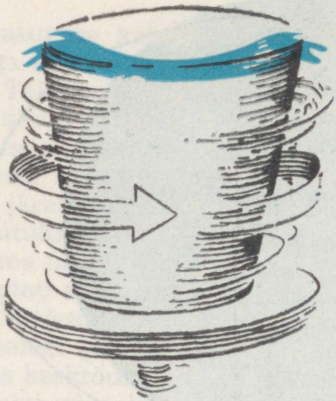




les osas, et just kesktõukejõud on süüdi väljavenitatuse tekkes.

Täpselt niisamasugune arutluskäik viis Newtoni järeldusele, et liikumine *ei ole* suhteline. Ta viitas selle tõestamiseks faktile, et vertikaaltelje ümber pöörlevas panges põhjustab kesktõukejõud veepinna kõverdumise ning võib viia isegi vee väljapritsimiseni. Kujuteldamatu, et pöörleval universumil oleks veele niisugune mõju, seepärast, väitis Newton, peab siit järeldama, et pange pöörlemine on absoluutne.

Kümne aasta jooksul pärast erirelatiivsusteooria avaldamist mõtiskles Einstein selle probleemi üle. Enamik füüsikuid isegi ei näinud siin üldse mitte mingit probleemi. Miks ei võiks, rääkisid nad, ühtlane liikumine olla suhteline (nagu kinnitab erirelatiivsusteooria), kuid kiirenev liikumine absoluutne? Einstein polnud sellega rahul. Ta adus ähmaselt, et kui ühtlane liikumine on suhteline, siis on seda ka kiirendusega liikumine. Lõpuks, üksteist aastat pärast erirelatiivsusteooria publitseerimist, aastal 1916, avaldas Einstein üldrelatiivsusteooria. Teooriat nimetatakse üldiseks, sest see on erirelatiivsusteooria üldistus ehk laiendamine ja hõlmab erijuhuna ka erirelatiivsusteooria.



Üldrelatiivsusteooria kujutab endast palju suuremat teaduslikku saavutust kui erirelatiivsusteooria. Poleks just Einstein esimesena formuleerinud erirelatiivsusteooriat, siis oleksid kahtlemata teised füüsikud niikuinii selleni jõudnud. Poincaré, prantsuse matemaatik, keda mainisime juba eespool, oli üks neist, kes erirelatiivsusteooriale üsna lähedale jõudis. Tähelepanuväärses kõnes 1904. aastal ennustas Poincaré, et tekib «täiesti uus mehhaanika», milles ükski kiirus ei saa ületada valguse kiirust, täpselt niisamuti nagu ükski temperatuur ei saa langeda allapoole absoluutset nulli. Sõnastatakse, väitis Poincaré, «relatiivsusprintsiip, mille kohaselt füüsikaseadused peavad olema samad, olenemata sellest, kas vaatleja seisab paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt, nii et meil pole ühtki võimalust avastada, kas oleme sellises liikumises või mitte». Poincaré ei näinud otsustavat sammu, mis tuli teha niisuguse programmi täitmiseks, kuid kindlasti taipas ta intuitiivselt erirelatiivsusteooria vajalikkust. Samal ajal ei teadnud Einstein midagi sellest, kui lähedased olid Poincaré, Lorentzi ja teiste mõtted tema enda omadega. Aastaid hiljem andis ta erakordselt kõrge hinnangu nende inimeste teaduslikule panusele.

Üldrelatiivsusteooria on hoopis iseasi. See oli, kui kasutada jälle Telleri sõnu, «kõige kaunim ootamatus», niivõrd jahmatama panevalt originaalne, niivõrd eba-

tavaline töö, et tekitas teadusemaailmas umbes samasugust efekti nagu 1962. aastal Ameerika tantsulokaalidesse sissemurdnud tantsuhullustus — tvist. Einstein pööras aja ja ruumi iidse rütmi pahupidi. Üllatavalt lühikese aja jooksul tantsis iga füüsik maailmas kas uut tvisti, varjamata hirmu selle ees, või kaebas, et ta on liiga vana selle äraõppimiseks. Kui Einstein poleks sündinud, siis oleksid teisedki füüsikud andnud füüsikale kindlasti sama tvisti, ent enne seda võinuks mööduda aastasada või rohkemgi. Vähesed suured teooriad teaduse ajaloos on nii täielikult üheainsa inimese looming.

«Newton, andesta mulle,» kirjutas Einstein elu lõpu poole. «Omal ajastul leidsid sa tolle ainsa tee, mis oli võimalik suurima mõtte- ja loomisjõuga inimese jaoks.»

See on meie ajastu suurima teadlase liigutav austusavaldus oma suurimale eelkäijale.

Einsteini üldrelatiivsusteooria tuumaks on seisukoht, mida ta ise nimetab *ekvivalentsuse printsiibiks*. See ei ole midagi muud kui rabav oletus (Newton oleks niisugust mõtet hullumeelseks pidanud), et raskus ja inerts on üks ja sama. Nad ei ole lihtsalt sarnased nähtused. *Gravitatsioon ja inerts on täpselt ühe ja sama asja kaks erinevat nimetust.*

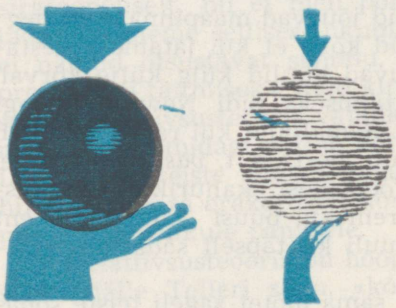
Einstein polnud esimene teadlane, keda hämmastas gravitatsiooni- ja inertsinähtuste kummaline sarnasus. Kujutleme hetkeks, mis juhtuks, kui kahurikuul ja väike puust kuulike hakkaksid ühekõrguselt kukkuma. Oletame, et kahurikuul kaalub sada korda rohkem kui puust kuulike. See tähendab, et kahurikuulile mõjuv jõud on sada korda suurem puukuulile mõjuvast jõust. Kerge on mõista, miks Galilei vaenlased ei suutnud uskuda, et niisugused kuulid jõuavad maapinnale üheaegselt. Muidugi teame nüüd kõik, et kui jätame arvestamata õhutakistuse, kukuvad kuulid külg külje kõrval. Niisuguse nähtuse selgitamiseks pidi Newton midagi väga kummalist oletama. Samal ajal kui raskus tõmbab kuuli allapoole, peab kuuli inerts, s. t. *vastupanu* jõule, teda jälle pidurdama. Tõepoolest, kahurikuuli raskusjõud on sada korda suurem kui puust kuulikesel, ent inerts pidurdab kahurikuuli ka täpselt sada korda tugevamini!

Füüsikud väljendavad sama mõtet sageli teiste sõna-

dega. Keha raskusjõud on alati võrdeline tema inertsiga. Kui keha *A* on kaks korda raskem *B*-st, siis on ka tema inerts kaks korda suurem. Keha *A* kiirendamiseks mingi kiiruseni on vaja kaks korda nii suurt jõudu kui keha *B* kiirendamiseks täpselt sama kiiruseni. Kui asi oleks teisiti, siis kukuksid erineva raskusega kehad erinevate kiirendustega.

Kerge on kujutleda maailma, kus need kaks jõudu ei ole võrdelised. Tõepoolest, Aristotelese aegadest kuni Galileini arvasid teadlased maailma just sellise olevat. Me tunneksime end niisuguses maailmas üsna mõnusasti. Tingimused langevas liftis muutuksid, aga kui tihti me siis ikka liftiga sõidame. Kuidas see ka ei oleks, ent meil on õnn elada maailmas, kus need kaks jõudu on võrdelised. Galilei näitas seda esimesena. Üllatavalt täpsed katsed, mis kinnitasid Galilei avastust, sooritas 1900. aastal ungari füüsik parun Roland von Eötvös. Kõige täpsema igakülgse kontrolli teostas mõne aasta eest rühm Princetoni ülikooli teadlasi. Nende poolt saavutatud täpsuse piires osutus raske mass (raskus) alati punktipealt võrdseks inertse massiga.

Newton teadis muidugi sellest raskuse ja inertsi imepärasest seosest, seosest, mis sunnib kõiki kehi langema sama kiirendusega, kuid ta ei osanud seda kuidagi seletada. See paistis lihtsalt erakordse kokkusattumusena. Niisuguse kokkulangemise tõttu võib inertsi kasutada raskusvälja tekitamiseks või kaotamiseks. Esimeses pea-





tükis oli juttu kunstlikust raskusväljast, mida saab tekitada rõngakujulises kosmoselaevas, kui panna see rattana pöörlema. Kesktõukejõud surub laeva sees olevad kehad välisääre vastu. Kindla jääva kiirusega pöörlemisel võib laeva sees tekkida samasuguse mõjuga inertsiväli nagu Maa raskusväligi. Kosmonaut tunneb end jalutavat mööda nõgusat põrandat. Mahapillatud esemed kukuvad sellele põrandale. Suits tõuseb lae poole. On olemas kõik normaalse raskusväljaga kaasnevad efek-



tid. Einstein illustreeris niisugust väidet järgmise kuulsa mõttelise katsega.

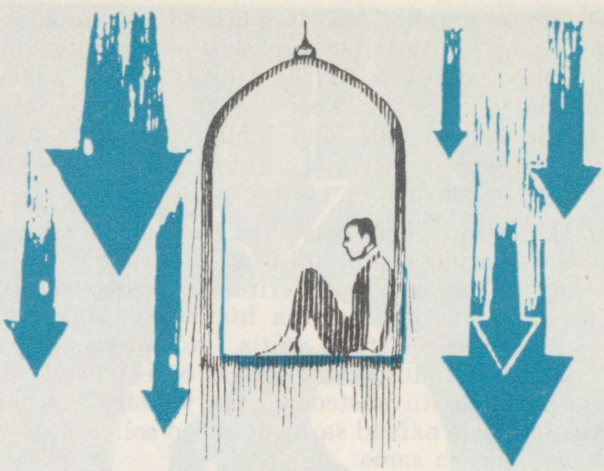
Kujutlege kosmoses lifti, mis liigub üha kasvava kiirusega ülespoole. Kui lifti kiirendus on jääv ja täpselt niisama suur kui see, millega keha Maa poole kukub, siis tunneb liftis olev inimene end just niisamuti nagu raskusväljas, mis on täpselt võrdne Maa raskusväljaga. Niimoodi saab luua raskuse või kaotada selle mõju. Näiteks langevas liftis elimineerib allapoole suunatud kiirendus täiesti raskuse lifti sees. Olek, mille puhul

$g = 0$ (raskusjõud puudub), valitseb kosmoselaevas senikaua, kuni ta on vaba langemise seisundis, tähendab, talle mõjub üksnes raskusjõud. Kaalutus, mida kogesid nõukogude ja ameerika kosmonaudid, seletub faktiga, et nende laevad olid Maa ümber tiirlemise ajal vaba langemise olekus. Niikaua kui laeva raketimootorid ei tööta, on g laeva sees võrdne nulliga.

Selline tähelepanuväärne vastavus inertsi ja raskuse vahel jäi seletamatuks seni, kuni Einstein arendas välja oma üldrelatiivsusteooria. Nagu erirelatiivsusteooriaski, püstitas ta lihtsaima ja julgeima hüpoteesi. Mäletate, erirelatiivsusteoorias Einstein väitis, et põhjus, miks eetrituul paistab puuduvat, on selles, et eetrituult *ei olegi olemas*. Üldrelatiivsusteoorias ta väidab: põhjus, miks raskus ja inerts näivad sarnastena, on selles, et nad tegelikult ongi üks ja sama.

Pole õige öelda, et vabalt langeva lifti sees Maa külgetõmme neutraliseeritakse. Raskust ei neutraliseerita, ta lihtsalt likvideeritakse. Raskusjõud kaob tõepoolest. Täpselt samuti pole õige öelda, et pöörlevas kosmoselaevas või kiirendusega tõusvas liftis imiteeritakse raskusjõudu. Seda ei imiteerita, vaid hoopis luuakse. Loodud raskusväljal on erinev matemaatiline kuju kui väljal, mis ümbritseb suuri kehi nagu näiteks Maad, ent siiski on see tavaline raskusväli. Nagu erirelatiivsusteooria puhul, muutub ka üldrelatiivsusteoorias looduse kirjeldamiseks kasutatav matemaatiline aparatuur üsna keerukaks, sest algtingimused peavad kehtima jääma, kuid lõppresultaat õigustab seda komplitseerumist. Kahe erineva jõu asemel on olemas üksainus. Veel enam, teooria viib tulemusteni, mida saab kontrollida vaatluse ja katse abil.

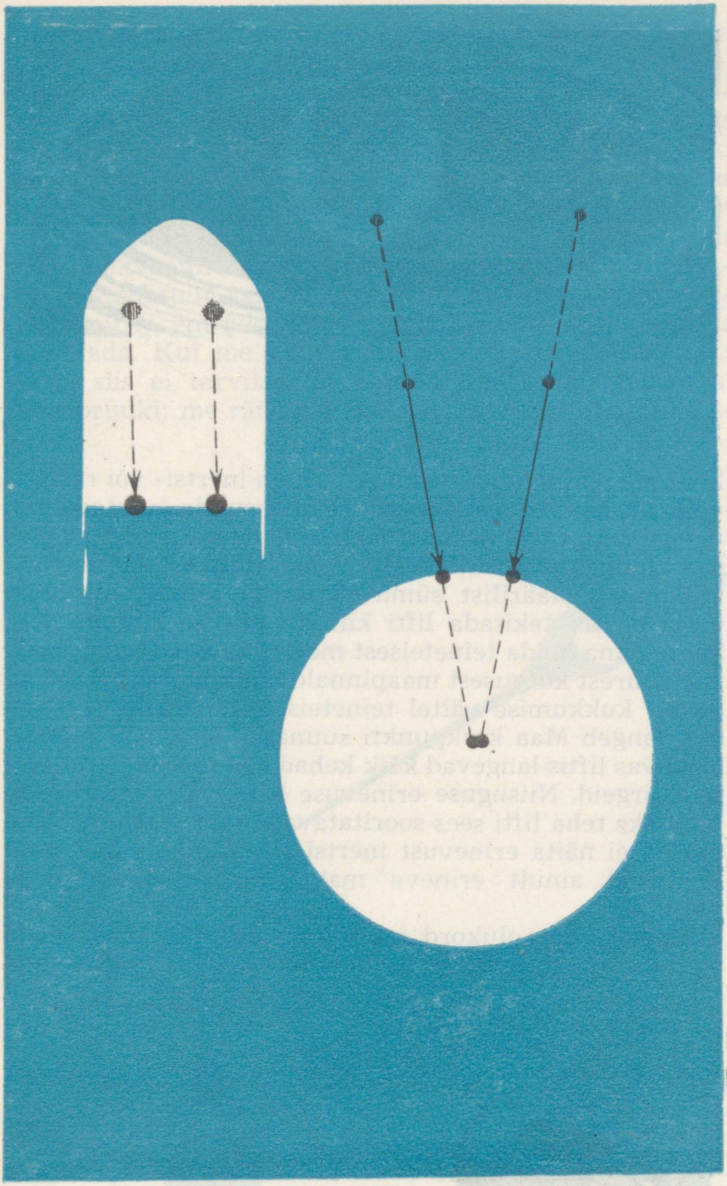
Einsteini ekvivalentsuse printsiip — raskuse ja inertsi ekvivalentsus — annab võimaluse kõiki liikumisi, sealhulgas ka kiirendusega liikumisi vaadelda suhtelistena. Kui Einsteini kujuteldava lifti kiirus kasvab, siis võib lifti sees täheldada inertsinähtusi. Ent lifti saab teoreetiliselt muuta liikumatuks, paigalolevaks taustsüsteemiks. Nüüd liigub kogu universum koos kõigi galaktikatega meist kiirenevalt mööda. See *universumi kiirendusega liikumine loob raskusvälja*. Raskusväli surub lifti



sees olevad kehad vastu põrandat. Võib öelda, et nende nähtuste põhjuseks on raskus, mitte aga inerts.

Mis siis aga *tegelikkuses* aset leiab? Kas liigub lift ja tekitab inertsiefekte või liigub universum ja põhjustab gravitatsiooninähtusi? Niiviisi küsida pole õige. Ei ole olemas «tõelist», absoluutset liikumist. On ainult lifti ja universumi suhteline liikumine. See suhteline liikumine loob jõuvälja, mida kirjeldavad üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid. Välja võib nimetada nii raskus- kui ka inertsiväljaks, olenevalt taustsüsteemi valikust. Kui taustsüsteemiks on lift, siis nimetatakse välja raskusväljaks. On aga taustsüsteemiks kosmos, siis kannab väli nimetust inertsiväli. Inerts ja raskus on ainult kaks erinevat sõna, mida kasutatakse ühe ja sama nähtuse kohta. Loomulikult on palju lihtsam ja mugavam mõelda paigalolevast universumist. Sel juhul ei püüa keegi lifti sees olevat välja raskusväljaks nimetada. Üldrelatiivsusteooria aga väidab, et välja võib nimetada raskusväljaks, kui ainult valida sobiv taustsüsteem. Niisuguse lifti sees ei saa teha ühtki katset, mis sellise valiku «vääraks» tunnistaks.

Kui öeldakse, et lifti sees olev vaatleja ei oska öelda,



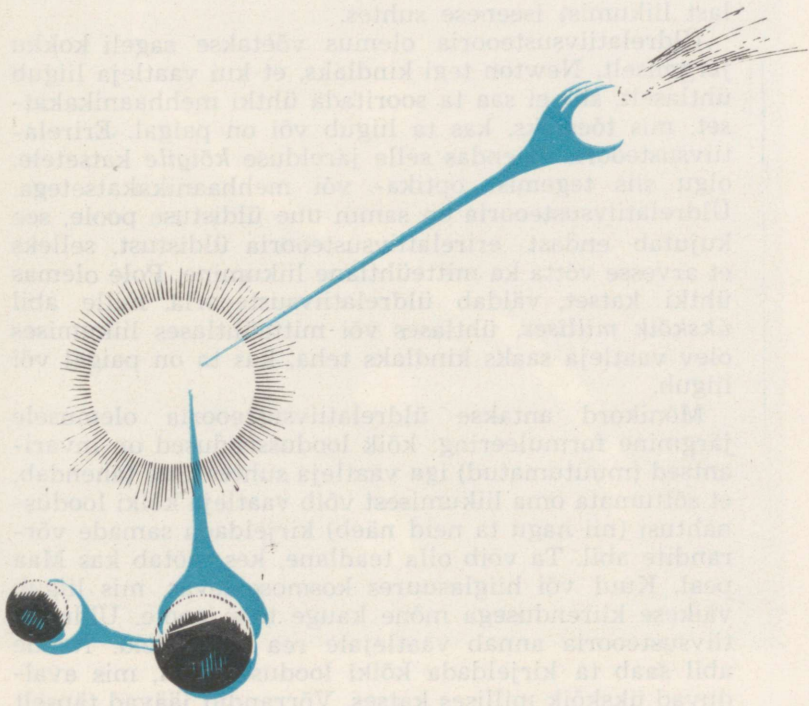


kas teda põranda vastu suruv väli on inertsi- või raskusväli, siis see veel *ei tähenda*, et ta ei suuda avastada erinevust oma välja ja suurt mateeriakogumit, näiteks planeeti ümbritseva raskusvälja vahel. Näiteks Maa raskusväli omab sfäärilist sümmeetriat ja täpselt niisugust välja ei saa tekitada lifti kiirendamisega ruumis. Kui kahte õuna hoida teineteisest meetri kaugusel ning lasta nad suurest kõrgusest maapinnale kukkuda, siis liiguvad õunad kukkumise vältel teineteisele lähemale, sest iga õun langeb Maa keskpunkti suunatud sirgjoont mööda. Liikuvas liftis langevad kõik kehad aga mööda paralleelseid sirgeid. Niisuguse erinevuse kahe välja vahel saab kindlaks teha lifti sees sooritatavate katsetega, ent need katsed ei näita erinevust inertsi ja raskuse vahel. Nad eristavad ainult erineva matemaatilise struktuuriga välju.

Samasugune olukord tekib ka pöörleval Maal. Vana vaidlus, kas pöörleb Maa või tiirleb taevas ümber selle



(nagu õpetas Aristoteles), ei kujuta endast midagi muud kui vaidlust kõige lihtsama taustsüsteemi valiku üle. Ilmselt on kõige mugavam valida taustsüsteemiks universum. Me räägime, et Maa pöörleb universumi suhtes ja inerts sunnib ekvaatori välja venima. Mitte miski peale ebamugavuse ei takista meid Maad liikumatuks taustsüsteemiks pidamast. Viimasel juhul väidame, et kosmos tiirleb ümber Maa, tekitades raskusvälja, mis mõjub ekvaatorile. Ja jällegi ei ole selle välja matemaatiline struktuur samasugune nagu raskusväljal planeetide ümber, ent ikkagi võib seda õigusega raskusväljaks nimetada. Kui me valime liikumatuks taustsüsteemiks Maa, siis ei tarvitse me muuta isegi oma igapäevast kõnepruuki: me räägime endiselt, et Päike tõuseb hom-



mikul ja loojub õhtul; Suur Vanker pöörleb ümber Põhjanaela. Milline seisukoht on siis «õige»? Kas pöörleb taevas või pöörleb Maa? Küsimusel pole mõtet. Niisama põhjendatult võiks ettekandja külastajalt küsida, kas ta soovib jäätist koogiga või kooki jäätisega.

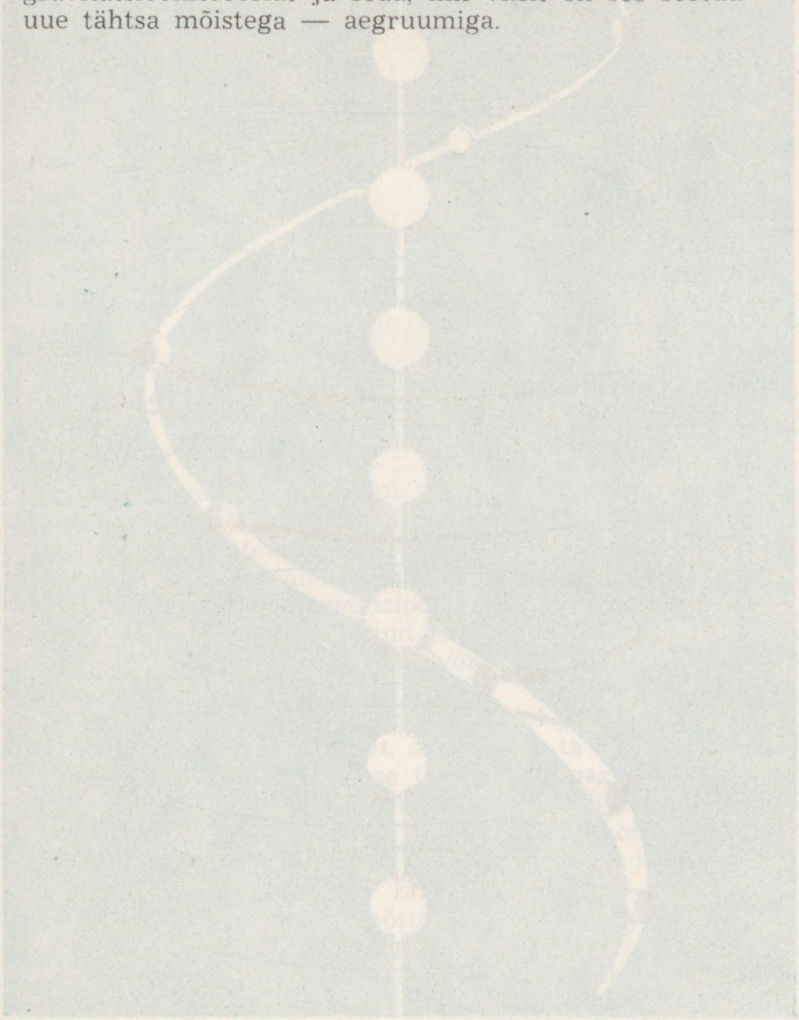
Kujutlege, et kosmos on varustatud mingite saladuslike «haarmetega» iga selles leiduva keha jaoks (seitsmendas peatükis vaadeldakse selliste «haarmete» päritolu). Kummaline on nende haarmete juures just see, et kui keha liigub ruumis ühtlaselt, siis ei takista haarmed millegagi tema liikumist. Niipea aga, kui katsutakse keha mitteühtlaselt (kiirenevalt) liikuma panna, haare nõrgeneb. Kui vaadelda liikumatu taustsüsteemina universumit, siis nimetatakse haaret keha inertsiks: see takistab liikumise muutumist. On aga liikumatuks taustsüsteemiks võetud keha, siis nimetatakse haaret raskuseks: universum katsub takistada keha mitteühtlast liikumist iseenese suhtes.

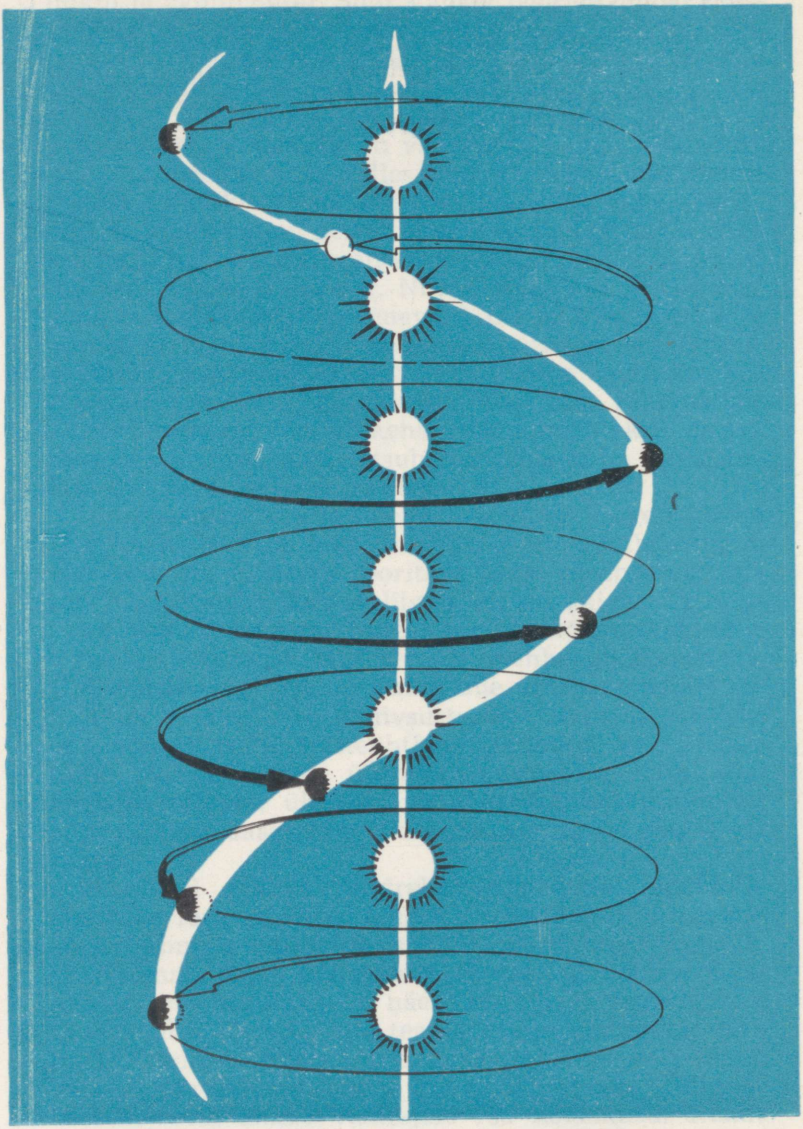
Üldrelatiivsusteooria olemus võetakse sageli kokku järgmiselt. Newton tegi kindlaks, et kui vaatleja liigub ühtlaselt, siis ei saa ta sooritada ühtki mehhaanikakatset, mis tõestaks, kas ta liigub või on paigal. Erirelatiivsusteooria laiendas selle järelduse *kõigile* katsetele, olgu siis tegemist optika- või mehhaanikakatsetega. Üldrelatiivsusteooria on samm uue üldistuse poole, see kujutab endast erirelatiivsusteooria üldistust, selleks et arvesse võtta ka mitteühtlane liikumine. Pole olemas ühtki katset, väidab üldrelatiivsusteooria, mille abil *ükskõik millises*, ühtlases või mitteühtlases liikumises olev vaatleja saaks kindlaks teha, kas ta on paigal või liigub.

Mõnikord antakse üldrelatiivsusteooria olemusele järgmine formuleering: kõik loodusseadused on invariantsed (muutumatud) iga vaatleja suhtes. See tähendab, et sõltumata oma liikumisest võib vaatleja kõiki loodusnähtusi (nii nagu ta neid näeb) kirjeldada samade võrrandite abil. Ta võib olla teadlane, kes töötab kas Maa peal, Kuul või hiiglasuures kosmoselaevas, mis liigub väikese kiirendusega mõne kauge tähe poole. Üldrelatiivsusteooria annab vaatlejale rea nõuandeid. Nende abil saab ta kirjeldada kõiki loodusseadusi, mis avalduvad ükskõik millises katses. Võrrandid jäävad täpselt

samaks, vaatamata sellele, kas vaatleja on mõne teise keha suhtes paigal, liigub ühtlaselt või kiirenevalt.

Järgmises peatükis vaadeldakse lähemalt Einsteini gravitatsiooniteooriat ja seda, mil viisil on see seotud uue tähtsa mõistega — aegruumiga.

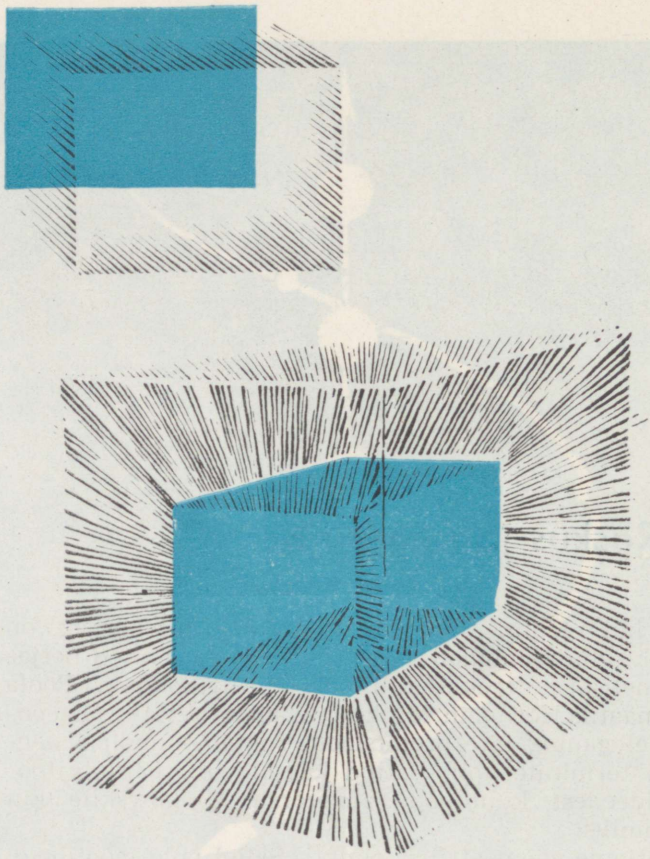




6. Raskus ja aegruum

Enne kui räägime Einsteini gravitatsiooniteooriast, on vajalik teha mõningad väga lühikesed märkused neljamõõtmelise mitteeukleidilise geomeetria kohta. Poola matemaatik Hermann Minkowski andis relatiivsusteooriale elegantse interpretatsiooni neljamõõtmelise aegruumi terminite abil. Paljud käesolevas peatükis toodud ideedest kuuluvad samavõrra Minkowskile kui Einsteinile.

Vaatleme geomeetrilist punkti. Sellel pole mõõtmeid. Kui punkt liigub piki sirget, siis tekitab ta ühemõõtmelise joone. Liigub niisugune joon ristsuunas iseendaga, siis tekitab ta kahemõõtmelise tasandi. Kui tasand liigub täisnurga all iseendaga, siis tekitab ta kolmemõõtmelise ruumi. Ja see on piir, milleni me oma kujutlusvõimega minna saame. Ent matemaatik kujutleb (muidugi mitte selles mõttes, et ta loob kujutluses endale mingi pildi, vaid ta töötab välja matemaatilise aparatuuri), et kolmemõõtmeline ruum liigub täisnurga all oma kõigi kolme mõõtme suhtes. See tekitab neljamõõtmelise eukleidilise ruumi. Pole mingit vajadust jääda peatuma neljal mõõtmel. Võime minna viie-,



kuue-, seitsme- või rohkemamõõtmeliste ruumideni. Kõik nad on eukleidilised, kujutavad endast Eukleidese geomeetria arendust, niisamuti nagu eukleidiline stereomeetria on eukleidilise planimeetria edasiarenduseks.

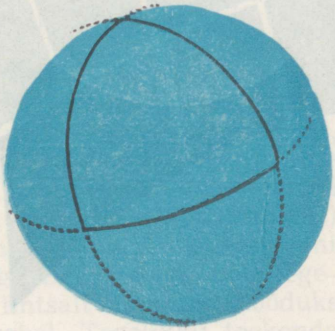
Eukleidilise geomeetria aluse moodustab rida postulaate, millest üks on kuulus paralleelsuse postulaat. See väidab, et läbi antud punkti väljaspool sirget on tasandil võimalik tõmmata ühe ja ainult ühe antud sirgega paralleelse sirge. Eukleidilist tasandit, mille



kohta see postulaat kehtib, nimetatakse lamedaks. Selle kõverus on null, pindala — lõpmata suur. Mitteeukleidilises geomeetrias on paralleelsuse postulaat asendatud teisega. Niisuguse asenduse võib teha kahel oluliselt erineval viisil.

Esimesel juhul, niinimetatud elliptilises geomeetrias räägitakse, et läbi antud punkti tasandil ei saa väljaspool antud sirget tõmmata *ühtki* joont, mis oleks paralleelne selle sirgega. Üldjoontes, mitte just täpselt, osutub seda tüüpi mitteeukleidilise tasandi mudeliks kerapind. «Kõige sirgemaks» võimalikest joontest keral on suurring (ring, mille diameeter on võrdne kera diameetriga). Kõik suurringid lõikuvad, nii et kaks suurringi ei saa kunagi olla paralleelsed. Niisugune eukleidiline tasand öeldakse omavat positiivset kõverust, mis viib selleni, et pind sulgub iseenesesse. Positiivse kõverusega pind ei ole lõpmata suur, vaid tal on lõplik väärtus.

Teist tüüpi mitteeukleidiline geomeetria, mida nimetatakse hüperboolseks, on selline, kus paralleelsuse postulaat on asendatud väitega, et tasandil saab läbi väljaspool antud sirget oleva punkti tõmmata lõpmata

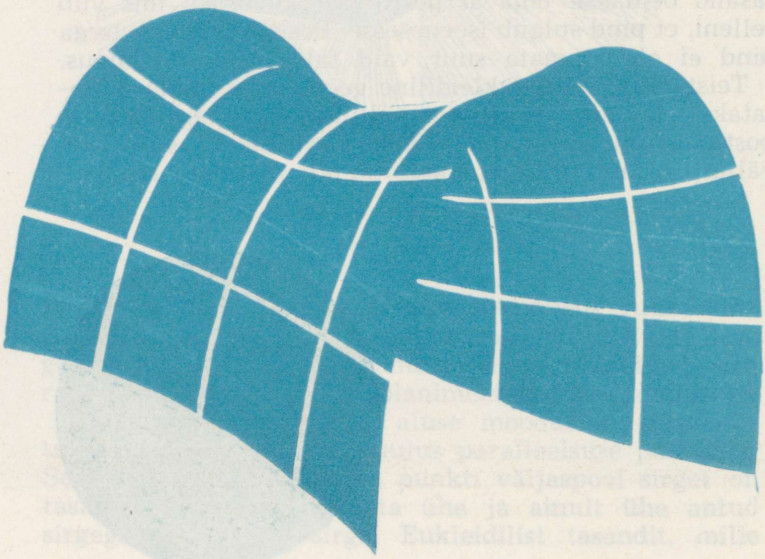


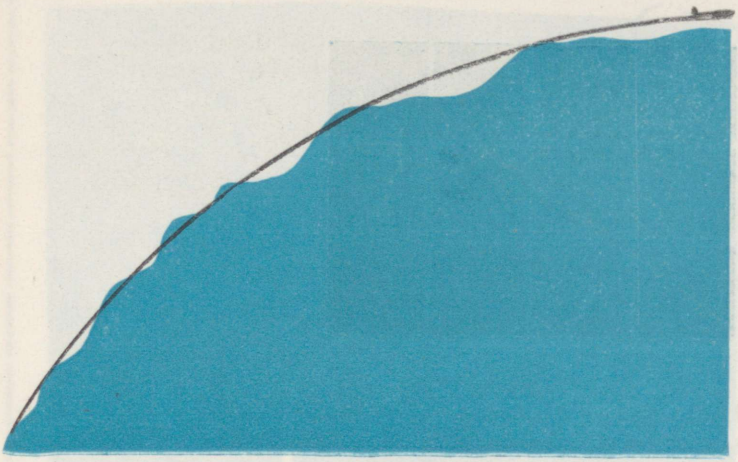
hulk selle sirgega paralleelseid sirgeid. Niisuguse pinnaosa ligikaudseks mudeliks on sadulakujuline pind. Sellisel pinnal öeldakse olevat negatiivne kõverus ja niisugune pind ei sulgu iseenesesse. Nii nagu eukleidiline tasandki laiub ta piiramatult igasse suunda.

Mõlemad, nii elliptiline kui ka hüperboolne geomeetria, on jääva kõverusega pindade mitteeukleidilised geomeetriad. See tähendab, et kõverus on igal pool sama; ühest kohast teise liikudes kehad ei moonutu. Üldisemat tüüpi mitteeukleidiline geomeetria, mida tavaliselt nimetatakse *Riemanni geomeetriaks*, on niisugune, milles kõverus võib muutuda punktist punkti ükskõik millisel etteantud viisil.

Täpselt nii, nagu on olemas 2-, 3-, 4-, 5-, 6-, 7-, ...-mõõtmelised eukleidilised geomeetriad, just niisamuti on olemas 2-, 3-, 4-, 5-, 6-, 7-, ...-mõõtmelised mitteeukleidilised geomeetriad.

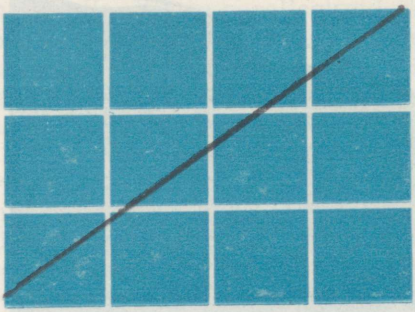
Üldrelatiivsusteooriat arendades leidis Einstein vajaliku olevat kasutada neljamõõtmelist Riemanni geomeetriat. Ent neljanda ruumimõõtme asemel tõi Ein-





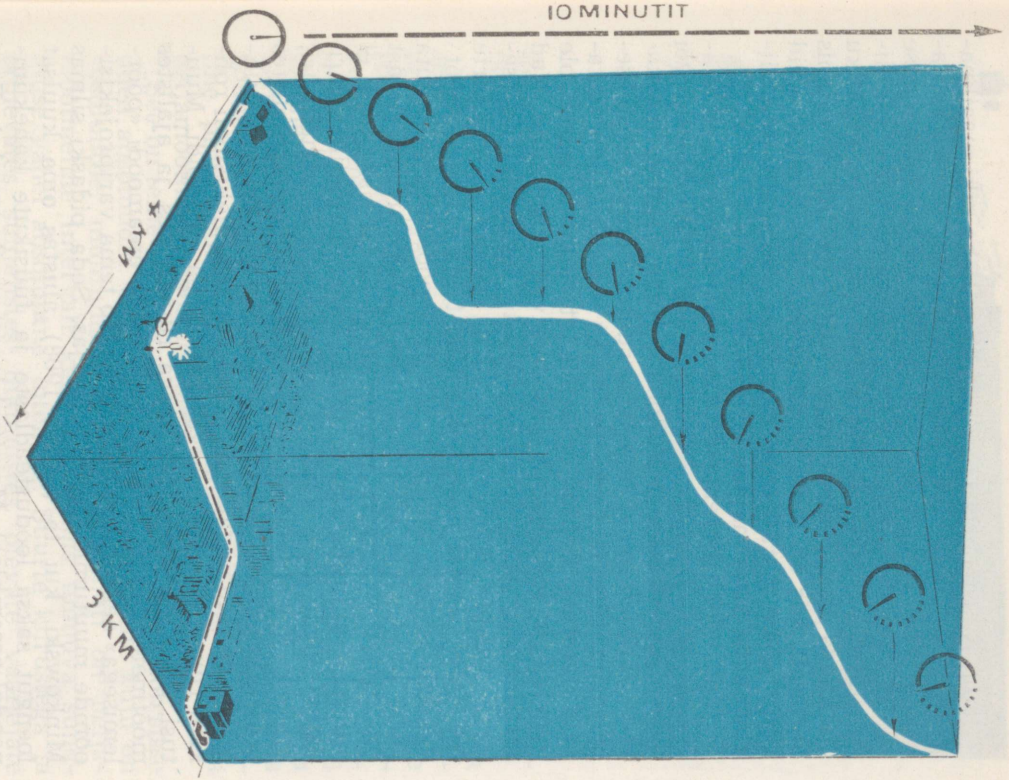
stein neljanda mõõtmena sisse hoopis *aja*. Neljanda mõõtme mõistes pole midagi üleloomulikku või salapärast. See tähendab ainult, et iga universumis aset leidev sündmus kujutab endast neljamõõtmelises aegruumi maailmas toimuvat sündmust.

Seda on kergem mõista, kui vaadelda järgmist sündmust. Te istute kell kaks päeval oma kodus autosse ja sõidate restorani, mis asub teie kodunt kolm kilomeetrit lõuna ja neli kilomeetrit ida pool. Kahemõõtmelisel tasandil oleks lühimaks vahemaaks teie kodunt restoranini täisnurkse kolmnurga hüpotenuus külgedega kolm ja neli kilomeetrit. Selle hüpotenuusi pikkus on viis kilomeetrit. Ent sõiduks kulub teil samuti teatav aeg, näiteks kümme minutit. Seda ajavahemikku võib kujutada kolmemõõtmelisel graafikul. Üks graafiku koordinaat on lõunasuunaline kaugus kilomeetrites, teine — idasuunaline kaugus kilomeetrites, vertikaalne koordinaat on aeg minutites. Sellel kolmemõõtmelisel aegruumi graafikul on intervall (vahemaa aegruumis) kahe sündmuse vahel (kodunt lahkumine ja restorani jõudmine) näidatud sirgjoonega. See sirgjoon pole tegeliku teekonna graafik, vaid lihtsalt kauguse mõõduks aegruumis kahe sündmuse vahel. Tegelikku teekonda



kujutab keeruline kõverjoon. Keeruliseks teeb graafiku see, et paigalt nihkumise momendil hakkab auto kiirenevalt liikuma, tänavate paiknemine võib otsesõidu restorani juurde võimatuks muuta, võib-olla peatute teel valgusfooride taga ja lõpuks tuleb teil peatumisel auto negatiivse kiirendusega liikuma panna. Tegeliku teekonna keerukat lainekujulist graafikut nimetatakse relatiivsusteoorias teekonna «maailmajooneks». Vaadeldaval juhul asub maailmajoon kolmemõõtmelises aegruumis ehk (nagu seda mõnikord nimetatakse) kolmemõõtmelises Minkowski ruumis.

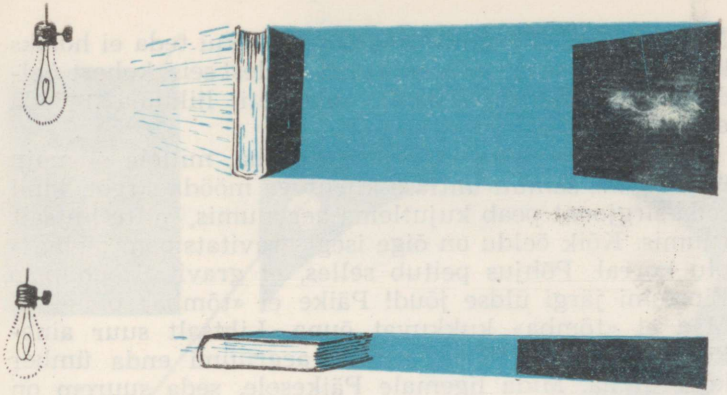
Et auto sõitis kahemõõtmelisel tasandil, siis osutus võimalikuks lisada veel üks mõõde — aeg — ja kujutada kogu teekonda kolmemõõtmelisel graafikul. Kui sündmused toimuvad kolmemõõtmelises ruumis, siis ei saa joonistada graafikut neljamõõtmelises aegruumis, kuid matemaatikud oskavad selliste graafikutega ilma neid joonistamatagi toime tulla. Katsuge kujutleda neljamõõtmelist hüperteadlast, kes oskab konstrueerida neljamõõtmelisi graafikuid niisama vabalt, nagu tavaline teadlane konstrueerib kahe- ja kolmemõõtmelisi. Kolm koordinaati tema graafikul on kolm mõõdet meie ruumis. Neljas koordinaat on meie aeg. Kui kosmoselaev lahkub Maalt ja maandub Marsil, siis joonistab kujuteldav hüperteadlane selle teekonna maailmajoone kõverana oma neljamõõtmelisele graafikule. (Joon tuleb kõver, sest laev ei saa niisugust teekonda kiirenduseta sooritada.) Aegruumi intervall stardi ja maandumise vahel osutub sellel graafikul aga sirgjooneks.


10 MINUTIT
4 KM
3 KM

Relatiivsusteooria järgi liigub iga keha piki maailmajoont neljamõõtmelises aegruumis ja tal on oma neljamõõtmeline struktuur. Kui mingit keha vaadeldakse kolme ruumikoordinaadi suhtes paigalseisvana, siis liigub ta ikkagi ajas. Tema maailmajooneks on graafiku ajateljega paralleelne sirge. Kui keha liigub ruumis ühtlaselt, siis on tema maailmajoon samuti sirge, kuid mitte enam paralleelne ajateljega. Mitteühtlaselt liikuva keha maailmajoon kõverdub.

Nüüd võime Lorentz-FitzGeraldi lühenemist erirelatiivsusteoorias vaadata uue pilguga — Minkowski või meie hüperteadlase seisukohalt. Nagu nägime, märkavad vaatlejad kahel teineteise suhtes liikuval kosmoselaeval nii teise laeva kujus kui ka kellade käigus teatavaid muutusi. Põhjus on selles, et ruum ja aeg ei ole teineteisest sõltumatult eksisteerivad absoluudid. Nad sarnaneksid nagu neljamõõtmeliste aegruumiliste esemete variprojektsioonidega. Kui panna valguskiirte teele ette raamat ja projekteerida tema vari kahemõõtmelisele seinale, siis võib raamatu pööramisega muuta varju kuju. Ühes asendis kujutab raamatu vari endast laia, teises — kitsast nelinurka. Raamat ise kuju ei muuda, muutub ainult tema kahemõõtmeline vari. Samal viisil näeb vaatleja neljamõõtmelist struktuuri, ütleme, kosmoselaeva, erinevates kolmemõõtmelistes projektsioonides, olenevalt sellest, kuidas ta laeva suhtes liigub. Mõningatel juhtudel võtab projektsioon rohkem ruumi ja vähem aega, teistel aga vastupidi. Muutusi, mida vaatleja teise laeva ruumilistes ja ajalistes mõõtmetes jälgib, võib seletada laeva omamoodi «pöörlemisega» aegruumis, mis põhjustab tema variprojektsioonide muutumist ruumis ja ajas. Seda pidaski silmas Minkowski, kui ta (aastal 1908) alustas oma kuulsat loengut saksa loodusteadlaste ja füüsikute kahekümnendal assambleel. Mainitud loeng on ilmunud A. Einsteini jt. raamatus «Relatiivsusprintsiip». Ükski populaarne raamat relatiivsusteooriast pole täiuslik ilma Minkowski tsitaadita:

«Vaated ruumile ja ajale, mida ma teile esitada tahan, arenesid eksperimentaalse füüsika baasil ja selles on nende jõud. Nad on radikaalsed. Siitpeale on ruum omaette ja aeg omaette muutunud puhtalt varjudeks ja



sõltumatu reaalsuse säilitab üksnes nende mõlema teatavat liiki ühtsus.»

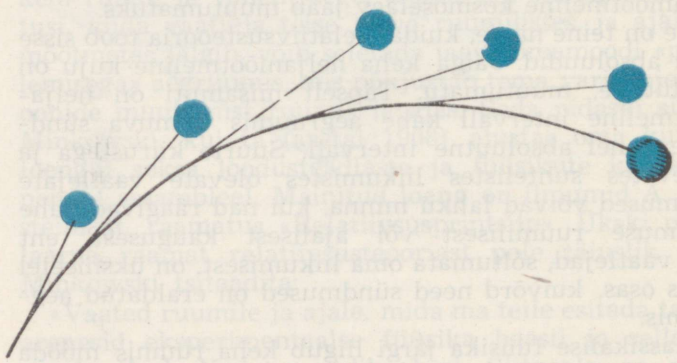
Tuleb aru saada tähtsast momendist: kosmoselaeva aegruumi struktuur, neljamõõtmeline struktuur on täpselt niisama jäik ja muutumatu nagu kolmemõõtmeline struktuur klassikalises füüsikas. See on oluline erinevus Lorentzi ja Einsteini lühenemisteooriate vahel. Lorentzi jaoks oli lühenemine kolmemõõtmelise objekti tõeline lühenemine. Einsteini jaoks on «reaalne» keha neljamõõtmeline objekt, mis ei muutu üldse. Tema kolmemõõtmeline projektsioon ruumis ja ühemõõtmeline projektsioon ajas võivad muutuda, ent aegruumi neljamõõtmeline kosmoselaev jääb muutumatuks.

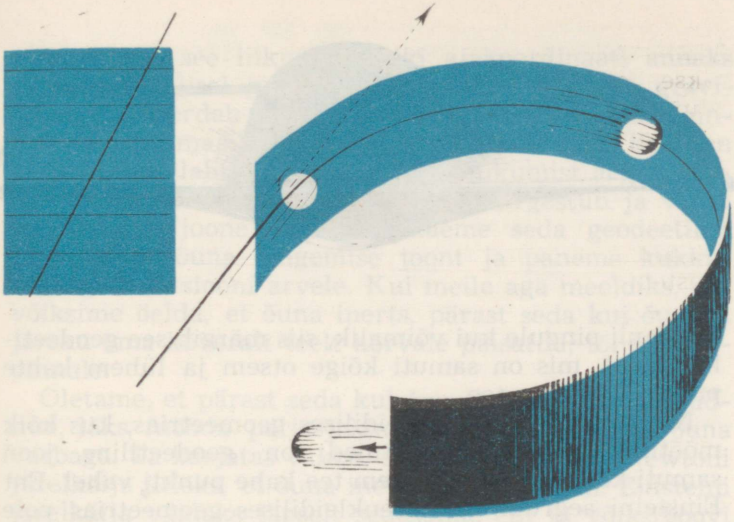
See on teine näide, kuidas relatiivsusteooria toob sisse uued absoluudid. Jäiga keha neljamõõtmeline kuju on absoluutne, muutumatu. Täpselt niisamuti on neljamõõtmeline intervall kahe aegruumis toimuva sündmuse vahel absoluutne intervall. Suurte kiirustega ja erinevates suhtelistes liikumistes olevate vaatlejate arvamused võivad lahku minna, kui nad räägivad kahe sündmuse ruumilisest või ajalisest kaugusest, ent *kõik* vaatlejad, sõltumata oma liikumisest, on üksmeelel selles osas, kuivõrd need sündmused on eraldatud aegruumis.

Klassikalise füüsika järgi liigub keha ruumis mööda sirget ja ühtlaselt seni, kuni talle ei mõju mõni jõud

Näiteks planeet liiguks mööda sirget, kui teda ei hoiaks kinni Päikese gravitatsioonijõud. Sellest seisukohast öeldakse, et Päike «sunnib» planeeti liikuma mööda ellipsit.

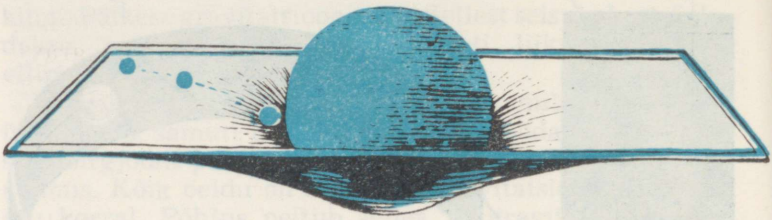
Relatiivsusteooria järgi liigub keha, millele ei mõju ükski jõud, samuti ühtlase kiirusega mööda sirget, kuid seda sirgjoont peab kujutlema aegruumis, mitte lihtsalt ruumis. Kõik öeldu on õige isegi gravitatsiooni olemasolu korral. Põhjus peitub selles, et gravitatsioon pole Einsteini järgi üldse jõud! Päike ei «tõmba» planeete. Maa ei «tõmba» kukkuvat õuna. Lihtsalt suur ainekogum, näiteks Päike, sunnib aegruumi enda ümber kõverduma. Mida ligemale Päikesele, seda suurem on kõverus. Teiste sõnadega, aegruumi struktuur suurte ainekogumite läheduses muutub mitteeukleidiliseks. Selles mitteeukleidilises ruumis valivad kehad endistviisi igasuguseid võimalikult otseseid teid, ent see, mis on sirge aegruumis, paistab kõverana, kui ta projekteerub ruumis. Meie hüperteadlane kujutaks Maa orbiiti oma neljamõõtmelisel graafikul sirgjoonena. Meie, kes me oleme kolmemõõtmelised olendid (täpsemalt, olendid, kes jagavad aegruumi kolmemõõtmeliseks ruumiks ja ühemõõtmeliseks ajaks), näeme Maa teed ruumis ellipsikujulisena.





Relatiivsusteooria-alaste teoste autorid selgitavad seda sageli järgmiselt. Kujutlege nelinurksele raamile tõmmatud kummitükki. Sellele asetatud greipfruut vajutab kummi lohku. Greipfruudi lähedusse pandud marmorkuulike veereb puuvilja poole. Greipfruut ei «tõmba» kuulikest. Ta loob ainult niisuguse struktuuriga välja (lohu), et kuulike valib vähima vastupanuga tee ja veereb greipfruudi poole. Ligikaudu (väga ligikaudu) öeldes kõverdub samal kombel ka aegruum suurte masside, nagu näiteks Päikese läheduses. See kõverdumine ongi raskusväli. Päikese ümber liikuv planeet ei liigu mööda ellipsit mitte Päikese tõmbe tõttu, vaid hoopis sellepärast, et niisuguses väljas on ellips kõige sirgem kõikvõimalikest teedest, mida mööda planeet aegruumis liikuda võib.

Niisugust teed nimetatakse geodeetiliseks jooneks. See sõna on relatiivsusteoorias sedavõrd tähtis, et teda tuleb lähemalt seletada. Eukleidilisel tasandil, nagu näiteks siledal paberilehel, on kõige otsem tee kahe punkti vahel sirge. See on samal ajal ka lühim vahemaa. Gloobuse pinnal on kahe punkti vaheliseks geodeetiliseks jooneks suurringi kaar. Kui tõmmata nöör kahe punkti



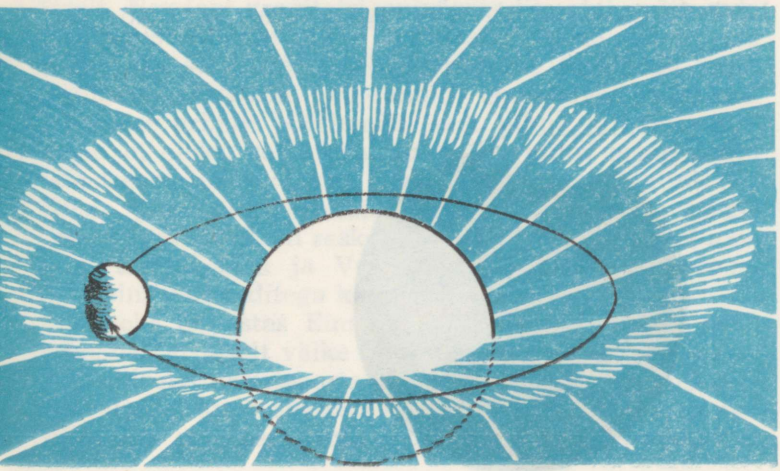
vahel nii pingule kui võimalik, siis märgib see geodeetilist joont, mis on samuti kõige otsem ja lühem kahte punkti ühendav tee.

Neljamõõtmelises eukleidilises geomeetrias, kus kõik mõõtmed on ruumimõõtmed, on geodeetiline joon samuti kõige lühem ja otsem tee kahe punkti vahel. Ent Einsteini aegruumi mitteeukleidilises geomeetrias pole asi nii lihtne. Seal on kolm ruumimõõdet ja üks ajamõõde, mis on omavahel ühendatud relatiivsusteooria võrrandite poolt määratud viisil. Need võrrandid on aga sellised, et geodeetiline joon, ehkki ta jääb aegruumis endiselt sirgeks, on hoopis kõige pikem, mitte enam lühim vahemaa. Huvitavast tulemusest, millele jõutakse, on võimalik aru saada vaid keerulise matemaatika abiga, kuid mainigem seda siiski: keha, mis liigub ainuüksi raskuse mõjul, leiab alati tee, mille läbimiseks kulub kõige rohkem aega, kui seda mõõdetakse keha omakella järgi. Bertrand Russell nimetas seda nähtust «kosmilise laiskuse seaduseks». Õun kukub otse alla, rakett liigub parabooli ja Maa ellipsit mööda sellepärast, et nad on teise tee valimiseks liiga laisad.

Just kosmilise laiskuse seadus sunnib kehi aegruumis liikuma selliselt, et mõnikord saab liikumist seletada inertsiga, teinekord gravitatsiooniga. Kui te seote nööri õuna külge ja keerutate, siis hoiab nöör õuna kinni, nii et ta sirget pidi minema lennata ei saa. Sel puhul ütleme, et õuna inerts pingutab nööri. Kui nöör katkeb, lendab õun sirget mööda minema. Midagi taolist juhtub ka siis, kui õun puu otsast alla kukub. Enne kukkumist takistab oks õuna liikumist piki neljamõõtmelist sirget. Õun on oksal paigal (Maa suhtes), ent liigub ajas, sest ta muutub pidevalt vanemaks. Kui raskusvälja poleks

olemas, siis see liikumine piki ajakoordinaati annaks neljamõõtmelisel graafikul sirge. Ent maakera gravitatsioon kõverdab aegruumi õuna naabruses ja see sunnib ka õuna maailmajoont kõveraks muutuma. Kui õun oksa küljest lahti tuleb, jätkab ta liikumist aegruumis, aga et see on laisk õun, siis ta tee sirgestub ja võtab geodeetilise joone kuju. Me näeme seda geodeetilist joont nagu õuna langemise joont ja paneme kukkumise gravitatsiooni arvele. Kui meile aga meeldiks, siis võiksime öelda, et õuna inerts, pärast seda kui õun on järsku oma kõveralt teelt kõrvale paisatud, tõi ta maapinnale.

Oletame, et pärast seda kui õun oli maapinnale jõudnud, läks mööda paljasjalgne poisike ja toksas õuna varbaga. Ta karjatas valust, sest lõi varba ära. Newtoni järelkäija ütleks, et õuna inerts takistas lööki. Einsteini järelkäija väidaks täpselt sedasama, ent ta võiks soovi korral ka kinnitada, et poisi jalg põhjustas kogu kosmose (kaasa arvatud varba) kiirendatud liikumise vastupidises suunas, see aga tekitas raskusvälja, mis sama jõuga tõmbas õuna varba poole. Kõik oleneb ainult sellest, milline sõnastus teile meeldib. Matemaatiliselt kir-

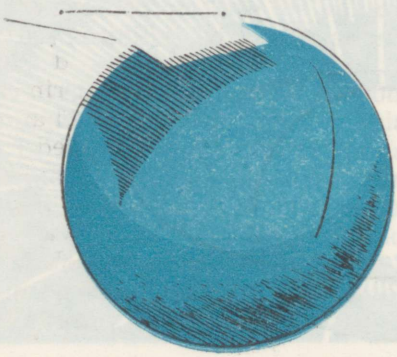


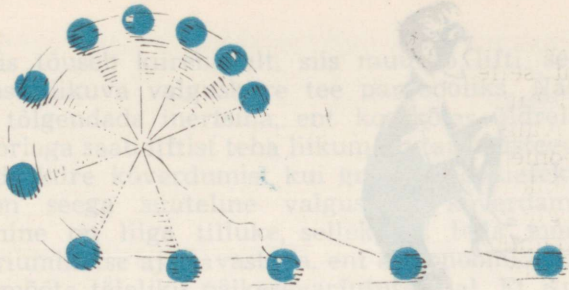
jeldab olukorda üksainus aegruumi võrrandite süsteem, ent sellest võib rääkida (tänu ekvivalentsuse printsiibile) ükskõik kummas Newtoni formuleeringus.

Kuigi relatiivsusteooria asendab raskuse aegruumi geomeetrilise kõverdumisega, jätab ta ometi paljud põhiküsimused vastamata. Kas toimub kõverdumine kogu ruumis hetkeliselt või levib see nagu lainetus? Enamik füüsikuid arvab, et kõverdumine tekib lainekujuliselt ja liigub seejuures valguse kiirusega. On tehtud isegi oletus, et gravitatsioonilained koosnevad tillukestest nähtamatutest energiaosakestest, nn. gravitonidest. Seni pole ükski katse näidanud ei lainete ega gravitonide olemasolu.

Robert H. Dicke, füüsik Princetoni ülikoolist, arvab, et gravitatsioon muutub järjest nõrgemaks ja on kaasajal võib-olla kolmteist protsenti väiksem kui Maa tekkimise ajal neli või viis miljardit aastat tagasi. Juhul kui asi on nii, siis Maa paisub tõenäoliselt ja tema pind praguneb. Päikegi peab paisuma. Kaks miljardit aastat tagasi pidi ta olema väiksem, tihedam ja kuumem; fakt, mis seletaks varasematel geoloogilistel ajastutel peaaegu tervel maakeral valitsenud troopikatingimusi. Kõik need on praegu üksnes oletused, ent võib-olla õnnestub Dicke'i teooriat varsti ka katseliselt kontrollida.

Relatiivsusteooria annab uue tee gravitatsiooni vaatlemiseks ja kirjeldamiseks, aga nähtus ise jääb ikka





salapäraseks ja vähearusaadavaks. Keegi ei tea, milline seos — kui seda üldse esineb — on tal elektromagnetismiga. Einstein ja teised on katsunud arendada «ühtset väljateooriat», mis ühendaks gravitatsiooni ja elektromagnetismi ühiste võrranditega, kuid seni on püüded jäänud tulemusteta. Võib-olla mõni Einsteini-taoline geniaalne noor lugeja näeb kord viisi niisuguse teooria formuleerimiseks.

Kas katseandmed on kinnitanud üldrelatiivsusteooriat? Jah, ehkki kaugeltki mitte nii täielikult kui erirelatiivsusteooriat. Esimene tõendus saadi Päikesele kõige lähema planeedi Merkuuri orbiidi vaatlemisel. Merkuuri orbiit on ellips, ent see ellips ise pöörleb aeglaselt. Newtoni gravitatsioonivõrrandite abil võib seda pöörlemist hinnata, kui arvestada teiste planeetide mõju, aga seejuures tuleb pöörlemine tegelikust veidi aeglasem. Einsteini võrrandid ennustavad planeedi elliptilise orbiidi pöörlemist isegi juhul, kui teisi planeete ei oleks; sel korral tuleb Merkuuri orbiit palju lähedasem tõelisele kui Newtoni poolt arvutatud tee. Teiste planeetide orbiidid sarnanevad rohkem ringidega, nii et efekti on raskem jälgida, kuid viimastel aastatel tehtud Maa ja Veenuse orbiitide mõõtmised on Einsteini võrranditega kooskõlas.

Teiseks ennustas Einstein, et Päikese spektris peab esinema äärmiselt väike nihe punase otsa poole. Vastavalt üldrelatiivsusteooria võrranditele on tugevatel raskusväljadel ajale aeglustav mõju. See tähendab, et iga rütmiline protsess, nagu näiteks aatomite võnkumine



või kella tiksumine, toimub Päikesel veidi aeglasemalt kui Maal. Selline nähtus omakorda nihutab Päikese spektrit suuremate lainepikkuste, s. t. punase otsa poole. Niisugust nihet on jälgitud, aga see ei ole just täiesti vankumatu tõend, sest talle võib leida palju muidki tõlgendusi.* Valge kääbus, mis on tuntud Siiriuse kaaslasena ja liigub viimasele väga lähedal, on küllalt massiivne, selleks et anda kolmkümmend korda suuremat punanihet kui Päike. Seda on samuti jälgitud ja see osutub veel paremaks kinnituseks. Ent parim tõend gravitatsiooni mõjust ajale saadi hiljuti laboratooriumides. Seda kirjeldatakse lähemalt kaheksandas peatükis.

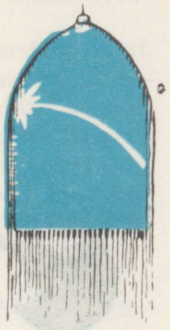
Kõige sensatsioonilisem üldrelatiivsusteooria kontrollkatsetest tehti 1919. aastal täieliku päikesevarjutuse ajal. Einstein arutles järgmiselt. Kui lift tähtedevaheli-

* Juba pärast raamatu valmimist, 1962. aastal tuli teade Päikese spektri punanihke kõige viimastest ja täpsematest mõõtmistest. Kasutades täiesti uut meetodit, said J. E. Blamont ja F. Roddier Meudoni observatooriumis Prantsusmaal strontsiumi neeldumisjoone punanihke jaoks väärtuse, mis on üldrelatiivsusteooria poolt ennustatud nihkele niivõrd lähedane, et esmakordselt osutus võimalikuks rääkida teooria tõepoolest heast kinnitusest. Nagu lisati, teeb see mõõtmiste «pretsedenditu täpsus tõenäoliselt lõpu melule, mis on kostnud füüsika köögipoolelt juba üle neljakümne aasta».

ses ruumis tõuseb kiirenevalt, siis muutub lifti sees edasi-tagasi liikuva valguskiire tee paraboliks. Nähtust võib tõlgendada inertsina, ent kooskõlas üldrelatiivsusteooriaga saab liftist teha liikumatu taustsüsteemi ja vaadelda kiire kõverdumist kui gravitatsiooniefekti. Raskus on seega suuteline valguskiiri kõverdama. Kõverdumine on liiga tilluke, selleks et teda mõne laboratooriumikatse ajal avastada, ent astronoomid võivad seda mõõta täieliku päikesevarjutuse ajal. Et Kuu varjab päikesevalguse, siis muutuvad nähtavaks tähed, mis asuvad Päikese serva lähedal. Neilt tähtedelt tulev valgus läbib tugevaima osa Päikese raskusväljast. Igasugune nihe tähtede nähtavates asendites viitaks siis sellele, et Päikese külgetõmme kõverdab kiire teed. Mida suurem on nihe, seda suuremaks kujuneb kõverdumine.

Paar sõna hoiatuseks! Kui te loete valguskiire «kõverdumisest» raskuse või inertsi mõjul, siis peate meeles pidama, et see on üksnes nähtuse kolmemõõtmeline kirjeldus. Ruumis kõverdub valguse tee tõepoolest. Kuid Minkowski neljamõõtmelises aegruumis liigub valgus, nii nagu klassikalises füüsikaski, ikka mööda geodeetilist joont. Ta valib kõige otsema tee võimalikest. Meie neljamõõtmeline teadlane kujutaks valguskiire teed oma aegruumi graafikul alati sirgena, isegi kui kiir läbiks tugevaid gravitatsioonivälju.

Inglise astronoom Arthur Stanley Eddington juhtis 1919. aastal teadlaste ekspeditsiooni, kes sõitsid Aafri-



kasse täielikku päikesevarjutust vaatama. Ekspeditsiooni esmaseks ülesandeks oli päikeseketta ääre lähedaste tähtede asukoha täpne mõõtmine. Newtoni füüsika ennustas samuti valguskiire paindumist raskusväljas, kuid Einsteini võrrandid andsid umbes kaks korda suurema hälbe. Kontrollimisel võidi saada seega vähemalt kolm erinevat tulemust:

1) tähtede asendis ei esine mingeid muutusi;

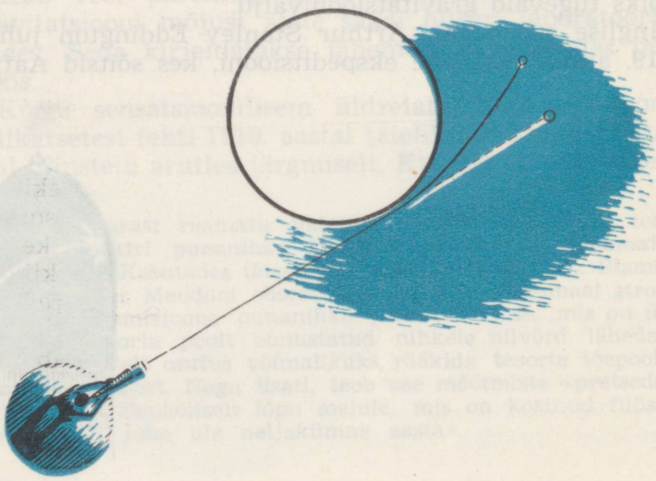
2) kõrvalekaldumine on lähedane sellele, mida ennustas Newtoni füüsika;

3) kõrvalekaldumine on lähedane Einsteini poolt ennustatule.

Esimene tulemus oleks ümber lükanud nii Newtoni kui ka üldrelatiivsusteooria võrrandid. Teine oleks rääkinud Newtoni kasuks ja Einsteini vastu. Kolmas oleks rääkinud Einsteini poolt ja Newtoni kahjuks. Vastavalt tollal populaarsele anekdoodile olevat kaks sellest ekspeditsioonist osavõtnud astronoomi arutanud neid kolme võimalust.

«Aga mis siis,» küsinud üks neist, «kui hälve tuleb kaks korda suurem Einsteini poolt ennustatust?»

«Siis,» vastanud teine, «läheb Eddington hulluks.»



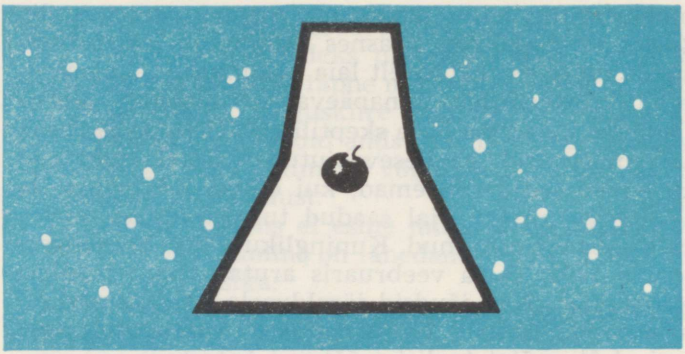
Õnneks osutus hälve lähedaseks Einsteini tulemusele. Ulatuslik reklaam, mis kaasnes Eddingtoni ekspeditsiooniga, tõmbas esmakordselt laia avalikkuse tähelepanu üldrelatiivsusteooriale. Tänapäeva astronoomid suhtuvad sellesse tõendisse üsna skeptiliselt. Tähtede asukoha täpsel mõõtmisel päikesevarjutuse vältel tekkivad raskused on palju suuremad, kui oletas Eddington, ja erinevate varjutuste ajal saadud tulemused on mõnevõrra erinevaks osutunud. Kuningliku Seltsi koosolekul Londonis 1962. aasta veebruaris arutas rühm teadlasi seda küsimust. Nad jõudsid järeldusele, et raskused on liiga suured, selleks et varjutuste vaatlejatel veel kunagi oleks mõtet taolisi mõõtmisi katsetada.

Vaatamata sellele, et on katseid (ehkki vähe), mis kinnitavad üldrelatiivsusteooria seisukohti, ja loendamatu hulk katseid, mida pole veel tehtud ning isegi mitte arutatud, kuid mis ometi võiksid seda teooriat veelgi paremini kinnitada, saab korraldada ka selliseid katseid, mis võiksid teooriale tugevasti kahju teha. George Gamow, tuntud füüsik Colorado ülikoolist, kirjeldas katset, millest võtavad osa antiosakesed. Nagu meil juba juttu oli, kujutavad need endast elementaarosakesi, mis sarnanevad kõiges hariliku aine osakestega, kuid millel on vastupidine elektrilaeng. Mõningad teadlased arvavad, et antiosakestel võib olla ka negatiivne mass. Sel juhul kiirendaks neile osakestele mõjuv jõud osakesi oma mõjuga vastassuunas. Antimateeriast valmistatud antiõun oleks lennanud taevasse, selle asemel et Newtonile nina pihta kukkuda. Kas antiosakestel võib olla negatiivne mass või mitte, seda pole veel kindlaks tehtud, aga kui lugu tõepoolest nii oleks, siis seisab relatiivsusteooria tõsiste raskuste ees.

Selleks et aru saada, millest need raskused tekivad, kujutlege tähtedevahelises ruumis hõljuvat kosmoselaeva, mis on tähtede suhtes paigal. Ühe kabiini keskel ujub negatiivse massiga antiõun. Laev hakkab kiirendusega g kabiini lae suunas liikuma. (g on kiirendus, millega kehad Maa poole kukuvad, see on võrdne umbes 9,8 meetriga sekundis ühe sekundi kohta, tähendab, igas sekundis suureneb keha kiirus 9,8 meetrit sekundis.)

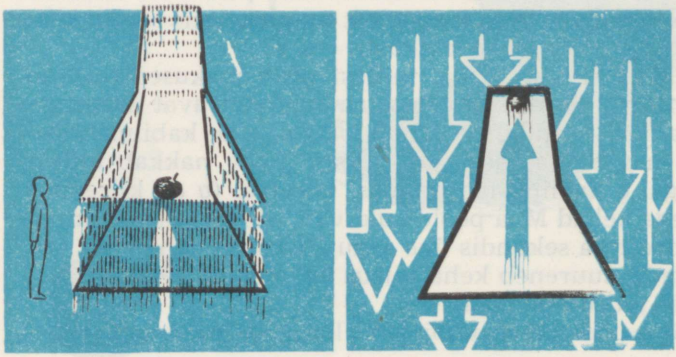
Mis juhtub õunaga?

Väljaspool laeva viibiva ja kosmose inertsiaalsüstee-



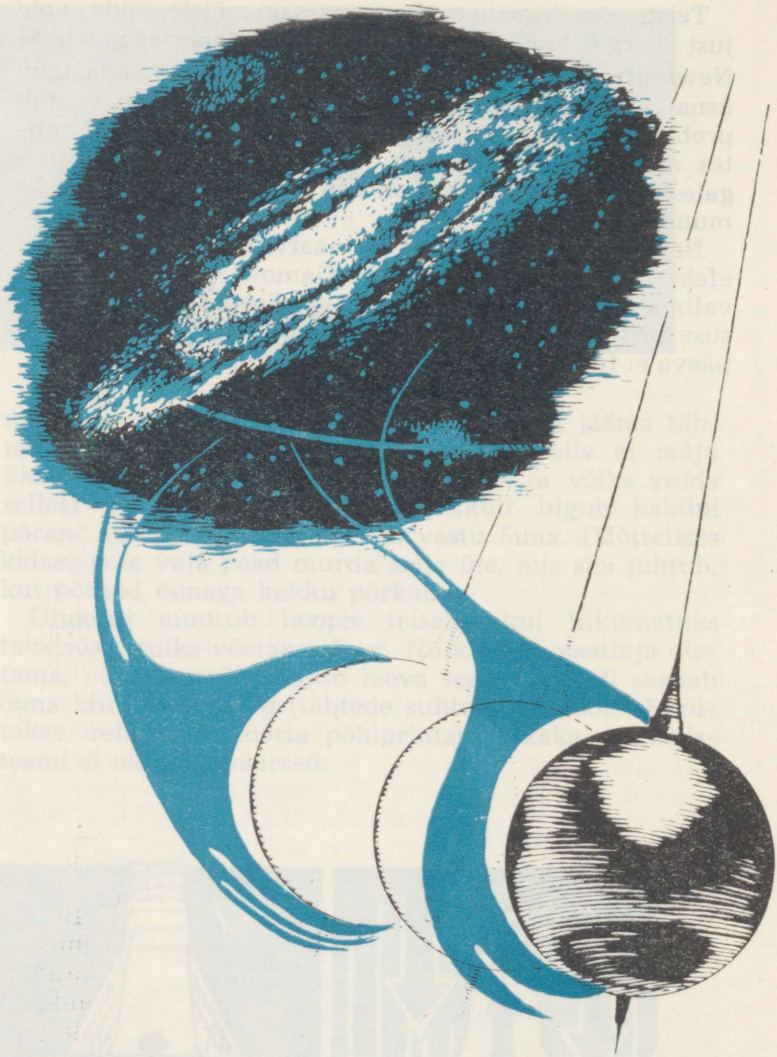
miga seotud vaatleja seisukohalt peab õun jääma tähtede suhtes sinnasamasse, kus ta oli. Talle ei mõju ükski jõud. Laev ise ei puuduta õuna, ta võiks asuda sellest ükskõik kui kaugel. Järelikult liigub kabiini põrand ülespoole, kuni põrkab vastu õuna. (Mõttelises katses pole vaja pead murda selle üle, mis siis juhtub, kui põrand õunaga kokku põrkab.)

Olukord muutub hoopis teiseks, kui liikumatuks taustsüsteemiks võetakse laev. Nüüd peab vaatleja oletama, et raskusväli mõjub laeva sees. See väli saadab õuna kiirendusega $2g$ (tähtede suhtes) lae poole. Rikutakse relatiivsusteooria põhiprintsiipi: kaks taustsüsteemi ei ole samaväärsed.



Teiste sõnadega, negatiivne mass on mõiste, mida ei ole just kerge kohandada üldrelatiivsusteooriaga, ehkki Newtoni seisukoht inertsi suhtes võimaldab seda teha üsna väikese vaevaga. Klassikaline füüsika vaatab probleemi ainult esimesest aspektist. Laev on eetri suhtes absoluutses liikumises. Õun jääb absoluutselt paigale. Ei ilmu mingeid raskusvälju, mis pildi keerukaks muudaksid.

Negatiivse massi ja seda saatva antigravitatsiooni efekti avastamine, järeldab Gamow, «sunniks meid valima Newtoni inertsiseaduse ja Einsteini ekvivalentsuse printsiibi vahel. Autor loodab palavalt, et sellist päeva ei tule».





7. Machi printsiip

Einsteini ekvivalentsuse printsiip väidab, et jõuväljа, mis tekib keha kiirendamisel või pöörlema panemisel, saab olenevalt taustsüsteemi valikust vaadelda inertsi- või raskusväljana. Kuid seejuures tekib väga oluline küsimus, mis viib sügavate, seni lahendamata probleemide juurde.

Kas tekivad need jõuväljad liikumise tõttu aegruumi suhtes, mis eksisteerib sõltumata ainest, või on aegruum ise aine *sünnitis*? Teiste sõnadega, kas galaktikad ja teised kehad universumis loovad aegruumi?

Teadlaste arvamused läksid lahku. Kõiki 18. ja 19. sajandi vanu järeldusi «ruumi» või «eetri» eksisteerimisest sõltumata ainest võib kuulda ka kaasajal, ainult praegu vaieldakse kosmose aegruumi struktuuri üle (mõnikord nimetatakse seda meetriliseks väljaks). Enamik relatiivsusteooriast kirjutanud teadlasi (Arthur Stanley Eddington, Bertrand Russell, Alfred North Whitehead jt.) arvasid, et aegruumi omadused ei olene tähtedest, ehkki tähed põhjustavad kohalikke kõverdumisi. Üldisemalt väljendades, kui universumis poleks mingeid teisi kehi peale Maa, siis, nagu nende arvamuste autorid kinnita-

vad, oleks ikkagi võimalik Maa pöörlemine aegruumi suhtes. (Probleemil, millist kõverust — positiivset, negatiivset või nullilist — see ruum omab, pole mingit seost antud vaidlusega.) Üksildane kosmoselaev, ainus keha universumis, võiks mootorid sisse lülitada ja kiirendada oma liikumist. Laevas olevad kosmonaudid tunneksid kiirenemise vältel inertsijõudude mõju. Üksildane ruumis pöörlev Maa muutuks ekvaatori kohalt lapikuks, sest aineosakestele, mis aegruumis mööda geodeetilisi jooni ei liigu, mõjuksid jõud. Osakesed peaksid, piltlikult öeldes, liikuma vastuvoolu aegruumile. Sellel üksildasel Maal oleks võimalik mõõta isegi Coriolisi jõuks* nimetatavat inertsjõudu ja määrata Maa pöörlemise *suund*.

Einstein tunnistas sellise vaatepunkti võimalikku õigsust, kuid vähemalt noorena polnud see talle meele järele. Ta eelistas seisukohta, mida esimesena pakkus iiri filosoof piiskop Berkeley, kes väitis, et kui Maa on ainuke keha universumis, siis on mõttetu rääkida tema pöörlemise võimalikkusest. Niisamasugust vaadet jagasid teataval määral 17. sajandi saksa filosoof Leibniz ja hollandi füüsik Christian Huygens, kuid see jäi unustusehõlma, kuni Ernst Mach (19. sajandi austria füüsik) ta uuesti ellu äratas sellega, et esitas tõega sarnaneva teadusliku teooria. Mach nägi ette paljusid relatiivsusteooria seisukohti ja ka Einstein on kirjutanud Machi suurest mõjust oma varasematele ideedele. (Kahetsusega tuleb märkida, et kui Machi ideed leidsid kajastuse Einsteini teoorias, keeldus ideede autor ise relatiivsusteooriat õigeks tunnistamast.)

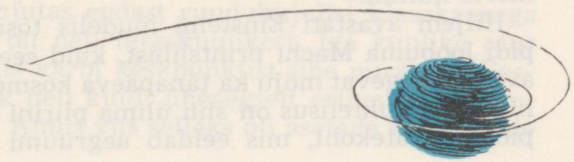
Machi seisukohalt pole tähtedeta kosmosel aegruumilist struktuuri, mille suhtes Maa pöörelda võiks. Raskus- (või inertsi-) väljade ilmumiseks, et need saaksid kokku suruda planeeti või tõsta vedelikke mööda pöörleva ämbri seinu üles, on vaja tähti, mis loovad aeg-

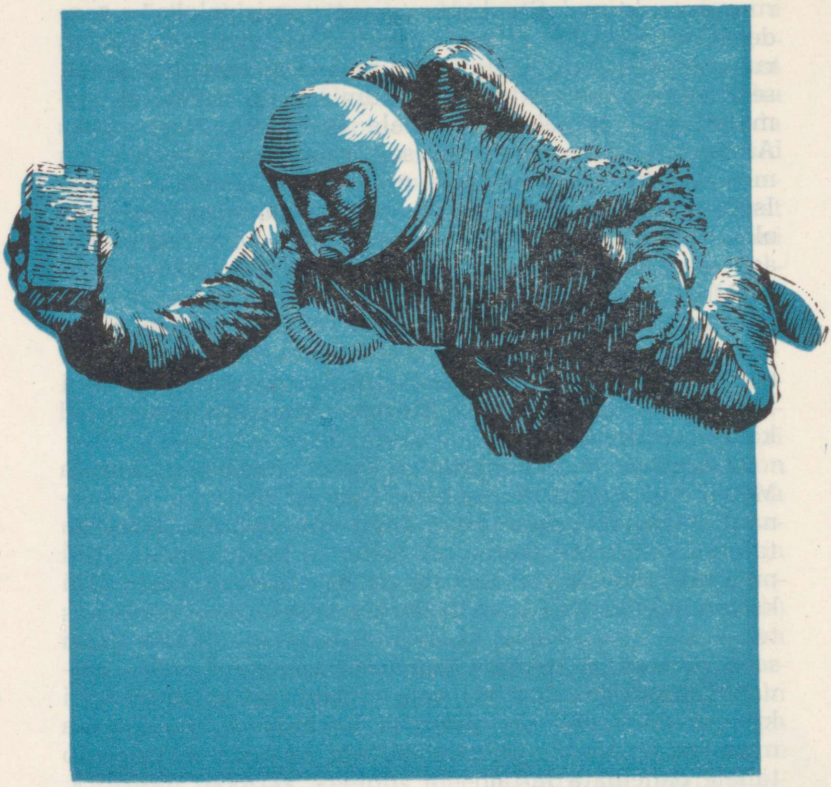
* Maa pöörlemine kutsub esile põhja või lõuna suunas lendava kontinentidevahelise raketi kõrvalekaldumise, põhjapoolkeral vastavalt paremale ja lõunapoolkeral vasakule. Seda inertsinähtust nimetatakse Coriolisi jõuks 19. sajandi algul elanud prantsuse inseneri G. G. Coriolisi auks. Coriolis analüüsis esimesena põhjalikult selle jõu olemust. Tsüklonid ja muud ringliikumised atmosfääris on Coriolisi jõudude mõju otsene tulemus.

ruumi struktuuri. Struktuurita aegruumis poleks ka geodeetilisi jooni. Me ei saaks isegi öelda, et täiesti tühjas ruumis leviv valguskiir liigub mööda geodeetilist joont, sest aegruumi struktuuri puudumisel poleks kiirel võimalik ühte trajektoori teisele eelistada. Nagu ütles A. d'Abro (oma suurepärases raamatus «Teadusliku mõtte areng»), kiir ei teaks, millist teed mööda liikuda. Isegi sellise sfäärilise keha nagu Maa eksisteerimine oleks juba võimatu. Maa osakesi hoiab koos raskujõud, aga seesama jõud paneb osakesed liikuma mööda geodeetilisi jooni. Kui aegruumil poleks struktuuri, siis poleks ka geodeetilisi jooni ja Maa (d'Abro sõnade järgi) ei teaks, millist kuju võtta. Selle kohta ütles Eddington kord humoorikalt: «Täiesti tühjas universumis (kui Machil on õigus) peavad Einsteini gravitatsiooniväljad kokku varisema!»

D'Abro kirjeldab mõttelist katset, mis aitab mõista Machi seisukohta. Kujutleme ruumis hõljuvat kosmonauti. Olgu ta ainuke keha kogu universumis. Käes on tal telliskivi. Me teame, et tellis ei kaalu midagi (tal puudub raske mass). Kas tal on aga inertne mass? Kui kosmonaut katsub kivi käest ära visata, kas tekib siis tema käe liikumisele vastu mõjuv jõud? Machi järgi seda esineda ei tohiks. Aegruumi meetrilist välja loovate tähtede puudumisel pole midagi, mille suhtes kivi kiirendada saaks. On muidugi kosmonaut, kuid tema mass on nii väike, et kõik sellega seotud efektid võib tähele panemata jätta.

Einstein kasutas Machi seisukoha jaoks terminit «Machi printsiip». Algul ta lootis, et selle printsiibi saab ka relatiivsusteooriasse tuua. Ja tõepoolest, ta lõigi kord universumi mudeli (sellest tuleb juttu üheksandas peatükis), milles universumi aegruumi struktuur eksisteerib vaid niivõrd, kui on olemas seda loovad tähed ja teised





materiaalsed kehad. «Järjekindlas relatiivsusteoorias,» kirjutas Einstein 1917. aastal, avaldades mudeli esimese matemaatilise kirjelduse, «ei saa olla mingit inertsi «ruumi» suhtes, vaid ainult masside inerts üksteise suhtes. Järelikult kui ma viin mingi massi küllalt kaugele kõigist teistest massidest universumis, kahaneb tema inerts nullini.»

Hiljem avastati Einsteini mudelis tõsine viga ja ta pidi loobuma Machi printsiibist, kuid seesama printsiip avaldab tugevat mõju ka tänapäeva kosmoloogidele, sest liikumise suhtelisus on siin ülima piirini viidud. Vastupidine vaatekoht, mis eeldab aegruumi meetrika ole-

masolu isegi tähtede puudumisel, on tegelikult väga lähedane vanale eetriteooriale. Liikumatu ja nähtamatu eetriks nimetatud tarrendi asemel pakutakse liikumatut ja nähtamatut aegruumi struktuuri. Niisuguse oletuse tõttu omandavad kiirendus ja pöörlemine kahtlaselt absoluutse iseloomu. Ja tõepoolest, selle vaatekoha jüngrid räägivad pöörlemistest ja kiirendustest kõhklemata nagu «absoluutidest». Aga kui inertsinähtus on suhteline (muidugi ainult tähtede poolt loodud struktuuri mõttes), siis esineb suhtelisus siin puhtaimal kujul.

Inglise kosmoloog Dennis Sciama lõi Machi jälgedes käies teravmeelse teooria, mille köitev esitus on antud tema populaarses raamatus «Universumi ühtsus». Vastavalt Sciama teooriale on pöörlemisel ja kiirenemisel tekkivad inertsinähtused kogu universumi suhtes toimuva liikumise tulemuseks. Sel juhul annab inertsi mõõtmine aga meetodi aine koguhulga hindamiseks universumis. Sciama võrrandid näitavad, et lähimate tähtede mõju inertsile on üllatavalt väike. Kõik tähed meie galaktikas tekitavad Sciama järgi umbes ühe kümnemiljondiku inertsist Maal. Peamise osa inertsijõust loovad kauged galaktikad. Teadlase hinnangu põhjal tekib 80 protsenti inertsijõust galaktikate suhtelise liikumise tulemusena. Need galaktikad on niivõrd kaugel, et meie teleskoobid pole nendeni veel küündinud.

Machi päevil ei teatud, et peale meie Galaktika on veel teisigi, ei teatud isegi seda, et meie Galaktika pöörleb. Tänapäeva astronoomid teavad, et pöörlemisel tekkivad kesktõukejõud suruvad Galaktika väga tugevasti kokku. Machi järgi võib niisugune kokkusurumine aset leida vaid siis, kui väljaspool meie tähekogumit leidub hiiglaslikke ainekoguseid. Oleks Mach teadnud inertsinähtusest meie Galaktika pöörlemisel, väidab Sciama, siis oleks ta võinud ennustada teiste galaktikate olemasolu juba viiskümmend aastat enne nende avastamist.

Sciama arvamuse ebatavalisus muutub ilmsemaks võib-olla järgmise näite varal. Ostsin kord väikese mängu, mis kujutas endast ruudukujulist klaaskaanega karpi. Karbis oli neli teraskuulikest. Iga kuulike asus uurdes, mis viis karbi keskpunktist ühe nurgani. Ülesandeks oli kõik neli kuuli üheaegselt erinevatesse nurkadesse ajada. Ainus viis selleks oli asetada karp lauale

ja panna pöörlema. Kesktõukejõud aitab sellest ülesandest jagu saada. Kui Sciamal on õigus, siis poleks selline lahendus ilma miljardite hiigla kaugel asuvate galaktikateta kõne allagi tulnud.

Kas areneb relatiivsusteooria Machi ja Sciama poolt näidatud suunas või säilib tähtedest sõltumata aegruumi



struktuur? Sellele ei oska keegi veel vastata. Kui on edukas niisugune väljateooria arendus, kus aine elementaarosakesi võib kirjeldada aegruumi välja abil, siis muutuvad tähed üheks niisuguse välja ilminguks. Struktuuri loovate tähtede asemel loob struktuur tähti. Kuid kaasajal on need kõik vaid oletused.




1965
1970
1995
2055

8. Kaksikute paradoks

Kuidas reageerisid uuele, kummalisele suhtelisuse maailmale maailmakuulsad teadlased ja filosoofid? Reageeringud osutusid erinevaks. Enamik füüsikuid ja astronoome, keda häirisid «terve mõistuse» seisukohtade rikkumine ja üldrelatiivsusteooria matemaatilised raskused, oli targu vait. Ent need õpetlased ja filosoofid, kes relatiivsusteooriast aru suutsid saada, võtsid ta vaimustunult vastu. Meil oli juba juttu sellest, kui ruttu tajus Eddington Einsteini saavutuste tähtsust. Moritz Schlick, Bertrand Russell, Rudolf Carnap, Ernst Cassirer, Alfred North Whitehead, Hans Reichenbach ja paljud teised väljapaistvad filosoofid olid esimesed entusiastid, kes kirjutasid sellest teooriast ja katsusid jõuda kõigi järeldusteni. Russelli raamat «Relatiivsusteooria ABC» ilmus esmakordselt 1925. aastal, kuid on tänapäevani jäänud üheks parimaks relatiivsusteooria populaarsetest esitustest.

Paljud õpetlased ei suutnud vabaneda vanast, Newtoni-aegsest mõttelaadist. Mitmes suhtes meenutasid nad Galilei päevade teadlasi, kes ei saanud end sundida tunnistama, et Aristoteles võis eksida. Piiratud matemaati-

liste teadmistega Michelsongi ei tunnustanud relatiivsusteooriat, ehkki tema suur katse sillutas teed erirelatiivsusteooriale. Hiljem, 1935. aastal, kui ma olin Chicago ülikooli üliõpilane, luges meile astronoomiat tuntud teadlane William D. Macmillan, kes väitis avalikult, et relatiivsusteooria on ainult kurb arusaamatus.

«Meie, kaasaegne põlvkond, oleme liiga kärsitud, selleks et midagi ära oodata,» kirjutas Macmillan 1927. aastal. «Nende neljakümne aasta jooksul, mis on möödunud Michelsoni katsest avastada Maa oodatud liikumist eetri suhtes, oleme loobunud kõigest, mida meile õpetati varem, loonud postulaadi, kõige mõttetuma kõigest, mida ainult oskasime välja mõelda, ja jõudnud mittenjuutonliku mehhaanikani, mis on kooskõlas selle postulaadiga. Saavutatud edusammud tähendavad küll oivalist andamit meie intellektuaalsele aktiivsusele ja teravmeelsusele, kuid pole kindel, et ka tervele mõistusele.»

Relatiivsusteooriale esitati kõige erinevamaid vastuväiteid. Üks varasematest ja visamatest puudutab paradoksi, millest esimesena rääkis Einstein ise 1905. aastal artiklis erirelatiivsusteooriast (sõna «paradoks» kasutatakse mingi üldiste seisukohtadega vastuolus oleva, kuid loogiliste vasturääkivusteta nähtuse kohta). Sellele paradoksile pühendatakse kaasaegses teaduslikus kirjanduses ohtrasti tähelepanu, sest edusammud kosmoselendude alal käsikäes fantastiliselt täpsete ajamõõtmisseadmete konstrueerimisega võivad peagi anda viisi tema otseseks kontrollimiseks.

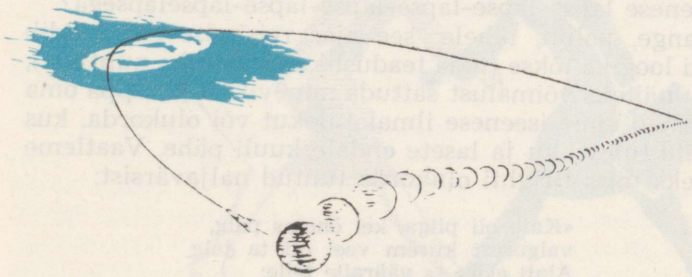
Paradoks esitatakse tavaliselt mõttelise katsena kaksikute osavõtul. Kaksikud võrdlevad kelli. Üks neist teeb kosmoselaeval pika reisi. Kui ta tagasi jõuab, võrdlevad nad uuesti kelli. Vastavalt erirelatiivsusteooriale näitab ringirännanud venna kell mõnevõrra vähem. Teiste sõnadega, aeg voolab kosmoselaevas aeglasemalt kui Maal. Seni kui kosmilised marsruudid piirduvad päikesesüsteemiga ja lende sooritatakse suhteliselt väikese kiirusega, on aegade erinevus tühiselt väike. Ent suurtel kaugustel ja valguse kiirusele lähedastel kiirustel «aja dilatatsioon» (nii nimetatakse seda nähtust mõnikord) kasvab. Pole midagi usutamatut oletuses, et aja jooksul avastatakse viis, kuidas kosmoselaeva kiirust

järk-järgult suurendada kiiruseni, mis on ainult veidi väiksem valguse kiirusest. See annab võimaluse külastada meie Galaktika teisi tähti, võib-olla aga teisi galaktikaidki. Niisiis on kaksikute paradoks rohkem kui lihtsalt meelelahutusülesanne, kunagi muutub ta kosmoserändurite argipäevaks.

Oletame, et kosmonaut — üks kaksikutest — läbib vahemaa tuhat valgusaastat ja pöördub siis tagasi. See vahemaa on meie galaktika mõõtmetega võrreldes väike. Kas võib olla kindel, et kosmonaut ei sure ammu enne teekonna lõppu? Kas pole selliseks reisiks, nagu oletavad paljud fantastikajuttude autorid, vaja tervet naiste ja meeste kolooniat, kes sugupõlvede kaupa elavad ja surevad, kuni kosmoselaev sooritab oma pikka tähtedevahelist reisi?

Vastus oleneb laeva kiirusest. Kui teekond toimub valguse kiirusele lähedase kiirusega, siis voolab aeg laeva sees palju aeglasemalt. Maapealse aja järgi kulub lennuks muidugi üle kahe tuhande aasta. Kui laevas olev kosmonaut liigub küllalt kiiresti, siis tema seisukohalt võib teekond kesta kõigest mõni aastakümme.

Nende lugejate jaoks, kellele meeldivad arvud, toome Berkeleys asuva Kalifornia ülikooli füüsiku Edwin M. McMillani hiljutiste arvutuste tulemused. Kosmonaut suundub Maalt spiraalse Andromeeda udukogu poole, kuhu on veidi alla kahe miljoni valgusaasta. Esimese poole teest läbib ta pideva kiirendusega $2g$, seejärel pideva aeglustumisega $2g$, kuni jõuab udukoguni. (See on mõnus viis püsiva raskusvälja loomiseks laeva sees pik-



kade reiside ajal ilma pöörlemise abita.) Tagasi sõidetakse samal kombel. Vastavalt kosmonaudi kellale kestab reis kakskümmend üheksa aastat. Maapealsete kellade järgi möödub aga peaaegu kolm miljonit aastat!

Te märkasite kohe, et tekivad igasugused köitvad võimalused. Neljakümneaastane teadlane ja tema noor laborant armusid teineteisesse. Nad saavad aru, et vanusevahe muudab nende abielu võimatuks. Seepärast suundub teadlane pikale kosmilisele teekonnale, liikudes valguse kiirusele lähedase kiirusega. Ta pöördub tagasi neljakümne ühe aastasena. Sel ajal on tema sõbratar Maal saanud kolmekümne kolme aastaseks. Tõenäoliselt ei suutnud ta armastatut viisteist aastat oodata ja abiellus kellegi teisega. Teadlane ei suuda sellest aga üle saada ja suundub teisele pikale retkele, seda enam, et talle pakub huvi välja selgitada, kas järgnevad põlvkonnad lükkavad tema teooria ümber või kinnitavad seda. Ta pöördub Maale tagasi neljakümne kahe aastasena. Noorpõlvesõbratar on ammu surnud, ja mis veel halvem, talle nii kallist teooriast pole midagi järele jäänud. Solvunult suundub teadlane veel pikemale retkele, et neljakümne viie aastasena tagasi pöördudes näha juba mitme aastatuhande võrra vananenud maailma. Võimalik, et nii nagu rändur Wellsi «Ajamasinas» avastab ta, et inimkond on välja surnud. Ja nüüd jääb ta hätta: Wellsi «ajamasin» võis liikuda mõlemas suunas, meie üksildasel õpetlasel pole aga võimalik tagasi pöörduda inimkonna ajaloo sellesse lõiku, kuhu ta kuulub.

Kui niisugused reisid ajas reaalseks muutuvad, siis tekivad täiesti ebatavalised moraaliprobleemid. Kas on selles midagi ebaseaduslikku, et naine abiellus näiteks omaenese lapse-lapse-lapse-lapse-lapse-lapselapsega?

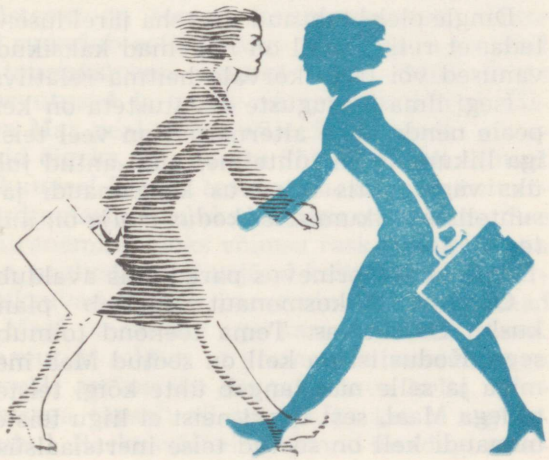
Pange, palun, tähele: see ajas reisimise liik väldib kõiki loogika lõkse (toda teadusliku fantastika nuhtlust), nagu näiteks võimalust sattuda minevikku ja tappa oma vanemad enne iseenese ilmaletulekut või olukorda, kus lipsate tulevikku ja lasete endale kuuli pähe. Vaatleme näiteks miss Brighti olukorda tuntud naljavärsist:

«Kate oli piiga, kel õhetas palg,
valgusest kiirem veel oli ta jalg.
Alati eksis ta vääraile teile:
kohale jõuab, ent juba on eile.»

Kui ta oleks tagasi tulnud eile, siis oleks ta pidanud kohtuma oma teisikuga. Vastasel korral poleks see olnud tõepoolest eile. Ent eile poleks saanud olla kahte miss Brighti, sest ajas matkama asudes ei mäletanud ta midagi eile toimunud kohtumisest teisikuga. Niisiis on siin näide loogilisest vastuolust. *Sellist* tüüpi reisid ajas pole loogiliselt võimalikud, kui mitte oletada meie maailmaga identse, kuid ajas teist teed pidi liikuva maailma olemasolu. Isegi sel juhul muutub asjade seis ülikeeruliseks.

Pange tähele ka seda, et einšteinlik ajas matkamise vorm ei nõua rändureilt mingit tõelist surematust ega pikaealisustki. *Reisija* seisukohalt vananeb ta alati normaalse kiirusega. Ja ainult Maa «omaaeg» tundub tema jaoks peadpööritava kiirusega edasi kihutavat.

Kuulus prantsuse filosoof Henri Bergson oli väljapaistvaim mõtleja, kes kaksikute paradoksi pärast Einsteiniga mõõgad ristas. Ta kirjutas sellest palju, ironiseerides kõige üle, mis näis talle loogiliselt absurdsena. Kahjuks tõestas kirjutatu ainult seda, et võib olla suur filosoof ilma märkimisväärsete teadmisteta matemaatikast. Mõne viimase aasta jooksul on uusi vastuväiteid esitatud. Herbert Dingle, inglise füüsik, keeldub «kõige



valjema häälega» seda paradoksi uskumast. Juba palju aastaid on ta sel teemal teravmeelseid artikleid kirjutanud ja süüdistab relatiivsusteooria spetsialiste kord rumaluses, kord kahekeelsuses. Meie pinnaline analüüs ei selgita muidugi täielikult toimuvat vaidlust, millest osavõtjad süüvivad kiiresti keerukatesse võrranditesse, ent aitab esile tuua üldprintsiipe, mis viisid spetsialiste peaaegu üksmeelse arvamiseni, et kaksikute paradoks teostub just nii, nagu väitis Einstein.

Dingle'i vastuväide, kõige tugevam, mis kunagi kaksikute paradoksile on esitatud, seisab järgnevas. Vastavalt üldrelatiivsusteooriale ei ole olemas mingit absoluutset liikumist, pole olemas «valitud» taustsüsteemi. Alati võib valida liikuva keha liikumatuks taustsüsteemiks, rikkumata seejuures mingeid loodusseadusi. Kui taustsüsteemiks on võetud Maa, siis teeb kosmonaut pika reisi, pöördub tagasi ja avastab, et on noorem oma kodus istunud vennast. Aga mis juhtub, kui taustsüsteem siduda kosmoselaevaga? Nüüd peame oletama, et pika retke sooritas ja pöördus tagasi hoopis Maa. Sel juhul oli kodus istujaks see kaksikutest, kes asus kosmoselaeval. Et Maa pöörleb, kas ei muutu siis nooremaks Maal asuv vend? Kui nii, siis tekkinud olukorras annab terve mõistuse paradoksaalne väljakutse aset ilmsele loogilisele vastuolule. Selge, et kumbki kaksikutest ei saa teisest noorem olla.

Dingle oleks tahtnud siit teha järelduse: tuleb kas oletada, et retke lõpul on mõlemad kaksikud täpselt ühevanused või peab kõrvale heitma relatiivsusprintsiibi.

Isegi ilma igasuguste arvutusteta on kerge mõista, et peale nende kahe alternatiivi on veel teisigi. Õige küll, iga liikumine on suhteline, kuid antud juhul on olemas üks väga tähtis erinevus kosmonaudi ja kodus istuja suhtelistes liikumistes: *kodus istuja on universumi suhtes liikumatu.*

Kuidas see erinevus paradoksis avaldub?

Oletame, et kosmonaut suundub planeedi *X* poole kuskil Galaktikas. Tema teekond toimub jääva kiirusega. Kodus istuja kell on seotud Maa inertsiaalsüsteemiga ja selle näit langeb ühte kõigi teiste kellade näitudega Maal, sest ükski neist ei liigu teiste suhtes. Kosmonaudi kell on seotud teise inertsiaalsüsteemiga, kos-

moselaevaga. Kui laev liiguks pidevalt ühes suunas, siis ei tekiks sellest, et polnud võimalust võrrelda mõlemate kellade näite, mingit paradoksi. Ent planeedi *X* juures kosmoselaev peatub ja pöördub tagasi. Seejuures muutub taustsüsteem: Maast eemale liikuva taustsüsteemi asemel ilmub Maa poole liikuv taustsüsteem. Niisugusel muutumisel tekivad hiiglaslikud inertsijõud, sest pöördumisel liigub laev kiirenevalt. Kui kiirendus on pöördumisel väga suur, siis hukkub kosmonaut (mitte aga tema kaksikvend Maal). Need inertsijõud tekivad muidugi seetõttu, et kiireneb kosmonaudi liikumine universumi suhtes. Nad ei teki Maal, sest Maale niisugune kiirendus ei mõju.

Ühest küljest võiks öelda, et kiirenduse poolt loodud inertsijõud «põhjustavad» kosmonaudi kella käigu aeglustumist; teisest küljest näitab kiirenduse tekkimine aga lihtsalt taustsüsteemi muutumist. Niisuguse muutuse tulemusena teiseneb kosmoselaeva maailmajoon, tema tee Minkowski neljamõõtmelise aegruumi graafikul selliselt, et teekonna kogu omaaeg osutub tagasipöördumisel väiksemaks kui kodus istunud kaksikvenna kogu omaaeg piki maailmajoont. Taustsüsteemi muutumisest võtab osa küll ka kiirendus, ent arvestada tuleb ainult erirelatiivsusteooria võrrandite järgi.

Dingle'i vastuväide jääb ikka veel jõusse, sest täpselt samasuguseid arvutusi võiks teha ka eeldusel, et liikumatu taustsüsteem on seotud kosmoselaevaga, mitte Maaga. Nüüd suundub retkele Maa ja pöördub seejärel inertsiaalset taustsüsteemi muutes tagasi. Miks mitte teha samad arvutused ja nende võrrandite põhjal näidata, et aeg on Maa peal maha jäänud? Ja needki arvutused osutuksid õigeks, kui poleks üht äärmiselt tähtsat fakti: *Maa liikumisel liiguks temaga kaasa kogu universum.* Maa pöördumisel pöörduks ka kogu universum. See universumi kiirenemine looks võimsa raskusvälja. Nagu juba näitasime, aeglustas raskusjõud kellade käiku. Kellad Päikesel tiksuvad näiteks harvemini kui needsamad kellad Maal, Maal omakorda aga harvemini kui Kuul. Pärast kõiki arvutusi selgub, et kosmose kiirendamisega loodud raskusväli aeglustaks kosmoselaeva kella, võrreldes maapealsega, täpselt niisama palju, kui ta aeglustas eelmisel juhul. Raskusväli ei mõjunud muidugi maa-

pealsetele kelladele. Maa ei liikunud kosmose suhtes, järelikult ei tekkinud seal ka lisaraskusvälja.

Õpetlik on kujutleda olukorda, kus tekib täpselt samasugune aegade erinevus, ehkki mingisuguseid kiirendusi ei esine. Kosmoselaev *A* möödub Maast jääva kiirusega ja suundub planeedi *X* poole. Maast möödumise hetkel asuvad kellaosutid nullil. Laev *A* liigub edasi planeedi *X* poole ja möödub laevast *B*, mis liigub jääva kiirusega vastassuunas. Maksimaalse lähenemise momendil teatab laev *A* laevale *B* oma kella järgi mõõdetud aja, mis on möödunud Maast möödalennu hetkest. Laeval *B* peetakse need andmed meeles ja liigutakse jääva kiirusega edasi Maa poole. Maast möödumisel teatab laev *B* Maale aja, mille *A* kulutas lennuks Maa juurest planeedini *X*, aga samuti aja, mille kulutas *B* (mõõdetud tema oma kella järgi) lennuks planeedilt *X* kuni Maani. Nende kahe ajavahemiku summa on väiksem kui aeg (mõõdetuna maapealse kella järgi), mis on möödunud *A* lahkumisest kuni *B* saabumiseni.

Selle aegade erinevuse saab välja arvutada erirelatiivsusteooria võrrandite põhjal. Mingeid kiirendusi siin ei esinenud. Muidugi, antud juhul ei teki ka kaksikute paradoksi, sest pole kosmonauti, kes ära lendaks ja tagasi pöörduks. Võiks oletada, et rändav kaksikvend sõitis minema laeval *A*, seejärel istus laevale *B* ja tuli tagasi; ent seda ei saa teha ilma ühest intertsiaalsüsteemist teise üle minemata. Ümberistumisel pidanuksid talle mõjuma vapustavalt võimsad inertsjõud, mis oleksid tekkinud sellepärast, et muutus kosmonaudi taustsüsteem. Soovi korral võiksime öelda, et inertsjõud aeglustasid kaksikvenna kella käiku. Ent kui kogu episoodi reisiva kaksikvenna seisukohalt vaadata, sidudes just tema liikumatu taustsüsteemiga, siis tuleb arutlustesse sisse raskusvälja loov nihkuv kosmos. (Peamiseks segaduste allikaks kaksikute paradoksi puhul on asjaolu, et olukorda võib kirjeldada erinevatest seisukohtadest.) Sõltumata vaatekohast annavad relatiivsusteooria võrrandid alati ühesuguse aegade erinevuse, milleni võib jõuda ainuüksi relatiivsusteooria abil. Ja üldse kasutasime üldrelatiivsusteooriat kaksikute paradoksi arutamisel vaid selleks, et lükata ümber Dingle'i vastuväited.

Sageli osutub võimatuks öelda, milline võimalustest

on see «õige». Kas lendab reisiv kaksikvend edasi-tagasi või teeb seda kodus istuja koos kosmosega? Vaieldamatult kindel on ainult üks: kaksikute suhteline liikumine. Sellest võib rääkida aga kahel erineval viisil. Ühelt poolt toob kosmonaudi inertsiaalse taustsüsteemi muutumine, mis tekitab inertsjõu, kaasa vanusevahe tekkimise. Teisest küljest kaalub raskusjõudude mõju üles Maa inertsiaalsüsteemi muutumisega seotud efekti. *Igast seisukohast on aga kosmos ja kodus istuja teineteise suhtes liikumatud.* Seega on olukord kummagi inimese jaoks täiesti erinev, vaatamata sellele, et rangelt säilib liikumise suhtelisus. Paradoksaalset vanusevahet saab selgitada sõltumata sellest, millist kaksikvenda lugeda paigalseisvaks. Relatiivsusteooriat pole vaja kõrvale heita.

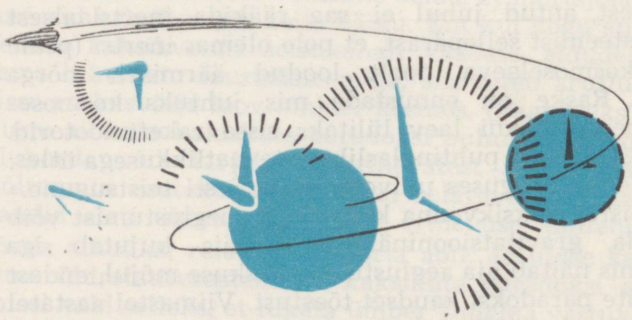
Ent esitame nüüd huvitava küsimuse. Mis siis, kui kosmoses pole midagi muud peale kahe kosmoselaeva *A* ja *B*? Oletame, et laev *A* liigub oma rakettmootori abil kiirenevalt, teeb pika reisi ja tuleb tagasi. Kas käituvad eelnevalt sünkroniseeritud kellad mõlemal laeval nii nagu eespool vaadeldud juhul?

Vastus oleneb sellest, kelle vaatekohta inertsi suhtes te jagate — Eddingtoni või Dennis Sciama oma. Eddingtoni järgi — jaa. Laev *A* kiireneb kosmose aegruumi meetrika suhtes, laev *B* aga mitte. Nende käitumine pole sümmeetriline ja viib tavalisele vanusevahe tekkimisele. Sciama seisukohalt aga on vastus — ei. Kiirendusest on mõtet rääkida ainult teiste materiaalsete kehade suhtes. Antud juhul on ainsateks kehadeks kaks kosmoselaeva. Olukord on täielikult sümmeetriline. Ja tõepoolest, antud juhul ei saa rääkida inertsiaalsest taustsüsteemist sellepärast, et pole olemas inertsi (peale kahe kosmoselaeva poolt loodud äärmiselt nõrga inertsi). Raske on ennustada, mis juhtuks kosmoses ilma inertsita, kui laev lülitaks sisse rakettmootorid. Ehk nagu Sciama puhtinglasliku ettevaatlikkusega ütles: «Elu oleks niisuguses universumis täiesti teistsugune.»

Et reisiva kaksikvenna kella käigu aeglustumist võib vaadelda gravitatsiooninähtusena, siis kujutab iga katse, mis näitab aja aeglustumist raskuse mõjul, endast kaksikute paradoksi kaudset tõestust. Viimastel aastatel saadi mõned niisugused tõestused suurepärase labora-

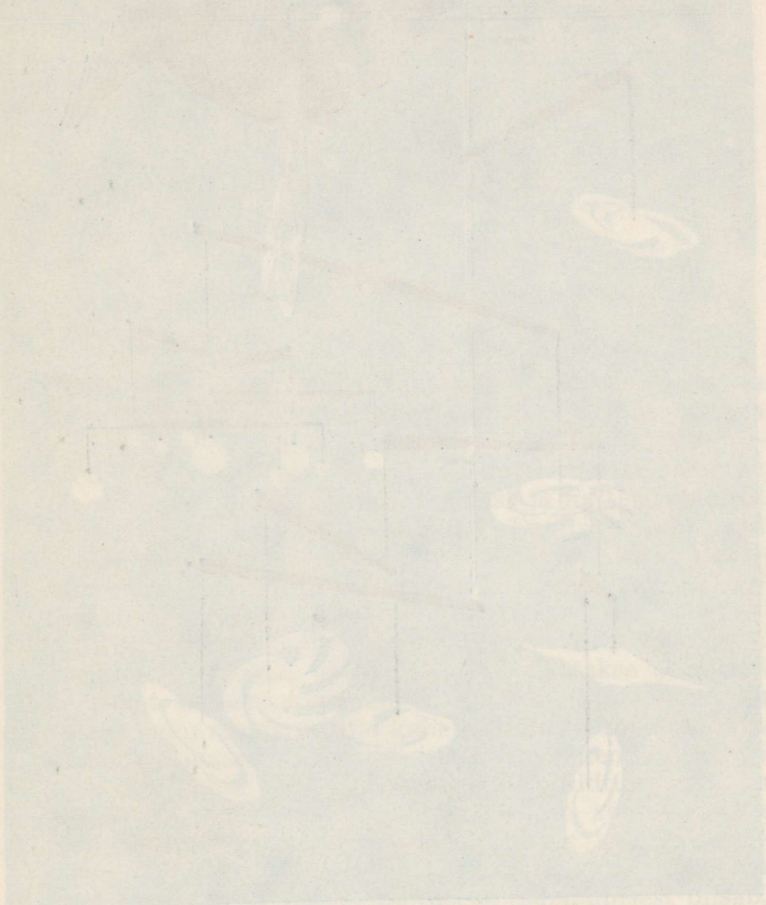
toorse meetodi abil, mille aluseks on Mössbaueri efekt. Noor saksa füüsik Rudolf Mössbauer avastas 1958. aastal viisi «tuumakellade» valmistamiseks, mis mõõdavad aega uskumatult täpselt. Kujutlege üht kella, mis tiksub viis korda sekundi jooksul, ja teist kella, mis tiksub nii, et pärast miljon miljonit tiksumist jääb ta kõigest ühe sajandiku tiksu võrra taha. Mössbaueri efekti abil saab kohe avastada, et teine kell käib aeglasemalt! Katsed Mössbaueri efekti rakendamisega näitasid, et aeg hoone vundamendi juures (kus raskus on suurem) voolab veidi aeglasemalt kui katusel. Gamow märkis: «Masinakirjutaja, kes töötab Empire State Buildingu esimesel korrusel, vananeb aeglasemalt kui kõige kõrgemal korrusel töötav kaksikõde.» Muidugi on see vanuste erinevus tabamatult väike, aga ta on olemas ja teda saab mõõta.

Inglise füüsikud avastasid Mössbaueri efekti abil, et kiiresti pöörleva viieteistkümnesentimeetrise läbimõõduga ketta äärele paigutatud tuumakella käik aeglustub. Pöörlevat kella võib vaadata ühena kaksikutest, kes pidevalt muudab oma inertsiaalsüsteemi (või kaksikvennana, kellele mõjub raskusväli, kui lugeda ketas paigalseisvaks, aga kosmos pöörlevaks). See katse on kaksikute paradoksi otseseks tõestuseks. Kõige vahetum katse tehakse siis, kui tuumakell paigutatakse tehiskaaslasele, mis suure kiirusega ümber Maa tiirleb. Seejärel kaaslane maandatakse ja võrreldakse kella näitu Maa peale jäänud kella näiduga. Muidugi tuleb peagi



päev, mil kosmonaut ise võib sooritada kõige täpsema kontrolli, võttes tuumakella kaasa kaugele kosmosereisile. Keegi füüsikuist peale professor Dingle'i ei kahtle, et kosmonaudi kella näit pärast Maale jõudmist ei ühti täpselt Maale jäänud tuumakella näiduga.

Ja ikkagi peame valmis olema üllatusteks! Tuletage meelde Michelson-Morley katset!



9. Universumi mudelid

Ükski füüsik ei vaidle tänapäeval erirelatiivsusteooria vastu ja ainult mõningad kahtlevad üldrelatiivsusteooria põhialustes. Tõsi, üldrelatiivsusteooria jätab paljud olulised küsimused lahendamata. Kahtlemata on selge ka see, et teooriat kinnitavaid vaatlusi ja katseid on veel vähe ja nad ei ole alati veenvad. Ent isegi juhul kui poleks üldse mitte mingeid tõestusi, oleks üldrelatiivsusteooria tänu tema ülimatele lihtsustustele ikkagi erakordselt köitev teooria.

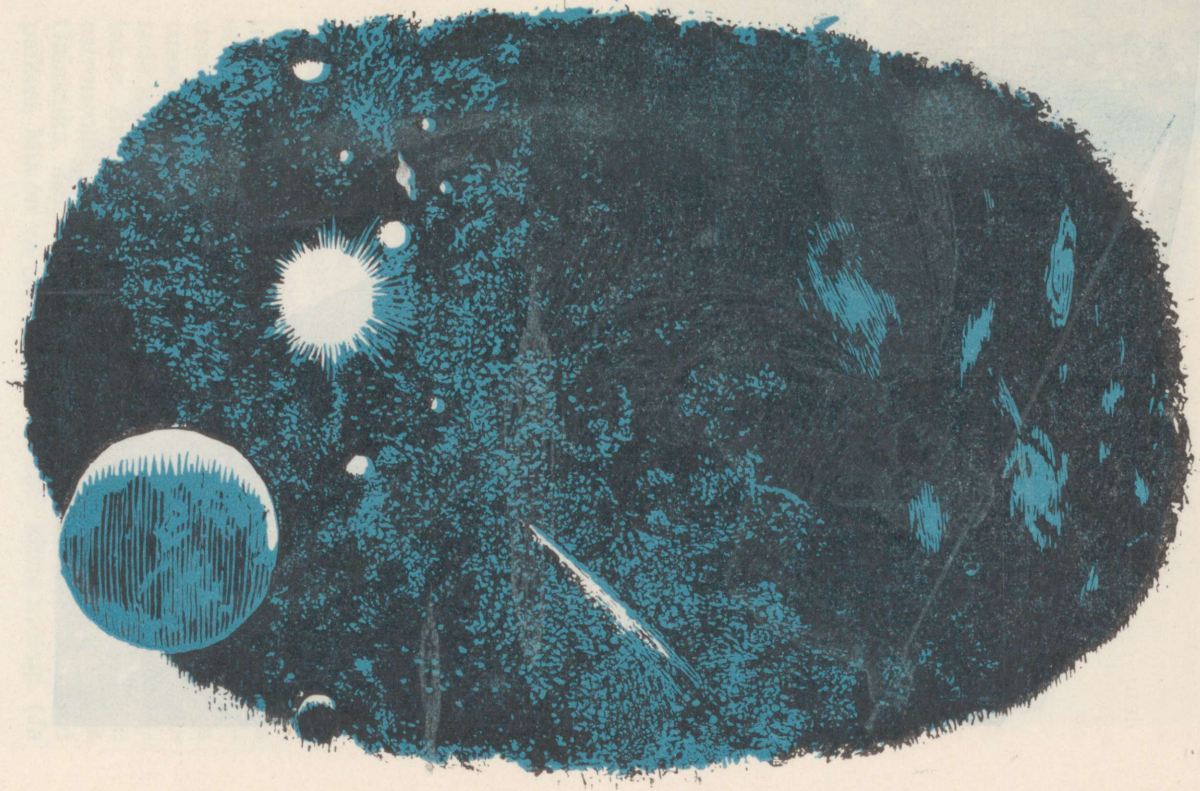
Lihtsustused? Kummalisena tundub niisuguse sõna kasutamine teooria kohta, kus rakendatakse sedavõrd keerukat matemaatikat, et keegi väitis kunagi, nagu poleks kogu maailmas üle kaheteistkümne seda mõistva inimese (muuseas, arvu oli tugevasti vähendatud isegi selle aja kohta, mil taolist arvamust üldtunnustatuks peeti). Relatiivsusteooria matemaatiline aparatuur on tõepoolest keerukas, aga see keerulisus kompenseeritakse üldpildi ebatavalise lihtsustumisega. Näiteks raskuse ja inertsi üheks nähtuseks taandamisest piisab, et teha üldrelatiivsusteooriast kõige viljakam suund maailma uurimises.

Einstein väljendas selle mõtte 1921. aastal, pidades Princetoni ülikoolis loengut relatiivsusest: «Võimalus seletada inertsi ja raskuse arvulist võrdsust nende ühise olemusega annab minu arust üldrelatiivsusele klassikalise mehhaanika kontseptsioonide ees niisugused eelised, et sellega võrreldes tuleb kõiki esinevaid raskusi väikesteks lugeda . . .»

Peale selle on relatiivsusteooriale omane joon, mida matemaatikud «elegantseks» nimetavad. See teooria on omamoodi kunstiteos. «Iga kauni imetleja,» kuulutas kord Lorentz, «peab soovima, et see teooria õigeks osutuks.»

Käesolevas peatükis jätame kõrvale relatiivsusteooria kindlalt fikseeritud faktid ja lugeja sukeldub palavatesse vaidlustesse, satub valdkonda, kus arvamused pole muud kui oletused, mida tuleb teaduslike tõestuste alusel vastu võtta või tagasi lükata. Mida kujutab endast universum tervikuna? Me teame, et meie Maa on Päikesest arvates kolmas planeet üheksast planeedist koosnevas süsteemis ja et Päike on üks umbes sajast miljardist Galaktikat moodustavast tähest. Me teame, et selles ruumiosas, mida on võimalik sondeerida kõige võimsamate teleskoopidega, on laiali paisatud teised galaktikad, mille hulk peaks ulatuma miljarditesse. Kas nii läheb edasi lõpmatuseni? Kas galaktikaid on lõpmata palju? Või on ruumil siiski lõplikud mõõtmed? (Võibolla tuleb rääkida «meie ruum», sest kui meie ruum on piiratud, siis kes saaks väita, et pole olemas teisi piiratud ruume?)

Astronoomid rakendavad kogu energia selleks, et neile küsimustele vastust leida. Nad vaatavad maailma üheainsa tervikuna ja konstrueerivad kujuteldavaid maailmapilte, niinimetatud universumi mudeleid. 19. sajandi algul oletasid paljud astronoomid, et universum on piiritu ja sisaldab lõpmatu hulga päikesi. Ruumi peeti eukleidiliseks. Sirged läksid kõigis suundades lõpmatusse. Kui kosmoselaev oleks ükskõik kuhupoole teele asunud ja sirget mööda liikunud, siis oleks ta teekond kestnud lõpmata kaua, kusjuures ta poleks kunagi piirini jõudnud. Niisugune arvamus pärineb vanadelt kreeklastelt. Nad armastasid rääkida, et kui sõdur viskab oma oda üha kaugemale ja kaugemale ruumi, siis

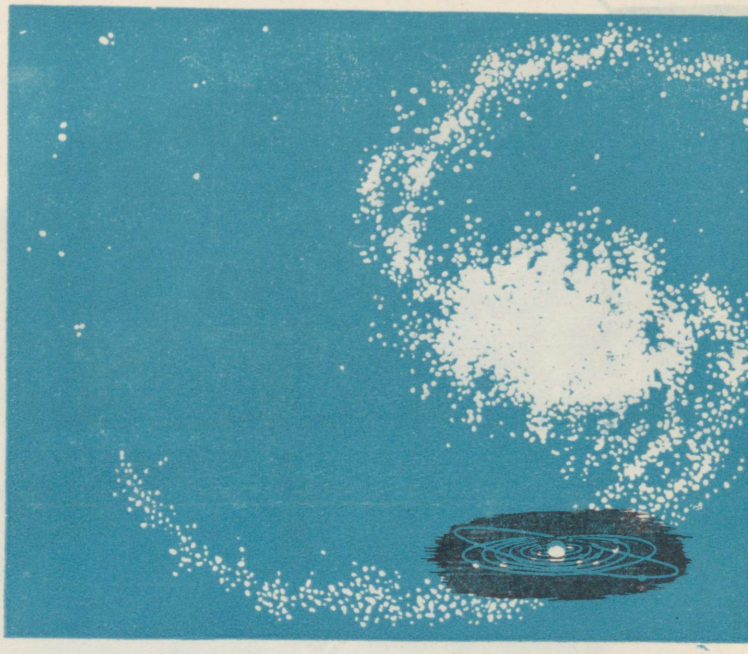






ei jõua ta kunagi piirini; kui niisugust lõppu kujutledagi, siis võiks sõdur seista seal ja oda veelgi kaugemale visata.

Sellele seisukohale on üksainus oluline vastuväide. Saksa astronoom Heinrich Olbers märkis 1826. aastal, et kui päikesi on lõpmatu hulk ja kõik nad on ruumis jaotunud juhuslikult, siis Maalt ükskõik millises suunas tõmmatud sirgjoon peab lõppkokkuvõttes mõnda tähte lõikama. See aga tähendaks, et kogu öine taevas peaks endast kujutama tähevalgust kiirgavat ühtlaselt helendavat pinda. Me teame, et asi nii ei ole. Öise taeva tumedusele tuleb leida mingi seletus, selleks et selgitada nähtust, mida praegu Olbersi paradoksiks nimetatakse. Enamik 19. sajandi lõpu ja 20. sajandi alguse astronoome arvas, et päikesi on piiratud hulgal. Meie Galaktika, kinnitasid nad, sisaldab kõiki olemasolevaid päikesi. Mis on väljaspool Galaktikat? Mitte midagi. (Ja

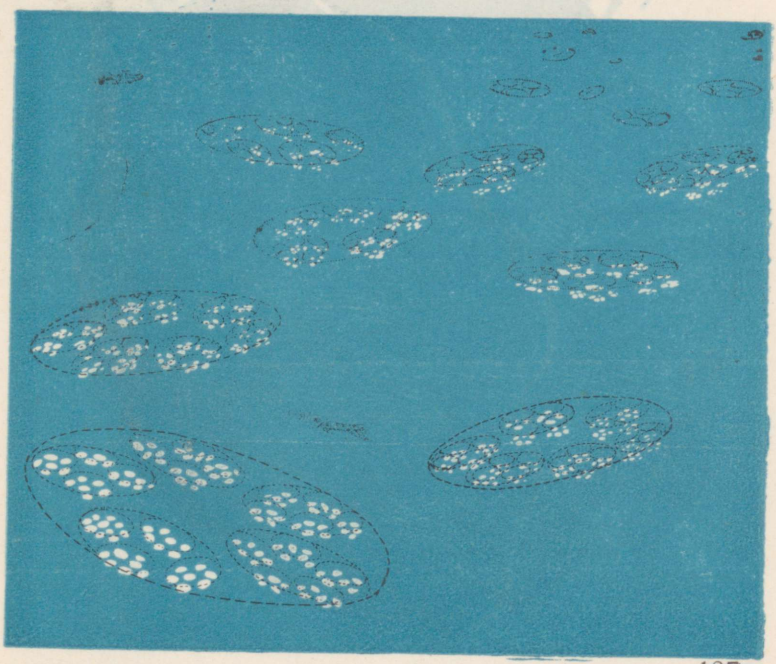


alles 20. sajandi keskpaiku ilmusid ümberlükkamatud tõendid selle kohta, et hiiglaslikel kaugustel meist eksisteerib miljoneid galaktikaid.) Teised astronoomid oletasid, et kaugetelt tähtedelt saabuv valgus võib neelduda tähtedevahelise tolmu kogumites.

Kõige teravmeelsema seletuse andis rootsi matemaatik C. V. L. Charlier. Galaktikad, väitis ta, rühmituvad assotsiatsioonideks, assotsiatsioonid — üliassotsiatsioonideks, üliassotsiatsioonid üli-üliassotsiatsioonideks ja nii edasi kuni lõpmatuseni. Igal ühinemisastmel kasvavad kaugused rühmituste vahel kiiremini kui rühmade mõõtmed. Kui see õige on, siis mida kaugemale tõmmata sirge meie galaktikast, seda väiksem on tõenäosus, et ta kohtab teist galaktikat. Samal ajal on see assotsiatsioonide hierarhia lõputu, nii et ikkagi võib rääkida, et universum sisaldab lõpmata palju tähti.

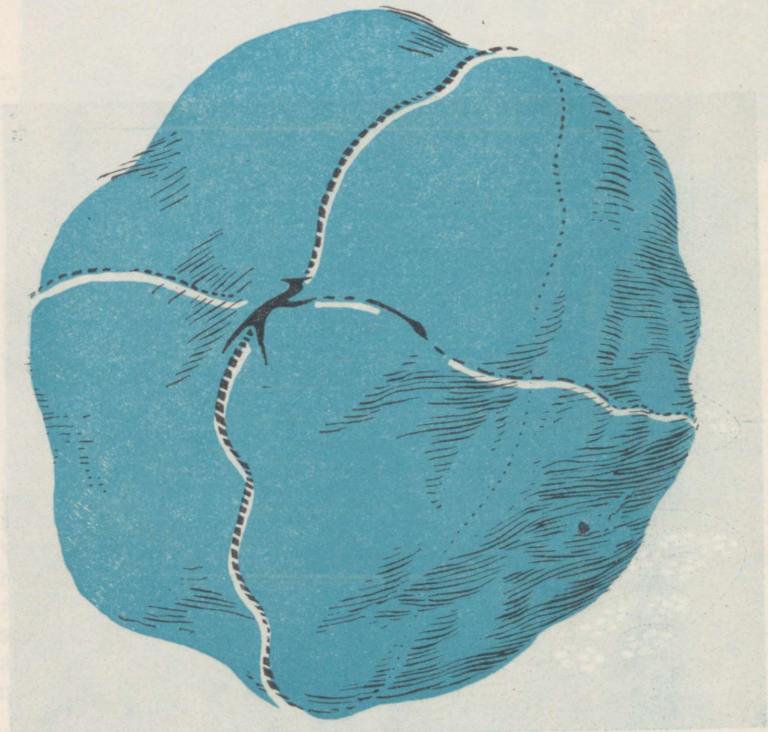
Charlier' poolt Olbersi paradoksile antud selgituses pole midagi korrast ära, välja arvatud see, et on olemas veelgi lihtsam seletus.

Esimese relatiivsusteoorial põhineva universumi mudeli esitas Einstein 1917. aastal avaldatud artiklis. See oli elegantne ja ilus mudel, ehkki Einstein pidi hiljem sellest loobuma. Eespool juba selgitati, et raskusväljad on aegruumi struktuuri kõverdumised, mis tekivad suurte masside olemasolu tõttu. Iga galaktika sees peab järelikult leiduma palju niisuguseid *aegruumi paindumisi* ja kõverdumisi. Aga kuidas on lugu hiiglaslike tühjade ruumiosadega galaktikate vahel? Üks seisukoht on järgmine: mida suurem on kaugus galaktikast, seda tasasem (eukleidilisem) on ruum. Kui universumis puuduks igasugune mateeria, siis oleks ta täiesti tasane; mõned aga arvavad, et sel juhul oleks üldse mõttetu



rääkida mingist universumi struktuurist. Kummalgi juhul laiub aegruumi universum piiramatult kõigis suundades.

Einstein esitas sellele teooriale ühe ahvatleva vastulause. Oletame, rääkis ta, et ainehulk universumis on küllalt suur, selleks et kindlustada ruumi üldine positiivne kõverus. Ruum sulguks siis kõigis suundades iseendasse. Seda on võimatu mõista, süvenemata neljamõõtmelisse mitteeukleidilisse geomeetriasse, kuid ta on küllalt kergesti tabatav kahemõõtmelise mudeli abil. Kujutlegem lamedat maad Lameetiat, kus elavad kahemõõtmelised olendid. Nad peavad oma maad eukleidese tasandiks, mis laiub lõputult igas suunas. Tõsi küll, Lameetia päikesed põhjustavad igasuguste kühmude ilmumise sellele tasandile, ent need on kohalikud küh-





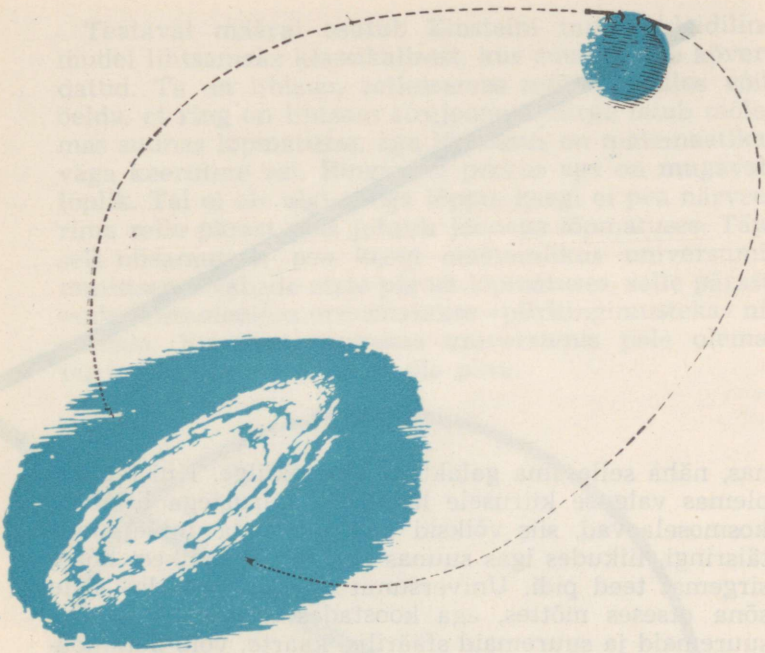
mud, mis üldisele tasasusele mõju ei avalda. On olemas aga teinegi võimalus, mida selle maa astronoomid kujutleda saavad. Võib-olla tekitab iga lokaalne kühm kogu tasandi väikese kõverdumise, nii et kõigi päikeste koosmõju viib tasandi deformeerumisele millekski kühmulise kerapinna taoliseks. Niisugune pind oleks ikkagi piirideta selles mõttes, et te võiksite igavesti liikuda ükskõik millises suunas ega jõuaks kunagi piirini. Lameetia sõdur ei oskaks leida kohta, millest kaugemale ta oma oda enam visata ei saaks. Ent ometi oleks maa pind lõpliku suurusega. Reisija, kes sõidab «sirget mööda» küllalt kaua, jõuab lõpuks tagasi punkti, kust ta oma liikumist alustas.

Matemaatikud räägivad, et niisugune pind on «kinnine». Muidugi pole ta lõputu. Nii nagu lõputul euklei-

dilisel ruumilgi on tal igal pool keskpunkt, ääremaid pole olemas. Seda «kinnisust», niisuguse pinna topoloogilist omadust võivad Lameetia elanikud kergesti kontrollida. Ühest kriteeriumist oli juba juttu: liikumine kerapinnal kõigis suundades. Teise kontrollimisviisina saaks kasutada pinna värvimist. Kui Lameetia elanik hakkaks mingist punktist lähtudes joonistama üha suuremaid ja suuremaid ringe, siis suleks ta end lõpuks väikese laigu sisse kera vastasküljel. Juhul kui sfäär on suur, elanikud aga hõlmavad sellest ainult väikese osa, siis ei saa nad taolisi topoloogilisi eksperimente sooritada.

Einstein tegi oletuse, et meie ruum on hiiglasliku hüpersfääri (neljamõõtmelise sfääri) kolmemõõtmeline «pind». Aeg tema mudelis ei kõverdu, vaid jääb sirgeks koordinaadiks, mis suundub tagasi lõpmata kaugesse





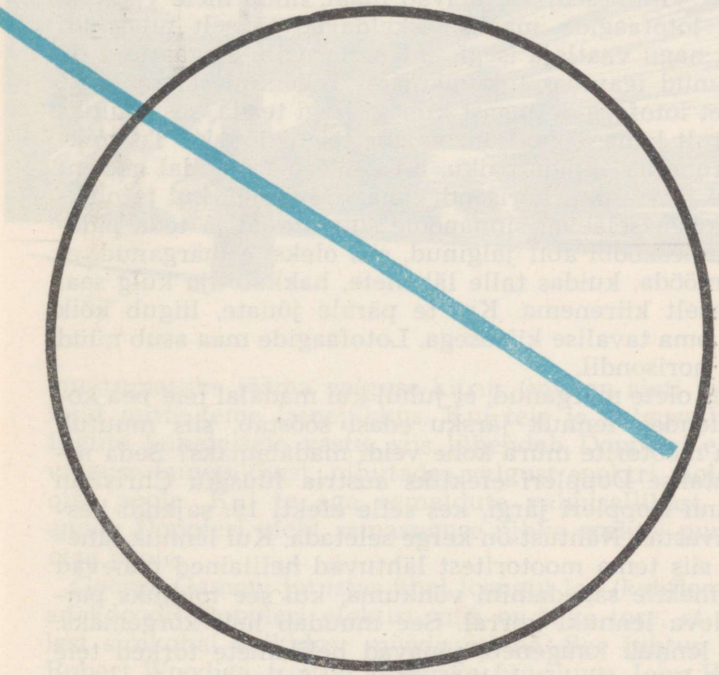
minevikku ning laiub lõpmatult kaugesse tulevikku. Kui kujutleda seda mudelit neljamõõtmelise aegruumi struktuurina, siis meenutab ta rohkem hüpersilindrit kui hüpersfääri ja harilikult nimetataksegi seda «silindrilise universumi» mudeliks. Igal ajahetkel näeme ruumi nagu hüpersilindri omamoodi kolmemõõtmelist ristlõiget. Iga ristlõige kujutab endast hüpersfääri pinda.

Meie Galaktika hõlmab hüperpinnast ainult tühise osa, nii et seni pole võimalik teha topoloogilist eksperimenti, mis tõestaks pinna kinnisust. Ent printsipiaalne võimalus kinnisuse näitamiseks on olemas. Seades üles küllalt võimsa teleskoobi, võib fokuseerida ta kindlale galaktikale, aga seejärel, pöörates teleskoopi vastassuu-

nas, näha sellesama galaktika vastaskülge. Kui oleksid olemas valguse kiirusele lähedaste kiirustega liikuvad kosmoselaevad, siis võiksid nad sooritada universumis täisringi, liikudes igas suunas kõigist võimalikest kõige sirgemat teed pidi. Universumit ei saa «värvida» selle sõna otseses mõttes, aga koostades universumist üha suuremaid ja suuremaid sfäärilisi kaarte, võib põhimõtteliselt sedasama teha. Kui kartograaf töötab küllalt kaua, siis avastab ta, et osutub ise selle sfääri sees olevaks, mille kaarti ta parajasti koostab. See sfäär kahaneb sedamööda, kuidas kartograaf tööd jätkab, täpselt nii nagu väheneb ring, millesse sulges end Lameetia elanik.



Teataval määral osutub Einsteini mitteeukleidiline mudel lihtsamaks klassikalisest, kus ruum ei ole kõverdatud. Ta on lihtsam sellessamas mõttes, milles võib öelda, et ring on lihtsam sirgjoonest. Sirge laiub mõlemas suunas lõpmatusse, aga lõpmatus on matemaatikas väga keeruline asi. Ringjoone pikkus aga on mugavalt lõplik. Tal ei ole algust ega lõppu, keegi ei pea närveerima selle pärast, mis juhtub joonega lõpmatuses. Täpselt niisamuti ei pea keegi einšteinlikus universumis muretsema vabade otste pärast lõpmatuses, selle pärast, mida kosmoloogias armastatakse «piiritingimusteks» nimetada. Einsteini mugavas universumis pole olemas piiriprobleeme, sest tal ei ole piire.



Teisi kosmoloogilisi mudeleid, mis olid kooskõlas üldrelatiivsusteooriaga, arutati kahekümnendail aastail. Mõningatel neist on veelgi ebatavalisemad omadused kui Einsteini silindrilisel universumil. Hollandi astronoom Willem de Sitter töötas välja suletud, lõpliku universumi mudeli, kus aeg kõverdub täpselt niisamuti nagu ruumgi. Mida kaugemale de Sitteri ruumis vaadata, seda aeglasemalt näib käivat kell. Kui juba küllalt kaugele jõuda, siis võib näha piirkonda, kus aeg on hoopis seisma jäänud, «nagu teejoomisel hullumeelse* juures,» kirjutab Eddington, «kus kell näitab alati kuus õhtul».

«Seejuures pole vaja mõelda, et on olemas mingi piir,» selgitab Bertrand Russell raamatus «Relatiivsusteooria ABC». «Inimesed, kes elavad maal, mida meie vaatleja peab lotofaagide maaks, askeldavad täpselt niisamuti ringi nagu vaatleja isegi, ent neile näib, et vaatleja on tardunud igaveses liikumatuses. Tegelikult ei saaks te sellest lotofaagide maast kunagi isegi teada, sest kuluks lõputult kaua aega, kuni valgus teieni jõuaks. Te võiksite tundma õppida paiku, mis selle maa ligidal on, ent ta ise jääks alati horisondi taha.» Muidugi, kui te oleksite kosmoselaeval sinnapoole suundunud ja teda pidevalt teleskoobi abil jälginud, siis oleksite märganud, et sedamööda, kuidas talle lähenete, hakkab aja kulg seal aeglaselt kiirenema. Kui te pärale jõuate, liigub kõik juba oma tavalise kiirusega. Lotofaagide maa asub nüüd uuel horisondil.

Kas olete märganud, et juhul kui madalal teie pea kohal lendav lennuk järsku edasi sööstab, siis muutub tema mootorite müra kohe veidi madalamaks? Seda nimetatakse Doppleri efektiks austria füüsiku Christian Johann Doppleri järgi, kes selle efekti 19. sajandi keskel avastas. Nähtust on kerge seletada. Kui lennuk läheneb, siis tema mootoritest lähtuvad helilained panevad kuulmekile sagedamini võnkuma, kui see toimuks paigaloleva lennuki korral. See muudab heli kõrgemaks. Kui lennuk kaugeneb, jõuavad helilainete torked teie kõrva harvemini ja heli muutub madalamaks.

Täpselt sama nähtus leiab aset siis, kui valgusallikas liigub kiiresti teie poole või teist eemale. Sel juhul peab

---

* Tegelane Lewis Carrolli raamatust «Alice Imedemaal».



muutumatuks jääma valguse kiirus (mis on alati jääv), kuid mitte tema lainepikkus. Kui teie ja valgusallikas liigute teineteisele vastu, siis lühendab Doppleri efekt valguse lainepikkust, nihutades valgust spektri violetse otsa poole. Kui te aga eemaldute valgusallikast, siis annab Doppleri efekt samasuguse nihke spektri punase otsa poole.

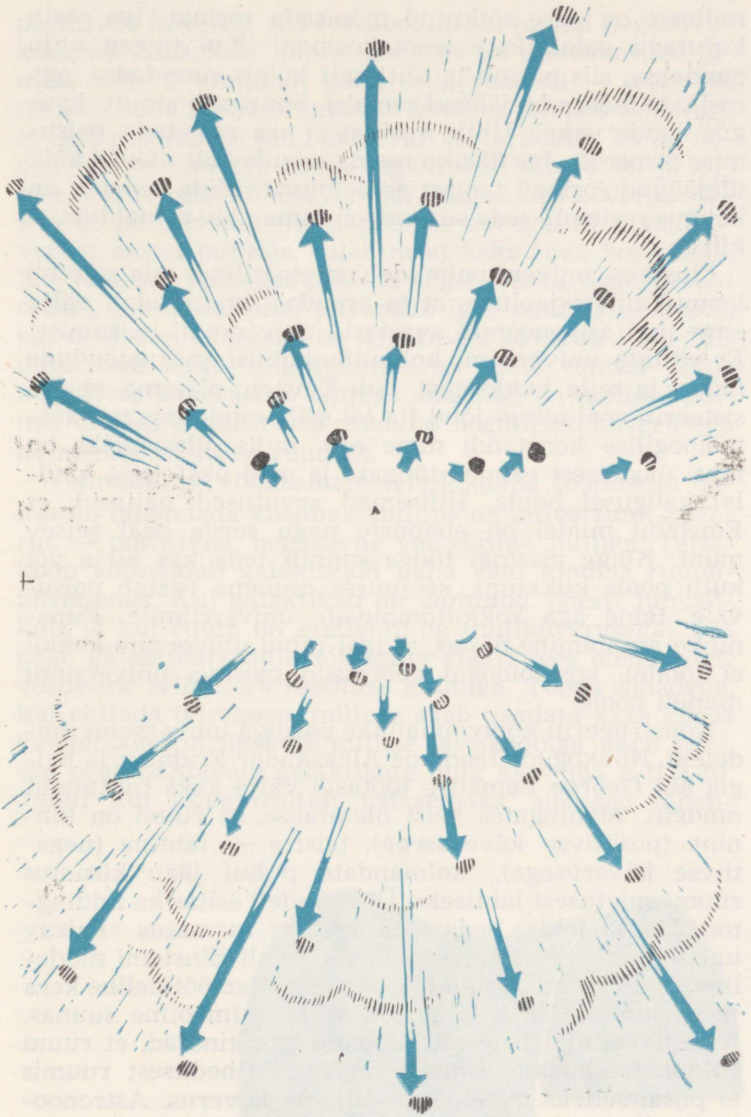
George Gamow jutustas ühel loengul loo (kahtlemata anekdoodi) Doppleri efektist, mis on liiga tore, et sellest siinkohal vaikides mööda minna. See juhtus vist Robert Woodiga, tuntud ameerika füüsikuga John Hopkinsi ülikoolist, kes peeti Baltimore'is kinni, sest ta sõitis punase tulega välja ristteele. Kohtuniku ees seistes selgitas Wood Doppleri efekti abil hiilgavalt, et tänu suurele kiirusele toimus punase valguse nihe spektri

violetse otsa poole ja seepärast nägi ta rohelist tuld. Kohtunik kaldus Woodi õigeks mõistma, ent kohtus viibis juhuslikult üks Woodi üliõpilastest, kelle ta hiljaaegu oli eksamil läbi kukutanud. See arvutas kiiresti välja kiiruse, millega on vaja sõita, selleks et valgusfoori tuli punasest roheliseks muutuks. Kohtunik loobus esialgsest süüdistusest ja trahvis Woodi kiiruse ületamise eest.

Doppler arvas, et avastatud efekt selgitab kaugete tähtede näivat värvust: punased tähed peavad Maast eemalduma, sinakad talle lähenema. Nagu ilmnes, polnud asi sugugi selles (värvus seletus teiste põhjustega), kuid käesoleva sajandi kahekümnendail aastail avastati, et kaugetelt galaktikatelt saabuv valgus nihkub spektri punase otsa poole. Nähtust ei saa küllaldase veenvusega seletada, oletamata, et need galaktikad eemalduvad Maast. Kui galaktika *A* on kaks korda kaugemal galaktikast *B*, siis on galaktika *A* punanihe ligi kaks korda suurem kui galaktikal *B*. Inglise astronoomi Fred Hoyle'i kinnituse järgi näitab Hüdra tähtkujus oleva galaktikate assotsiatsiooni punanihe seda, et assotsiatsioon eemaldub Maast hiiglasuure kiirusega, umbes 61 000 kilomeetrit sekundis.

Tehti mitmesuguseid katseid seletada punanihet mõnel muul viisil, mitte Doppleri efektiga. «Valguse väsimise» teooria järgi tuleb välja, et mida kauem valgus teel on, seda väiksem on tema võnkumise sagedus. (Suurepärane näide hüpoteesist *ad hoc*, s. t. hüpoteesist, mis on seotud ainult mingi üksiknähtusega, kuna teisi tunnistusi tema kasuks ei ole.) Teise seletuse järgi tekitab nihke valguse läbiminek kosmilisest tolmust. De Sitteri mudelis järeldub nihe loogiliselt aja kõverdumisest. Ent lihtsaim selgitus, mis kõige paremini on kooskõlas teiste tuntud faktidega, on see, et punanihe kajastab tõepoolest galaktikate tegelikku liikumist. Sellest eeldusest lähtudes arendati peagi uus seeria «paisuva universumi» mudeleid.

Kuid universumi paisumine ei tähenda, et paisuvad galaktikad ise või et (nagu praegu arvatakse) suurenevad kaugused galaktikate vahel assotsiatsioonis. Ilmselt toob paisumine kaasa assotsiatsioonide vahelise kauguse suurenemise. Kujutlege hiiglaslikku taignakäntsakat,



millesse on sisse sõtkutud mõnisada rosinat. Iga rosin kujutagu galaktikate assotsiatsiooni. Kui taigen ahju pannakse, siis paisub ta ühtlaselt kõigis suundades, aga rosinate mõõtmed jäävad samaks. Suureneb ainult kaugus nende vahel. Ühtki rosinat ei saa nimetada paisumise tsentriks. Iga üksiku rosina seisukohalt näivad kõik ülejäänud rosinad temast eemalduvat. Mida suurem on kaugus rosinani, seda suurem on tema näiv eemaldumiskiirus.

Einsteini universumimudel on staatiline, mis seletub loomulikult asjaoluga, et ta arendas oma mudeli välja enne, kui astronoomid avastasid universumi paisumise. Et vältida universumi kokkutõmbumist raskusjõudude mõjul ja selle hukkumist, pidi Einstein oletama, et eksisteerib veel mingi jõud (ta tõi selle mudelisse nn. kosmoloogilise konstandi nime all), mille ülesandeks on tähti üksteisest eemale tõugata ja neid üksteisest kindlal kaugusel hoida. Hilisemad arvutused näitasid, et Einsteini mudel on ebapüsiv nagu serva peal seisev münt. Kõige pisemgi tõuge sunnib teda kas kirja või kulli poole kukkuma, seejuures esimene vastab paisuvale, teine aga kokkutõmbuvale universumile. Punanihke avastamine näitas, et igal juhul universum kokku ei tõmbu, kosmoloogid pöördusid paisuva universumi mudeli poole.

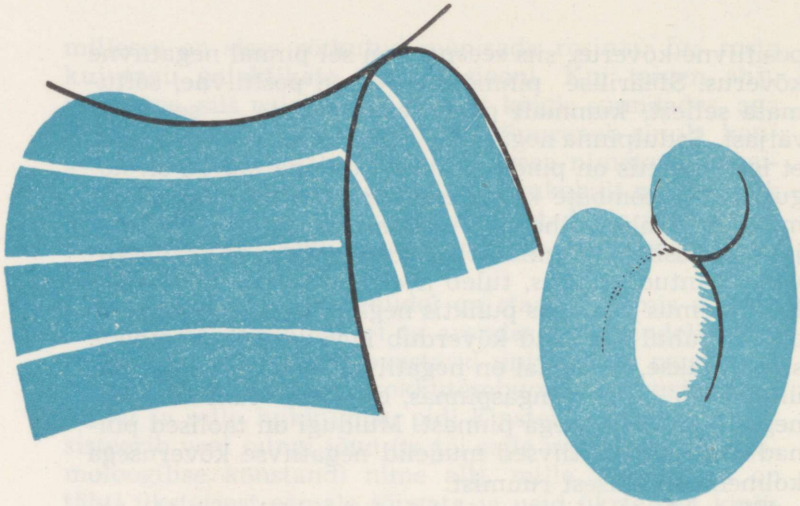
Konstrueeriti kõikvõimalikke paisuva universumi mudeleid. Nõukogude teadlane Aleksander Fridman ja belgia abt George Lemaître töötasid välja kaks tuntuimat mudelit. Mõningates neist oletatakse, et ruum on kinnine (positiivse kõverusega), teistes — lahtine (negatiivse kõverusega), kolmandate puhul jääb küsimus ruumi suletusest lahtiseks. Ühe mudeli esitas ka Eddington, kes kirjeldas seda oma köitvas raamatus «Paisuv universum». See mudel sarnaneb sisult Einsteini mudeliga, ta on kinnine nagu hiiglasuur neljamõõtmeline kera ja paisub ühtlaselt kõigi kolme ruumimõõtme suunas. Käesoleval ajal pole astronoomid aga kindlad, et ruum sulgub iseendasse. Ilmselt mateeria tihedusest ruumis ei piisa, selleks et tekiks positiivne kõverus. Astronoomid eelistavad lahtist ehk üldise negatiivse kõverusega lõputut universumit, mis meenutab sadulpinda.

Lugejal ei tohi tekkida mõte, et kui sfääri pinnal on

positiivne kõverus, siis *seespool* on sel pinnal negatiivne kõverus. Sfäärilise pinna kõverus on positiivne, sõltumata sellest, kummalt poolt seda vaadata — seest või väljast. Sadulpinna negatiivne kõverus tuleneb asjaolust, et igas punktis on pind erinevalt kõverdatud. Ta on nõgus, kui te tõmbate käega tagantpoolt ettepoole, ja kumer, kui tõmbate ühest servast teiseni, üks kõverus väljendub positiivse, teine negatiivse arvuga. Et saada kõverust antud punktis, tuleb need kaks arvu korrutada. Kui tulemus jääb igas punktis negatiivseks, nagu peabki olema, juhul kui pind kõverdub igas punktis isemoodi, siis öeldakse, et pinnal on negatiivne kõverus. Pind, mis ümbritseb auku rõngaspinnas, on teine tuntud näide negatiivse kõverusega pinnast. Muidugi on taolised pinnad üksnes primitiivsed mudelid negatiivse kõverusega kolmemõõtmelisest ruumist.

Võimalik, et võimsamate teleskoopide loomisega õnnestub lahendada küsimus, milline on universumi kõverus — positiivne, negatiivne või võrdne nulliga. Teleskoop võimaldab galaktikaid näha vaid kindlas ruumipiirkonnas. Kui galaktikad on jaotunud täiesti juhuslikult ja kui ruum on eukleidiline (nullkõverusega), siis peab galaktikate hulk niisuguse sfääri sees olema alati võrdeline selle kera raadiuse kuubiga. Teiste sõnadega, kui ehitada teleskoop, millega saab vaadata kaks korda kaugemale kui ükskõik millise teleskoobiga enne seda, siis peab nähtavate galaktikate hulk kasvama n-lt 8-ni. Juhul kui hüpe osutub väiksemaks, siis see tähen-

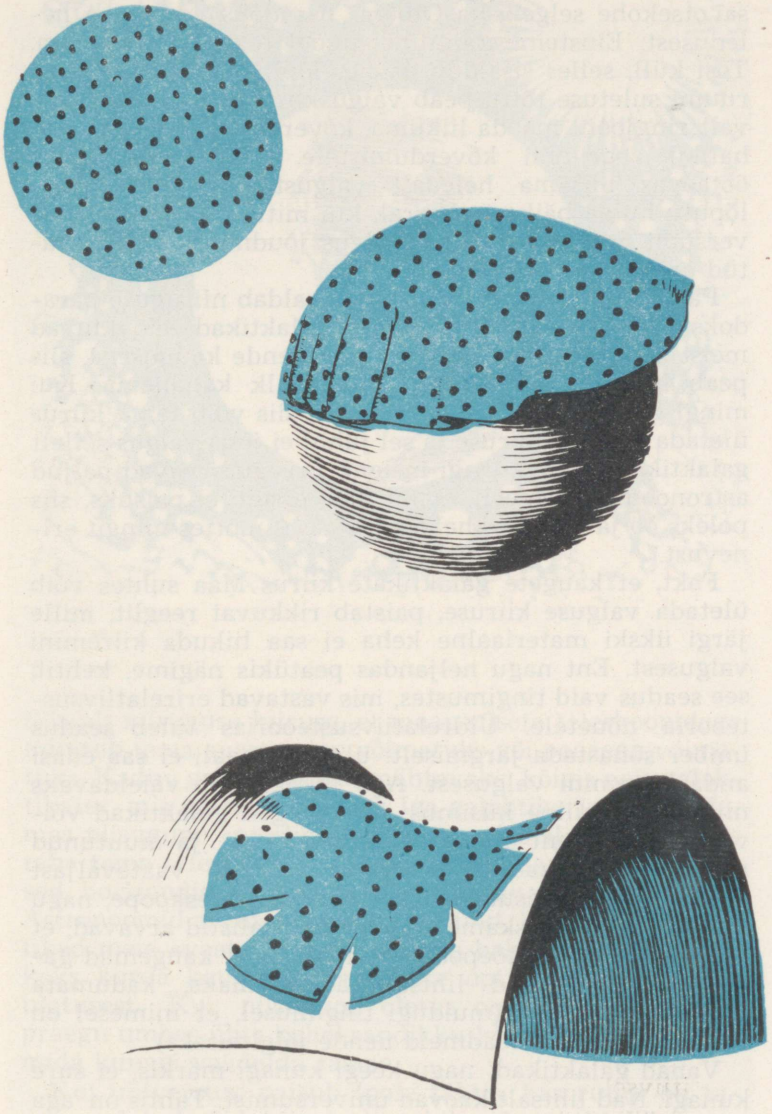




dab, et universumi kõverus on positiivne, kui suuremaks, siis negatiivne.

Võiks arvata, et lugu peab olema hoopis vastupidi, aga vaatleme kord negatiivse ja positiivse kõverusega kahemõõtmelisi pindu. Oletame, et siledast kummitükist on välja lõigatud ring, millele poolesentimeetriste vahedega kleebitakse rosinaid. Selleks et kummile sfäärilise pinna kuju anda, tuleb ta kindlasti kokku suruda, ja paljud rosinad nihkuvad üksteisele lähemale. Teiste sõnadega, kui sfäärilisel pinnal olevad rosinad peavad jääma poole sentimeetri kaugusele teineteisest, siis on vaja vähem rosinaid. Kui painutada kummitükk sadulpinnaks, siis nihkuvad rosinad üksteisest kaugemale; selleks et säilitada sadulpinnal rosinate vahemaa pool sentimeetrit, on vaja rohkem rosinaid. Öeldust tuleneb moraal, mida naljatamisi võib niimoodi väljendada: kui te ostate pudeli õlut, siis öelge müüjale kindlasti, et soovite pudelit, milles ruum on negatiivselt, mitte aga positiivselt kõverdatud.

Paisuva universumi mudeli puhul ei vajata Einsteini kosmoloogilist konstanti, tähtede hüpoteetilisele tõukumisele viivat jõudu. (Hiljem pidas Einstein kosmoloogilise konstandi kontseptsiooni kõige suuremaks veaks,



mida ta kunagi oli teinud.) Nende mudelite ilmumisega sai otsekohe selgeks ka Olbersi paradoks öise taeva heledusest. Einsteini staatiline mudel tegi siin vähe ära. Tõsi küll, selles sisaldub üksnes lõplik arv päikesi, aga ruumi suletuse tõttu peab valguskiir universumis pidevalt ringjoont mööda liikuma, kõverdudes vastavalt kohaliku aegruumi kõverdumistele. Tulemusena peaks öötaevas niisama heledalt valgustatud olema nagu lõputu hulga päikeste korral, kui mitte oletada, et universumi nooruse tõttu on valgus jõudnud ainult piiratud arvu tiire sooritada.

Paisuva universumi mõiste kõrvaldab niisuguse paradoksi väga lihtsalt. Kui kauged galaktikad eemalduvad meist kiirusega, mis on võrdeline nende kaugusega, siis peab kogu Maani jõudev valgushulk kahanema. Kui mingi galaktika on küllalt kaugel, siis võib tema kiirus ületada valguse kiiruse ja sel juhul ei jõua valgus sellelt galaktikalt üldse kunagi meieni. Praegu arvavad paljud astronoomid tõemeeli, et kui universum ei paisuks, siis poleks öö ja päeva vahel sõna otseses mõttes mingit erinevust.

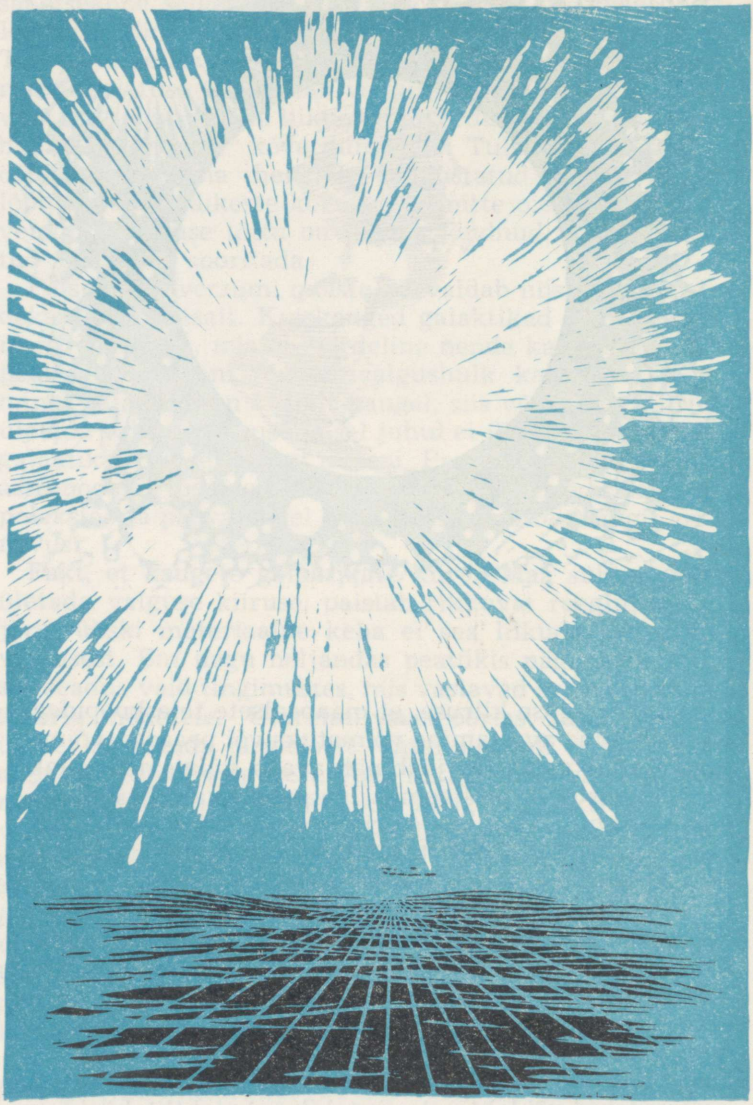
Fakt, et kaugete galaktikate kiirus Maa suhtes võib ületada valguse kiiruse, paistab rikkuvat reeglit, mille järgi ükski materiaalne keha ei saa liikuda kiiremini valgusest. Ent nagu neljandas peatükis nägime, kehtib see seadus vaid tingimustes, mis vastavad erirelatiivsusteooria nõuetele. Üldrelatiivsusteoorias tuleb seadus ümber sõnastada järgmiselt: ühtki signaali ei saa edasi anda kiiremini valgusest. Aga ikkagi jääb vaieldavaks niisugune oluline küsimus: kas kauged galaktikad võivad ka tegelikult ületada valgusbarjääri, ja muutunud nähtamatuks, kaduda alatiseks inimese vaateväljast isegi siis, kui kasutada nii võimsaid teleskoope, nagu üldse kujutleda oskame. Mõned spetsialistid arvavad, et valguse kiirus on tõepoolest piiriks ja et kaugemad galaktikad muutuvad lihtsalt ähmasemaks, kadumata täiesti silmapiirilt (muidugi tingimusel, et inimesel on küllalt tundlikke seadmeid nende jälgimiseks).

Vanad galaktikad, nagu keegi kunagi märkis, ei sure kunagi. Nad lihtsalt kaovad universumist. Tähtis on aga mõista, et ühegi galaktika kadumine ei tähenda seda, nagu kaoks universumist tema aine. Galaktika saavutab



lihtsalt niisuguse kiiruse, et maapealsete teleskoopidega muutub tema avastamine võimatuks või peaaegu võimatuks. Kaduv galaktika jääb nähtavaks kõigis neis galaktikates, mis on talle ligemal. Iga galaktika jaoks on olemas niisugune «optiline horisont», sfääriline piir, mille taha tema teleskoobid tungida ei suuda. Need sfäärilised horisondid ei ühti kahe galaktika puhul kunagi. Astronoomid arvutasid välja, et punkt, kust alates galaktikad meie «vaateväljast» kaduma hakkavad, on umbes kaks korda kaugemal praeguste optiliste teleskoopide ulatusest. Kui niisugune oletus on õige, siis näeme praegu umbes ühte kaheksandikku kõigist galaktikatest, mida kunagi vaadelda saame.

Kui universum paisub (pole tähtis, kas ruum on tasane, suletud või lahtine), siis tekib pahatahtlik küsimus: millega sarnanes universum varem? Sellele vastamiseks on kaks erinevat viisi, kaks universumi kaasaegset mudelit. Mõlemat vaadeldakse järgmises peatükis.



10. Plahvatus või püsiv seisund?

Kujutlege pilti pidevalt paisuvast kosmosest, aga seejärel laske see pilt tagurpidi minema, nagu kinos tehakse. Selge, et pidi olema moment, mil hiiglasuur ainekogus kontsentreerus väga väikesesse ruumiossa. Võimalik, et kogu paisumisprotsess algas palju miljardeid aastaid tagasi hiiglasliku algse plahvatusega. See on suure plahvatuse kontseptsioon, mille esimesena esitas Lemaître, mis aga praegu on leidnud kõige kirglikuma kaitsja George Gamowi näol.

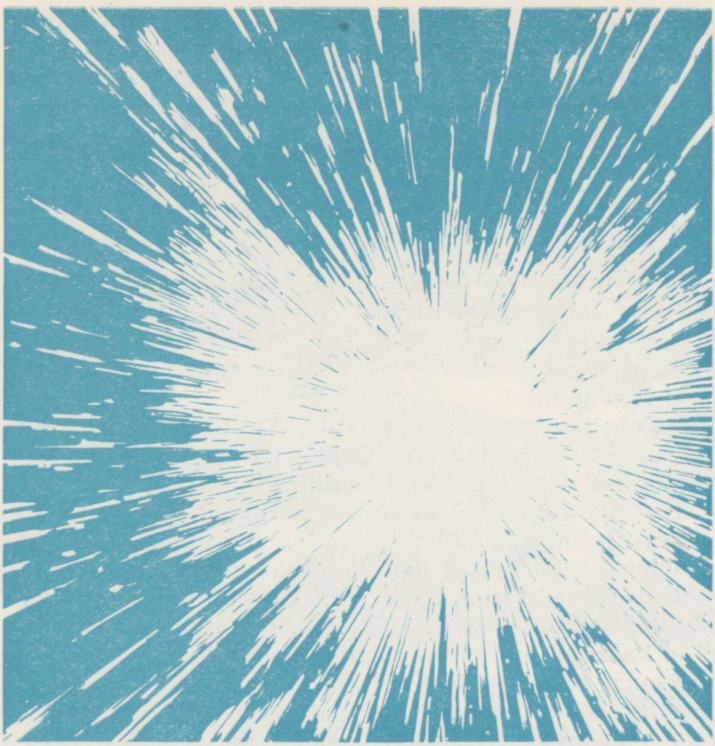
Gamow on kirjutanud oma teooria kaitseks veenva raamatu «Universumi loomine». Lemaître arvas, et suur plahvatus toimus umbes viie miljardi aasta eest, kuid universumi iga on viimastel aastatel avaldatud arvamustes üha suurenenud. Praegu arvatakse, et kõige tõenäolisem iga on 20 — 25 miljardit aastat. Igal juhul oli aga Gamowi järgi aeg, kus kogu universumi aine oli kontsentreerunud ühte uskumatult tihedasse homogeensesse ainekerasse, nn. ilemisse (*ylem* — vana-kreeka sõna ürgmateeria jaoks). Kust see tekkis? Gamow arvab, et see moodustus universumi eelneva kokkulangemise

tulemusena. Ilmselt ei saa me sellest kokkulangemise perioodist mitte midagi teada. Nagu Lemaître'i mudelgi algab Gamowi mudel plahvatusest. Vahel nimetatakse plahvatushetke «loomishetkeks», ent mitte selles mõttes, nagu mitte millestki oleks loodud miski, selgitas Gamow, vaid vormi loomise mõttes millestki varem vormitust. Kui eelistatakse uskuda loomisse mitte millestki, siis see on niisama hea.

Otse plahvatuse eel olid ilemi rõhk ja temperatuur uskumatult kõrged. Seejärel toimus gigantne, kujuteldamatu plahvatus. Gamowi raamatus vaadeldakse detailselt kõike, mis võis pärast seda juhtuda. Lõpuks moodustusid paisuvast tolmust ja gaasist tähed. Universumi paisumine käesoleval ajal on mateeriale algplahvatuse ajal antud liikumise jätkuks. Gamow oletab, et see liikumine ei lakka kunagi.

Käesoleval ajal võistleb Gamowi plahvatusteooriaga püsiva universumi teooria, mille 1948. aastal esitasid kolm Cambridge'i ülikooli teadlast — Hermann Bondi, Thomas Gold ja Fred Hoyle. Kõige veenvamalt on seda teooriat kaitsnud Hoyle oma populaarses raamatus «Universumi olemus». Nagu Gamowi teooriaski võetakse siin arvesse universumi paisumist ja oletatakse, et ruum on lahtine ning lõputu, mitte aga suletud nagu Eddingtoni mudelis. Erinevalt Gamowi teooriast ei alga teooria plahvatusest, selles ei ole üldse mingit algmomenti. Pole juhus, et Hoyle'i raamatu pealkiri erineb Gamowi raamatu pealkirjast ainult ühe sõna poolest. Hoyle'i kosmoses ei esine «loomismomenti», pigem on seal, nagu näeme, lõputu hulk pisikesi loomisakte. Hoyle formuleerib selle järgmiselt: «Igal galaktikate pilvel, igal tähel, igal aatomil on algus, algust polnud ainult universumil tervikuna. Universum on midagi rohkemat kui ainult tema osad, ehkki see järeldus võib tunduda ootamatuna.»

Püsiv universum on alati juba kindlakskujunenud liikumises. Kui me pöörduksime sadu tuhandeid miljardeid aastaid tagasi, leiaksime sealt igast kosmose osast sama tüüpi paisuvaid galaktikaid, mis sisaldavad sama tüüpi vananevaid tähti, mõningaid neist sama tüüpi planeetidega, mis nende tähtede ümber tiirlevad, ja võimalik, et mõnedel neist leidub ka sama tüüpi eluvorme.



Võib-olla on olemas lõputu hulk planeete, millel selsamal hetkel (sõltumata hetke tähendusest) saadavad mõistusega olendid esimesi kosmonaute kosmosesse. Kosmos on lõputus ruumis ja lõputus ajas homogeenne (sõna kõige üldisemas mõttes). Tema paisumine pole plahvatuse tagajärg. See on põhjustatud mingist tõukejõust, mille olemuse üle käivad praegu veel tulised vaidlused. Jõud sarnaneb kosmoloogilise konstandiga, millest Einstein loobus. See tõukab galaktikaid seni, kuni nad lõppude lõpuks satuvad valgusbarjääri taha ja kaovad meie vaateväljast. Loomulikult toimub niisugune kadumine ainult meie Galaktikas asuva vaatleja seisukohalt. Kui maapealne vaatleja näeb, et galaktika *X*

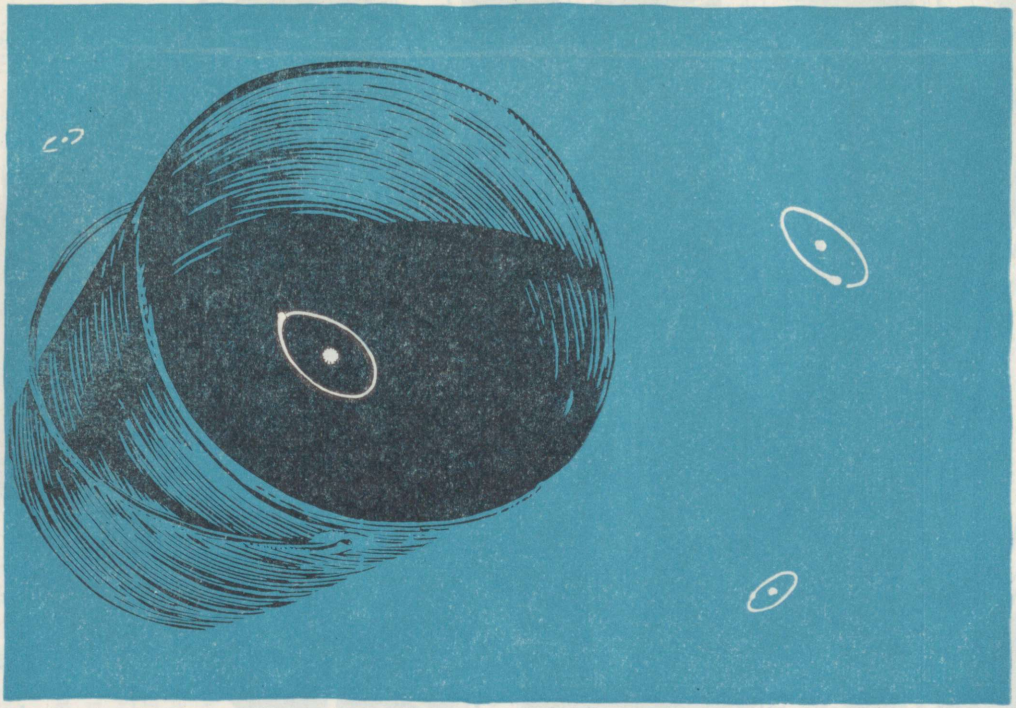
ja tema naabrid kadusid, siis näevad vaatlejad galaktikas *X*, et meie Galaktikaga juhtus täpselt seesama lugu.

Kerkib väga oluline küsimus. Kui kosmos kogu aeg paisub ja jätkab paisumist, siis miks ei muutu ta hõredamaks? Ilmselt pole püsiva oleku seletamiseks teist teed kui oletada, et vahetpidamata luuakse uut materiaat, võimalik, et vesiniku — lihtsaima elemendi kujul. Vastavalt Hoyle'i arvamusele hoiaks see kosmose püsivas olekus, kui ühes ämbritäies ruumis (peaaegu võimatu on kirjutada Hoyle'i vaadetest, kasutamata seda piltlikku väljendit) tekib üks vesiniku aatom umbes iga kümne miljoni aasta kohta. Muidugi peab aine moodustuma täpselt nii kiiresti, et see kompenseerib tiheduse vähenemise.

Kust tulevad vesiniku aatomid? Sellele ei julge keegi vastata. See on punkt, kust Hoyle'i teooria alguse saab. Kui uskuda loomist mitte millestki, siis märgib see püsiva oleku teoorias punkti, kus toimus, aga õigemini pidevalt toimub loomine.

Mõlemad võistlevad teooriad, plahvatusteooria ja püsiva oleku teooria, võivad olla kooskõlla viidud kõigi faktidega, mida kosmosest teatakse (täpsemalt sellega, mida kaasajal arvatakse teadvat), samuti kõigi relatiivsusteooria printsiipidega. Kaasajal on mõlemad teooriad ühtviisi vastuvõetavad. Igal aastal kinnitavad mingid uued avastused plahvatusteooriat ja kutsuvad esile kahtlusi püsiva oleku teooria suhtes, ent need vaatlused kompenseeritakse uutega, mis räägivad püsivuse teooria kasuks ja panevad kahtlema plahvatusteoorias. Kui loete ükskõik kumma teooria kaitsja artiklit või raamatut, siis näete, et autor kirjutab nii, nagu räägiksid kõik andmed tema kasuks ja väga vähesed tema kangekaelsete oponentide poolt. Teil ei ole vaja teda uskuda. Kui spetsialistide arvamused lähevad lahku, siis pole mõistlik kindlalt ühele poolele asuda, kui te just emotsionaalselt ei eelista ühte teooriat teisele. Gamow kirjutas avalikult plahvatusteooria emotsionaalsest eelistamisest. Niisama avameelne oli oma püsiva oleku teooria eelistamises Hoyle. (Niipalju kui tean, pole psühhoanalüütikud veel selgitanud mõlemat teooriat neid kaitsvate inimeste neurooside alusel, kuid võite olla kindlad, et nad lõpuks seda ikkagi teevad.) Kui jätta kõrvale emotsioonid, on





mõistlik oodata otsustamisega seni, kuni astronoomid suudavad hankida küllalt andmeid, selleks et vaekauss ühele või teisele poole kalduks.

On olemas palju teisi kosmosemudeleid. Mõned neist tehti tõemeeli, mõned naljatamisi. On mudeleid, milles ruum kõverdub tagasi nagu Möbiuse pind (ühe poolega pind, mis saadakse, kui pabeririba ühele otsale keerd peale keeratakse ja seejärel mõlemad otsad kokku kleebitakse). Kui te niisuguse universumi kord läbi käite, siis jõuate sinnasamasse, kust oma retke alustasite, ainult kõik osutub vastupidiseks nagu peegelpildis. Mõistagi võite ta veel kord läbi käia ja iga asja uuesti oma kohale viia. On olemas ostsilleeruva universumi mudeleid, kus plahvatused vahelduvad paisumiste ja kokkutõmbumistega. See tsükkel kordub pidevalt nagu mõnede filosoofide ja idamaa religiooni igavese taassünni doktriinis. (Huvitav on märkida, et Edgar Allan Poe



oma kummalises kosmoloogilises töös pealkirjaga «Heureka», mida ta ise kõrgelt hindas, kaitses ostsilleeruva universumi mudelit; universum asuvat praegu kokkutõmbumise staadiumis.) Kõige ekstsentrilisem kõigist mudeleist on «kinemaatilise relatiivsuse» mudel, mille esitas Oxfordi ülikooli astronoom Edward A. Milne. Selles tuuakse sisse kaks täiesti erinevat aja liiki. Ühe aja terminites on universumi iga ja mõõtmed lõputud ning ta ei paisu üldse. Teise aja terminites on universumil lõplikud mõõtmed ja ta paisub alates alles oma tekkemomendist. Milline aja liik põhiliseks valida, see on ainult mugavuse küsimus.

Inglise matemaatik Edmund Whittaker esitas kord (naljatamisi) kahaneva universumi teooria, kus vähe sellest, et lõplik kosmos kahaneb, vaid ka mateeria lahkub sellest pidevalt sinna, kust seda Hoyle'i teooria järgi juurde tuleb. Maailm kaob lõppude lõpuks täiesti, ent mitte plahvatusega, vaid viimse ohkega. «Mainitud teoorial on see eelis,» kirjutab Whittaker, «et ta annab universumist väga lihtsa pildi.» Muidugi peaks niisugune teooria seletama, miks me ei jälgi galaktikate spektris mitte nihet violetse, vaid punase otsa poole, aga seda on kerge teha. Selleks on vaja de Sitterilt laenata üks tema võtetest ja oletada, et aja kulg kiireneb (üks füüsikuist märkis naljapärast, et see võiks seletada ka





fakte, miks vanemaks saamisel paistavad aastad kuudena lendavat. Nad lendavad *tõepoolest* nagu kuud). Valgus, mis kaugest galaktikast Maale jõuab, oleks siis selle galaktika valgus, mis eksisteeris miljoneid aastaid tagasi, kui elektromagnetilised võnkumised toimusid aeglasemalt. See võinuks viia küllalt suurele punanihkele, mis oleks ületanud Doppleri efekti spektri violetse otsa poole. Mõistagi, mida kaugemal on galaktika, seda vanem ja punasem ta näib.

Fakt, et võib luua ka kokkutõmbuva universumi mudeli, näitab, kuivõrd paindlikud on relatiivsusteooria võrrandid. Neid võib kooskõlla viia paljude erinevate kosmosemudelitega, millest igaüks seletab väga hästi kõike, mida kaasajal jälgida saab. Huvitav on märkida, et 1620. aastal kirjutas inglise filosoof Francis Bacon oma teoses «Novum organum» järgmist: «Taeva kohta võib luua palju üksteisest erinevaid hüpoteese, mis kõik on nähtustega küllalt hästi kooskõlas.» Kaasaegne kosmoloogia pole selles suhtes muutunud, ehkki vaadeldavate nähtuste hulk on palju suurem; järelikult on alust oletada, et praegused mudelid on tõele lähemal kui vanad. Muidugi saja aasta pärast loodavad kosmosemudelid, mis baseeruvad kaasajal tundmatutel astronoomilistel andmetel, ei pruugi üldsegi sarnaneda ühegagi meie mudelitest, mida praegu tõepärastena vaadeldakse.

Iiri kirjaniku lord Dunsany raamatus «Inimene, kes föönіksi ära sõi», on väike lõbus muinasjutt, milles Atlas selgitab Dunsanyle, mis juhtus sel päeval, kui tänu teadusele surelikud lakkasid universumi vana-kreeka mudelisse uskumast. Atlas rääkis, et tema ülesanne oli kaunis rumal ja ebameeldiv. Tal oli külm, sest Maa lõunapoolus toetus ta kaelale, ja ta käed olid kogu aeg märjad kahest ookeanist. Kuid ta täitis oma ülesannet seni, kuni inimesed temasse uskusid.

Seejärel, räägib Atlas kurvalt, hakkas maailm «liiga õpetatuks» muutuma. Atlas otsustas, et teda enam ei vajata. Ta jättis maailma maha ja läks ära.

«Ent,» räägib Atlas, «mitte järelemõtlematult, mitte ilma sügavate mõtisklusteta. Kuid ma olin põhjalikult hämmastunud selle üle, mis siis juhtus, kui ma seda tegin.»

«Aga mis siis juhtus?»

«Üldse mitte midagi. Lihtsalt mitte kõige vähematki.»

Püüdsin käesolevas raamatus jutustada loo sellest, mis juhtus, kui Newtoni absoluutse liikumise jumal pärast Einsteini sõrmepuudutust jättis Maa sinnapaika ja kõndis minema. Maaga ei juhtunud absoluutselt mitte midagi, vähemalt kuni tänaseni. Ta jätkas pöörlemist oma telje ümber, jäi endiselt ekvaatori kohalt paksemaks, tiirles endistviisi ümber Päikese. Ent füüsikas juhtus siiski midagi. Tema võimalused seletada, tema võimalused ennustada ja veel enam, tema võimalused Maa nägu hea või halva poole pöörata said suuremaks, kui nad olid kunagi varem.

Järelsõna

Eessõnas juba märkisime, et mõningate küsimuste käsitlus Gardneri raamatus vajab täpsustamist. Tähelepanu tuleb pöörata järgmistele momentidele.

Üldrelatiivsusteooria ülesehitamisel lähtus Einstein ekvivalentsuse (raskusvälja ja inertsi ekvivalentsuse) printsiibist. Selle abil saigi ta teooria põhivõrrandid. Ent tuleb märkida, et ekvivalentsuse printsiip pole üldine printsiip ja tema rakenduspiirkond on kitsendatud. Nagu Gardner ise märgib, on inertsiga ekvivalentne ainult homogeenne (s. o. suuruselt ja suunalt ühtlane) raskusväli.

Ent välja võib ühtlaseks lugeda üksnes väga väikeste ruumipiirkondade puhul. Näiteks Maa raskusvälja jõujooned lähtuvad radiaalselt tema tsentrist. Ainult nendes ruumiosades, mille joonmõõtmed on palju kordi väiksemad Maa mõõtmetest, võib Maa raskusvälja homogeenseks pidada. Seepärast räägitakse, et ekvivalentsuse printsiip on lokaalne, s. o. üleminekuga kiirendatud koordinaatsüsteemi võib elimineerida raskusvälja üksikutes ruumiosades, ent kaugeltki mitte kõikjal.

Üldiseks printsiibiks, mida saab rakendada ilma igasuguste kitsendusteta, on *inertse ja raske massi võrdsuse printsiip*. Selle alusel saab üles ehitada kogu gravitatsiooniteooria. Kui lähtuda ekvivalentsuse printsiibist, siis on teooria ülesehitamiseks vajalik täiendav oletus, et gravitatsiooninähtus taandub täiesti aegruumi geomeetrilistele omadustele.

Gardner toob esile mõtte, et üldrelatiivsusteooria olemus seisab kõigi taustsüsteemide, nii ühtlaselt kui ka kiirenevalt liikuvate täielikus võrdõiguslikkuses. Tegelikult on asi selles, et aegruum on kõverdatud. Just see

asjaolu sunnib üldrelatiivsusteooria võrrandeid üles kirjutama niisuguses vormis, et neid saaks kasutada igas taustsüsteemis.

Erirelatiivsusteoorias olid kõik inertsiaalsüsteemid võrdõiguslikud mitte sugugi sellepärast, et teooria võrranditel oli üks ja sama kuju. Põhjus peitus selles, et kõigil füüsikalistel suurustel on inertsiaalsüsteemides üks ja sama kuju. Parim tõend selle kasuks, et mitte mingite katsetega, ei mehhaaniliste ega elektromagnetilistega, pole võimalik avastada, kas süsteem on paigal või liigub ühtlaselt.

Teine asi, kui kõne all on üldine teooria. Füüsikaliste protsesside konkreetne kuju on siin erinevates koordinaatsüsteemides muidugi erinev ja üksikud süsteemid on eelistatud. Võtame näiteks erirelatiivsusteooria. Nagu teada, on ta üldrelatiivsusteooria erijuht, nii et printsipiaalselt võime kasutada niihästi inertsiaalseid koordinaatsüsteeme kui ka vabal kombel kiirendatud süsteeme. Formaalselt saab seda teha, ent see ei tähenda, et füüsika seisukohalt oleksid kõik süsteemid võrdõiguslikud: kõigis inertsiaalsüsteemides levib valgus alati sirget mööda ühe ja sama kiirusega. Kiirenevates koordinaatsüsteemides muutub valguse tee kõverjooneliseks. Seega on olemas objektiivne kriteerium, mis sel juhul sunnib inertsiaalsüsteeme eelistatuks pidama.

A. Baz

TERMINITE SÕNASTIK

Käesoleva terminite sõnastiku eesmärgiks ei ole anda rangeid ja täpseid definitsioone, vaid lihtsaid ning intuitiivselt arusaadavaid, mis jääksid elementaarse raamatu piiresse. Näiteks ei tuleks kõveruse täpne defineerimine kõne allagi, selleks kuluks mitu lehekülge. Ammendava informatsiooni saamiseks peab lugeja pöörduma entsüklopeedia või vastava õpiku poole.

A b s o l u u t n e l i i k u m i n e — liikumatu eetri või mõne teise, niisama universaalse ning eelistatud taustsüsteemi suhtes toimuv liikumine.

A e g r u u m — relatiivsusteooria neljamõõtmeline koordinaatsüsteem.

A e g r u u m i i n t e r v a l l — aegruumis mõõdetud kaugus kahe sündmuse vahel.

A e g r u u m i s t r u k t u u r — aegruumi geomeetriline struktuur.

A n t i a i n e — antiosakestest koosnev aine.

A n t i o s a k e — elementaarosake, niisamasugune nagu harilik osake, ainult tal on vastasmärgiline laeng ja (või) vastupidine magnetmoment. Laetud osakeste korral on mõlemad vastupidised. Neutraalsed osakesed, millel ei ole laengut, erinevad magnetmomentide poolest.

c — valguse kiiruse kokkuleppeline tähis. c on võrdne umbes 300 000 km/s.

D o p p l e r i e f e k t — muutused hääle või elektromagnetilise lainetuse mõõdetavas lainepikkuses, mille põhjuseks on lainete allika lähenemine või eemaldumine vaatlejast.

E e t e r — aine, mis 19. sajandi füüsikute arvates pidi täitma kogu ruumi ja olema elektromagnetilise kiirguse levimiskeskkonnaks.

E e t r i t u u l — eetri liikumine temas liikuva keha suhtes.

E k v i v a l e n t s u s e p r i n t s i i p — üldrelatiivsusteooria aluseks olev väide, mille järgi raskus ja inerts on ühtede ja samade nähtuste vaatlemise erinevad viisid.

E l l i p t i l i n e g e o m e e t r i a — mitteeukleidiline geomeetria, kus väljaspool antud sirget olevast punktist tasandil ei saa tõmmata ühtki antud sirgega paralleelset sirget.

E l e k t r o m a g n e t i l i n e l a i n e — elektrilaengu võnkumisel tekkiv kiirgus. See levib vaakuumis ühtlaselt liikuva vaatleja suhtes alati jääva kiirusega, olenemata kiirgusallika või vaatleja kiirusest.

E l e k t r o m a g n e t i l i s t e l a i n e t e s p e k t e r — kogu

elektromagnetilise kiirguse skaala, alates erakordselt pikkadest kuni ülimalt lühikeste lainepikkusteni.

Energia — võime teha tööd.

Eukleidiline geomeetria — Eukleidese postulaatidel põhinev geomeetria.

Eukleidiline ruum — nullkõverusega ruum.

Erirelatiivsusteooria — Einsteini esimene relatiivsusteooria, mis tegeles ainult inertsiaalsüsteemis olevate vaatlejatega.

g — kiirendus 9,8 meetrit sekundis sentimeetri kohta, mille tekitab raskus või inerts.

Galaktika — miljardite tähtede kogum, sageli läätsekujuline, liigub ruumis nagu tervik.

Galilei süsteem — vt. inertsiaalsüsteem.

Geodeetiline joon — kõige «sirgem» tee kahe punkti vahel antud tasandil antud ruumis või aegruumis; kahte punkti ühendav ekstreemumpikkusega (lühim või pikim) joon.

Hüperboolne geomeetria — mitteeukleidiline geomeetria, kus läbi väljaspool sirget asuva punkti saab tasandil tõmmata lõpmatu hulga antud sirgega paralleelseid sirgeid.

Hüpersfäär — neljamõõtmeline sfäär.

Hüpotees *ad hoc* — teooria, mis on loodud ühe kindla nähtuse selgitamiseks, mida aga teised katsed (vaatlused) üldse ei toeta.

Ilem — algaine (ürgmateeria), mis oletuste järgi miljardeid aastaid tagasi plahvatas, moodustades praeguse paisuva universumi.

Inertne mass — keha mass, vaadelduna seisukohalt, kuidas ta kiirendamisele vastupanu avaldab. Mõõdetakse jõu kaudu, mida läheb vaja keha kiirenduse suurendamiseks antud väärtuse võrra.

Inerts — aine omadus jääda inertsiaalsüsteemi suhtes paigale või liikuda ühtlaselt ning sirgjooneliselt, kuni talle ei mõju väljastpoolt mingi jõud.

Inertsiaalne taustsüsteem — koordinaatide süsteem, mis liigub ühtlaselt läbi ruumi teiste inertsiaalsüsteemide suhtes. Seesama mis inertsiaalsüsteem või Galilei süsteem.

Inertsiaalsüsteem — vt. inertsiaalne taustsüsteem.

Kaksikute paradoks — kellaparadoks, mida rakendatakse hüpoteetiliste kaksikute korral. Üks kaksikutest suundub suure kiirusega toimuvale kosmoselennule: Maaga seotud inertsiaalsüsteemi suhtes tema vananemisprotsess aeglustub ja tagasijõudmisel osutub ta nooremaks oma kogu aeg Maal viibinud vennast.

Kellaparadoks — relatiivsusteooria rabav väide, et kaks sünkroniseeritud kella võib teineteisest eemale viia, seejärel aga jälle lähendada selliselt, et nad ei näita enam ühte ja sama aega, kuigi mõlemad käivad täpselt.

Kennedy-Thorndyke'i katse — Michelson-Morley katse kordamine, kusjuures seadme õlad ei olnud võrdsed.

Kiirendus — muutus liikuva keha kiiruses, liikumissuunas või neis mõlemas.

Kesktõukejõud — inertsijõud, mis sunnib keha või keha osi pöörlemiskeskpunktist kaugemale liikuma.

Koordinaat — arvude kombinatsioon, mida kasutatakse punkti tähistamiseks. Joone märkimiseks vajatakse ühte, tasandi jaoks kahte, ruumi puhul kolme, aegruumi puhul aga nelja koordinaati.

Kosmos — kogu aegruumiline universum.

Kõverus — joone erinevus sirgest, pinna või ruumi erinevus tasasest pinnast või ruumist.

Lainepikkus — laine levimissuunas mõõdetud vahemaa kahe samas faasis oleva naaberpunkti vahel.

Lorentz-FitzGeraldi lühenemine — keha relatiivne lühenemine liikumise suunas.

Maailmajoon — liikuva keha tee, kujutatuna neljamõõtmelises aegruumi koordinaadistikus.

Machi printsiip — teooria, mille järgi inerts tekib keha kiirenevast liikumisest kogu universumi aine suhtes.

Mass — lihtsustatult öeldes, kehas sisalduv aine hulk.

Massi ja energia jäävus — väide, mille järgi massi ja energia koguhulk universumis ei saa kahaneda ega kasvada.

Michelson-Morley katse — kuulus katse, mis näitab eetrituule puudumist Maa liikumisel ruumis.

Mitteeukleidiline geomeetria — geomeetria, kus üks või mitu Eukleidese geomeetria postulaati on asendatud teistega.

Mõtteline katse — katse, mida saab sooritada ainult mõttes, mitte aga tegelikus elus.

Negatiivne kiirendus — kiiruse kahanemine.

Negatiivne mass — keha hüpoteetiline omadus, mis sunniks keha liikuma mõjuva jõuga vastassuunas.

Neljas mõõde — ükskõik milline neljas koordinaat koordinaatide süsteemis.

Null *g* — nullgravitatsioon, kaaluta olek ruumis suures kauguses materiaalsetest kehadest või vabalt langeva kosmoselaeva kabiinis.

Olbersi paradoks — hämmastav arvestus, mis näitab, et kui galaktikad on ruumis ühtlaselt jaotatud, universum aga on ajas ja ruumis lõpmatu ega paisu, siis peab kogu taevas särama heledamini Päikesest.

Optiline horisont — sfääriline piir (paisuvas universumis), milleni võib küündida kõige võimsamate teleskoopidega; sellest piirist kaugemal eemalduvad galaktikad vaatlejast valguse kiirusest suurema kiirusega.

Ostsilleeruv universum — universum, mis vaheldumisi paisub ja kokku tõmbub.

Postulaat — tõestusteta püstitatud oletus, mis moodustab mingi loogilise süsteemi aluse. Nimetatakse mõnikord ka aksioomiks.

Punanihe — valguse lainepikkuse nihkumine spektri punase otsa poole. Niisuguse nihke põhjuseks võib olla: 1) valgusallika liikumine kehast kaugemale; 2) tugevama gravitatsiooni-

välja mõju; 3) kui oletada, et aja kulg kiireneb, siis see, et valgus kiirati varasemal perioodil.

Püsiva oleku teooria — teooria, mille järgi kosmosel pole ajas algust ega lõppu, vaid ta püsib tasakaalus just seetõttu, et pidevalt luuakse uut mateeriat, mis asendab universumi paisumise tõttu lõpmatusse hajunud aine.

Raske mass — keha mass, mida vaadatakse kui raskusvälja tekitajat või kui keha, millele niisugune väli mõjub. Maa peal avaldub see keha raskusena.

Raskus — Newtoni järgi on iga kahe keha vahel mõjuv külgetõmbejõud võrdeline kehade masside korrutisega ja pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga. Einsteini järgi on raskus jõudude mõju alt vabade materiaalsete kehade omadus liikuda aegruumis mööda geodeetilisi jooni.

Seisumass — vaatleja suhtes paigal oleva keha mass.

Signaal — igasugune erinevatel kehadel toimuvate põhjuslikus seoses olevate sündmuste ahel.

Silindriline universum — Albert Einsteini esimene kosmosemudel. Selle kolm ruumikoordinaati on positiivse kõverusega, ajakoordinaat aga sirge.

Suure plahvatuse teooria — teooria, mille järgi universum on tekkinud ilemi hiiglasliku plahvatuse tulemusena.

Taustsüsteem — paigalseisvana vaadeldav koordinaatide süsteem, mille suhtes mõõdetakse aega, liikumist, pikkust, massi jne.

Topoloogia — lihtsustatult öeldes uurib topoloogia neid keha omadusi, mis pideva deformatsiooni korral jäävad samaks.

Vaba langemine — keha liikumine ruumis ainuüksi gravitatsioonijõu mõjul.

Valgus — nähtav osa elektromagnetiliste lainete spektrist.

Ühtne väljateooria — seni veel küllaldaselt välja arendamata teooria, milles elektromagnetism ja gravitatsioon on ühendatud ühise võrrandite süsteemiga.

Üldrelatiivsusteooria — Einsteini teine relatiivsusteooria, mis üldistab erirelatiivsusteooriat, võttes arvesse ka kiireneva liikumise, gravitatsiooni ja inertsi.

KRONOLOOGIA

1879 sündis Albert Einstein (14. märtsil) Ulmis, Saksamaal.

1881 tegi Albert Michelson esimese katse avastada eetrituult.

1887 Michelson-Morley katse ei näidanud eetrituule olemasolu.

1893 avaldas H. A. Lorentz oma esialgse teooria, mis seletas Michelson-Morley katse tulemust.

1905 avaldas Einstein erirelatiivsusteooria.

1908 sooritas Roland von Eötvös oma erakordselt täpsed katsed, mis tõestavad, et inertne mass on võrdeline raske massiga; pidas Hermann Minkowski kuulsa loengu ajast ja ruumist kui aegruumi variprojektsioonidest.

1911 tegi Einstein ettepaneku kontrollida valguskiire paindumist gravitatsiooni mõjul täieliku päikesevarjutuse ajal.

1916 lõpetas Einstein töö üldrelatiivsusteooria juures.

1917 kirjeldas Einstein «silindrilise universumi» mudelit. Moodsa kosmoloogia algus.

1919 toimus Arthur Stanley Eddingtoni juhtimisel Aafrika-ekspeditsioon täieliku päikesevarjutuse jälgimiseks: mõõtmised kinnitasid Einsteini ennustust gravitatsiooni mõjust valgusele.

1932 kordasid Kennedy ja Thorndyke Michelson-Morley katset sel viisil, et tulemused lükkasid Lorentzi lühenemisteooria ümber.

1942 teostas Enrico Fermi koos oma abilistega esimese ahelreaktsiooni. Mass muundus energiaks kooskõlas Einsteini valemiga. Algas aatomisajand.

1955 suri Albert Einstein (18. aprillil Princetonis, New Jerseys).

1958 avastas Rudolf Mössbauer nn. Mössbaueri efekti, mille baasil sooritati peagi Einsteini ennustust (aja aeglustumine raskuse mõjul) kinnitav katse.

SISUKORD

Eessõna venekeelsele väljaandele 7
Sissejuhatus 8
1. Absoluutne või relatiivne? 11
2. Michelson-Morley katse 21
3. Erirelatiivsusteooria. I osa 39
4. Erirelatiivsusteooria. II osa 57
5. Üldrelatiivsusteooria 73
6. Raskus ja aegruum 89
7. Machi printsiip 111
8. Kaksikute paradoks 119
9. Universumi mudelid 131
10. Plahvatus või püsiv seisund? 155
Järelsõna 167
Terminite sõnastik 169
Kronoloogia 173

Мартин Гарднер
ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ МИЛЛИОНОВ
На эстонском языке. Обложка Ю. Аррака. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

Toimetaja I. Sõnajalg. Kunstiline toimetaja A. Säde. Tehniline toimetaja E. Sagris. Korrektorid V. Leibak ja H. Kahar.

Laduda antud 10. VI 1968. Trükkida antud 10. XII 1968. Leedu NSV J. Janonese nim. Paberivabriku trükipaber nr. 1, 54×84/16. Trükipoognaid 11. Tingtrükipoognaid 9,2. Arvestuspoognaid 7,97. Trükiarv 10 000. Tellimuse nr. 2040. Trükikoda «Ühiselu», Tallinn, Pikk t. 40/42. Hind 63 kop.



A
29625
5976826