

*Teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli  
„Füüsika metageomeetiline alus“ eest*

Tomi Sebastian Koivisto ja Luca Marzola



Foto: Hardi Veermäe



Foto: Birgit Püve

## FÜÜSIKA METAGEOMEETRILINE ALUS: MIKS, KUS JA KELLELE?

### Ruum – viimane piir

Ruum – viimane piir. See pole mitte ainult ühe populaarse ulmesarja tunnuslause, vaid võtab hästi kokku küsimuse, mida me uurime: ruumi, see tähendab aegruumi olemust.

Oleme kõik tuttavad ruumi mõistega. Lõppude lõpuks tajuvad meie ajud reaalsust objektidena, mis paiknevad abstraktses kolmemõõtmelises (3D) ruumis. Matemaatikud nimetavad seda abstraktsiooni kolmemõõtmeliseks eukleidiliseks ruumiks. Skandinaavia disainerid pakuvad meile palju võimalusi, kuidas seda kõige paremini ära kasutada. Et see mõiste meile omaseks saaks, ei pea me olema ei matemaatikud ega disainerid. Oskame seda lausa loomuomast ära kasutada, hindamaks kaugust krõpsukausini, mille poole peame küünitama, enne kui saame suhu pista järgmise krõpsu. Oletagem nüüd, et oleme purulaisad ja otsustame ehitada roboti, mis teeks selle tähtsa toimingu meie asemel. Roboti programmis peab olema kirjas kolm asja: võrdluspunkt (mida tihti nimetatakse alguspunktiks), kausi asukoht selle punkti suhtes ja meie suu asukoht kas kausi või alguspunkti suhtes. Selle informatsiooni abil robot teab, kus need punktid ruumis asetsevad, mis on *siin* ja mis *seal*.

Kuigi eelmine lõik võib näida tobedana, tõstab see esile, et loomupäraselt kaldume pidama ruumi millekski, mis on loodusesse n-õ sisse ehitatud ja teatud mõttes *loomulik*. Aga kas ruum on tõesti nii loomulik? Mõelge uuesti meie ehitatud robotile: kui kaugel on kaus meile suust, kui seda vaadata roboti vaatenurgast? Kui panime roboti tarkvarasse rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi, on üks võimalik vastus „umbes 60 cm“. Mis saab aga siis, kui robotil pole aimugi, mis on sentimeeter? Sel juhul on võimalik vastus, et kaugus on paar selle hammasratta pööret, millele järgneb pool teise hammasratta pööret ja nii edasi. Kuidas näiksid asjad, kui joonistaksime meie käes olevate krõpsude trajektoori meie ja roboti vaatenurgast? Ja mis kõige tähtsam – kumba nendest kahest joonisest peaks loomulikumaks mõni tulnukas?

Loetud pool lehekülge pealtnäha mõttetuid arutlusi peaks olema teid praeguseks veennud, et ruum, kaugus ja ehk isegi geomeetria eksisteerivad meie universumis ainult tänu sellele, et nad elavad meie peas. Neid ei vaja mitte universum, vaid teie (ja tuleb tunnistada, meie samuti). Kui ruum ei ole midagi, mis „lihtsalt on“, siis mis on ruum?

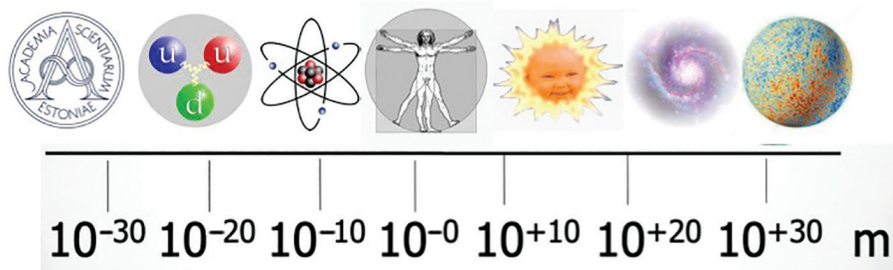
## Kus oleme nüüd?

See võib tunduda paradoksaalne, kuid tänapäeva teoreetilised füüsikud (st need, kes ei kannu valgeid kitleid ja on seetõttu kaetud kriiditolmuga) ei pühenda sellele probleemile eriti palju oma aega. Meie arusaamine loodusest toetub kahele sambale, kvantmehaanikale ja üldrelatiivsusteooriale. Kvantmehaanika kirjeldab, kuidas toimib loodus väga väikestel mõõtmetel ja üldrelatiivsusteooria annab aimu, kuidas toimivad asjad väga suurtel mõõtmetel. Teame ka, kuidas asjad käituvad nende kahe piirjuhu vahel. Küllap teate seda samuti, sest siin taandub füüsika klassikalistele seadustele, mida õpetatakse koolis. Seepärast vaadake pigem neid kahte piirjuhtu, alustades väga väikeste pikkuste füüsikast.

Üks asi, millele tuleb tähelepanu juhtida, on see, et keegi ei tea kindlalt, mis juhtub, kui läheneme väikseimale võimalikule vahemaale,  $1,62 \times 10^{-35}$  meetrit, mida tuntakse Plancki pikkuse nime all (selguse mõttes märgime, et Max Planck oli sellest kahtlemata pikem). Keegi on kindlasti kusagil öelnud, et hobuseraua äärmuslik vorm on rõngas. Siin on tõesti nii, kuna gravitatsioon, mis valitseb suurte kauguste füüsikat, mängib rolli ka siin. Võib ainult väita, et aeg ja ruum, nii nagu me neid tunneme, ei oma siin tähendust, kuna tegu on gravitatsiooni ja kvantmaailma kokkupuutepunktiga. Et „näha“, mis siin toimub, oleks vaja Plancki pikkusest väiksema lainepikkusega footonit, kuid selle footoni energia oleks nii suur, et sünniks must auk!

Teooriat, mida veel pole, aga mis kirjeldaks füüsikat sel ultramikroskoopilisel tasemel, nimetatakse üldiselt kvantgravitatsiooniks. Et tähistada selle tundmatuse uurimist, kasutasime joonisel 1 Eesti teaduste akadeemia stiilset logo. Sel kujutatud sümbolid on kosmoloogiline konstant  $\Lambda$ , mis on vaakumi ja universumi salapärase tumeenergia kaal, ja lõpmatus  $\infty$ , mõõtmatu, mille tundmaõppimine ja mõistmine on inimese kutsumus – vähemalt ütleb nii Odüsseus Dante „Jumalikus komöödias“.

Liikudes joonise 1 kauguste redelil astme võrra ülespoole, siseneme osakeste-füüsika maailma. Siin on olukord nii palju parem, et meil on olemas isegi kindel mudel, mis seletab kõiki osakestefüüsika nähtusi – standardmudel (näete, et



Joonis 1. Füüsikalise universumi ulatus. Erinevas suuruses avalduv kerasümmeetria.

füüsikud ei ole asjadele nime andmises just kõige tugevamad). Selle teooria järgi koosneb aine elementaarosakestest kvarkidest ja leptonitest, mida looduses on kolmes eri variandis. Täpsemalt on aine, millest me koosneme, tehtud prootonitest, neutronitest ja elektronidest. Meie ümber lendab ringi veel hulk neutriinosid. Neil pole meie igapäevaelule praktiliselt mingit mõju, nii et neid ei panda enamasti tähele. Elektron ja neutriino ongi lihtosakesed, millele on antud ühine nimi „leptonid“. Prootonid ja kvargid aga ei ole lihtosakesed, nad koosnevad lihtosakestest, mida nimetatakse kvarkideks. Esimeses lähenduses võime öelda, et prootoni ja neutroni koostises on ainult kahte tüüpi kvarke,  $u$ - ja  $d$ -kvargid. Prooton koosneb kahest  $u$ -kvargist (kumbki laenguga  $+2/3$  elektroni laengut) ja ühest  $d$ -kvargist (laenguga  $-1/3$ ). Neutronis on üks  $u$ -kvark ja kaks  $d$ -kvarki. Seetõttu on prootonil laeng  $+1$ , aga neutron on elektriliselt neutraalne. Elektron ja elektronneutriino koos  $u$ - ja  $d$ -kvargiga on standardmudeli esimene osakeste põlvkond.

Nagu juba mainitud, on looduses veel kaks põlvkonda, mis sama muustrit kordavad. Teise põlvkonna moodustavad müüon, müüoneutriino,  $u$ -tüüpi sarmiga kvark ja  $d$ -tüüpi veider kvark (me ei mõelnud neid nimesid ise välja). Viimases põlvkonnas on taulepton, tauneutriino,  $u$ -tüüpi tipukvark (ehk tõekvark) ja  $d$ -tüüpi põhja- ehk ilukvark. Elektroni, müüoni ja tau füüsikalised omadused on samad, välja arvatud mass, mis on igal järgmisel põlvkonnal suurem. Võime seega mõelda müüonist kui raskest elektronist ja me ei mõtle väga valesi! Sama käib  $u$ - ja  $d$ -tüüpi kvarkide kohta, seega on kolmekordne kordus kolm korda korratud. Neutriinod näevad kõik välja enam-vähem ühesugused. Piisab, kui öelda, et nad ei riku teiste osakeste seatud põlvkondade muustrit.

Kõik need osakesed suhtlevad üksteisega teiste osakeste, vastastikmõjusid vahendavate kalibratsioonibosonite kaudu. On 8 gluonit, mis vahendavad *tugevat vastastikmõju*, mis hoiab kvarke prootonites ja neutronites vangis ja seob need osakesed omakorda aatomituumadeks.  $W^+$ ,  $W^-$  ja  $Z$  bosonid omakorda vahendavad *nõrka vastastikmõju*, mis põhjustab muu hulgas radioaktiivset lagunemist ja tuumalõhustumist. Viimaks on olemas foton, valguskvant, mis vahendab *elektromagnetilist vastastikmõju*, mida te väga suure tõenäosusega käesoleva teksti lugemiseks kasutate. See, kuidas standardmudeli vastastikmõjud töötavad, on tõeliselt ilus: vastastikmõjud osakeste vahel on pelgalt teooriale sisemiselt omaste sümmeetriate tagajärg. See tuleneb sellest, et standardmudel on oma juurtelt  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  kalibratsioonirühma<sup>16</sup> Yang-Millsi teooria. See

<sup>16</sup> Tegemist on kolme eri tüüpi sümmeetria kooskõla või pigem isegi koosavaldumisega. Neist vist ainsana on tavanähtuste maailmas lihtsad analoogid  $U(1)$  tüüpi sümmeetrial. Sellist võib ette tulla kõikides olukordades, kus mingi füüsikaline suurus on väljendatav (kahemõõtmelise) vektoriga. Näiteks tuule kiiruse ida-lääne- ja põhja-lõunasuunalised komponendid. Või siis tuulelainete levimise kiiruse samasugused komponendid. Neid saab väljendada tuule (või lainete) kiiruse ja suuna kaudu. Paljudel juhtudel on oluline vaid kiirus, kuid mitte suund. Näiteks tuulegeneraatorid oskavad end pöörata just

tähendab sisuliselt, et osakeste vastastikmõjusid ei saa meelevaldselt valida. Kõnesolev sümmeetria määratleb seda vahendavate osakeste omadused ja selle, kuidas need vastastikmõjustuvad ülejäänud standardmudeliga. Sümmeetriad ütlevad meile, kuidas osakesed vastastikmõjustuvad. Mõõtmised omakorda ütlevad, kui tugevad need vastastikmõjud on – *a priori* seda öelda ei saa.

Kvarkide, leptonite ja kalibratsioonibosonite kõrval on veel üks osake, mis eksperimentaalselt avastati alles 2012. aastal CERN-i suures hadronite põrgutis – Higgsi boson. See looduse fundamentaalne ehituskivi mängib füüsikas väga olulist rolli, kuna põhjustab standardmudeli kalibratsioonirühma  $SU(2) \times U(1)$  osa spontaanset sümmeetriarikkumist.

Et mõista, mida see tähendab, võtame ette veel ühe tobeda näite. Kõigepealt on vaja teada, et kui on olemas Higgsi osake, siis peab olema ka Higgsi väli. Ja usaldage meid, kui ütleme, et Higgsi boson on skalaarne osake, mis tähendab, et selle väljaga on igas aegruumi punktis seotud n-ö Higgsi väärtus. Mõelge sellest nii, nagu aegruum oleks tuba ja Higgs oleks temperatuur; mõodate igas ruumpunktis temperatuuri ja see annab teile välja. Siis võite leida toa keskmise temperatuuri ning kirjeldada oma välja keskvärtuse ja sellest kõrvalekallete kaudu. Sisuliselt nii me kvantväljateoorias teemegi: kirjeldame osakesi vastavate väljade kohalike ergastustena.

Higgsi välja puhul on tähelepanuväärne, et tühja ruumi keskmine temperatuur (erialakeeles tuntud *vaakumi keskvärtusena*) ei ole null. Et saada aru, mida see tähendab, kujutage standardmudeli sümmeetriarühma ette pallina. Kui palli pöörata, näeb see ikka ühtemoodi välja, hoolimata sellest, kuidas seda pöörame. Selles väljendubki sümmeetria olemus. Nullist erinev Higgsi vaakumi keskvärtus on nagu palli keskelt läbi torgatud pulk. Nüüd jääb pall muutumatuks ainult siis, kui pöörata seda ümber pulga poolt määratud telje. Sümmeetria on olemas, kuid see on osaliselt rikutud. Kui standardmudel kui teooria sümmeetriarühm on  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , siis Higgsi bosoni „keskväärtus“ ei ole sümmeetriiline  $SU(2) \times U(1)$  rühma all. Vastavad rühma teisendused lihtsalt

---

sobivasse suunda ning elektri tootmisel on oluline vaid tuule kiirus, aga mitte suund. Nii saame toodetud elektrienergia kaudu mõõta, kui tugev on tuul, aga mitte seda, millisest suunast see puhub. Samas situatsioonis oleme siis, kui mõõdame lainekõrgust rõhuanduriga. Teisalt, tuule suuna teadmine ei anna meile sellistel puhkudel ka mingit lisateavet selle kohta, kui palju seade suudab energiat toota. Tuule suuna muutumine nii, et kiirus püsib sama, ei muuda ka elektri tootmist. Sellistel puhkudel öeldakse, et tuul (tehniliselt tuult kirjeldav vektorväli) on  $U(1)$  sümmeetriaga. Eesti keeles tähendab see, et kui pöörame seadet, mis oskab mõõta vaid tuule kiirust, siis tulemus ei sõltu sellest, kui palju ja mis suunas seadet pöörame (teisisõnu, on invariantne pöörete suhtes). Sama omadus on elektromagnetväljal. Kõrgemat järku sümmeetriad  $SU(2)$  ja  $SU(3)$  on seotud invariantisusega pöörete suhtes teatavates keerukamates mitmemõõtmelistes ruumides – toim.

ei jäta vaakumi keskvärtust samaks. Nad tahavad seda muuta teiseks, kuigi võrdväärseks väärtuseks. Selline omadus põhjustab spontaanset sümmeetriarikkumist, millest kerkivad esile parameetrid, mis on kõik võrdelised Higgsi vaakumi keskvärtusega – osakeste massid.

Kvargid, leptonid ja enamik kalibratsioonibosoneid vastastikmõjustuvad Higgsi bosoniga. Kui standardmudeli sümmeetria poleks rikutud (st Higgsi keskvärtus oleks null), oleksid need elementaarosakesed massitud, kuna sümmeetria ei lubaks võrranditesse massi sisse kirjutada. Spontaanse sümmeetriarikkumise korral aga annab Higgsi välja kirjeldus nii keskvärtuse nullist erinemise tõttu kui ka kohalike selle välja häirituste kaudu automaatselt massi kõigile osakestele, mis on sellega vastastikmõjus. Iga osake saab massi, mis on vaakumi keskvärtuse (mis, muide, on umbes 246 GeV), selle osakese ja Higgsi välja vahelise vastastikmõju tugevuse korrutis. Müüonid ja taud on siis täpselt nagu elektronid, kuigi nende vastastikmõju Higgsi väljaga on vastavalt 200 ja 300 korda tugevam. Gluonid jäävad massituks, kuna Higgsi väli nendega ei vastastikmõjustu. Footon on jällegi kalibratsiooniboson, mis on seotud vaakumi ooteväärtuse poolt rikutud algse sümmeetria jäänukiga: see vastab palli pööretele ümber pulgaga määratud telje. Lihtsalt elegantne.

### **Geomeetria? Täna ei, ma üritan loobuda**

Hea küll, see ongi kõik, mis puudutab standardmudeli toimimist. Eksperimentaatorid näevad palju vaeva, et seda maatasta teha, kasutades elutervet empiirilist lähenemist. Siiani ei ole õnnestunud standardmudeli ennustustest leida kõrvalekaldeid, mis paneksid teoreetikuid imestusest kulmu kergitama. Oma maailmas töötab standardmudel täiuslikult ja selle ainus mure on, kui kauaks see nii jääb. Pealegi, mis saab selle nimest, kui see ei ole kord enam osakestefüüsika standard? Loodame väga, et mõlemad küsimused saavad varsti vastuse. Sellest hoolimata on üks asi selge: standardmudel ei ütle meile midagi aegruumi enese kohta, vaid lihtsalt eeldab, et aegruum on olemas. Tulles tagasi meie näite juurde, siis standardmudel seletab, mis juhtub, kui toa keskmine temperatuur erineb nullist, aga tuba peab juba olemas olema.

Tähelepanek, et standardmudel võib olla ebatäielik, tuleb siis, kui me püüame selle abil seletada nähtusi, mis toimuvad palju suuremates mõõtkavades kui osakestefüüsika. Vaadake näiteks üles. Ei, mitte Päikese poole, see kahjustaks teie silmi ja Päikese standardmudel, mis on segu osakestefüüsika enda standardmudelist ja Newtoni füüsikast, töötab suurepäraselt. Peame vaatama suuremaid vahemaid, kaht viimast redelipulka joonisel 1, mis on kosmoloogia pärusmaa.

Et seda teha, peame kõigepealt otsa vaatama n-ö elevandile elutoas – gravitatsioonile. Gravitatsiooni standardmudelis ei ole ja seda kirjeldab ainult klassikaline teooria nimega üldrelatiivsusteooria. Mida tähendab „klassikaline“? Saja-

aastane üldrelatiivsusteooria on tõepoolest füüsikakirjanduse klassika. Meie mõtleme selle all, et üldrelatiivsusteooria seletab, kuidas gravitatsioon töötab, määratlemata seda vastastikmõju vahendavate kvantide omadusi, st see ei ole kvantteooria. Kuidas siis gravitatsioon töötab, küsite teie. Rahvatarkuse järgi on saladus geomeetrias. Kujutage aegruumi ette voodina, millel on kena, sile ja täiesti tasase pinnaga värske lina. Mis juhtub, kui panete voodi peale mõne asja? Muidugi vajutab see lina lohku. Päris rasked asjad vajutavad lina niivõrd auku, et lähedal olevad asjad kukuvad sinna sisse. Nad vajuvad lohkudesse nii, nagu teie komistades maha kukute või nagu Maa kukub pidevalt ümber Päikese.

Üldrelatiivsusteooria põhiline objekt on meetriline väli (lühidalt meetrika), mis ütleb meile, kuidas arvutada kaugusi ja nurka kahe suuna vahel. Meetrika elab muutkonnal,<sup>17</sup> mis on matemaatikute peen mõiste kirjeldamiseks ruumi, mille üldine kuju võib olla veider, kuid mis lähedalt vaadatuna näeb välja nagu eukleidiline ruum.<sup>18</sup> Maa on ligikaudu kerakujuline, kuid sellest hoolimata on olemas suured tasandikud. Väikestel skaaladel ei näe me kõverust keral, millel me elame. Seetõttu tundub, nagu Maa olekski tasane ja see ajab osa inimesi mõnevõrra segadusse. Muutkonda võib niisiis defineerida kui kõige üldisemat ruumi, kus saavad elada lamemuutkondlased.

Kui eeldame, et muutkond on olemas, saame sellele asetada hulga erinevaid asju: standardmudeli osakesi, meid, teid, galaktikaid ja nii edasi. Iga objekt jätab muutkonnale lohu, mille „sügavus“ on võrdeline selle objekti kogueenergiaga, kaasa arvatud kuulus  $E = mc^2$  panus tänu massile  $m$ . Nagu igaüks teab, on  $c$  valguse kiirus. Objektid niisiis muudavad muutkonna kuju ja selle meetrikat. Muutkond omakorda ütleb neile objektidele, kuidas liikuda. Neid tõmbab gravitatsioon tänu muutkonna lohkudele, mida matemaatikud nimetavad kõveruseks. Üldrelatiivsusteooria järgi kõverdab aine aegruumi ja aegruumi kõverus (mida väljendab meetrika) muudab geodeetilisi kõveraid,<sup>19</sup> mida mööda aine liigub.

Võiksime siis öelda, et tühjas universumis pole gravitatsiooni, kuna seal pole midagi, mis muutkonda kõverdaks. Kõigepealt peaksime kokku leppima, mida tähendab sõna „tühi“. Kui anname vaakumile mingi energiatiheduse ja ootame küllalt kaua, ütlevad üldrelatiivsusteooria võrrandid, et viimaks jõuab universum kiireneva paisumise faasi, mida käivitab vaakumi energiatihedus (varem mainitud kosmoloogiline konstant  $\Lambda$ ). Kosmoloogilised mõõtmised ütlevad meile, et praegu see toimubki, kuna vaakumi energia on lõviosa (ligikaudu 70%) praegusest universumi energiast. Ülejäänud osa tuleb ainest, kuid peamiselt mitte

<sup>17</sup> Joone, pinna, kolmemõõtmelise ruumi jne üldistus – toim.

<sup>18</sup> Ehk kõige tavalisem kahemõõtmeline pind või kolmemõõtmeline ruum, milles elame – toim.

<sup>19</sup> Ka geodeetiline joon, mis nt künklikul maastikul väljendab lühimat teed kahe punkti vahel; Maal näiteks suuring(joon) – toim.

sellest ainest, mida kirjeldab standardmudel, vaid hoopis ainest, mis ei kiirga ega peegelda valgust, mistõttu füüsikud kutsuvad seda üsna loominguliselt tumeaineks. Kosmoloogilist konstanti nimetatakse üldjuhul, kui see võib muudata, *tumeenergiaks*.

Kuna tumeaine ja tumeenergia olemus on keeruline mõistatus, millest kumbki on väärt vähemalt Nobeli auhinda, kulutavad füüsikud suure osa oma ajast neid lahendada üritades. Meie vaatepunktist pole tumeenergia ja tumeaine siiski fundamentaalsed probleemid. Lõppude lõpuks tulenevad need asjaolust, et standardmudelit sunnitakse seletama kosmoloogilisi mõõtmisi, mis on tehtud eeldusel, et üldrelatiivsusteooria kehtib. Nii nagu standardmudel, ei seleta üldrelatiivsusteooria, mis on aegruum. See lihtsalt eeldab, et on olemas muutkond, mis on kõverdumisaldis. Seegi punkt on vaieldav, kuna üldrelatiivsusteooriast on mitmeid variante, mis seletavad gravitatsiooni erinevate geomeetria abil. Nii on nn uue ja uuema üldrelatiivsusteooriaga (me teame küll, kuidas need nimed kõlavad!). Need kirjeldavad sama gravitatsioonifüüsikat, kuid tasastel muutkondadel ja mitte kõveruse, vaid teiste geomeetria omaduste abil.

Mis siis on aegruumi geomeetria? Näib, et vastus sõltub sellest, kelle käest küsida. Meie arvame, et aegruumil kui sellisel geomeetria ei ole. Nagu juba ütlesime, on geomeetria koos meie sõbra muutkonnaga ainult meie peas. Võib juhtuda, et tumeaine ja tumeenergia küsimuste lahendused ei peitu ei standardmudelis, üldrelatiivsusteoorias ega üheski hulgast muudatustest, mida füüsikud viimase 100 aasta jooksul on välja pakkunud. Vahest on need salapärased asjad kõigest millegi sümptomid, mis toimub sügavamal tasandil kui see, mida meie praegused teooriad kirjeldavad. Võib-olla isegi just sellel tasandil, mida standardmudel ja üldrelatiivsusteooria oma aluspõhjaks kasutavad – eeldus aegruumist. Kui aegruum on midagi, mida ei ole lihtsalt olemas, et me võiksime seda oma teooriates kasutada, kust see siis tuleb? Millest see tehtud on? Lõppude lõpuks on meie naiivsel ettekujutusel maailmast teatud piirini tõepõhi all: nii üldrelatiivsusteooria kui standardmudel on oma kehtivusvaldkondades väga edukad teooriad. Niisiis on selge, et mida tahes me oletame, peab see õigel piirjuhul taas andma praeguse ettekujutuse. Muidu see lihtsalt ei kirjeldaks meie universumit.

## **Energia on põhiline**

Unustage hetkeks geomeetria ja küsige hoopis, mida me tegelikult teame universumi kohta. Kõike seda, mida teame empiirilisest füüsikateadusest, oleme õppinud vastasmõjust muude universumi asjadega. Füüsikas vahendavad interaktsioone osakesed, mis põhimõtteliselt on *väljade* kvandid. Väljad järgivad põhivõrrandit  $\mathbf{DF} = \mathbf{M}$ . See ütleb, et  $\mathbf{F}$  allikaks on interakteeruv aine  $\mathbf{M}$ . Just väljad on need, mida mõeldakse, nagu allpool ka rõhutame.

Kui räägime näiteks elektromagnetväljast, siis selle allikaks on elektrilaengute



vool. Gravitatsiooniväli  $\mathbf{F}$  käitub sarnasel viisil. Tema allikaks on energia, mis – nagu teada – on ekvivalentne massiga. Seega, nii nagu elektron indutseerib enda ümber elektrivälja ja interakteerub mõne teise elektroniga Coulomb'i seaduse kohaselt, annab Maa mass, vaadatuna ülalpool võrrandis  $\mathbf{M}$  allikana, gravitatsioonivälja  $\mathbf{F}$  lahendi, mis lõpeb puult õuna kukkumisega Newtoni seaduse kohaselt. Kuna valem  $\mathbf{DF} = \mathbf{M}$  on igal juhul muutumatu, võime sellest näitest järeldada, et kuna elektrivoolud indutseerivad enda ümber magnetvälja, siis peaks analoogiline gravitatsiooniväli olema genereeritud massi ja energia voolust, st impulsist. Mõlema interaktsiooni puhul võivad isegi välja allikate puudumisel vaakumis levida lained.<sup>20</sup> Valguse ja elektromagnetlainete analoogiks on ruumis levivad fluktuatsioonid, mida kutsutakse gravitatsioonilaineteks. Seda kõike teati gravitatsiooni dünaamika kohta ja isegi kontrolliti eksperimentaalselt, sealhulgas gravitatsioonilainete osas, mille avastamise eest saadi 2017. aastal Nobeli preemia.

Puudu oli aga elektrilaengu täpne gravitatsiooniline analoog. Vaadeldavaid laenguid, mis iseloomustavad interaktsioone, kutsutakse jäävateks laenguteks. Nende suuruste jäävus on oluline omadus, ilma milleta ei saaks tegelikult neist rääkida mõistlikul viisil. Elektroni jaoks on elektrilaeng hästi defineeritud omadus. See on konstantne ja ühesugune kõigi elektronide jaoks. Kui laeng ei oleks jääv ja selle suurus või märk võiks meelevaldselt muutuda, oleks näiteks võimatu kasutada teda elektronide loendamiseks. Sama peaks kehtima ka energia jaoks, mis on gravitatsioonilisele vastasmõjule vastav laeng.

Energia jäävuse seadus tundub olevat füüsika põhiseadus. Energia võib muuta oma vormi paljudel veidratel viisidel, aga ta ei tohiks tekkida eikusilt ja kaduda eikuhugi – see peaks kõlama mõistlikult ja võib-olla isegi tunduma ilmsena. Paljude füüsikateoreetikute jaoks ei ole see aga sugugi ilmne olnud ning tõepoolest oli see vastuolus valitseva geomeetrilise paradigmaga. Tavaseisukohtade järgi on gravitatsioon aegruumi kõverus ja ei ole energia mõistet, mis oleks kõveras aegruumis jääv suurus. Energia jäävuse seadus seega rangelt võttes ei kehti, vaid toimib üksnes kasuliku lähendina, kui jätta kõrvale gravitatsioon tegelikus maailmas. Seega usuti, et energia ei ole fundamentaalselt vaadeldav suurus.

Meie jaoks oli see vaatenurk vastuvõetamatu. On mõistlik, et samas universumis on olemas nii energia kui ka gravitatsioon. Me ei saanud mõtestada veel fundamentaalsemat füüsikat, mille poole pürgime, kui neid mõistlikke arusaamasid ei saaks sinna ekstrapoleerida. Jõudsimme järelduseni, et kui universumi geomeetriline pilt ei võimaldanud energiat käsitleda vaadeldava suurusena, siis järelikult oli sellest pildist midagi puudu. Kuigi teaduses on kujunenud justkui peavoolutööstus, mis sepitseb uusi lisaomadusi gravitatsiooni standardsesse geomeetrilisse pilti, siis harva mõeldakse, et see geomeetriline formulatsioon

---

<sup>20</sup> Lihtsalt selle tõttu, et neil võrranditel on olemas lainelevi kirjeldavad lahendid – toim.

nõuab mõttekamat alust. Selle üks aluseid oli dogma, et energia juhuslikkus väljendab looduse põhiomadusi, aga mitte gravitatsiooniteooria puudujääki.

On huvitav täheldada, et ei see standardne käsitlus ega ka geomeetiline tõlgendus ei lange päris kokku algse üldrelatiivsusteooriaga (Einstein, 1916). Einstein ei pidanud gravitatsiooni geometriseerimist oma teooria eriliseks saavutuseks, vaid hindas märksa olulisemaks hoopis gravitatsiooni ja inertsii ühendamist. Ta pakkus välja gravitatsioonilise energia definitsiooni ja kaitses seda aastaid innukalt oma paljude kolleegide kriitika eest. Samas oli kriitikal mõtte sees, sest algne käsitlus ei saanud anda ideele matemaatiliselt kooskõlalist väljendust. Lõpuks aga algsed ideed unustati ja need sügavad küsimused heideti vastusid saamata kõrvale, nii et geomeetiline dogma jäi peale.

Aga vaatame seda teaduslikku ketserlust ja pöördume nende küsimuste juurde tagasi. Välja  $\mathbf{F}$  ei olnud neis gravitatsiooni algvõrrandites. Küll aga oli teist sorti objekt  $\mathbf{Q} \neq \mathbf{F}$ , mille jaoks ikkagi  $\mathbf{DQ} = \mathbf{DF}$ . Gravitatsioonilise dünaamika võrrandit vaadati kujul  $\mathbf{DQ} = \mathbf{M} + \mathbf{I}$ , kus  $\mathbf{I}$  oli meetrikast konstrueeritud energiavoog (Einstein, 1916). Tuletame meelde, et meetrika on geomeetiline kontseptsioon, pigem kokkulepe, mille abil defineeritakse ja mõõdetakse aegruumis kaugusi. Seega on tõepoolest kasulik tuua ta võrranditesse sisse, sest see võimaldab meil käsitleda kaugusi ja ajalisi kestusi ning kirjeldada pindalasiid ja ruumalasiid. Pangem tähele, et võime selle võrrandi kirjutada ümber kujul  $\mathbf{DF} - \mathbf{I} = \mathbf{M}$ . Üksnes materiaalne allikas  $\mathbf{M}$  jääb võrrandi paremale poole. Tuleb välja, et vasakul pool on  $\mathbf{DF} - \mathbf{I}$  täpselt geomeetiline kõverus  $\mathbf{G}$ , mis on meetrika poolt täiesti määratud, nii et  $\mathbf{DF} - \mathbf{I} = \mathbf{G}$ . Seega on algne võrrand ekvivalentne võrrandiga  $\mathbf{G} = \mathbf{M}$ . Kui tuletada meelde üldrelatiivsusteooria väljavõrrandite kuju, siis on see kindlasti adekvaatne selles versioonis (võib-olla  $n$ -õ tensorikujul, kus ilmuvad kreeka indeksid diferentsiaalvormide asemel, mida on siin mugavam kasutada). Aga aitab detailidest. Mida see kõik tähendab?

Standardvõrrandi  $\mathbf{G} = \mathbf{M}$  alusel pidi üldrelatiivsusteooria tuumaks olema, et „materiale ütleb aegruumile, kuidas kõverduda, ja kõver aegruum ütleb materiale, kuidas liikuda“. Me ei väida, et see on vale. See lihtsalt ei puuduta füüsikat otseselt ega hõlma relatiivsuse printsiipi ja teooria algseid kavatsusi. Teistel interaktsioonidel on samuti geomeetrilised tõlgendused. Selleks sobivat matemaatilist raamistikku kutsutakse kihtkondade diferentsiaalgeomeetriaks. Nende interaktsioonide füüsika on otse läbinähtav põhivõrrandist  $\mathbf{DF} = \mathbf{M}$ . Maxwelli teooria puhul ütleb see, et „laengud tekitavad elektrivälja ja elektriväli liigutab laenguid“. Täpsem lause sisaldab voolusiid puhtalt staatiliste laengute asemel ning elektromagnetvälja puhtalt elektrivälja asemel. Aga mida ütleb see põhivõrrand gravitatsiooni korral? Maxwelli juht puudutas üksnes laetud materiat, kuid gravitatsioon mõjutab iga materiale vormi, sest – mõneti lihtsustades – materiale on energia. Niisiis on „kõik tekitab energiavälja ja energiaväli liigutab kõike“ asjakohane.

Tõepoolest, geomeetria on seega olemas üksnes meie peas. Meetrika on meie väljamõeldis. Võib-olla meie intuitsiooni jaoks kategooriline, aga siiski kõigest abstraktsete joonlaudade kogum, mille oleme välja mõelnud, aga mitte miski, mis on „kuskil olemas“. Ta nõuab neid **I** poolt kirjeldatud fiktiivseid energiasid, et oma olemasolu toetada. Gravitatsioonist kaob müstika, kui puhastada see teoorias mittemateriaalsest, mittevaadeldavast suurusest **I**. See suurus püsib seal terve sajandi.

Alles jäänud osa, välja **F**, võib kutsuda vahest täpsemalt (aga kohmakamalt) energo-inertsiaalseks või gravito-inertsiaalseks väljaks. Einstein nimetas „oma elu rõõmsaimaks mõtteks“ mõistmise, et inimene ei tunne vabalt langedes oma kaalu. Sõit ülespoole kiirenevalt liikumas liftis ja gravitatsiooni allapoole suunatud tõmme, kui inimene on ise paigal, tunduvad ühesugustena. Need on gravitatsiooni ja inertsiaalkvivalentsuse näited. Ekvivalentsuspriinitsiip toodi tihti argumendiks energia defineerimise võimalikkuse vastu fundamentaalteoorias. Ei ole võimalik eristada gravitatsioonilisest „jõust“ inertsiaal jõudusid ja seega ei ole ka võimalik üheselt siduda energiat üksuguse „jõuga“. Füüsikutena ei peaks me aga küsima, kuidas vaatleja liftis tõlgendab maailma mingite tehnilike mõistete kohaselt, mille ise oleme välja mõelnud. Küsimus, mida peame küsima ja tahame küsida, on: mida vaatleja mõõdab? Vastus on, et välja **F**.

Füüsika käsitleb väljasid. Füüsika fundamentaalteooriad on väljateooriad. Ainuke viis, kuidas praktikas detekteerida ja kvantifitseerida elektri- ja magnetväljasid. Millegi kaalumise – näiteks meie endi või planeedi Maa massi-energia – mistahes viisil tähendab lõppude lõpuks selle massi-energia kogumi tekitatud gravitatsioonivälja (või energo-inertsiaalse välja) mõõtmist, uurides tema mõju mingile teisele energeetilisele objektile, olgu selleks vedru või kaal. See kehtib igat sorti energia jaoks, olgu see ilma massita footoni oma või kuulugu see mustale augule, mis on singulaarne massi kontsentratsioon. See kehtib energia jaoks tema paljudes tuntud vormides ja vahest ka tundmatutes vormides. Mõistlik on lähtuda sellest, et on olemas universaalne fundamentaalne vaadeldav suurus, mida kutsutakse energiaks. Gravitatsioon ei muuda seda suurust mõttetuks, universumi paisumine ei riku tema jäävust. See on põhiline.

### **Singulaarne joon aegruumis**

Gravitatsiooni geomeetrilised alused pandi paika suure õpetlase Johann Christian Martin Bartelsi (1769–1836) poolt tollases Dorpati, praeguses Tartu ülikoolis. Ta õpetas kaht matemaatikut, kes hiljem (kumbki iseseisvalt) tegid läbimurde geomeetriateni, mis rikkusid Eukleidese „Elementide“ viiendat postulaati. Tõepoolest, Martin Bartels ise juhatas noore C. F. Gaussi matemaatikasse. Kuid kõige huvitavam oli teada saada, et Bartels, kellest hiljem sai Wilhelm Struve äi, oli esi-

mene, kes võttis kasutusele põhilise tööriista (matemaatikas tuntud kui reeper<sup>21</sup>), et mõista universumi geodeetilisi kõveraid. Sellel ideel põhinevat üldrelatiivsusteooria tööriista kutsutakse (anakronistlikult, järgides Einsteini ja Weyli sõnastust) ka raamiks (*frame*). Bartels ja tema õpilased töötasid välja liikuva kanoonilise teljestiku<sup>22</sup> meetodi. Füüsikas võtab selline liikuv teljestik (kolmtahukas) põhirolli taustsüsteemi, raami või reeperi konstrueerimisel, mille saab sobitada vaatlejaga igas ruumipunktis. Hiljem populariseerisid saksa ja prantsuse matemaatikud seda lihtsat tööriista ning arendasid sel alusel geomeetriat edasi. Liikuva teljestiku üldistusi kolmemõõtmelisest ruumist neljamõõtmelisse aegruumi tuntakse tänapäeval aegruumi teljestiku (*tetrad*), *Vierbeini* või *repère mobile*'i nime all.

Praegustest tüüplähenemistest kvantgravitatsiooni teoriasse on silmuskvantgravitatsioonis fundamentaalseteks pinnaelementideks liikuvate kolmtahukate paarid, mida nimetatakse tihendatud triaadideks, samas kui kümne- ja kõrgemamõõtmelised stringiteooriad on geomeetrilise dogma radikaalsemad väljendused (Penrose, 2016). Katse jõuda lõpmatusse on inimeste vaev ning tee sinna on sillutatud vigadega. Märkimisväärne näide on Harald Keres, kes lisaks fenomenaaalsele hulgale muudele asjadele algatas Tartu ülikoolis relativistliku gravitatsiooniteooria uurimise. Ta oli üks haruldastest mõtlejatest, kes pööras tähelepanu kiirenduse relatiivsusele (Oziewicz, 2014). Kasutades füüsikalisi mõisteid, nagu vabalt langevad osakesed ja kellad, arendas ta inertsiaalseid raame, mida saab kasutada Einsteini gravitatsiooniteoorias, et selle kaudu jõuda Newtoni gravitatsiooniteooriani. Üks oluline tähelepanek on, et üldiselt ei saa need inertsiaalsed raamid olla jäigad, st need saadavad üksnes koordinaatide ümbertähistamist. Kui mõistame õigesti, siis sellisele mitte-jäikusele vastav matemaatiline mõiste on mittehologoomsus,<sup>23</sup> mille füüsikaline vaste on erinevate vaatlejate suhteline kiirendus.

Galilei relatiivsuspriintiip ja Einsteini erirelatiivsuspriintiip on ekvivalentsetes üksnes nende vaatlejatele, kes liiguvad ühtlase kiirusega. Viimase priintiibi tänapäevast tähendust näitlikustatakse liftiga, samas kui esimest iseloomustas juba Galilei ise liikuva laeva näitel. Kui laevakabiinis oleksid mõned liblikad ja kärbsed, siis nende teekond õhus oleks sõltumatu laeva enda liikumisest. Selle tähelepaneku lihtne, ent sügav tagajärg on, et ei leidu absoluutset paigalseisu ega absoluutset liikumist. Teisisõnu, asjad võivad liikuda üksnes üksteise suhtes.

<sup>21</sup> Süsteem, mille põhjal määratakse punkti koordinaadid ruumis (aegruumis ja ajas) – toim.

<sup>22</sup> Piki joont liikuv teatavas mõttes lihtsaim kolmest ühikvektorist koosnev teljestik kolmemõõtmelises ruumis. Diferentsiaalgeomeetrias, sh geodeetiliste joonte uurimisel, esitatakse selle kaudu joone lokaalne siht, kõverus ja vääne lihtsaimal kujul Bartels-Frenet' (ka Frenet'-Serret') valemitega. Need on praeguseni joonte diferentsiaalgeomeetria aluseks – toim.

<sup>23</sup> Mittehologoomsed on süsteemid, mille seisund sõltub teest, mille kaudu seisundini jõuti – toim.

Relatiivsusprintsiiibi täpsem väljendus on see, et füüsikaseadustel on kõigis inertsiaalsetes taustsüsteemides sama kuju. Selle üks aluseid on tähtis kaasaegne füüsikaseadus, et valgus liigub vaakumis kiirusega, mis on kõigi vaatlejate jaoks ühesugune. See seadus fikseerib vaakumi kausaalse struktuuri erirelatiivsussteooria kohaselt. See printsiiip läheb aga kaduma, kui astuda edasi üldrelatiivsussteooriasse, sest selles gravitatsiooniteoorias ei ole mittetriviaalseid inertsiaalseid taustsüsteeme. Akadeemik Keres oli esimeste hulgas, kes mõistis neid fundamentaalseid probleeme ja hakkas neid lahendama.

Tartu ülikooli teadlased jätkavad gravitatsiooniteooria valdkonda teedrajavate panuste andmist. Näiteks pärjati 2020. aastal riigi teaduspreemiaga – aasta-preemiaga täppisteaduste vallas – Laur Järv, Manuel Hohmann ja Margus Saal töö eest „Gravitatsiooni geomeetrilised alused“. Kui see rühm alustas gravitatsiooni alternatiivsete geomeetrilise kirjelduste uurimist, kõlas mõiste „teleparalleelne“ gravitatsiooniteoreetikule sama eksootiliselt kui näiteks botaanikule. Teleparalleelne geometria ei ole mitte kõver, vaid tasane. Siiski võib sellistel geometriatel olla mittetriviaalseid omadusi, näiteks kristallstruktuuri või pideva keskkonna mehaanika uuringutes esinevates „väände“ ja „mittemeetrisuse“ kontseptsioonides. Nagu eespool mainitud, saab üldrelatiivsussteooriat ekvivalentselt formuleerida emma-kumma geomeetrilise omaduse alusel. Sage-damini tehakse seda kõveruse kaudu, mis viib n-õ gravitatsiooni geomeetrilise kolmsuseni (Beltrán jt, 2019). Mitte-minimaalsed üldrelatiivsussteooria dünaamilised laiendused hargnesid alternatiivsetes geometriates uuteks teooriateks ning Tartu ülikooli teadlased on jõudnud neis laiendustes paljude huvitavate uuringuteni.

Tänu Tartu gravitatsioonitöörühma ning keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi (KBFI) interdistsiplinaarsele koostööle on teaduse tippkeskuse TK133 „Tume universum“ ja rühmagrandi PRG356 „Gravitatsiooni kalibratsiooniteooria: ühendamine, laiendused ja fenomenoloogia“ raames osutunud võimalikuks teha kindlaks teleparalleelse gravitatsiooni roll ruumi, aja ja aine fundamentaalsemas teoorias. Maailm on niisugune, et kaks lõpmatust joonisel 1 ei ole lahus, vaid on ühe ja sama tundmatu kaks erinevat külge. Paigutasime nad ühele joonele, aga tegelikkus on mitte ring, vaid hobuseraud. Üksnes universum on piisavalt suur laboratoorium, et uurida füüsikat kõrgeimates energiates, mis vastavad väikseimatele pikkustele. Jagatis lõpmatusega, null, on mitte lihtsalt loomulik põhiolek fundamentaalsemale osakesteooriale, mis üritab jõuda kaugemale standardmudelilt, vaid ka loomulik kosmoloogiline algtingimus universumi ratsionaalses mudelis.

Tuletame meelde põhivõrrandi  $\mathbf{D}\mathbf{F} = \mathbf{M}$ . Teleparallelism tähendab, et operaator  $\mathbf{D}$  rahuldab tingimust  $\mathbf{D}^2 = \mathbf{0}$ . Ei ole kõverust, mis takistaks meid moodustamast taustsüsteemi triviaalses geometrias. Üldiselt ei oleks selline taustsüsteem aga inertsiaalne, mis tähendab, et ta tuleks siduda mingi suurusega  $\mathbf{I} \neq \mathbf{0}$ , ja seega peame arvesse võtma teleparalleelse  $\mathbf{D}$  mittetriviaalseid omadusi. Erinevate

vaatlejate taustsüsteemide vahelist teisendust saab visualiseerida aegruumi geometria ümbervormimisena. Teisendused, mis seovad ühe inertsiaalse vaatleja mõõtmised teise inertsiaalse vaatleja omadega, genereerivad geometrias mittemeetrilisust. Teisendused, mis seovad inertsiaalseid ja mitteinertsiaalseid vaatlejaid, tekitavad aegruumi väänet. Tehnilises kõnepruugis annab viimane seose väände ja taustsüsteemi mittehologoomsuse vahel. Füüsikaline sisu on selles, et ei piisa üksnes painutamisest, vaid on vaja ka väänamist ja moonutamist, et tuua teooriasse kiirenduse suhtelisus.

Üleminek geometrilistelt mõtetelt ratsionaalsetele gravitatsiooni alustele leidis aset siis, kui teooria tuletati aksiomaatilistest algprintsipiidest, konsulteerides Manuel Hohmanniga töö mitmesuguste matemaatiliste küsimuste osas. Üks esimestest tulemustest oli põhivõrrandi  $\mathbf{DF} = \mathbf{M}$  tuletamine. See ei ole miski, mida saame eeldada, vaid on lihtsalt matemaatilise ime, Poincaré lemma tautoloogiline tagajärg, kombinatsioonis tegeliku maailma tähelepanekuga, et on olemas materia  $\mathbf{M}$ , mis paistab olevat jääv, ehk  $\mathbf{DM} = \mathbf{0}$  (Koivisto jt, 2021). Sellise mõttekäigu tulemus oli, et energia ja impulss ei ole aegruumis ilmuvad suurused. Energia on fundamentaalne. Ruum ja aeg tekivad postuleeritud vaatlejale energia ilmingutena.

Füüsika jaoks oli see uus alguspunkt, miski, mida võime nimetada metageomeetriaks. Üks metageomeetristest juhtprintsipiidest on, et fundamentaalne teooria peab võimaldama nullist põhiolekut. Mitte lihtsalt tühi ruum, vaid ruumi puudumine. On keeruline leiutada fundamentaalsele teooriale nullist veel loomulikumat põhiolekut. Praegustele füüsikateooriatele ei ole selline olek aga kättesaadav, sest nad on olemuslikult geometrilised ja põhiolek on seega alati mingi referentsgeomeetria. Referentsgeomeetria kirjeldab ruumi, vaakumit, kuid kvantväljateoorias on vaakum täis kõiksugust elu. Ta on kõike muud peale elutühja. Kui vaakumis asub mingi väli  $\mathbf{F}$ , siis muutub ta polariseerituks. Osakestefüüsika interaktsioonide teooriad ja tavalised gravitatsiooniteooriad keelduvad loobumast meetrika poolt pakutud geometrisest sõrestikust. Üksnes Diraci elegantne teooria elektronist ja Weyli elegantne teooria neutriinost jäävad eimilleski ellu.

Meie uurimistöö keskendus metageomeetrisele gravitatsiooniteooriale, mis ei eelda meetrika olemasolu, kuid seletab tema ilmnenemise elementaarsematest algtõdedest (Złóśnik jt, 2018). Tartus õppiv doktorant Ernest Michael Priidik Gallagher avastas hiljuti, et mitte üksnes gravitatsioon, vaid üldse kõik võib tekkida eimilleski! Ta konstrueeris „esimest järku eelgeomeetriselise Yang-Millsi teooria“, uut sorti osakestefüüsika interaktsioonide teooria, mis ennustab uut fenomenoloogiat, aga taandub ühel piirjuhul edukalt tavateooriaks ja teisel juhul eimillekski (Gallagher jt, 2022). See vihjab sügavamale arusaamale kvantvaakumist ja avab uued teed kõikide interaktsioonide ühendamiseks. Eelnev väärrib veidi rohkem selgitamist.



**Joonis 2.** Mõõteratas – aegruumi (illusiooni) lähtepunkt.

### **Kroonon (ja Kairon)**

Loodetavasti oleme nüüdseks nõus, et aegruum on tõepoolest viimane rinne. Kuidas me seda aga uurime? Tegelikult võib vastust näha juba aknast, juhul kui parajasti käivad teetööd. Siis võib näha mõnd töömeest, kes kasutab mõõterast (joonis 2). Kui ratas veereb libisemiseta, siis saab töömees pöörete arvust rehkendada vajaliku kauguse.

Aegruum võib ilmuda väga sarnasel viisil: midagi „veereb“ ja selle tulemusena *usume*, et oleme liikunud kahe punkti vahel abstraktses muutkonnas. Kui kasutada mõõteratta asemel mõnd üldisemat kujundit ja üldistada tänava pind abstraktsemaks pinnaks, jõuame matemaatilise aparaadini, mis seob vaatleja nähtud ruumi ja aja ilmutamise abstraktsema kujundi, nn mudelruumi veeremisega. Mudelruumi teisendused muutkonnal veeremisel annavad viisi jätta kõrvale meetrika kui midagi fundamentaalset. Sellises tõlgenduses on meetrika ise lihtsalt teeratta kaugusmõõdiku abstraktne üldistus. Võib minna sammu kaugemalegi ja muutkonna asemel, millel teeratas veereb, pakkuda teeratta, mis „veereb“ väljamõeldud muutkonnal. Seega jäägu kõrvale see fiktiivne muutkond koos mõttega aegruumist *sub specie aeternitatis*.

Meetrika ja muutkonna elimineerimine fundamentaalsete objektide seast annab võimaluse käsitada üht lihtsamat mõistet aegruumi mõistmise alusena. Uuritav objekt on teeratta referentsraadiuse üldistus ja me kutsume seda kroononiks. See on sarnane Higgsi väljaga standardmudelil selles mõttes, et rikub sümmeetriat spontaanselt, torgates pulga läbi sfääri keskpunkti.

Kui seda teeb Higgs, siis teiseneb energia puhtast kiirgusest materiaalsesse vormi nii, et osakesed saavad massi. Kui seda teeb aga kroonon, siis tekivad vaatlejad koos aja ja ruumiga. Higgsi mehhanismi aegruumi tarbeks võib kutsuda kronogeneesiks. Kroonon saab kellaks, kui ta mõõdab teeratta veeremist läbi aja. Nii tekitab kroonon aegruumi kaks aspekti: aja suuna ja liikuva teljestiku ehk kolmtahuka.

See metageomeetiline teooria paigutab vaatleja füüsika fundamentaalsemale tasemele võrreldes sellega, kuhu praegustes teooriates on jõutud. Need võimaldavad metafüüsikalisi lahendeid, aegruume ilma vaatlejata, mis paratamatult tekitavad mitu paradoksi ja on lähtepunktiks mõnele kõige fundamentaalsemale probleemile, mis on takistanud edasiliikumist fundamentaalfüüsikas. Näiteks aja probleem kvantgravitatsiooniteoorias pärineb vastuolust kvantmehaanika aja mõiste (kus aeg on kõigest väline parameeter) ja üldrelatiivsusteooria mõistatusliku aja mõiste vahel (mis on paariline energiale, mis aga omakorda oli seni trotsinud kõiki definitsioone).

Pole isegi tarvis spekulierida kvantteooria osas, et mõista põhimõttelisi raskusi maailma standardses kirjelduses, neljamõõtmelises geomeetrias. Nagu Harald Keres seletas: „[---] relativistlik maailm ometi pole homogeenne ehitusega 4-dimensionaalne kontinuum, vaid  $3 + 1$  dimensionaalne sündmuste agregaat, et igale vaatlejale tema teadvuse igal hetkel maailm omab ruumilise ja ajalise osise, mis on omavahel kaemuslikult nii ebavõrdsed kui iganes võimalik. Tegelikke mõõtmiste korral pole juttugi aja ja ruumi kokkusulamisest Minkowski „uniooniks““ (Kuusk, 2019). Spontaanse sümmeetriarikkumise mehhanism lepib meie teooria realsustajuga.

Teooria pakub huvitava F-i. Parem pool on liikuva kolmtahuka efekt. Vasakul pool on energoinertsiaalne väli. Seega on olemas kaht sorti gravitatsioonilisi väljasid. Üks on tekitatud materia poolt, teine aga tekitatud ruumi poolt. Priidik Gallagheri poolt arendatud osakestefüüsika teooria struktuur on sellega märkimisväärselt sarnane (Gallagher jt, 2022). See sarnasus viitab uuele viisile, kuidas ühendada gravitatsioon nn suurte ühendteooriatega (Georgi, Glashow, 1974). Viimane seletab standardmudeli keerukaid interaktsioonistruktuure kui palju lihtsama struktuuri madalaenergilist väljendust, aga nende teooriatega oli probleeme, mida uus, veelgi suurem ühendteooria võib tulevikus seletada.

Selle suurema ühendteooria fenomenoloogiliste märgete avastamine on saamas meie praeguse uurimistöö fookuseks. Õnneks ennustab nii gravitatsiooni kui ka osakestefüüsika pool selles metageomeetrilises teoorias uusi nähtusi. Kroononi gravitatsiooniline dünaamika rikutud sümmeetriaga faasis imiteerib näiteks üldrelatiivsusteooria lahendeid, mis sisaldavad mõnd välist tumeaine kandidaati. Kroononi teooria ei nõua uusi koostisosi, et seletada selle müstilise nähtuse olemasolu. Tõepoolest, see juhtub hoopis vajamineva välja sisu vähendamisega. Priidik Gallagher jt leidsid huvitava analoogia kosmoloogilise tumeaine ja kvantvaakumi efektiivse magnetisatsiooni ja polarisatsiooni vahel liikudes jõuda metageomeetrilise teooria osakestefüüsika poole. Me ei tea veel, kas see efektiivne materia on tõepäraneim seletus kosmoloogilisele tumeainele, aga kindlasti on see minimaalseim.



Täielikumas metageomeetrilises teoorias peaks abstraktne mõõteratas käima piki keerukamat mustrit ja sisaldama Maxwelli elektromagnetismi täielikku sümmeetriat (mida nimetatakse konformseks sümmeetriaks) ning allesjäävaid interaktsioone standardmudelisis (Baez, Huerta, 2010). See toob mängu kroononi paarilise, veel ühe välja, mida sobivalt kutsutakse kaironiks. Kui kroonon mõõdab kohalike kellade tiksumist, mille vangideks oleme määratud, siis kairon hõlmab muutkonna teistsuguse, globaalse aja mõistega. Kui igavik ilmub hetkega, siis see on *kairos*.

Higgs ja kroonon koos torkavad läbi samadest sfääridest (Baez, 2002). Nende kahe torkega seonduva nähtuse mustrid võisid olla üsna juhusliku kujuga, kuid nad osutusid ühesugusteks. Kas see on juhuslik kokkulangemine, et aegruum on materia sisemise ehituse peegeldus? Võib spekuloida, et samasugune kuju võib veelgi seletada loogikat, mis võib olla vaatleja geneetilise koodi ja ümbrusega interakteerumise aluseks. Sfääride muusikalise veeremise kaudu ilmutab universum end meile nii lähedalt kui kaugelt, sest nii oleme loodud informatsiooni läbi töötama.

## VIITED

Baez, J. C. 2002. The octonions. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 39(2), 145–205, <https://doi.org/10.1090/S0273-0979-01-00934-X>

Baez, J. C., Huerta, J. 2010. The algebra of Grand Unified Theories. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 47(3), 483–552, <https://doi.org/10.1090/S0273-0979-10-01294-2>

Beltrán, J., Heisenberg, L., Koivisto, T. 2019. The geometrical trinity of gravity. *Universe*, 5(7), 173, <https://doi.org/10.3390/universe5070173>

Einstein, A. 1916. Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–822, <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>

Gallagher, P., Koivisto, T., Marzola, L. 2022. Pregeometric first order Yang-Mills theory. *Physical Review D*, 105(12), 125010, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.125010>

Georgi, H., Glashow, S. L. 1974. Unity of all elementary-particle forces. *Physical Review Letters*, 32(8), 438–441, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.32.438>

Koivisto, T. S., Hohmann, M., Marzola, L. 2021. Axiomatic derivation of coincident general relativity and its premetric extension. *Physical Review D*, 103(6), 064041, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.064041>

Kuusk, P. 2019. Aegruum. Ilmamaa, Tartu.

Oziewicz, Z. 2014. Centre-of-mass for the finite speed of light. *Journal of Physics: Conference Series*, 532(1), 012021, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/532/1/012021>

Penrose, R. 2016. *Fashion, Faith, and Fantasy in the New Physics of the Universe*. Princeton University Press.

Złośnik, T., Urban, F., Marzola, L., Koivisto, T. 2018. Spacetime and dark matter from spontaneous breaking of Lorentz symmetry. *Classical and Quantum Gravity*, 35(23), 235003, <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aaea96>

### **Luca Marzola**

Sündinud 31. oktoobril 1983 Ferraras (Itaalia)

2002 L. Ariosto lütseum (Liceo Classico L. Ariosto, Ferrara)

2006 Ferrara ülikool, füüsika ja astrofüüsika (BA)

2009 Ferrara ülikool, teoreetiline füüsika (MSc)

2012 Southamptoni ülikool, füüsika (PhD)

Töötanud aastatel 2012–2017 järeldoktorina Tartu ülikoolis ja alates 2014. aastast keemilise ja bioloogilise füüsika instituudis teadurina. Avaldanud üle 70 teadusliku töö, *h*-index 26 (Web of Science Core Collection andmebaasis).

### **Tomi Sebastian Koivisto**

Sündinud 31. märtsil 1977 Helsingis

1996 Masala gümnaasium

2002 Helsingi ülikool, teoreetiline füüsika (MSc)

2006 Helsingi ülikool, teoreetiline füüsika (PhD)

Töötanud järeldoktorina Helsingi, Heidelbergi, Utrechti ja Oslo ülikoolides, aastatel 2013–2018 lektorina Põhjamaade teoreetilise füüsika instituudis (Nordita, Stockholm) ja alates 2019 Tartu ülikoolis vanemteaduri ja kaasprofessorina. Avaldanud üle 100 teadusliku töö, *h*-index 47 (Web of Science Core Collection andmebaasis).