

Aegruumi käelisus

Tomi Sebastian Koivisto^{1 2 3}

Universumi mõõt ja mõte

Kui püüame mõista universumi ehitust, märkame üsna pea, et maailm, milles elame, on neljamõõtmeline. Et täpsustada, millal ja kus miski toimub, tuleb anda kolm ruumikoordinaati ja üks ajakoordinaat. Matemaatiliselt võiks mõõtmeid olla ükskõik kui palju, ent eriliseks osutub just neli.

Topoloogia uurib ruumi omadusi, mis ei olene mõõtkavadest ega nurkadest, vaid ruumi sidususest ja pidevusest. Topoloogilises mõttes on tähtis, kas kujul on servad, augud või eraldatud osad – mitte see, kui suur või venitatud ta on. Näiteks võib kummist rõngast painutada ja venitada, kuid seni, kuni see ei katke, jääb tema topoloogiline olemus samaks. Kahemõõtmelised pinnad on topoloogiliselt lihtsad. Neid eristab vaid aukude arv. Sfääril pole ühtegi, silindril üks, ja nii edasi. Kolmemõõtmelised ruumid on juba mitmekesisemad, kuid nende struktuur on siiski mõistetav, sest nad seostuvad kindlate kujude ja sümmeetriatega. Neljas mõõde on selles reas eriline. Siin ei ole enam üldist viisi ruumide kirjeldamiseks, ja mõned geomeetrilised meetodid, mis kõrgemates mõõtmetes topoloogiast lihtsustavad, ei tööta. Selle tulemusena tekib erinevus topoloogilise ja sileda ruumi vahel. Kaks ruumi võivad olla sidususe poolest samad, ent erineda oma siledusstruktuuri poolest. Just see võimaldab neljamõõtmelises ruumis eksisteerida loendamatu hulga nn eksootilisi muutkondi: ruume, mis on topoloogiliselt identsed, kuid mille siledus ehk „tekstuur“ on erinev. Kõrgemates mõõtmetes muutub pilt taas lihtsamaks ja korrapärasemaks.

Ka geomeetrias ilmneb neljanda mõõtme erilisus. Neljamõõtmelises ruumis saab pöörded jagada kaheks eriliseks haruks, mis on omavahel seotud, kuid mitte identsed. Neid harusid võib nimetada vasaku- ja paremakäeliseks. Selline jaotus ei ilmne madalamates mõõtmetes ning kaob taas viienda mõõtme lisamisel. Pöörlemisel on alati eelistus: keerame kas päripäeva või vastupäeva. Sama kogeme kruvikeermega, sest on olemas vasaku- ja paremakäelised keermed, mida ei saa omavahel vahetada. Niisugune kahepoolne joon ilmneb looduses korduvalt ja eri mastaapidel, spiraalgalaktikates, tigude kodades ja inimkeha ülesehituses. Molekulidel on oma käelisus, mis määrab nende reaktsioonivõime ja rolli eluslooduses. Bioloogias on aminohapped valdavalt vasakukäelised, suhkrud aga paremakäelised. Fundamentaalses füüsikas avaldub käelisus nii aine ehituses kui ka vastastikmõjudes – selle teema juurde naaseme allpool. Käelisus ei ole kõrvalnähtus, vaid looduse sisemise korra oluline joon.

¹Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Physics, University of Tartu, W. Ostwaldi 1, 50411 Tartu, Estonia.

²National Institute of Chemical Physics and Biophysics, Rävala pst. 10, 10143 Tallinn, Estonia.

³Department of Physical Sciences, Helsinki University, P.O. Box 64, FIN-00014 Helsinki, Finland.

Vaatleme nüüd täpsemalt neljamõõtmelist pöörlemisstruktuuri. Pöörlemine toimub alati tasandil. Kolmemõõtmelises ruumis vastab igale pöörlemistasandile sellega risti olev pöörlemistelg: näiteks x - y -tasandi pöörlemine toimub z -telje ümber. Nii määravad tuttavad x -, y - ja z -teljed kolmemõõtmelise pöörlemisstruktuuri. Neljamõõtmelises ruumis on aga kuus pöörlemistasandit. Nii nagu nelja inimese seast saab valida kuus paari, moodustub neljast koordinaatteljest kuus tasandit. Esmapilgul on veidi keerukam näha, et need tasandipöörded jagunevad kaheks eraldiseisvaks pöördestruktuuriks. Saame valida kuus iseseisvat tasandipööret: iga kolmemõõtmeline pööre seostub neljanda mõõtme suuna ümber tehtava pöördega, mis võib olla päripäeva või vastupäeva. Pööre z -telje ümber seostatakse nüüd kahel viisil pöördega tasandil, mille määravad z -telg ja neljanda mõõtme suund. Kui teha sama ka x - ja y -telgede korral, siis määratleme kaks teineteisest sõltumatut pöördestruktuuri varianti.

Senine arutelu on olnud puhtalt geomeetiline. Füüsikas samastub neljas mõõde ajaga. Me ei näe neljandat eraldi ruumisuunda, vaid kogeme seda ajas kulgeva muutusena. Neljamõõtmeline korraldus avaldub kolmemõõtmelise liikumisena. Niiviisi vastab füüsikalises tõlgenduses z -telje pöörlemine ümber neljanda mõõtme liikumise kiiruse muutusele z -suunas. Kui seome selle pöörlemisega z -telje ümber – kiiruse määratud suunas kas vastu- või päripäeva –, saame vasaku- ja paremakäelise kruviliikumise. Nõnda ilmnevad neljamõõtmelised pöörlemised justkui kahe kattuva, ent sõltumatu kolmemõõtmelise pöörlemisstruktuurina. Aga kui elaksite viies mõõtmes, põimuksid need struktuurid ja sulanduksid kokku ning käelisuse eristus kaoks. Sümmetria muutuks taas lihtsaks. Vaid nelja mõõtme muusika kõlab seega kahehäälselt ja selles peitubki selle eriline harmoonia.

Spiinorid ja ruumipaarsus

Kõige algsemal tasandil esindavad käelisust *spiinorid*. Need on aine kvantkirjelduse põhielemendid, selles mõttes lausa „aatomid“. Perioodilisustabeli aatomid ju koosnevad prootonitest, neutronitest ja elektronidest. Neist on algosake vaid elektron. Prooton ja neutron on ehitatud kvarkidest – algosakestest, mida seob tugev vastastikmõju. Spiinor on lihtsaim pöörlemisstruktuuri kandev üksus. Tema spinil ehk impulsimomendil on kaks võimalikku suunda – ütleme üles või alla. Seega on spiinor kvantbitt, kahetasemeline kvantsüsteem. Spiinori geomeetiline eripära seisneb selles, et 360° täispööre ei too teda tagasi samasse olekusse, vaid pöörab ta pahupidi (st märk vahetub) ning algseisund taastub alles 720° pöördega. Öelda võib koguni, et spiinor on justkui geomeetria ruutjuur. Spiinorid jagunevad kõigis paarismõõtmelistes ruumides kaheks komponendiks, kuid just neljas mõõtmes kajastub see jaotus aegruumi pöörete kahekäelises struktuuris. Puhtalt ühekäeline spiinor eeldab massitust. Mass seob vasaku ja parema komponendi üheks paariks. Seepärast on elektronid ja kvargid massiivsete osakestena kahekäelised spiinorid. Tegelikult ei ole algosakeste seas praegu kindlalt teada ühtki ühekäelist osakest. Tahke keha füüsikas võib selliseid siiski ilmned nn kvaasiosakestena. Näiteks Weyli poolmetallides madalaenergilised ergastused käituvad nagu ühekäelised spiinorid ning käelisust peegeldavad ühepoolised ääreolekud on tuttavad ka kvant-Halli süsteemidest.

Veel 1950. aastate alguses peeti enesestmõistetavaks, et looduse põhiseadused on peegelpildi suhtes samad. *Ruumipaarsus* pidi säilima. Just sel ajal hakati üha täpsemalt uurima nõrga vastastikmõju protsesse, nagu β -lagunemine, mille käigus

neutron muutub prootoniks ning tekivad elektron ja antineutriino. Need nõrgad lagunemised olid aeglased ja näisid alluvat teistsugustele seadustele kui elektromagnetiline või tugev jõud. Kui teooriad ja mõõtmised muutusid täpsemaks, tekkis küsimus, kas looduse peegelsümmeetria kehtib ka nende protsesside puhul. Pakuti välja otsene kontrollkatse. See viidi peagi läbi ning tulemus oli üllatav: madalal temperatuuril ja magnetväljaga suunatud koobaltituumade β -lagunemisel paiskusid elektronid eelistatult ühes kindlas suunas (vastupidiselt tuumaspinni suunale), mitte sümmeetriliselt. Tulemus raputas kogu füüsikat. Senine ettekujutus looduse universaalsest sümmeetriast purunes. Vahetult järgnenud mõõtmised kinnitasid pildi, milles neutriinod käituvad vasakukäelistena ja antineutriinod paremakäelistena. Kokkuvõttes ei kohtle nõrk jõud vasakut ja paremat võrdselt. Ta eristab neid rangelt, nagu värv, mis laseb läbi vaid ühe poole.

Ent samal ajal kehtib üldisem seaduspära. CPT-sümmeetria ütleb, et füüsikaseadused püsivad samad, kui vahetame ära ühekorraga laengu märgi (C), peegelpildi (P) ja aja suuna (T). See seab vastandpaarid – aine ja antiaine, vasak ja parem, minevik ja tulevik – kindlasse loogilisse seosesse. Need on aga diskreetsed teisedused, erinevalt pidevatest pöördeteisendustest, millest eespool kõnelesime. Pöörata saab ju mitte üksnes 90 või 180 kraadi kaupa, vaid mistahes nurga võrra. Pidevate sümmeetriate puhul ei ole aga looduses olud igal pool ühesugused. Suunad, tihedused ja väljad võivad muutuda kohast kohta. Seetõttu ei saa sümmeetriat käsitleda üksnes kogu ruumi hõlmava globaalse muutmisreeglina, vaid ta peab sama kehtida ka lokaalselt, „elada ruumis“.

Seda nimetatakse *kalibreerimiseks* ehk sümmeetria lokaliseerimiseks. Füüsikaline on see, mis ei sõltu calibreerimisest, st on sümmeetria all invariantne. Kuna kehade liikumine pole üldiselt sümmeetriline, eeldab selle kirjeldamine sümmeetria kaudu kompenseeriva välja olemasolu, mis tasakaalustab kohalikke erinevusi. Nii tekib kalibratsiooniväli. See väli kirjeldab lokaalset kalibratsiooni ja pole otseselt vaadeldav. Küll aga on selle välja tugevus sümmeetria suhtes invariantne ja seega füüsikalise tähendusega: ta vahendab vastastikmõjusid. Sümmeetria määrab niisiis füüsikaseadused. See on kalibratsiooniteooria keskne idee, mille Hermann Weyl 1918. aastal sõnastas, püüdes tollal uut üldrelatiivsusteooriat sügavamalt mõista ja ühendada selle elektromagnetismiga samas geomeetrilises raamistikus (O’Raifeartaigh, 1997).

Just selles traditsioonis jätkas Chen-Ning Yang oma otsinguid. Eelmisel aastal lahkunud Yang oli 20. sajandi üks originaalsemaid ja mõjukamaid teoreetilisi füüsikuid. Koos Robert Millsiga 1954. aastal andis ta Weyli kalibratsioonisümmeetria ideele uue ulatuse, viies selle elektromagnetismi piiridest kogu osakestefüüsika vundamendiks ja rajades tee tänapäevasele standardmudelile. Just Yang oli ka see, kes tõstas küsimuse looduse käelisuse kohta ja soovitas kontrollida ruumipaarsuse (P) rikkumist β -lagunemisel – idee, mis viis 1957. aastal Nobeli preemiani. Hiljem püüdis Yang sama calibreerimise loogikat kanda tagasi gravitatsiooni juurde, vormistades selle aegruumi sümmeetria kalibratsiooniteooriana. See katse ei viinud küll otsese läbimurdeni ja jäi füüsika peavoolust kõrvale, kuigi Yang ise pidas seda lähenemist ka hiljem üha paljulubavamaks (Yang, 2005). Ehkki Yang–Millsi teooria kujunemise aegu käis Yangil mõttes uue väljateooria ning isegi aegruumi „spiinorilisuse“ võimalus, jäi ta oma gravitatsiooniteooria puhul siiski meetrilise käsitlemise piiridesse. See lähtekoht välistas juba iseenesest neljamõõtmelise aegruumi sisemise kahesuse väljendamise.

Nüüd, aastakümneid hiljem, on aegruumi sümmeetria kalibreerimise mõte taas esile kerkinud just selles uues valguses.

Aegruumi käelisus ja gravitatsioon

Erirelatiivsusteooria käsitleb ühtlaselt liikuvate vaatlejate taustsüsteeme. Seepärast kehtivad kahe sellise vaatleja mõõtmiste jaoks kogu aegruumis samad reeglid. Neid mõõtmisi seob neljamõõtmeline pöördesümmeetria, mis suhestab eri liikumissuundades vaatlejate ruumi ja aja koordinaadid ühe tervikliku teisenduse kaudu. Kui aga vaatlejad võivad oma liikumist muuta – kiirendada, aeglustada või suunda pöörata – ei piisa enam ühest globaalsest teisendusest. Samm üldrelatiivsusesse on taustsüsteemide kalibreerimine. Lubame, et kohalik taustsüsteem võib punktiti erineda ning kompenseerime need erinevused kalibratsiooniväljaga, mille tugevus avaldubki gravitatsioonina. See väli mõjutab vaatlejat või vabalangemist nagu jõud, ent geomeetriselt võib sama nähtust esitada ruumi ja aja kõverusena. Sellest lähtekohast pole gravitatsioon mitte väline jõud, vaid ruumi ja aja geomeetria omadus, mis suunab vabalt liikuvat keha tema inertsiaalsel teel. Osakeste füüsika vastastikmõjude puhul tuleneb väli osakeste sisemisest olekuruumist, gravitatsiooni puhul aga aegruumi enda sümmeetriast.

Selle sümmeetria eripära lisab eelnevale aga veel ühe, sügavama kihistuse. Neljamõõtmelist pöördesümmeetriat kalibreerivad väljad jagunevad kaheks, vasakuks ja paremaks. Seeläbi kannavad need väljad ühekorraga kahte eri rolli. Need kujundavad nii aegruumi geomeetria teket kui ka selles toimuvat dünaamilist vastastikmõju. Taustsüsteem ei ole ette antud, vaid tuleb esile pöördesümmeetriat kalibreerivatest väljadest. Siin peitub põhimõtteline erinevus võrreldes teiste vastastikmõjudega. Standardmudeli jõud toimivad etteantud ruumis, seevastu pöördesümmeetria avaldub ka ruumi tekkimises endas. Kohalik taustsüsteem kujuneb vasaku ja parema haru erinevuse kaudu. Asjaolu, et eri harude kõverused pole samad, annab aegruumi geomeetria kuju. Täpsemini on kohalik taustsüsteem nn raamväli, mille vääne on otseselt võrdeline vasaku ja parema kõveruse erinevusega.

Kalibreerimisprintsipi lähtuv gravitatsiooniteooria on sisuliselt üheselt määratud. Vabadust jääb üle vaid kahe parameetri jaoks, millest teine, λ , vastab kosmoloogilisele konstandile. Kosmoloogiliste vaatluste põhjal teame, et λ on imeväike, kuid mitte null, $\lambda \sim 10^{-60}$. Uus parameeter on χ , mis mõõdab vasakukäelise kõveruse kaalu gravitatsioonis – ehk seda, kui „vasakukäeline“ gravitatsioon üldse olla saab. Nn paremakäelise gravitatsiooni mudelis on $\chi = 0$ ning dünaamika põhiraskus lasub paremal komponendil, samal ajal kui vasakukäeline komponent jääb varjatult kohalikku taustsüsteemi tasakaalustama.

Selle range raamistiku piirjuhuna kerkib esile tuttav üldrelatiivsusteooria. Kui $\chi = 0$, taastuvad küll tavapärased üldrelatiivsuse väljavõrrandid, kuid neisse ilmub geomeetria lisaliige, mis käitub nagu aine. Geomeetria sisemine inerts kujundab kõverust ja avaldub tumeainet meenutava mõjuna. See on tähelepanuväärne, sest tumeainet kinnitab tohutu hulk väga erinevaid vaatlusi, galaktikate pöörlemiskõveratest ja klasterite dünaamikast kuni kosmilise mikrolainetausta ja suurte struktuurideni (Einasto, 2010). Ometi pole seni ükski (sageli keerukas ja kohati isegi mitetekoherentne) gravitatsiooniteooria muudatus suutnud nähtuste tervikpilti seletada. Tumeaine võimalikeks seletusteks peetakse nii uusi osakesi, millele on pakutud terve rida kandidaate, kui ka ürgseid musti auke. Nende hüpoteese saab üha täpsema kosmilise andmestiku – näiteks James Webbi kosmoseteleskoobi (Annuk,

2023) – vaatluste põhjal otseselt kontrollida (Hütsi jt, 2023). Samamoodi saab vaatlusandmetega proovile panna ka hüpoteesi, et tumeaine nähtus ei vaja ainelisi lisakomponente, vaid tuleneb aegruumi sisemisest dünaamikast (Koivisto jt, 2025). Eriti kõnekad on seejuures gravitatsioonilainete vaatlused. Just selline mõõtmine seabki range piiri parameetritele χ .

Kui $\chi \neq 0$, kaldub gravitatsioon juba kõrvale üldrelatiivsusteooria kirjeldusest. Vasakukäelise välja segunemine muudab nii gravitatsiooni dünaamikat, tumeda sektori omadusi kui ka vaakumi mikroskoopilist struktuuri. Kalibratsiooni-teooria seob ühe parameetriga pealtnäha täiesti eraldiseisvaid füüsikalisi suursi. Eriti märkimisväärne on, et gravitatsioonilainete kiirus sõltub parameetrist χ . Üldrelatiivsusteoorias on gravitatsioonilainete kiirus täpselt võrdne valguse kiirusega (Kuusk, 2018; vt ka Järv, 2024), kuid kõnealune raamistik lubab, et gravitatsioonilainete levikiirus võib erineda valguse kiirusest vasakukäelise komponendi panuse tõttu gravitatsiooni vahendamises. Mitmekanalilise astronoomia sündmus GW170817 leidis aset kahe neutrontähe ühinemisel. Samast suunast lähtunud gammakiirguspurse järgnes gravitatsioonilainetele vähem kui kahe sekundilise viitega pärast üle saja miljoni valgusaasta kestnud teekonda. See näitas, et gravitatsioonilainete ja valguse kiiruste erinevus on äärmiselt väike. Vasakukäelisuse segunemist mõõtev parameeter peab seega jääma sama suurusjärgu piiresse, $|\chi| \leq 10^{-14}$. Isegi kui vasakukäelisel poolel on gravitatsioonis oma panus, võib see olla niivõrd väike, et selle mõju jääb praegu mõõtepiiride taha.

Aga see piirang kehtib vaid meie lähikosmoses. Kahe neutrontähe kokkutiirlemise lõppfaas ja ühinemine GW170817 toimus punanihkel $z \approx 0.01$. Kosmilise mikrolainetausta kujunemise ajal ($z \approx 1100$) ning eriti veel varem, enne kergete aatomituumade tekkimist ($z > 10^8$) ei pruugi see kohalik kiiruspiirang enam kehtida, sest χ võis areneda koos kosmoloogilise taustaga. See avab küsimuse, milline võis olla χ väärtus universumi varaseimas arengujärgus. Kui $\chi = 1$, panustavad gravitatsiooni vasak ja parem haru täpselt sümmeetriliselt. Teoreetilisest vaatepunktist on see kõige loomulikum lähtejuhtum ning seetõttu on ahvatlev eeldada, et varase universumi algseisund vastas piiriolukorrale $\chi \rightarrow 1$.

See on küll tõesti ebatavaline režiim, kuid just selline, millel võiks kosmoloogias olla keskne roll. Ilma peenhäälestatud algtingimusteta võiks see põhjendada kosmoloogilise printsiibi kehtivust ja sellest tulenevat universumi suureskaalalist ühtlust. Piiril $\chi \rightarrow 1$ kohalikud vabadusastmed tarduvad ning alles jääb peaaegu puhtalt topoloogiline raamistik. Sellises olekus gravitatsioonilained ei levi. Dünaamika taandub piiranguteks ja häired tasanduvad viivitusega. Seetõttu on sellest režiimist väljudes kogu ruum juba kooskõlas ning universum on suureskaalaliselt homogeenne ja isotroopne. Tavaliselt seletatakse seda nn inflatsioonimehhanismiga, mille täpne toimimisviis ja päritolu on endiselt arutluse all.

Kokkuvõtteks

Neljamõõtmelises aegruumis „plahvatab“ topoloogiliselt samaväärsete siledade struktuuride ääretu paljususe ning ainult seal avaldub käelisuse eriline nähtus. Teisisõnu mõõtmete arvu võiks järeldada juba empiirilisest tõigast, et on olemas parem ja vasak. Kalibreerimisprintsiibi põhjal tuleneb siit üldrelatiivsusteooria kohane gravitatsioon ning sealt edasi avaneb tee ühendteooriasse. Weyli ja Yangi arutluskäiku järgides määrab sümmeetria nõnda looduse põhiseadused, ent seesama loogika võib üllataval kombel ometi heita valgust ka kosmose tumedale küljele ning

isegi selgitada universumi algingimusi ja päritolu.

Kaks hoiatust on asjakohased. Esiteks on veel lahtine, kas see pilt kirjeldab ka tegelikult meie universumit – see vajab vaatluslikku kinnitamist või ümberlukkamist. „Kosmiliseks koobaltikatseks“ võiksid osutada tumeda sektori struktuurid või varasemast ajast pärinevad gravitatsioonilained ja taustkiirgus, mille statistilised omadused võivad paljastada P-rikkumist. Teiseks tasub mainida, et fundamentaalfüüsika peavool lähtub hoopis teistsugustest eeldustest. Praegu valitseva paradigma kohaselt pole kõige algsemad ehituskivid spiinorid, vaid kahemõõtmelised pinnad ehk stringid. Selle käsitluse järgi oleks universum 10- või 11-mõõtmeline.

2026. aasta suvel toimub Tartus juba kümnendat korda konverents, kus arutletakse kosmoloogia ja gravitatsiooni geomeetrilisi aluseid. Taas on kavas ka avalik loeng vanas tähetornis. Täpsemalt teave: <https://indico.global/event/15717/>.

Kasutatud kirjandus

- L. O’Raifeartaigh, 1997. The Dawning of Gauge Theory. Princeton Univ. Press, ISBN 978-0-691-02977-1.
- C. N. Yang, 2005. Selected Papers (1945–1980) of Chen Ning Yang: With Commentary. World Scientific, ISBN 978-981-256-367-5, 978-981-4480-13-0 doi: 10.1142/5853.
- T. Koivisto, L. Zheng and T. Zlosnik, The Spin(4) gauge theory of space, time, gravitation, matter and dark matter. [arXiv: 2507.00968 [gr-qc]].
- J. Einasto, Dark Matter. Astron. Astrophys. (EOLSS Encyclopedia, UNESCO–Eolss Publishers, Oxford, UK, 2010), [0901.0632 [astro-ph.CO]].
- K. Annuk, 2023. Mõnda James Webbi kosmoseteleskoobi senisest käekäigust. Tartu Tähetorni Kalender, 100, 77–86.
- G. Hütsi, M. Raidal, J. Urrutia, V. Vaskonen and H. Veermäe, 2023. Did JWST observe imprints of axion miniclusters or primordial black holes Phys. Rev. D 107 no.4, 043502 doi: 10.1103/PhysRevD.107.043502.
- P. Kuusk, 2018. Gravitatsioonilainete lugu jätkub. Tartu Tähetorni Kalender, 95, 74–82.
- L. Järv, 2024. Gravitatsioonilained gravitatsiooniläätstes. Tartu Tähetorni Kalender, 101, 63–69.