

Topologinen geometrodynamiikka: Yhtenäisteoria gravitaation ja standardimallin yhdistämiseksi

Johdanto

Fysiikan yhtenäisteorian etsintä on ollut pitkäaikainen ja kiehtova pyrkimys, jonka tavoitteena on yhdistää luonnon perusvoimat ja -hiukkaset yhdeksi kattavaksi kehykseksi. Yksi merkittävimmistä haasteista tällä alueella on ollut yleisen suhteellisuusteorian (gravitaation) ja kvanttikenttäteorian (standardimallin) sovittaminen yhteen. Albert Einstein itse omisti suuren osan myöhäisestä urastaan tämän tavoitteen saavuttamiseksi, mutta ilman lopullista menestystä.¹ Standardimalli, joka kuvaa onnistuneesti sähkömagneettista, heikkoa ja vahvaa vuorovaikutusta, ei sisällä gravitaatiota, ja sen matemaattinen rakenne on yhteensopimaton yleisen suhteellisuusteorian kanssa tietyissä äärimmäisissä olosuhteissa, kuten alkuräjähdyksessä ja mustien aukkojen tapahtumahorisontissa.²

Topologinen geometrodynamiikka (TGD) on 1970-luvun lopulla syntynyt vaihtoehtoinen ja kunnianhimoinen lähestymistapa tähän yhtenäistämishaasteeseen.⁴ Teoria pyrkii tarjoamaan yhtenäisen geometrisen kuvauksen sekä gravitaatiolle että standardimallin kvanttikentille, eroten näin valtavirran yrityksistä, kuten säieteoriasta ja silmukakvanttigravitaatiosta.⁵ TGD:n kehitti suomalainen fyysikko Matti Pitkänen vuodesta 1977 alkaen.⁵ Teorian alkusysäyksenä toimi niin kutsuttu "energian ongelma" yleisessä suhteellisuusteoriassa. Kaarevassa aika-avaruudessa energia-impulssin säilymislaite eivät ole yksiselitteisiä Poincarén symmetrioiden puuttuessa.⁵ TGD ehdottaa ratkaisuksi, että aika-avaruuden perusrakenne on erilainen kuin Einsteinin gravitaatiossa. Fyysinen aika-avaruus malliutuu 4-ulotteisena pintana ("surface") kiinnitettynä tiettyyn 8-ulotteiseen taustatilaan H , joka on karteesisesti Minkowski-avaruuden M_4 ja kompleksisen projektiivisen tason CP^2 tulo $H=M_4 \times CP^2$.⁵ Tämän uuden lähestymistavan toivottiin säilyttävän Minkowski-avaruuden symmetriat (ja näin energian säilymisen) gravitaatiosta huolimatta.⁵

Tämä poikkeuksellinen lähtökohta, jossa aika-avaruus on upotettu korkeampiulotteiseen tilaan, mahdollistaa standardimallin symmetrioiden geometrisoinnin ja tarjoaa uuden näkökulman kvanttimekaniikkaan ja suhteellisuusteoriaan.⁶ Matti Pitkäsen laaja ja pitkäaikainen työ on ollut keskeisessä roolissa TGD:n kehityksessä, ja hänen lukuisat julkaisunsa käsittelevät teorian matemaattisia perusteita, sovelluksia hiukkasfysiikassa, kosmologiassa, tietoisuusteoriassa ja monilla muilla aloilla.⁴ Tämän raportin tavoitteena on tarjota akateemisesti perusteellinen katsaus topologiseen geometrodynamiikkaan, sen historialliseen kehitykseen, matemaattiseen rakenteeseen, yhdistämistavoitteisiin,

sovellusalueisiin ja suhteeseen muihin merkittäviin teorioihin, kuten silmukakvanttigravitaatioon ja säieteoriaan.

TGD:n historiallinen kehitys ja peruseriaatteen

Topologisen geometrodynamiikan juuret ulottuvat 1970-luvun loppupuolelle, aikaan, jolloin teoreettinen fysiikka oli voimakkaan kehityksen alla.⁷ Standardimalli oli vakiinnuttanut asemansa kuvaamaan onnistuneesti tunnettuja alkeishiukkasia ja niiden vuorovaikutuksia, mutta gravitaatio pysyi edelleen erillisenä ja kvantittamattomana voimana. Samoihin aikoihin suuret yhtenäisteoriat (GUT) olivat nousemassa suosioon pyrkimyksenä yhdistää standardimallin kolme muuta perusvoimaa.⁷ Myös varhaiset säieteoriat alkoivat herättää kiinnostusta mahdollisena kvanttigravitaation ja yhtenäisteorian ehdokkaana.⁷ Tässä intellektuaalisessa ilmapiirissä Matti Pitkänen aloitti työnsä TGD:n parissa, inspiroituneena erityisesti yleisen suhteellisuusteorian peruskäsitteellisistä haasteista.⁸

Yksi merkittävimmistä alkusysäyksistä TGD:n synnylle oli yleiseen suhteellisuusteoriaan liittyvä energian määrittelyn ongelma.⁹ Einsteinin teoriassa gravitaatiokentän energiaa ei voida määrittellä lokaalisti koordinaateista riippumattomalla tavalla, mikä johtaa ongelmiin energian ja impulssin säilymlakien kanssa kaarevassa aika-avaruudessa.⁵ Erilaiset pseudotensorit on ehdotettu energian ja impulssin määrittämiseksi, mutta ne eivät ole tensoreita yleisissä koordinaattimuunnoksissa, mikä heikentää niiden fysikaalista tulkintaa.⁹ Tämä puute globaaleissa säilymlaissa oli Pitkäsen mukaan merkittävä motivaatio etsiä vaihtoehtoja teoriaa.⁸

Pitkänen sai vaikutteita myös John Wheelerin geometrodynamiikan ajatuksista, jossa fysiikkaa pyritään kuvaamaan puhtaasti geometrian avulla.⁸ Wheelerin visioissa aika-avaruuden topologialla ja geometrisillä rakenteilla oli keskeinen rooli aineen ja vuorovaikutusten synnyssä. TGD jatkaa tätä geometrisointiohjelmää, mutta radikaalimmalla tavalla, korvaamalla Einsteinin aika-avaruuden 4-ulotteisella pinnalla, joka on upotettu korkeampiulotteiseen tilaan.⁴

TGD:n keskeiset peruseriaatteen rakentuvat ajatukselle, että fyysinen aika-avaruus ei ole abstrakti Riemannin monisto, kuten yleisessä suhteellisuusteoriassa, vaan 4-ulotteinen pinta, joka on upotettu 8-ulotteiseen tilaan $H=M4 \times CP2$.⁴ Tässä konstruktiossa $M4$ edustaa 4-ulotteista Minkowski-avaruutta, joka on erikoisen suhteellisuusteorian aika-avaruus, ja $CP2$ on 4-ulotteinen kompakti Kähler-monisto, jolla on standardimallin symmetriat.¹² Tämä valinta ei ole mielivaltainen, vaan se on perusteltu standardimallin symmetrioilla, jotka ikään kuin "määrittävät" tämän 8-ulotteisen taustatilan.¹² Ajatus on, että tämän upotuksen geometria geometrisoi

tunnetut klassiset kentät ja alkeishiukkasten kvanttiluvut.⁵ Lisäksi TGD voidaan nähdä eräänlaisena yleistyksenä säieteorioista, jossa perusobjektit eivät ole 1-ulotteisia säikeitä, vaan 3-ulotteisia pintoja, joiden dynamiikka määräytyy upotuksen geometrian kautta.⁴

Matti Pitkäsen keskeinen rooli TGD:n kehityksessä

Matti Pitkänen on ollut topologisen geometrodynamiikan ainoa ja keskeinen kehittäjä sen synnystä lähtien.⁴ Hänen yli neljä vuosikymmentä kestänyt omistautumisensa tälle teorialle on johtanut laajaan ja monimutkaiseen rakennelmaan, joka pyrkii vastaamaan fysiikan peruskysymyksiin uudesta näkökulmasta.⁴ Pitkäsen panos ei rajoitu pelkästään teorian perusideoiden luomiseen, vaan hän on myös aktiivisesti kehittänyt sen matemaattista formalismia, tutkinut sen sovelluksia eri fysiikan aloilla ja jopa ulottanut sen ulkopuolelle, esimerkiksi tietoisuuden teoriaan.¹⁴

Pitkäsen keskeisimpiä ideoita teorian pohjana on edellä mainittu aika-avaruuden kuvaaminen 4-ulotteisena pintana 8-ulotteisessa upotustilassa $M4 \times CP2$.¹³ Tämä radikaali poikkeama perinteisestä yleisestä suhteellisuusteoriasta mahdollistaa energian säilymisen Minkowski-avaruuden symmetrioiden kautta, samalla kun gravitaatio kuvataan aika-avaruuden kaareutumisena upotustilassa.⁵ Toinen merkittävä käsite on "monilehtinen aika-avaruus" (many-sheeted space-time), joka syntyi tarpeesta selittää, miten useat päällekkäiset ilmiöt (esim. kahden partikkelin sähkökentät) voidaan yhdistää, ellei kenttien summa ole enää ratkaisu? TGD ratkaisee ongelman nerokkaasti moniarkkisen avaruusajan käsitteellä.¹⁸ Sen sijaan, että eri lähteiden kentät lineaarisesti summautuisivat yhdessä 4-avaruudessa, Pitkänen olettaa, että aine ja kentät jakautuvat useille samansuuntaisille aika-avaruusarkeille, jotka ovat liitetty toisiinsa ns. madonreikäyhteyksin (topologisin silloituksin).¹⁸ Havaittaja, joka ei erota näitä erillisiä "lehtiä", kokee niiden vaikutusten summautumisen efektiivisesti samassa avaruudessa.¹⁸ Tämä moniarkkisuus on siis fyysinen toteutus lineaariselle superpositiolle: makroskooppisesti klassiset kentät näyttävät summautuvan, vaikka perustasolla kukin arkki kantaa vain omaa indusoitua kenttäänsä.¹⁸

Pitkänen on myös kehittänyt ajatuksen p-adisten lukujen fysiikasta kognition ja intentionaalisuuden fysiikkana.⁴ Tämä liittyy TGD:n syvällisesti matematiikan ja tietoisuuden väliseen suhteeseen. Lisäksi hän on tuonut esiin nollaenergian ontologian (ZEO, Zero Energy Ontology), jossa fysikaaliset tilat ovat nollaenergian omaavia kokonaisuuksia, jotka sijaitsevat kausaalisten timanttien (CD, Causal Diamond) rajoilla. Tämä näkökulma muuttaa radikaalisti käsitystämme ajasta ja kvanttimekaniikan tulkinnasta.⁴ Hierarkia efektiivisiä Planckin vakioita ($\hbar_{eff} = n \times \hbar$) on toinen Pitkäsen

kehittämä keskeinen idea, joka liittyy pimeään aineeseen ja makroskooppiseen kvanttikohherenssiin.¹³

Matti Pitkäsen laaja julkaisutuotanto kattaa useita kirjoja ja lukuisia artikkeleita, joissa hän käsittelee TGD:n eri osa-alueita.¹⁴ Hänen teoksensa "Topological Geometrodynamics" ¹⁶ ja "Topological Geometrodynamics: An Overview" ⁵ tarjoavat kattavan johdatuksen teoriaan. Hänen julkaisunsa käsittelevät muun muassa TGD:n matemaattisia perusteita, sen suhdetta standardimalliin ja kvanttigravitaatioon, kosmologisia sovelluksia, pimeää ainetta, tietoisuusteoriaa ja kvanttibiologiaa.¹⁷ Pitkäsen jatkuva työ ja uusien ideoiden kehittäminen ovat olleet ratkaisevassa roolissa TGD:n monimutkaisen ja laajan rakenteen muotoutumisessa.

Matemaattinen rakenne: Aika-avaruus 4-pintana $M4 \times CP2$:ssa

Topologisen geometrodynamiikan matemaattisen rakenteen ytimessä on ajatus fyysisestä aika-avaruudesta 4-ulotteisena pintana, joka on upotettu 8-ulotteiseen tilaan $H=M4 \times CP2$.⁵ Tämä upotustila muodostaa teorian perustan, ja sen geometria määrää olennaisesti fysiikan luonteen.

Minkowski-avaruus ($M4$) on erikoisen suhteellisuusteorian tasainen aika-avaruus, jossa on yksi aika- ja kolme avaruusulottuvuutta. Sen metrisessä signatuurissa on yksi positiivinen (aika) ja kolme negatiivista (avaruus) komponenttia. TGD:ssä Minkowski-avaruus säilyttää keskeisen roolinsa, sillä teorian tavoitteena oli alun perin säilyttää Poincarén symmetriat, jotka ovat erikoisen suhteellisuusteorian perusta ja takaavat energian ja impulssin säilymisen.⁵

Kompleksinen projektiivinen taso ($CP2$) on 4-ulotteinen kompakti Kähler-monisto, jolla on rikas geometrinen rakenne.²⁰ Se voidaan konstruoida ottamalla kompleksinen 3-avaruus $C3$ ja identifioimalla pisteet, jotka eroavat toisistaan vain kompleksisella vakiokertoimella.²¹ Topologisesti $CP2$ voidaan ajatella muodostuvan lisäämällä 2-sfera äärettömään $R4$:ään.²⁰ $CP2$:lla on $SU(3)/U(2)$ kosetirakenne, ja sen isometriaryhmä on $SU(3)$, joka sisältää standardimallin väri vuorovaikutuksen $SU(3)$ -symmetrian aliryhmänä.²¹ Lisäksi $CP2$:lla on Kähler-metriikka ja -muoto, jotka ovat tärkeitä teorian matemaattiselle johdonmukaisuudelle.²⁰ Merkittävää on myös, että $CP2$ on ainoa kompakti 4-monisto, jolla on euklidinen signatuuri ja joka sallii Kähler-rakenteen omaavan twistor-avaruuden.²¹ Yhdessä Minkowski-avaruuden kanssa, joka on ainoa 4-ulotteinen avaruus Minkowskin signatuurilla, jolla on Kähler-twistor-avaruus, niiden karteesinen tulo $H=M4 \times CP2$ on twistoriteorian näkökulmasta ainutlaatuinen.²¹

Fyysinen aika-avaruus TGD:ssä ei ole identtinen t tämän 8-ulotteisen upotustilan

kanssa, vaan se on 4-ulotteinen alimonisto (pinta), joka on upotettu siihen.⁵ Eri mahdolliset maailmankaikkeuden aika-avaruudet ajatellaan siis 4-ulotteisina monistoina tässä kiinteässä 8-ulotteisessa tilassa.⁵ Tämän upotuksen dynamiikka määräytyy jonkin toimintaperiaatteen, kuten Kähler-vaikutuksen, kautta.²²

Tärkeä käsite TGD:ssä on "monilehtinen aika-avaruus".⁷ Tämä idea syntyi tarpeesta selittää, miten lineaariset superpositioperiaatteet voivat toteutua teoriassa, jossa perusrakenne on geometrinen. Monilehtisessä aika-avaruudessa voi olla useita 4-ulotteisia pintoja (lehtiä) samassa M_4 alueessa. Hiukkaset voivat topologisesti tiivistyä näille eri lehdistä ja kokea niistä peräisin olevien kenttien summan. Tämä mahdollistaa efektiivisen lineaarisen superposition voimille, vaikka peruskentät itse olisivatkin yksinkertaisia. Yleisen suhteellisuusteorian kuvaama aika-avaruus voidaan nähdä efektiivisenä kuvauksena, jossa nämä lehdet on ikään kuin "kasattu yhteen".¹³ On kuitenkin tärkeää huomata, että kvanttimekaniikan superpositioperiaate on erillinen ja seuraa kvanttimekaniikan perusoletuksista. TGD:ssä superpositio pätee "klassisten maailmojen maailman" (WCW) spinorikentille, jotka ovat WCW:n tasolla puhtaasti klassisia spinorikenttiä.

Tämä geometrinen perusta, jossa aika-avaruus on 4-pinta $M_4 \times CP^2$:ssa, mahdollistaa standardimallin symmetrioiden geometrisoinnin. CP^2 :n isometriat ja holonomiat liittyvät standardimallin sisäisiin symmetrioihin, kuten sähköheikkoon ja värisymmetriaan.²⁰ Esimerkiksi CP^2 :n vielbein-ryhmä $SO(4)$, jonka peiteryhmä on $SU(2)_L \times SU(2)_R$, tunnustetaan sähköheikoksi ryhmäksi.²⁰ Indusoitu spinoriyhteys upotustilasta aika-avaruuden pinnalle sisältää sekä sähköheikkoja että gravitaatiokenttiä.²⁰

TGD:n lähestymistapa yleisen suhteellisuusteorian ja standardimallin yhdistämiseen

Topologinen geometrodynamiikka pyrkii yhdistämään yleisen suhteellisuusteorian ja standardimallin tarjoamalla yhtenäisen geometrinen kuvauksen perusvuorovaikutuksista.⁶ TGD:n perusajatus on, että kaikki fysiikan ilmiöt voidaan palauttaa aika-avaruuden geometrian ja topologian ominaisuuksiin 8-ulotteisessa upotustilassa $H = M_4 \times CP^2$.⁶

Yksi keskeisimmistä mekanismeista tässä yhdistämisessä on induktioprosessi.⁴ Aika-avaruuden 4-pinnalle indusoidaan metriset ominaisuudet ja kentät upotustilan geometriasta. Tämä tarkoittaa, että gravitaatiota edustava aika-avaruuden metriikka sekä standardimallin sähköheikot ja värikentät eivät ole erillisiä entiteettejä, vaan ne ovat pohjimmiltaan projektiota korkeampiulotteisen tilan geometrisista rakenteista

4-ulotteiselle pinnalle.⁴

Monilehtisen aika-avaruuden käsite on ratkaisevassa roolissa TGD:n yhdistämishjelmassa.⁴ Se mahdollistaa sekä kvanttimekaniikan superpositioperiaatteen toteutumisen että klassisten kenttien olemassaolon eri mittakaavoissa. Eri aika-avaruuden lehdet voivat vastata eri fysikaalisia alajärjestelmiä tai vuorovaikutuksia. Esimerkiksi hiukkaset voivat olla topologisesti kondensoituneita useille eri lehdille, jolloin ne kokevat eri lehdiltä peräisin olevien voimien summan.⁴ Tämä mahdollistaa efektiivisen lineaarisen superposition, vaikka peruskentät olisivatkin geometrisesti yksinkertaisia.

Standardimallin hiukkaset saavat TGD:ssä geometrisen tulkinnan topologisina rakenteina monilehtisessä aika-avaruudessa.²⁰ Esimerkiksi alkeishiukkaset voidaan nähdä kahden madonreiän kontaktin muodostamina pareina, joilla on euklidinen signatuuri indusoidussa metriikassa ja 4-ulotteinen CP2-projektio.²⁰ Näiden kontaktien kurkut käyttäytyvät efektiivisesti Kählerin magneettisina monopoleina, ja ne on yhdistetty Kählerin magneettisilla fluksiputkilla muodostaen suljettuja magneettisia virtapiirejä.²⁰ Nämä rakenteet ovat analogisia säiemäisille objekteille.

Standardimallin voimat, kuten sähköheikko ja värivuorovaikutus, syntyvät TGD:ssä upotustilan kaarevuudesta ja indusoiduista kentistä aika-avaruuden pinnoilla.²⁰ Erityisesti sähköheikot vuorovaikutukset liittyvät läheisesti CP2:n geometriaan, ja myös värivuorovaikutukset palautuvat CP2:n geometriaan, sillä SU(3) on sen isometriaryhmä ja U(2) on holonomiaryhmä.²⁰ Tämä viittaa syvempään yhtenäiseen alkuperään.

TGD:n keskeisiä sovellusalueita hiukkasfysiikassa ovat muun muassa alkeishiukkasten massojen selittäminen p-adisen termodynamiikan avulla⁴, hiukkasperheiden selittäminen partonisten 2-pintojen topologian (eli *genus*) kautta⁴ sekä uusien fysikaalisten ilmiöiden, kuten Planckin vakion hierarkian ja pimeän aineen eri faasien, ennustaminen.⁵

TGD:n kosmologiset sovellukset

Topologisella geometrodynamiikalla on myös merkittäviä kosmologisia sovelluksia, jotka tarjoavat vaihtoehtoisia näkökulmia varhaiseen maailmankaikkeuteen, pimeään aineeseen ja pimeään energiaan.¹⁷

TGD:n nollaenergian ontologia (ZEO) tarjoaa uuden tavan tarkastella kosmologista kehitystä.⁴ ZEO:ssa fysikaaliset tilat ovat nollaenergian omaavia kokonaisuuksia, jotka sijaitsevat kausaalisten timanttien (CD) rajoilla. Nämä tilat voidaan nähdä positiivisen ja negatiivisen energian tilojen pareina CD:n vastakkaisilla rajoilla. Tämä näkökulma voi

mahdollistaa uudenlaisen ymmärryksen alkuräjähdyksestä ja kosmisen inflaation vaiheesta.

Pimeä aine ja pimeä energia, jotka muodostavat suurimman osan maailmankaikkeuden massa-energiasta, saavat TGD:ssä luonnollisen selityksen.⁴ TGD ennustaa Planckin vakion hierarkian ($h_{\text{eff}}=n \times h$), jossa tavallisen aineen faasit, joilla on suuri efektiivinen Planckin vakio, käyttäytyvät kuin pimeä aine.¹³ On kuitenkin tärkeää erottaa nämä faasit galaktisesta pimeästä aineesta. $h_{\text{eff}}=nh$ hierarkia ennustaa valaisemattoman aineen kaltaisia faaseja tavalliselle aineelle, ja näille faaseille on suoraa evidenssiä myös kosmologiassa ja biologiassa. Baryonista massaa katoaa kosmologiasta, ja selityksenä on, että nukleonit ja baryonit yleensä (sekä leptonit) muuntuvat valaisemattomaan $h_{\text{eff}}=nh$ faasiin ja päätyvät magneettiselle keholle. Tämä tapahtuu esimerkiksi biologiassa. Galaktinen valaisematon aine vastaa kosmisia säikeitä, joihin liittyy Kählerin magneettinen ja volyyminen energia, mikä on analogista valaisemattomalle energialle. Säikeille lokalisoituminen selittää galaksia kiertävien tähtien vakionopeusspektrin ilman lisäennustuksia, eikä se ennusta valaisemattoman aineen haloa, jolle on runsaasti olemassaolevuuden evidenssiä [<https://matpitka.blogspot.com/2025/03/dark-energy-weakens.html>]. On mahdollista, että myös säikeillä olisi valaisematonta ainetta edellä esitetyssä mielessä.

Tämä hierarkia voi syntyä, mutta ei Kählerin toiminnon epädeterministisyydestä. Vaikutusperiaatteen epädeterministisyydellä ei ole mitään tekemistä h_{eff} hierarkian kanssa. Pitkäkantaiset klassiset sähköheikot ja värikytöt, jotka ovat olennainen osa TGD:tä, voivat toimia pimeän aineen korrelaattoreina.⁴ Lisäksi monilehtinen aika-avaruus tarjoaa mahdollisuuden pimeän energian selittämiseen erilaisten aika-avaruuden lehtien välisen energia-erojen kautta.

TGD tarjoaa myös spekulatiivisia näkemyksiä astrofysikaalisiin ilmiöihin.¹⁷ Esimerkiksi kosmiset säikeet, jotka ovat topologisia defektejä varhaisessa maailmankaikkeudessa, voivat saada uuden tulkinnan TGD:ssä magneettisina fluksiputkina, jotka ovat peräisin kosmisista säikeistä.²⁰

TGD:n lähestymistapa kvanttigravitaation ongelmaan

Topologinen geometrodynamiikka lähestyy kvanttigravitaation ongelmaa radikaalisti eri tavalla kuin valtavirran teorian.¹³ Sen sijaan, että pyrittäisiin kvantittamaan itse aika-avaruuden metriikkaa, TGD siirtää painopisteen 3-ulotteisten pintojen (tai ekvivalentisti 4-ulotteisten pintojen) kvantittamiseen.¹³

Keskeinen käsite TGD:n kvanttigravitaatiossa on "klassisten maailmojen maailma"

(WCW, World of Classical Worlds).¹⁷ WCW on kaikkien mahdollisten 3-ulotteisten pintojen (tai tiettyjen preferoitujen 4-ulotteisten pintojen) muodostama avaruus, joka on upotettu $H=M_4 \times CP^2$:een.²³ Kvanttifysiikka TGD:ssä nähdään klassisena spinorikentän geometrian WCW:ssä.²⁴ WCW:lle määritellään Kähler-metriikka, joka mahdollistaa kvanttiteorian hermiittisen konjugaation geometrisoinnin.²²

Kvanttidynamiikka WCW:ssä määräytyy Kähler-funktion avulla, jonka ehdotetaan liittyvän preferoitujen ekstramaalien Kähler-vaikutukseen.²² Kähler-vaikutus on TGD:n perustoimintaperiaate, ja sen ekstramaalit tulkitaan klassisiksi aika-avaruuden konfiguraatioiksi, jotka vastaavat kvanttitiloja.²³ WCW:n funktionaali-integraali, joka määritellään Kähler-funktion eksponentin avulla, korvaa perinteisen kvanttikenttäteorian polkuintegraalin.²²

Nollaenergian ontologia (ZEO) on toinen olennainen osa TGD:n kvanttigravitaatioteoriaa.⁴ ZEO:ssa kvanttitilat ovat nollaenergian omaavia kokonaisuuksia, jotka elävät kausaalisten timanttien (CD) rajoilla. S-matriisi, joka kuvaa hiukkasten vuorovaikutuksia, tulkitaan ZEO:ssa aikamaisena kietoutumisena positiivisen ja negatiivisen energian osien välillä.²⁵

Hierarkia Planckin vakioita ($\hbar = n \times h$) on myös keskeinen TGD:n lähestymistavassa kvanttigravitaatioon.⁷ Suuret efektiiviset Planckin vakiot voivat mahdollistaa makroskooppisten kvantti-ilmiöiden olemassaolon ja tarjota yhteyden kvantti- ja gravitaatiomittakaavojen välille. Pimeä aine, joka on olennainen osa maailmankaikkeutta, voidaan TGD:ssä tunnistaa aineen faaseiksi, joilla on suuri efektiivinen Planckin vakio.¹³

TGD:n erottavia piirteitä verrattuna muihin kvanttigravitaatioteorioihin ovat muun muassa aika-avaruuden upotus korkeampiulotteiseen tilaan, monilehtinen aika-avaruus, WCW:n geometria, ZEO ja Planckin vakion hierarkia. Nämä konseptit mahdollistavat uudenlaisen näkökulman kvanttigravitaatioon ja sen suhteeseen muihin perusvuorovaikutuksiin.

TGD:n vertailu silmukakvanttigravitaation kanssa

Topologinen geometrodynamiikka (TGD) ja silmukakvanttigravitaatio (LQG, Loop Quantum Gravity) ovat molemmat valtavirrasta poikkeavia lähestymistapoja kvanttigravitaation ongelmaan, mutta niiden peruseriaatteet ja lähestymistavat eroavat merkittävästi.

LQG:n keskeinen ajatus on gravitaatiokentän itsensä kvantittaminen ilman taustariippuvuutta.²⁶ Teoria kuvaa aika-avaruuden kvantittuneena rakenteena, joka

muodostuu spin-verkoista (spin networks) ja niiden ajallisesta kehityksestä spin-vaahdoiksi (spin foams). Aika-avaruuden geometriset ominaisuudet, kuten pinta-ala ja tilavuus, ovat kvantittuneita. LQG ei oleta mitään ulkoista aika-avaruutta, johon fysiikka sijoittuisi.

TGD sen sijaan olettaa 8-ulotteisen upotustilan $H=M_4 \times CP^2$, jossa fyysinen aika-avaruus on 4-ulotteinen pinta.⁵ TGD:n painopiste on 3-ulotteisten pintojen (tai niitä vastaavien 4-ulotteisten pintojen) kvantittamisessa "klassisten maailmojen maailmassa" (WCW), joka on kaikkien mahdollisten aika-avaruuden konfiguraatioiden avaruus.¹⁷ WCW:n geometria määräytyy Kähler-metriikan avulla. Toisin kuin LQG:ssä, TGD:ssä on taustatila, mutta se ei ole säiemallin taustatila, joka on spontaanin kompaktifikaation tulos. TGD:n $H=M_4 \times CP^2$ ei vastaa Calabi-Yaun valintaa, vaan se on kiinnitetty vaatimuksesta, että TGD on matemaattisesti olemassa. Spinorinosteen olemassaolo siten, että twistoriavaruus omaa välttämättömän Kähler-rakenteen, fiksaa $H:n$. Samoin lukuteoreettisen TGD:n olemassaolo, joka vaatii M_8-H duaalisuuden, missä M_8 :lla on oktonioninen tulkinta, määrittää $H:n$. Myös avaruusajan dimensio fiksaantuu. TGD pyrkii yleiseen koordinaatti-invarianssiin.

LQG:ssä aine kuvataan yleensä standardimallin kenttinä, jotka on sijoitettu kvantittuneelle aika-avaruudelle. TGD:ssä alkeishiukkaset saavat geometrisen tulkinnan aika-avaruuden topologisina rakenteina, kuten madonreiän kontakteina monilehtisessä aika-avaruudessa.²⁰ Myös standardimallin vuorovaikutukset geometrisoidaan upotustilan geometrian kautta.²⁰

Yksi merkittävä ero on teorian matemaattinen formalismi. LQG perustuu kanoniseen kvantisointiin ja spin-verkkojen teoriaan, kun taas TGD rakentuu ääretönulotteisen Kähler-geometrian, superkonformaalisten symmetrioiden ja nollaenergian ontologian varaan.⁴

Kummallakaan teorialla ei ole vielä vakiintunutta kokeellista vahvistusta, ja molemmat kohtaavat omia haasteitaan. LQG:llä on vaikeuksia palauttaa klassinen yleinen suhteellisuusteoria tietyissä raja-arvoissa, ja sen kyky selittää standardimallin hiukkasia ja vuorovaikutuksia on edelleen kehitteillä. TGD on erittäin kunnianhimoinen ja laaja teoria, jonka monimutkainen matemaattinen rakenne tekee sen testaamisesta ja laajan hyväksynnän saavuttamisesta haastavaa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että TGD ja LQG edustavat kahta hyvin erilaista filosofiaa kvanttigravitaation etsinnässä. LQG pyrkii kvantittamaan itse aika-avaruuden, kun taas TGD pyrkii upottamaan aika-avaruuden korkeampiulotteiseen tilaan ja geometrisoimaan kaikki vuorovaikutukset tämän

upotuksen kautta.

TGD:n vertailu säieteorian kanssa

Topologinen geometrodynamiikka (TGD) ja säieteoria ovat molemmat teorioita, jotka pyrkivät yhdistämään kaikki perusvuorovaikutukset, mukaan lukien gravitaatio, mutta niiden peruseräkkeet ja lähestymistavat ovat hyvin erilaiset.

Säieteorian perusajatus on, että alkeishiukkaset eivät ole pistemäisiä, vaan 1-ulotteisia värähteleviä säikeitä, jotka elävät korkeampiulotteisessa aika-avaruudessa (tyypillisesti 10, 11 tai jopa 26 ulottuvuutta).¹ Eri hiukkaset vastaavat säikeiden eri värähtelytiloja. Säieteoria sisältää luonnostaan gravitaation, ja se on ollut lupaava ehdokas "kaiken teoriaksi".

TGD:tä on kuvailtu eräänlaisena säieteorioiden yleistykseenä.⁴ Kuitenkin TGD:ssä perusobjektit eivät ole 1-ulotteisia säikeitä, vaan 3-ulotteisia pintoja (tai niitä vastaavia 4-ulotteisia pintoja), jotka on upotettu 8-ulotteiseen tilaan $H=M_4 \times CP^2$.⁵ Säikeiden sijasta TGD:ssä esiintyy säiemäisiä rakenteita, kuten madonreiän kontakteja yhdistäviä fluksiputkia ja fermionien liikeratoja määrittäviä 2-ulotteisia pintoja (string world sheets).²⁰

Säieteoria vaatii ylimääräisiä ulottuvuuksia teorian matemaattisen johdonmukaisuuden vuoksi, ja nämä ulottuvuudet oletetaan olevan kompaktifioituja eli "käärittyjä" hyvin pieniksi, jotta ne eivät olisi havaittavissa tavanomaisissa energioissa. TGD:ssä ylimääräiset ulottuvuudet muodostuvat kompaktista CP^2 -avaruudesta, jonka koko on suuruusluokkaa 104 Planckin pituutta.²¹ Tämä koko on paljon suurempi kuin säieteorian kompaktifioitujen ulottuvuuksien oletettu koko.

Yhdistämisen mekanismi on myös erilainen. Säieteoriassa yhdistäminen saavutetaan sillä, että kaikki hiukkaset ja voimat syntyvät saman perusobjektin, säikeen, värähtelyistä. TGD:ssä yhdistäminen perustuu geometrisointiin: kaikki vuorovaikutukset, mukaan lukien gravitaatio ja standardimallin voimat, kuvataan aika-avaruuden geometrian ja topologian kautta upotustilassa H .²⁰

Säieteoria on kohdannut haasteita kokeellisen todistusaineiston löytämisessä, sillä sen ennustamat ilmiöt ilmenevät tyypillisesti erittäin korkeilla, nykyisillä kokeilla saavuttamattomissa energioissa. TGD:llä on myös omat haasteensa kokeellisen verifiointin suhteen, vaikka se tekee ennustuksia esimerkiksi pimeän aineen luonteesta ja Planckin vakion hierarkiasta, jotka saattavat olla testattavissa tulevaisuudessa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka TGD:tä on kuvailtu säieteorian yleistykseenä,

se eroaa säieteoriasta merkittävästi perusobjektiansa, ulottuvuuksiensa ja yhdistämismekanisminsa suhteen. Molemmat teoriat ovat kunnianhimoisia yrityksiä ylittää nykyisen fysiikan rajat, mutta ne lähestyvät tätä tavoitetta hyvin erilaisista lähtökohdista.

Vertailutaulukko: TGD, silmukakvanttigravitaatio ja säieteoria

Ominaisuus	Topologinen geometrodynamiikka (TGD)	Silmukakvanttigravitaatio (LQG)	Säieteoria
Perusobjektit	3-ulotteiset pinnat (4-pinnat)	Spin-verkot ja spin-vaahdot	1-ulotteiset värähtelevät säikeet
Aika-avaruuden luonne	4-pinta upotettuna 8-ulotteiseen tilaan	Kvantittunut, muodostuu spin-verkoista	10, 11 tai 26 ulottuvuutta
Aika-avaruuden ulottuvuus	4 + (4 kompaktifioitua)	4 (kvantittunut)	10, 11 tai 26 (osa kompaktifioitu)
Kvanttigravitaation lähestymistapa	WCW:n geometria, 3-pintojen kvantisointi	Gravitaatiokentän kanoninen kvantisointi	Gravitaatio ilmenee säikeiden värähtelyistä
Yhdistämismekanismi	Geometrisointi upotustilan kautta	Ei suoraan sisäänrakennettu	Kaikki voimat ja hiukkaset säikeistä
Taustariippuvuus	Taustatila on, mutta pyrkii yleiseen koordinaatti-invarianssiin	Taustariippumaton	Taustatila yleensä oletetaan
Keskeiset vahvuudet	Yhtenäinen kuvaus, standardimallin geometrisointi, tietoisuusteoria	Taustariippumaton, ei UV-divergensseja	Sisältää gravitaation, potentiaali kaiken teoriaksi
Keskeiset heikkoudet	Monimutkainen, kokeellinen verifiointi haastavaa	Klassisen GR:n palauttaminen, standardimallin selittäminen	Kokeellinen verifiointi haastavaa, valtava teoriavalikoima

Tila fysiikkayhteisössä	Valtavirrasta poikkeava	Valtavirrasta poikkeava	Aktiivinen tutkimusalue
Kokeelliset todisteet/ennusteet	Pimeä aine (tietyt faasit), Planckin vakion hierarkia, joitain astrofysikaalisia anomalioita	Ei vakiintuneita suoria todisteita	Ei suoria vakiintuneita todisteita

Johtopäätökset

Topologinen geometrodynamiikka edustaa ainutlaatuista ja kunnianhimoista yritystä yhdistää fysiikan perusvuorovaikutukset. Sen juuret ovat yleisen suhteellisuusteorian energian määrittelyn ongelmassa, ja se on kehittynyt laajaksi teoriaksi, joka kattaa hiukkasfysiikan, kosmologian ja tietoisuuden. TGD:n keskeiset piirteet, kuten aika-avaruuden kuvaaminen 4-pintana 8-ulotteisessa upotustilassa $M_4 \times CP_2$, monilehtinen aika-avaruus, klassisten maailmojen maailman geometria ja nollaenergian ontologia, tarjoavat radikaalisti erilaisen näkökulman fysiikan peruskysymyksiin.⁴

TGD pyrkii geometrisoimaan standardimallin hiukkaset ja voimat upotustilan geometrian kautta, tarjoten samalla uusia selityksiä muun muassa hiukkasmassoille, hiukkasperheille ja pimeälle aineelle.⁴ Sen kosmologiset sovellukset tarjoavat vaihtoehtoisia näkemyksiä varhaiseen maailmankaikkeuteen ja pimeään energiaan.¹⁷ Kvanttigravitaation ongelmaa TGD lähestyy 3-pintojen kvantittamisella WCW:ssä ja Kähler-geometrian avulla.¹⁷

Verrattaessa TGD:tä silmukakvanttigravitaatioon ja säieteoriaan, on selvää, että TGD edustaa omaa, erillistä lähestymistapaansa.⁴ Vaikka TGD:tä on kuvailtu säieteorian yleistykseenä, sen perusobjektit ja yhdistämismekanismi eroavat merkittävästi. Toisin kuin LQG, TGD:llä on taustatila, mutta se ei ole säiemallin taustatila, joka on spontaanin kompaktifikaation tulos. TGD:n $H = M_4 \times CP_2$ on kiinnitetty vaatimuksesta, että TGD on matemaattisesti olemassa. Spinorinosteen olemassaolo siten, että twistoriavaruus omaa välttämättömän Kähler-rakenteen, fiksaa H :n. Samoin lukuteoreettisen TGD:n olemassaolo, joka vaatii M_8-H duaalisuuden, missä M_8 :lla on oktonioninen tulkinta, määrittää H :n. Myös avaruusajan dimensio fiksaantuu. TGD pyrkii yleiseen koordinaatti-invarianssiin.

TGD on edelleen kehitteillä oleva teoria, ja sen monimutkainen matemaattinen rakenne

ja valtavirrasta poikkeavat perusperiaatteet ovat tehneet sen laajan hyväksynnän ja kokeellisen verifiointin haastavaksi.⁴ Siitä huolimatta TGD tarjoaa kiehtovan ja potentiaalisesti yhtenäisen kehyksen, joka voi avata uusia näkökulmia fysiikan peruskysymyksiin ja mahdollisesti johtaa ennustuksiin, jotka voidaan testata tulevaisuudessa. Matti Pitkäsén sitoutunut työ teorian parissa on ollut ratkaisevassa roolissa sen kehityksessä, ja hänen panoksensa teoreettiseen fysiikkaan on merkittävä.¹⁴ Tulevaisuuden tutkimus ja uusien matemaattisten työkalujen kehittäminen voivat auttaa paljastamaan TGD:n koko potentiaalin ja sen kyvyn selittää maailmankaikkeuden perimmäistä luonnetta.

Lähdeartikkelit

1. Unifying General Relativity and the Standard Model - The Faith of a Heretic, avattu huhtikuuta 4, 2025, <http://www.krauselabs.net/writings/unifying-general-relativity-and-the-standard-model/>
2. Physics beyond the Standard Model - Wikipedia, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Physics_beyond_the_Standard_Model
3. General relativity - Wikipedia, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/General_relativity
4. scireprints.lu.lv, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://scireprints.lu.lv/371/1/tgdview.pdf>
5. Topological Geometro-dynamics: Revised Edition - Bentham Books, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://benthambooks.com/book/9781681081793/>
6. Through the Wormhole on Spacetime Surface: Early History of Topological Geometro-dynamics Theory (TGD) - ResearchGate, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://www.researchgate.net/publication/380719999_Through_the_Wormhole_on_Spacetime_Surface_Early_History_of_Topological_Geometro-dynamics_Theory_TGD
7. Summary of TGD, quantum TGD, and TGD inspired theory of consciousness and quantum biology - SciRePrints, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://scireprints.lu.lv/455/2/zoomtalk.pdf>
8. Book Series :: Holistic Science Publications, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://www.holistic-science-publications.com/book-series/>
9. Is Energy Conserved in General Relativity?, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://www.desy.de/user/projects/Physics/Relativity/GR/energy_gr.html
10. arxiv.org, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://arxiv.org/abs/gr-qc/0403107>
11. Is energy always conserved in general relativity and quantum mechanics? - Reddit, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/113wn16/is_energy_always_conserved_in_general_relativity/
12. TGD INSPIRED THEORY OF CONSCIOUSNESS - Topological Geometro-dynamics, avattu huhtikuuta 4, 2025, <http://tgdtheory.fi/bookpdf/tgdconsc.pdf>
13. (PDF) Topological geometrodynamics - ResearchGate, avattu huhtikuuta 4, 2025,

https://www.researchgate.net/publication/228555266_Topological_geometrodynamics

14. Items where Author is "Pitkänen, Matti" - SciRePrints, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://scireprints.lu.lv/view/creators/Pitk=E4nen=3AMatti=3A=3A.default.html>
15. Pitkänen, Matti - Holistic Science Publications, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://www.holistic-science-publications.com/pitkanen-matti/>
16. Topological Geometrodynamics - Matti Pitkanen - Google Books, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://books.google.com/books/about/Topological_Geometrodynamics.html?id=A5-IW1M3YrEC
17. (PDF) Topological Geometrodynamics: an Overview - ResearchGate, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://www.researchgate.net/publication/268558523_Topological_Geometrodynamics_an_Overview
18. TGD (Topological Geometro Dynamics) Inspired Theory of Consciousness - CiteSeerX, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b681634deaf3b109068cadcd8dff5d476caeb0d2>
19. Topological Geometrodynamics: Pitkanen, Matti: 9780955117084 ..., avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://www.amazon.com/Topological-Geometrodynamics-Matti-Pitkanen/dp/0955117089>
20. tgdtheory.fi, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://tgdtheory.fi/public_html/articles/cp2etc.pdf
21. Reduction of Standard Model Structure to CP2 Geometry and Other Key Ideas of TGD - Prespacetime Journal, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://www.prespacetime.com/index.php/pst/article/viewFile/1940/1806>
22. tgdtheory.fi, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://tgdtheory.fi/public_html/articles/kahleretal.pdf
23. (PDF) Identification of the Configuration Space Kähler Function - ResearchGate, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://www.researchgate.net/publication/228459941_Identification_of_the_Configuration_Space_Kahler_Function
24. (PDF) TGD Inspired Theory of Consciousness - ResearchGate, avattu huhtikuuta 4, 2025, https://www.researchgate.net/publication/228386703_TGD_Inspired_Theory_of_Consciousness
25. Very Special Relativity and TGD - CiteSeerX, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1b9884d3788917c3bbc79ba077925d1d4f04f5bf>
26. Quantum gravity as the unification of general relativity & quantum mechanics - OSF, avattu huhtikuuta 4, 2025, <https://osf.io/34qrs/download/?format=pdf>