



Symmetrioiden fysiikkaa ja metafysiikkaa

ARI PEUHU

Johdanto

Symmetrioilla on keskeinen sija tieteessä.¹ Myös filosofiassa esiintyy symmetrioista johdettuja periaatteita, kuten Leibnizin riittävän perusteen periaate. Voidaan siten väittää, että symmetrioita on aina pidetty todellisuuden piirteiden ja ilmiöiden perustana. Tässä kirjoituksessa tarkastellaan symmetrioita relativistisessa hiukkasfysiikassa. Näin siksi, että oletan nykyisen fyysikalistisvoittoisen maailmankuvan mukaisesti kaikkien luonnonilmiöiden ja universumin rakenteen olevan perustavimmalla tasolla fysikaalista. (En käsittele yleisen suhteellisuusteorian symmetrioita (diffeomorfismit), sillä ne ovat melko ongelmattomia hiukkasfysikaalisiin verrattuna. Tosin tulee muistaa, ettei meillä ole lukuisista yrityksistä huolimatta sen ja kvanttimekaniikan yhtenäistävä teorian. En myöskään tarkastele CPT- eli varaus–pariteetti–aika-symmetriaa.)

¹ Kuten taiteessa ja sopivasti tulkittuna myös teologiassa: "Mitä on ollut, sitä vastakin on; ja mitä on tapahtunut, sitä vastakin tapahtuu. Ei ole mitään uutta Auringon alla." (Saarnaaja 1:9). Laaja esitys symmetrioista tieteessä ja taiteessa on Mainzer 1996.

Fyysikot tyytyvät yleensä luonnehtimaan symmetrioita periaatteina tai luonnonlakeina, mutta ilman selkeää ontologista sitoumusta: "... tiedämme jotain luonnonlakien rakenteesta... symmetrioista 'varsinaisina luonnonlakeina'" (Houtappel, Van Dam ja Wigner 1965, 602; ks. myös Feynman 1967, 94). Steven Weinberg avaa symmetrioiden roolia hiukkasfysiikassa ja puhuu niiden "tiukkarakenteisuudesta", mutta myöntää, että "symmetriaperiaatteet eivät yksin olisi johtaneet sähköheikon voiman teoriaan tai kvanttiväridynamiikkaan, eivät ainakaan muuten kuin erikoistapauksina jossain yleisemmässä teoriavaihtoehtojen joukossa" (Weinberg 1999, 145). Fysiikan filosofiassa puolestaan symmetrioita on painotettu metodologisina ja heuristisina periaatteina (Bangu 2013). Paljolti näistä epämääräisyyksistä tai pelkistä episteemisistä painotuksista johtuen tässä kirjoituksessa etsitään vastausta kysymykseen, ovatko symmetriat olemassa ja jos ovat, mitä ne ovat?² Esitän

² Brading ja Castellani (2003, 13) kysyvät ovatko symmetriat "luonnonossa vallitsevia ominaisuuksia vai luonnehtivatko ne fysikaalisen maailman rakennetta". Tätä näkemystä ei tule sekoittaa viime aikoina paljon keskusteltuun *onttiseen* tai rakenteelliseen realismiin. Argumenttini, jota en voi tässä enempää perustella, on että parhaan nykytiedon mukaan universumin perustava ontologia ei koostu rakenteista vaan kvanttikenttien vuorovaikutusprosesseista. Rakenteet on liian stabiili luonnehdinta. Kvanttikenttäteorioiden ontologia ei ole rakenteita eikä objekteja, sillä kvanttien identiteetti ei säily samana. Esimerkiksi atomiytimeistä sironnut tai emittoitunut elektroni ei ole sama, jonka ydin absorboi. On myös paikallaan huomauttaa, että yritykset perustaa symmetriat vielä perustavampiin tekijöihin ovat mahdollisia, mutta ei ainakaan tavalla, jolla esimerkiksi Peter Atkins (2018) sitä yrittää. Hänen konseptiossaan symmetriat perustuvat "Ei-Minkään" (*Nothing*) uniformisuuteen ja isotrooppisuuteen, ja niistä seuraavat säilymisilait ilmenevät Noetherin teoreemojen perusteella, kun Ei-Mikään "valssautuu" (*rolls into*) universumiksi. Paitsi että valssautuminen jää pelkäksi kielikuvaksi, ylitsepääsemätön ongelma on, että jos Ei-Mikään on (*sic?*) ei mitään, ei myöskään uniformisuutta tai isotrooppisuutta voi olla. Näin Atkins saa symmetriat ja säilymisilait triviaalisti pelkästään asettamalla ne väkisin alkuehtoihin.

paikoin vasta-argumentteja tunnetuille kannoille symmetrioiden roolia vastaan (Kosso, Martin, Lange ja Lyre), mutta otan samalla huomioon niiden positiiviset piirteet. Argumentoin kahden päätuloksen puolesta: 1) symmetriat ovat fysikaalisia ja ilmenevät alkeishiukkasten vuorovaikutuksissa kvanttimitäntäteorioiden mukaisesti; 2) energian säilyminen vaikuttaa keskeisimmältä säilyvältä suureelta. Argumentaationi menee paikoin melko yksityiskohtaisesti fysiikkaan, mutta tätä ei voi aiheen vuoksi välttää.

Symmetrioiden tyypit

Symmetriat ovat muunnoksia (transformaatioita), jotka eivät muuta systeemin tai rakenteen tilaa relevanttien parametrien suhteen. Esimerkiksi ympyrällä on ääretön määrä infinitesimaalisia symmetriamuunnoksia (välillä 0° - 360°), jotka jättävät sen ennalleen. Symmetriamuunnokset voivat olla sekä fysikaalisia että matemaattisia. Kummatkin perustuvat ryhmäteoriaan, jolla on erityisesti fysiikassa keskeinen rooli.³ Erityisesti hiukkasfysiikassa tärkeitä ovat transformaatiot, jotka muuntavat entiteettejä toisikseen kuten kvanttiväridynamiikassa kvarkkien

³ Ryhmä on joukko G , jolle on tulo-operaatio siten, että 1) mille tahansa kahdelle G -alkiolle a ja b , $a \circ b$ tuottaa ryhmän alkion, 2) operaatio on assosiatiivinen: $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$, 3) ryhmä sisältää identiteettialkion: $a \circ 1 = 1 \circ a = a$, ja 4) jokaiselle ryhmän alkion a käänteisalkio a^{-1} siten että: $a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = 1$. Esimerkiksi kokonaislukujen yhteenlasku muodostaa ryhmän, jossa identiteettialkio on 0 ja käänteisalkio on vastaluku. Hiukkasfysiikan relevantit ryhmät ovat jatkuvia (äärettömiä) infinitesimaalimuunnoksia Lie-ryhmiä, joiden virittäjät (engl. *generators*) muodostavat kyseisten ryhmien Lie-algebrat ryhmän rakennevakioiden (engl. *structure constants*) määräämille virittäjien välisille kommutaatiorelaatioille. Toisin sanoen rakennevakiot antavat niiden kvanttikenttien fysiikan, joita ryhmät kuvaavat. Virittäjät ovat ryhmän alkioita tai elementtejä, joista saadaan ryhmän sallimilla laskutoimituksilla (eli transformaatioilla) ryhmän muut alkion. (Useimmiten kyseessä on matriisialgebra.) Esimerkiksi kvanttiväridynamiikan $SU(3)$ virittäjät ovat gluonit.

värivarausta muuttuu gluonien vaihdoissa. Ryhmäteorian kielellä tämä tarkoittaa sitä, että systeemille S jonkin ryhmän G perustava esitys (engl. *representation*) kuvaa S -tilojen muuntamista toisikseen. Lisäksi symmetriamuunnokset osoittavat invariansseja, ja fysiikassa invariansseista seuraa säilymislakeja. Tämä perustuu Emmy Noetherin teoreemaan – tarkemmin ottaen kahteen sellaiseen, globaaliin ja lokaaliin (Noether 1918) – joiden mukaan jokaisesta jatkuvasta symmetriasta seuraa invarianssi ja säilymislaki. Esimerkiksi avaruuden paikkojen symmetriasta, niiden keskinäisestä fysikaalisesta yhdenvertaisuudesta, seuraa liikemäärän säilymislaki, ajanhetkien samanvertaisuudesta energian säilymislaki ja avaruuden suuntien (ja siten kulmien) yhtenäisyydestä pyörimisliikemäärän säilyminen.⁴ (Tiivis yleinen matemaattinen esitys Lagrangen yhtälöiden, Noetherin teoreemojen ja säilymislakien suhteista on (Robinson 2011, 6–10).) Nämä ovat kolme perustavinta säilymislakia jo klassisessa fysiikassa.

Lisäksi erotetaan ulkoiset ja sisäiset sekä globaalit ja lokaalit symmetriat. Ulkoiset symmetriat ovat aika-avaruudellisia, kuten juuri kuvatut kolme; sisäiset symmetriat ovat lähinnä hiukkasfysiikassa esiintyviä ”sisäisten avaruuksien” piirteitä kuten (alun perin protonin ja neutronin) isospin. Globaalit symmetriat koskevat kaikkia aika-avaruuden pisteitä tai paikkoja, ja muunnokset tapahtuvat niissä yhtä aikaa. Lokaalit symmetriat käsittelevät kyseisiä muunnoksia toisistaan riippumattomina. Fysikaalisesti kuvattuna globaalin ja lokaalin symmetrian ero on yksinkertaisesti se, että aika-avaruuden pisteiden muunnosriippumattomuus toisistaan edellyttää voimaa eli vuoro-

⁴ Tarkastellaan Lagrangen yhtälöä, joka antaa systeemin kineettisen ja potentiaalienergian erotuksen. Tämä rajoitetaan avaruuden kahden pisteen suhteen (ne mukaan lukien), ja määritetään funktionaali *vaiikutus* S (engl. *action* S) Lagrangen yhtälön integraalina aikavälillä $t_1 - t_2$. (Se riippuu koko matkasta kyseisellä välillä, ei tietyistä pisteistä siinä). Tästä ratkaistaan, mikä matka minimoi S :n eli mikä on tehokain (energiaa minimoivin) reitti. Näin päädytään Eulerin-Lagrangen yhtälöön, josta saadaan systeemin liikeyhtälöt ja säilymislait.

vaikutusta pisteiden välillä kompensoimaan paikalliset poikkeamat, jotta symmetria säilyy. (Voidaan todeta yleisesti, että ”mitallistaminen” (engl. *gauging, fixing a gauge*) tarkoittaa siirtymistä globaalista symmetriasta lokaaliin.)

Kun hiukkanen liikkuu potentiaalissa (kentässä), sen aaltofunktio muuntuu tämän vaikutuksesta lokaalisti. Tätä kutsutaan lokaaliksi mittasymmetriaksi (engl. *local gauge symmetry*). Esimerkiksi kvanttisähködynamiikassa (QED) tämä ilmenee invarianssina aaltofunktion (tai Lagrangen yhtälön) lokaalisissa vaihemuunnoksissa sähkömagneettisen potentiaalin A_μ kautta, joka liittää vaiheet toisiinsa aika-avaruuden eri pisteissä. Tämä potentiaali on niin sanottu mittakenttä. Siten sähkömagneettisessa kvanttikentässä globaali invarianssi ei ole riittävä Maxwellin yhtälöiden dynamiikan säilymiseen, mutta aika-avaruus-pisteiden riippumattomuus toisistaan eli lokaali invarianssi säilyttää dynamiikan ja siten teorian fysikaalisen sisällön samana. Schrödingerin yhtälö kuvaa sähkömagneettisessa potentiaalissa liikkuvan hiukkasen tilan, mutta nämä potentiaalit eivät ole yksikäsitteisiä vaan niille voidaan tehdä mittamuunnoksia, jotka jättävät sähkömagneettisten kenttien arvot ennalleen. Ongelma on, ettei Schrödingerin yhtälö ole mittainvariantti, mutta tämä ongelma ratkeaa siten, että se voidaan myös muuntaa. Tämä on sallittua, sillä aaltofunktio ei ole suoraan havaittava entiteetti. Aaltofunktion derivaatat muuntuvat tavalla, joka särkee lokaalin vaihevarianssin. Lokaali vaiheinvarianssi säilyy ja symmetria säilyy tuomalla liikeyhtälöön kovarianttiderivaatta (engl. *covariant derivative*) $D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu$ (e on hiukkasen varaus). (Näistä muunnoksista katso esimerkiksi (Aitchison ja Hey 2013, 52–53).) Tiivistäen: koska lokaali vaiheinvarianssi ei ole mahdollinen vapaan hiukkasen aaltoyhtälölle, vaihemuunnos edellyttää vuorovaikutuksen, mikä tarkoittaa mittahiukkasta tai kenttää. Syistä joihin ei tässä mennä mittasymmetria ja siten invarianssi puolestaan edellyttää, että vuorovaikutuksen välittäjä on massaton, kuten fotonin sähkömagnetismin välittäjänä.

Fysikaalinen peruste lokaaleille symmetrioille tulee suppeasta suhteellisuusteoriasta, sillä se antaa signaalivälityksen ylärajan (valonnopeus tyhjiössä), mikä ei salli aika-avaruuden kaikkien pisteiden samanaikaista kontaktia eli kaukovaikutuksia (engl. *action at a distance*). Kuten edellä todettiin, tästä seuraa, että aika-avaruuden paikkojen väliset yhteydet edellyttävät vuorovaikutusta, ja tämä toteutuu vain jonkin välittäjän myötä. Ryhmäteoria antaa kullekin voimalle – sähkömagnetismi, väri- ja heikko voima sekä gravitaatio – perustavan esityksen ja siten välittäjien määrän ja ominaisuudet.

Edeltävä lyhyt kuvaus on riittävä symmetrioiden asemasta luonnon järjestyksessä. Noetherin teoreemojen mukaan symmetriat ovat perustavia (ks. myös Wigner 1967, 14–27)), mutta käännteinen kanta on yhtä hyväksyttävä, eli että symmetriat ovat johdettavissa liikelaeista (ja muista perustavista fysiikan laeista). Äärimmilleen vietynä tätä kantaa edustavat esimerkiksi Colin Froggatt ja Holger Nielsen (1991). Heidän ”symmetriat johdannaisina” -näkömyksen mukaan symmetrioita ei ollut alun perin, vaan ne ilmenevät ikään kuin portaittain liike- ja kenttälakien mukaisesti sekä fysikaalisten entiteettien vuorovaikutuksista energiaskaalan aletessa. Tämä on niin sanotun satunnaisdynamiikan (engl. *random dynamics*) tarjoama selitys (Nielsen 1991). Sen ydinajatus on olettaa mahdollisimman vähän rajoitteita, mutta tämä on myös sen heikkous, sillä valitut rajoitteet ovat melko mielivaltaisia, sillä esimerkiksi Lorentz- tai mittainvarianssia (engl. *gauge invariance*) ei oleteta. Satunnaisdynamiikka ei myöskään ole saanut edes johdannaista empiiristä tukea, joten en käsittele sitä tämän enempää.

On myös selvää, että satunnaisdynamiikan kritiikki yleistyy, sillä mikä tahansa sen kaltainen yritys joutuu olettamaan jotain fysikaalista perustakseen – ei pelkästään aika-avaruudellista geometriaa. Näin fysikaalisista ”luonnonlaeista” tai vahvemista symmetriaperiaatteista ei päästä eroon: täysin satunnainen pysyy ilman niitä satunnaisena, joten on äärimmäisen epätodennäköistä suhteessa siihen, mitä fysiikassa nykyään tiedämme, että universumimme kehittyisi satunnaisen perustalta.

Vastakkainen kanta – ”symmetriat ensin” – puolestaan joutaa siihen, että skaalan kasvaessa kohti suurempia energioita saavutetaan lopulta yksittäinen, perustavin symmetria; ”alemmat” symmetriat ovat tämän kannan mukaan myös portaittaisia, mutta seurauksia symmetriarikoista. Tätä puoltaa se, että nykyinen Standardimalli on tunnustettu rumaksi, mitä tulee sen parametreihin. Niitä on vähintään 19 liittyen hiukkasten massoihin, ja koska massan ilmaantuminen tarkoittaa jonkin symmetrian rikkoa, on luontevaa etsiä kattavampia symmetrioita korkeammilla energiaskaaloilla sekä uusilla fysikaalisilla postulaatioilla. Suosituimpia näistä ovat supersymmetriat, teknovärimallit (engl. *technicolour*), joissa Higgsin bosoni on fermionikooste; suuret yhtenäisteoriat (GUT), jotka sitovat sähköheikon ja värivoiman yhden ryhmän muunnosten alaisiksi; säieteoriat, jotka sisältävät useampia kuin 4 avaruuden dimensiota (joista muut kuin normaalit 3 ovat mahdollisesti vähintään 10^{500} kompaktifioitua Calabi-Yau-monistoa); sekä silmukka-kvanttigravitaatio (engl. *quantum loop gravitation*), joka ei sisällä aika-avaruutta valmiina taustana. En käsittele näitäkään, sillä ne ovat joko alkutekijöissään tai suurista toiveista huolimatta ilman kokeellista evidenssiä ohittaneet etsikkoaikansa; yleiskäsitelystä näistä saa teoksesta (Armas 2021).

Noetherin teoreemoista ei voi siten pitävästi päätellä symmetrioiden ensisijaisuuteen, sillä ne ovat symmetrisiä (!) suhteessa liike- ja kenttäyhtälöihin. (Ja kronologisesti säilymislait todettiin ensin; Noetherin teoreemat ovat ikään kuin niiden ja symmetrioiden vastaavuuden varmennus.) Lisäksi matemaattisina ne eivät selitä mitään fysikaalista. Toisin sanoen symmetrioissa on kyse myös siitä, mihin Noetherin teoreemojen ontologinen ja fysikaalinen pätevyys perustuu ja miten ne voidaan todeta.

Symmetrioiden havaittavuus ja riippumattomuus

Tarkastelen tässä jaksossa kriittisesti Peter Kosson argumentaatiota eri symmetrioiden asemasta ja havaittavuudesta. Kosso on

painottanut teorioihin liittyvien symmetrioiden yhteyttä muihin tekijöihin, kuten ”tapahtumat, ehdot, ominaisuudet ja luonnon säännönmukaisuudet, jotka riippuvat symmetrioiden yksityiskohdista” (Kosso 2000c, 119). Kosso painottaa, että symmetria on perustava siinä määrin kuin muut seikat riippuvat siitä, vaikka se myös riippuu muista seikoista. Symmetrian perustavuus perustuu siten keskinäisriippuvuuteen muiden tekijöiden kanssa (115–16). Havainto ei kuitenkaan tarjoa kaikissa tapauksissa evidenssiä tai tukea symmetrian puolesta, muttei sitä vastaanakaan. Näin ollen symmetrioihin liittyvät muut teoreettiset elementit ovat yhtä olennaisia. Tämän lisäksi havaintotuki voi olla myös negatiivista, kuten energian säilymisen tapauksessa: yhtään tapausta sen rikkoutumisesta ei ole havaittu, ja yleinen teoreettinen perustelu tälle on, että kenttien yksittäiset vuorovaikutukset eivät tapahtuisi säännönmukaisesti siten kuin ne tapahtuvat ilman energian säilyvyyttä. Tässäkin kuitenkin myös positiivinen havaintoevidenssi tulee mukaan, sillä universon kausatiivinen rakenne heijastaa energian säilymistä.

Kosso kysyy, kumpi ratkaisee, symmetrian havaittavuus vai sen seuraukset (Kosso 2000b)? Tässä on taustakysymyksenä, onko tietty symmetria vain matemaattinen (tai kuvauksen seuraus) vai esiintyykö se luonnossa, ja jos esiintyy, onko se vahvempi kuin pelkkä säännönmukaisuus. Kosson mukaan havaittavuus on hyvä peruste pitää symmetriaa reaalisenä, mikäli se toteuttaa seuraavat ehdot: 1) symmetrian edellyttävä muunnos on tapahtunut, mikä edellyttää viitekehyksen tai vertailusysteemin (engl. *point of reference*); ja 2) siihen liittyvä invarianssi on sama ennen ja jälkeen muunnoksen (Kosso 2000b, 86). Kosson johtopäätös on, että lokaali symmetria (jolla hän tarkoittaa mittasymmetriaa) on ”merkittävästi vähemmän lähellä suoraa kokemusta ja havaintoa kuin globaalit symmetriat” (Kosso 2000b, 97).⁵ Tämä tarkoittaa sitä, että lokaalin mittasymmetrian ja sen todentamisen väliin tulee enemmän teoreettisia yhteyksiä tai

⁵ Artikkelissa (2000c) Kosso kuitenkin vaikuttaa luopuneen tästä kannasta, mitä tulee havaittavuuteen.

elementtejä kuin "klassisten" aika-avaruudellisten symmetrioiden tapauksessa. Esimerkiksi heikon voiman isospin-varaus esitetään symmetriaryhmällä $SU(2)$, jonka 3 virittäjää (engl. *generators*) antavat voimaa välittävät vektoribosonit W^+ , W^- ja Z^0 (indeksi kuvaa sähkövarausta), ja ne muuntavat esimerkiksi kvarkkimakuja toisikseen. Nämä vuorovaikutukset voidaan puolestaan todeta vastaavissa reaktioissa, kuten atomiytimen beetahajoamisessa, jossa alas-kvarkki muuntuu ylös-kvarkiksi eli neutroni muuntuu protoniksi (ja kääntäen). Tämä on symmetrian havainto, mutta reitti symmetriasta siihen on hyvin "teoriapitoinen". (Huomataan toki, että kumpikin Kosson ehto toteutuu.)

Kosson argumentti ei ole kuitenkaan kovin vahva, sillä ehto 2) on Noetherin teoreemojen vuoksi itsestään selvä, sekä siksi, että invarianssi ennen ja jälkeen muunnoksen on oikeastaan yksi symmetrian määrittävä piirre. Ehto 1) on tärkeämpi, mutta jää kovin yleiseksi, sillä irrallisina eli teorioista (viitekehyksistä) riippumattomina symmetrioilla ei ole juurikaan merkitystä fysiikassa. Irrallisina ne ovat enintään heuristisia – siis teorian kehittämisen ensiaskeleita. Kosso ei myöskään tee eroa symmetrioiden ja muiden tekijöiden riippuvuuksien välillä. On selvää, että jotkin tekijät – suhteessa symmetrioihin – ovat keskeisempiä kuin muut. On myös ilmeistä, ettei symmetrioita voi luonnehtia Kosson tapaan täysin yleispätevillä riippuvuussuhteilla johtuen symmetrioiden yksilöllisyydestä ja muiden tekijöiden vaihtelevuudesta niiden mukaan. Näin ollen puhe tapahtumista ja ominaisuuksista ei selvennä asiaa, ja säännönmukaisuudet ovat ongelmallisia luonnehtia: ovatko ne lainomaisia vai havaittuja säännönmukaisuuksia. Ehkä tarkempi näkemys löytyisi symmetrioiden keskinäisistä riippuvuuksista, vaikka tässä mennään pitkälti metafysiikan (tai spekulaation) puolelle. Lähelläkohtana voinee pitää symmetrioiden kattavuutta. Tällöin energian ja liikemäärän säilymisen taustalla olevat symmetriat – aika ja avaruuden paikat – vaikuttavat perustavammilta kuin esimerkiksi lokaalit mittasymmetriat. En kuitenkaan mene tä-

hän sinänsä houkuttavaan näkemykseen pidemmälle. Johtopäätöksenä on, ettei Kosso ole selvittänyt läheskään riittävästi symmetrioiden ontologista tai metafyyssistä asemaa.

Martin ja Lorentz-invarianssi

Symmetrioiden riippuvuus muista tekijöistä on kuitenkin tärkeä huomio. Christopher Martin (2002, S228–31; 2003, 47) painottaa, että pelkän (lokaalin) mittainvarianssin lisäksi tarvitaan muita tekijöitä, kuten renormalisoituvuus. Martin tukee tätä argumentoimalla, että siirtyminen globaalista lokaaliin mittainvarianssiin on fysikaalisesti irrelevanttia, sillä globaalit muunnokset ovat vain koordinaattimuunnoksia, joten ne eivät muuta fysikaalisten parametrien arvoja. Tästä johtuen Martinin mukaan ei voi olla fysikaalista perustetta lokaalille mittasymmetrialle *fysikaalista* vuorovaikutusta edellyttävänä muunnoksena. Erityisesti suppean suhteellisuusteorian rajoite signaalinopeudelle on Martinin mukaan ongelmallinen takaamaan lokaalin mittainvarianssin (Martin 2002, S226–7).

Martinin argumentaatio ei kuitenkaan ole tässä kohdin pitävää. Ensinnäkin voidaan todeta, että se vaikuttaa kumpaankin suuntaan: voidaan yhtä perustellusti väittää, että lokaali mittainvarianssi *on oltava*, tai muutoin kausaaliprosessit eli signaalivälitys on epäfysikaalista ja pelkästään globaalista invarianssia, ja tämä on vain koordinaatteja koskevaa. Toisin sanoen fysikaalisesti ei voi esiintyä samanhetkisiä kaukovaikutuksia (engl. *instantaneous action at a distance*), jotka globaali mittainvarianssi sallii. Näin irrelevanteiksi, tai matemaattisesti triviaaleiksi, osoittautuvatkin globaalit mittamuunnokset koordinaatteja koskevana. Tätä vahventaa empiirisesti se, että lokaaleista mittasymmetrioista seuraavat vektoribosonit (fotoni, W^+ , W^- , Z^0 ja gluonit) on havaittu. Toiseksi Martin pitää Lorentz-invarianssia yhtenä lisätekijänä lokaalien mittamuunnosten kanssa. Suhteessa edeltävään Martinin argumenttiin tämä on outoa, sillä se tarkoittaa fysikaalisesti suppeasta suhteellisuusteoriasta seuraavaa signaalinopeuden rajoitetta, jonka aseman Martin edellä kyseenalaisti. Lorentz-muunnokset (jotka aika-avaruudellisina

muodostavat Lorentz-ryhmän) sisältävät signaalinopeuden äärellisen vakioisuuden, joka on lokaalin mittainvarianssin perusta. (Kyse on *relativistisista* kvanttikenttäteorioista.) Martin tosin myöntää, että fysikaalinen (lokaali) mitta-argumentti voi olla perusteltu, jos mittamuunnoksille voidaan antaa ei-triviaali fysikaalinen peruste (Martin 2002, S227). Lisäksi Martin vetoaa efektiivisiin kenttäteorioihin eli nykyistä suuremman energiaskaalan teorioihin (tai teoriaan), joista mittainvarianssi seuraisi. Ei kuitenkaan ole evidenssiä eikä teoreettisesti kovin perusteltua olettaa, etteivät kyseiset teoriat vuorostaan perustuisi symmetrioihin (tai kattavaan symmetriaan, kuten Lorentz-invarianssi). Kuten nähdään, tämä on sama ongelma kuin satunnaisdynamiikan kohdalla.

Mitä tulee symmetrioiden yhteyksistä muihin tekijöihin, renormalisoitavuus on nähdäkseni lokaalia mittainvarianssia tukeva edellytys.⁶ Kvanttikenttäteorioiden on oltava renormalisoituvia, eli niiden tietyistä laskuista antamat äärettömät tulokset on kumottava. Fysikaalisesti äärettömien arvojen voidaan nähdä seuraavan esimerkiksi siitä, että elektronin ”paljasta” varauستا ei voida mitata tarkasti, sillä se on aina virtuaalisten elektroni–positroni-parien peittämä. Tämä on niin sanottu tyhjiön polarisaatio, mikä johtuu siitä, että vastakkaismerkkiset va-

⁶ Niin sanotusta mitta-argumentista (engl. *gauge argument*) on keskusteltu verrattain paljon (Healey 2007 on kattava esitys). Healey argumentoi, että lokaalinen mittasymmetria on vain teoreettinen tai formaalinen, oikeastaan laskuja helpottava apuväline ilman fysikaalista realiteettia. Hän mainitsee renormalisaation, mutta toteaa, että itse asiassa se on puutos (engl. *lacuna*), joka osaltaan vie perustan mitta-argumentilta (Healey 2007, 166–7). Vaikka Healeyn argumentaatio on monin paikoin kiinnostavaa, on silti helppo huomata, ettei se ole riittävää juuri siksi, että se olettaa mitta-argumentin ”puhtaan” muodon eli pelkkien lokaalien mittasymmetrioiden (ja muunnosten) riittävyden. Toisin sanoen Healeyn kokonaisargumentti on *non sequitur*. Healey edustaa tyypillistä filosofin otetta mitta-argumenttiin; fyysikon kanta on ”epäpuhtaampi” ja ottaa huomioon lokaalien mittojen suhteet muihin tekijöihin. Tästä esimerkkinä käy Rovelli 2014.

raukset lähenevät toisiaan. Kaikki mahdolliset virtuaaliset prosessit kasvattavat varauksen (ja massan) arvon äärettömäksi, ja fysiikassa ei voi esiintyä äärettömiä suureita (paitsi laskennallisina raja-arvoina). Mittasymmetriaan liittyviä muita tekijöitä ovat heikon voiman spontaani symmetriarikko ja värivoiman asymptoottinen vapaus. (Tämä tarkoittaa sitä, että kyseinen voima *heikkenee* energiaskaalan kasvaessa ja etäisyyden pieneessä, jolloin kvarkit vuorovaikuttavat heikommin ja liikkuvat lähes kuin vapaat hiukkaset.)⁷ On osoitettu, että ei-abeliset teorit, joilla on rikkoutumaton mittasymmetria, ovat ainoita renormalisoituvia teorioita, joilla on myös asymptoottisen vapauden ominaisuus (Coleman & Gross 1973). (Ei-abelisissa teorioissa voimien välittäjät vaikuttavat toisiinsa monimutkaistaen niitä huomattavasti, toisin kuin abelisessa kvanttisähködynamiikassa.) Näin nämä kolme piirrettä – lokaali mittasymmetria, renormalisoituvuus ja asymptoottinen vapaus – liittyvät kiinteästi toisiinsa, mikä tukee Martinin kantaa. Oma ongelmansa tietysti on, mikä näiden rajoitteiden tarkempi suhde on mittasymmetriaan, mitkä niiden keskinäiset vahvuudet ovat ja seuraavatko jotkin niistä toisistaan vai ainoastaan symmetrioista. Näihin kysymyksiin en tässä puutu.⁸

Tätä vastoin Brading ja Brown (2003, 99–100) argumentoivat, että mittasymmetriat sinänsä riittävät fysikaalisiin tuloksiin.

⁷ Elizurin teoreeman (1975) mukaan spontaani symmetriarikko ei ole mahdollinen lokaalin mittainvarianssin olettavissa teorioissa. Näin ei kuitenkaan ole, kuten Simon Friederich argumentoi (2013) ja Fröhlich *et al.* (1981) ovat osoittaneet; ks. myös Smeenk 2006. Tosin myös Friederich vaikuttaa olettavan ”puhtaan” mitta-argumentin muotoilun, koska väittää, että puhe Higgsin mekanismista lokaalin mittasymmetrian rikkoutumisena on harhaanjohtavaa. Mutta kuten nähtiin, puhdas mitta-argumentti on liian rajoittunut.

⁸ Martin ehdottaa yhtenä rajoitteena yksinkertaisuutta (engl. *simpli-city*), muttei kerro, koskeeko se teorian, yhtälöiden vai minkä yksinkertaisuutta. Lisäksi voi olla kyseisen käsitteen löysyydestä johtuen niin, että symmetriat ja mittainvarianssit luonnehtivat sitä hiukkasfyysiikan teorioiden tapauksessa. (Sähköheikon ja värivoiman *yhtälöt* ovat kaikkea muuta kuin yksinkertaisia.)

Heidän mukaansa on itsessään ei-triviaalia, ettei mittamuunnoksista matemaattisina seuraa empiirisesti havaittavissa olevia eroavuuksia (suhteessa niiden liikeyhtälöihin ja kenttämuuttujiin). Toisin sanoen fysikaalisesti relevantti tarkastelu koskee ”metatasoa”, symmetrioiden laajempaa roolia – ei niiden tyypillistä tarkastelua suhteessa yksittäisiin ilmiöihin tai voimiin (kuten mitta-argumentti olettaa).

Symmetriat metalakeina: Lange

Metatason painotus on kiinnostava huomio, ja Marc Lange on sittemmin esittänyt vastaavan argumentin, jonka mukaan symmetriat selittävät säilymislait ja invarianssit analogisesti sen kanssa, miten jälkimmäiset selittävät fysikaaliset ilmiöt (Lange 2007). Langen mukaan symmetriaperiaatteet ovat metalakeja, jotka hallitsevat tai määräävät (engl. *govern*) tavallisia lakeja ”juuri kuten ne hallitsevat (ja auttavat selittämään) tavallisia tosiasioita ja tapahtumia” (Lange 2007, 458). Näin olisi olemassa hierarkkinen kolmirakenne: symmetriat – säilymislait – normaalit lait. (Lange huomauttaa myös, ettei symmetrioiden ja säilymislakien yhteys Noetherin teoreemojen kautta ole olen-naista; Lange 2007, 464–6.)

Lange keskittyy symmetriaperiaatteisiin selittävinä, mutta tämä episteeminen kanta edellyttää ontologista: jos symmetrioita ei ole olemassa, ne eivät selitä mitään. Argumentaatio symmetrioiden ontologisen aseman puolesta on vaativampaa, mutta koska yritän sitä, episteemiset seikat voidaan jättää sikseen. Lisäksi tulee se, että Lange puhuu selittämisestä lähes kuin se olisi *simpliciter* tarkentamatta suhteita selittämisen teorioihin. Lange toteaa, että ”lain välttämättömyys antaa sille selittävää voimaa” (Lange 2007, 472), joten tarkastellaan seuraavaksi, mitä tämä pitää sisällään. (Tulee kuitenkin huomata, ettei kyse ole välttämättömyydestä sen tavanomaisessa mielessä eli pätemisenä kaikissa aktuaalisesta maailmastamme saavutettavissa olevissa mahdollisissa maailmoissa.)

Lange eksplikoi säilymlakeja ja luonnollista välttämättömyyttä (engl. *natural necessity*) kontrafaktuaaleilla. Näin symmetrioiden välttämättömyys on vahvempaa kuin liike- ja kenttäyhtälöiden, eli symmetrioihin liittyvien kontrafaktuaalioletusten ala on laajempi kuin vastaavien säilymlakien ala. Lisäksi symmetriaperiaatteet rajoittavat mahdollisten voimien ja niitä koskevien lakien lajeja (engl. *kinds*). Lange eksplikoi näitä piirteitä ei-noomisen vakaan joukon käsitteellä (engl. *non-nomic stable set*) (Lange 2007, 471). Se on väitejoukko, jonka jokaiselle jäsenelle m pätee, että m olisi ollut tosi, jos p olisi vallinnut – missä m on lakiväite ja p on ei-noominen väite, joka on loogisesti konsistentti vakaan joukon kanssa. Ei-noomisuuden luonnehdinta ei ole tässä tärkeä, mutta esimerkkinä käytetään ”Jokaisella ^{209}Po atomilla on 50% mahdollisuus hajota seuraavan 107 sekunnin aikana”. Looginen konsistenssi tarkoittaa tässä sitä, ettei väitejoukossa oleville symmetriaperiaatteiden vahvuksille laeille ole negaatioita tai vastaavia seurauksia kyseisen teorian puitteissa. Vakaus puolestaan eksplikoi välttämättömyyttä, ja se eksplikoi ”maksimaalista invarianssia” siten, että väitejoukon jäsenet ovat yhdessä niin invariantteja kuin ne voivat olla.⁹ Looginen konsistenssi on kuitenkin triviaali minimiedellytys, joten Langen luonnehdinnassa keskeistä on kontrafaktuaalisuuden vahvuuden aste ja siten luonnollisen välttämättömyyden asema. Näin ollen säilymlakien luonnollinen välttämättömyys perustuu siihen, että ne vallitsisivat, vaikkeivät jotkin (tai kaikki) tietyn teorian liike- ja kenttäyhtälöt olisi voimassa. Samoin symmetriaperiaatteet vallitsisivat, vaikkeivät jotkin säilymlait pätsisi.

Langen analogia säilymlakien ja tavallisten lakien sekä toisaalta symmetrioiden ja säilymlakien välillä on kuitenkin ongelmallinen. Mikäli symmetriat pätevät mutta säilymlait eivät päde, Noetherin teoreemat eivät myöskään päde kaikissa (jatkuvien) symmetrioiden ja säilymlakien tapauksissa. Mate-

⁹ Tässä voi kysyä, eikö modaalinen ”voivat olla” (engl. *could*) tuo mukanaan kehäluonnehdinnan, mutta jääköön se argumentin vuoksi.

maattisina Noetherin teoreemat ovat päteviä, joten symmetriaperiaatteet ja lait kantavat *fysikaalisen* selitystaakan, ja tämä vaikuttaa kontrafaktuaalioletuksiin siinä määrin kuin ne seuraavat näistä. Lisäksi on paikallaan huomauttaa, että kontrafaktuaalien asema sinänsä on edelleen vailla yleisesti hyväksyttyä perustaa, joten on arveluttavaa rakentaa niiden varaan niin merkittävässä määrin kuin Lange tekee. Itse asiassa olen taipuvainen väittämään vahvemmin, että koska Noetherin teoreemoja ei voi epäillä, ne tukevat kaikkia niihin liittyviä fysikaalisia kontrafaktuaaleja. Siten symmetrioiden ja säilymlakien yhteyttä ei voi kumota Lange-tyyppisillä konstruktioilla.¹⁰

Syvempi ongelma on puolestaan se, että symmetrioiden, säilymlakien ja kontrafaktuaalioletusten suhteet saattavat olla tiiviimpiä kuin yleensä luullaan. On nimittäin vähintäänkin ongelmallista olettaa – Noetherin teoreemasta riippumatta – että symmetriat ja säilymlait voivat erota toisistaan niin helposti kuin Langen kontrafaktuaaliskenaariot esittävät. Otetaan esimerkiksi mekaniikan yleinen muotoilu Lagrangen yhtälöllä eli $L = T - V$, jossa T on kineettinen energia ja V potentiaalienergia (vuorovaikutusenergia). Kun edellytetään, että vaikutus S integraalina jonkin (suljetun) systeemin reitille aikavälillä $t_1 - t_2$ on 0, saadaan Eulerin-Lagrangen liikeyhtälö (jonka yksi muoto on Newtonin liikeyhtälö). Kun tämä muotoilu oletetaan ajasta riippumattomaksi, saadaan vuorostaan energian säilyminen kyseiselle systeemille. Kun oletetaan Langen tapaan, ettei jälkimmäinen pidä paikkaansa, ei myöskään aikasymmetria pidä paikkaansa. Jos kuitenkin symmetriat ovat säilymlakeja vahvempia eli jälkimmäisten ala on symmetrioiden rajoittamaa, säilymlait ovat seurauksia edellisistä ilman poikkeuksia. Saman tulisi päteä myös säilymlakien ja tavallisten lakien suhteen Langen analogiassa. Toisin sanoen sallittujen kontrafaktuaalioletusten ala on paljon rajatumpi kuin niiden melko huole-

¹⁰ Vaikuttaa siltä, ettei Lange itsekään täysin luota konseptioonsa, sillä hän toteaa, että lait ovat ”jollain tavalla” välttämättömiä (engl. *some variety of necessity*) (Lange 2007, 472).

ton käyttö antaa ymmärtää. Tässä en argumentoi asiaa enempää, mutta nähdäkseni voidaan jopa väittää, että kun symmetriat ovat mitä ne ovat, universumin on oltava fysikaalisesti sellainen millainen se on. Toisin sanoen lakien eksplikoinnissa kontrafaktuaaleille ei tule antaa juurikaan painoarvoa (jos mitään). Langen tapauksessa tämä ilmenee niin, että hän keskittyy kontrafaktuaaleihin aivan kuin ne selittäisivät symmetrioiden ontologista asemaa. Mikäli argumentaationi on pätevää, näin ei ole, eikä siten symmetrioiden asemaan ole saatu selvyyttä Langen konstruktion avulla.

Symmetrioiden ontologiset suhteet: fysiikasta metafysiikkaan

Tässä jaksossa esitän fysikaalisia argumentteja symmetrioiden ontologisesta asemasta, jolloin huomataan, että fysiikan ja metafysiikan välillä on molemminpuolisia siirtymiä. Nähdäkseni näin tulee ollakin, sillä fysiikan eturintama on aina ollut erottamatonta fysikaalisten käsitteiden selventämisestä. Symmetrioiden, säilymlakien ja tavallisten lakien tiivis yhteys ei sulje pois niiden keskinäisiä vahvuussuhteita. Tässä Langen näkemys on nähdäkseni oikean suuntainen. Silti tulee kysyä mistä keskinäisen vahvuuden hierarkia johtuu, eli mitä Langen postuloima määräämissuhde symmetrioiden ja muiden lakien välillä tarkoittaa ontologisesti. Luonnonlakien ongelmat ovat niin monitahoisia – esimerkiksi konfirmaatio ja sen asteet, lainomaiset versus satunnaiset yleistykset, luonnollisten lajien projektiivisuus ja induktion ongelma – että joudun tekemään tässä ”aleksanteriratkaisun” sivaltamalla suoraan oletukseen, että lait eivät ole reaalisia vaan ne, mitä kutsutaan luonnonlaeiksi, ovat yleisiä tiivistäviä kuvauksia säännönmukaisista tapahtumista sekä entiteettien tyypillisistä vuorovaikutuksista.¹¹ Näin olete-

¹¹ Tässä en voi käsitellä muita ehdotuksia luonnonlakien eksplikaatioiksi. Riittääköön todeta, että pidän erityisesti epäilyttävinä yrityksiä, joissa paitsi, että lait oletetaan olemassa oleviksi, oletetaan myös niiden välttämättömyys ja se perustetaan universaaleihin (Armstrong

taan mahdollisimman vähän, mikä on ontologinen hyve aiheemme kannalta. Symmetrioita ei tule olettaa reaalina toisin kuin on tapana luonnonlakien suhteen. Lisäksi vältetään erinäisiä kehäpäätelmiä (engl. *begging the question*) symmetrioita koskevissa ontologisissa argumenteissa. Mitä tulee luonnonlakeihin, nähdäkseni niiden sijaan tulisi puhua vahvoista säännönmukaisuuksista tai invariansseista jo siitäkin syystä, että tämä ei ole reifioivaa toisin kuin puhe luonnonlaeista. Lisäksi invarianssit painottavat tyypillisten vuorovaikutusten poikkeuksettomuutta perustavimmalla fysikaalisella tasolla – parhaimpana esimerkkinä energian säilyminen. (Kvanttikenttäteorioissa tämä on probabilistista, mutta se ei muuta asian ydintä, sillä kokonaisprosesseissa energia säilyy.) Olennainen kysymys on, mitä tästä seuraa symmetrioiden suhteen.

Symmetrioiden asemaa on luontevaa lähestyä *symmetriarikojen* kautta. Kosmologian ja hiukkasteorian yhdistelmä on pääpiirteissään seuraava (Roos 2015). Nykyisin kokeellisesti saavutettavissa olevalla energiaskaalalla (noin 1 TeV saakka) sähköheikko ja värivoima ovat erillisiä; edellinen koskee pääosin kvarkkien ja leptonien (kuten elektronit) vuorovaikutuksia virtuaalisten fotonien ja vektoribosonien välityksellä, jälkimmäinen kvarkkien ja gluonien vastaavia siten, että nukleonit (kuten protonit ja neutronit) muodostuvat niistä. Puuttumatta ehdotettuihin teorioihin, sekä hieman yleistäen, niin sanottujen suurten yhtenäisteorioiden (GUT) mukaan universumin alkuhetkillä vallitsi 10^{14-16} GeV skaalassa kattava ja tarkka symmetria, joten hiukkaset/kentät olivat massattomia. (Tosin ei tiedetä, millai-

1978). Tämä on pelkkää reifiointia, joka ei lisää selitysvoimaa. (Lewis 1983 ja van Fraassen 1989, 96–99 ovat huomauttaneet samasta seikasta.) Erityisesti van Fraassen painottaa, että luonnonlakien modaalisuuden vahvuus – välttämättömyys – on edelleen riittävästi selvittämättä. Sittemmin universaalien välttämättömyys on pyritty selittämään ominaisuuksien ja tapahtumatyyppien kausatiolla (Tooley 1987, Armstrong 1993). Väittäisin kuitenkin, että tällöin universaaleilla ei ole enää reaalista tekemistä asian kanssa sen lisäksi, että kausaation eksplikaatio puolestaan jää kovin avoimeksi.

nen symmetria on kyseessä.) Tässä energiaskaalaa vastaa universumin lämpötila. Esimerkiksi kun GUT-symmetria alkoi rikkoutua (noin 10^{-37} sekuntia universumin alusta) lämpötilan pian vähentyessä arvoon $\approx 10^{15}\text{K}$ ($\approx 10^{-11}$ sekuntia), eli hiukkasten keskimääräisen liike-energian vähetessä ja etäisyyden kasvaessa universumin laajenemisesta johtuen, generoituivat massat vuorovaikutuksessa universumin kattavan Higgsin kentän kanssa. Seurauksena oli sähköheikon ja värivoiman erkaantuminen toisistaan. Koska Higgsin kenttä on vakioinen kaikkialla relevanttien parametrien suhteen, kuten kunkin hiukkaslajin massojen, niiden arvot ovat kullekin lajille samat. Symmetriarikkoa voi pitää faasimuunnoksena (analogiana höyryn nesteytyminen).¹² Asian ymmärtämistä helpottaa, kun sivuutetaan universumin nykyinen koko ja sen sijaan muistetaan, että symmetriarikot ja niihin liittyvät ilmiöt tapahtuivat, kun universumi oli *hyvin* pieni (noin jalkapallon kokoinen). Tällöin vuorovaikutusten ja faasimuunnosten ala asettuu oikeisiin mittoihinsa.

¹² Tarkemmin kuvattuna massojen generaatio sähköheikon voiman vektoribosoneille (ja yleistettävissä kaikille hiukkaslajeille) on seuraava. Goldstonen teoreeman mukaan jatkuvan (engl. *continuous*) symmetrian rikko tuottaa massattoman Goldstonen bosonin jokaiselle ryhmän virittäjälle, mutta sellaisia ei löydy. Ensi näkemältä tämä on vahva evidenssi symmetriarikkoa vastaan. Se koskee kuitenkin globaalia mittasymmetriaa, ja osoittautuu, että *lokaalin* mittasymmetrian rikko sallii massat säilyttäen myös renormalisoitavuuden. (Katso alaviite 7.) Higgsin mekanismi seuraa siten, että symmetrisessä tilassa oleva tyhjiö siirtyy faasimuunnoksena yhteen sen äärettömän monesta mahdollisesta degeneratiivisesta tilasta, jossa energian arvo on vähäisempi. (Tätä kuvaavat tunnettu "sombromalli" tai pystyssä olevan kynän horjahtaminen kumoon johonkin suuntaan.) Fysikaalisesti tästä seuraa vektoribosonikentän pitkittäispolarisaatiotila (engl. *longitudinal polarization*), mikä tarkoittaa massan ilmenemistä (koska massattomilla kentillä/hiukkasilla ei ole kyseistä tilaa). Tästä jää jäljelle Higgsin bosoni.

Holger Lyre on kiistänyt Higgsin mekanismin olemassaolon (Lyre 2008). Hänellä on kolme perustetta: ei ole kiistatonta evidenssiä imaginäärisille massoille, Goldstonen bosoneille eikä mittamuunnosten "instantiaatioille". Lyren perusteet eivät kuitenkaan kestä. Ensiksikin imaginääriset massat ovat epäfysiikaalisia, joten niitä ei voi käyttää vasta-argumenteissa. Massattomia Goldstonen skalaari- eli spin-0-hiukkasia ei ole havaittu, ja tämä selittyy juuri Higgsin mekanismilla, sillä kyseiset bosonit liittyvät globaaliin symmetriaan, mutta Higgsin mekanismi edellyttää lokaalin symmetrian, joten Goldstonen bosonien puuttuminen ei ole ongelma. Mitä tulee mittamuunnosten "instantiaatioihin", Lyre olettaa myös puhtaan mitta-argumentin, joka edellä todettiin riittämättömäksi. Tulee myös mainita, että spontaani symmetriarikko Higgsin mekanismina saattaa olla alun perin kestävä. Higgs osoitti, ettei spontaani symmetriarikko ole välttämätön, vaan lokaalit mittainvariantit parametrit riittävät (Higgs 1966). Tom Kibble osoitti saman ei-abelisille teorioille (sähköheikko ja värivoima) (Kibble 1967).

Tämä on toistaiseksi tuntemamme fysiikan mukainen kuvaus. Metafysiikka tulee mukaan spekulatiivisempaan ehdotuksena seuraavasti. Symmetrioilla on kolmijako: 1) helposti havaittavat, 2) kokeellisesti havaittavat ja 3) epäsuorasti havaittavat. 1-tyypin symmetrioista yksinkertaisin esimerkki on ympyrän infinitesimaaliset muunnokset. 2-symmetrioista energian säilymisen kokeellinen perusta mainittiin edellä; sille ei ole havaittu yhtään vastaesimerkkiä, ja mikäli se on yksi perustavimmista symmetrioista, ei niitä edes voi olla. 3-symmetriat ovat pääasiassa hiukkasfysiikan sisäisiä symmetrioita, kuten gluonien välittämän värivoiman eksakti ja isospinin epätarkka symmetria (johtuen ylös- ja alas-kvarkin massaerosta.) Epäsuorasti havaittavat symmetriat johtavat tarkastelun myös symmetriarikkoihin.

Symmetrioiden kolmijaosta saamme tarkennetun kuvan Langen metalakinäkemykseen. Verrattuina tavallisiin luonnonlakeihin, kuten liikelait, symmetrioiden kesken vallitsee kuitenkin aste-eroja, mikä ilmenee niiden rikkoina. Näin ollen vain eksaktit symmetriat ovat vahvuudeltaan ensisijaisia, ja tältä

osin niitä voidaan pitää ainoina ”metalakeina”. Asiaan liittyy kuitenkin kysymys, jota ei ole käsitelty: symmetrioiden ja luonnonvakioiden suhteet, kuten valonnopeus (tyhjiössä), Planckin vakio, gravitaatiovakio ja hiukkasten vuorovaikutusten kytkentävakiot. Nyt on olennaista huomata, että useimmat näistä *eivät* ole vakioita vaan riippuvat energiaskaalasta. Esimerkiksi niin kvanttisähködynamiikan kuin kvanttiväridynamiikan kytkentävakiot ovat niin sanottuja juoksevia kytkentöjä. Sähkömagneettinen varaus kasvaa energian kasvaessa eli etäisyyden lyhetessä, ja värivoima kasvaa etäisyyden kasvaessa (kvarkkien ja gluonien asymptoottinen vapaus/kahliutuminen). Valonnopeus puolestaan riippuu väliaineesta, jossa se liikkuu. (Planckin vakio vaikuttaa olevan aito vakio. Puhe siitä, että se voi lähestyä arvoa 0, on parametrien idealisointia vailla suoraa fysikaalista merkitystä.) Silti valonnopeutta eli suppean suhteellisuusteorian sisältämää kausaalisen signaalivälitysnopeuden *ylärajaa* voidaan pitää vakiona. Tällaisena sen fysikaalinen yhteys *lokaaleihin* mittasymmetrioihin tulee ilmeiseksi, kuten kirjoituksen alkupuolella osoitettiin.

Edellä sanotusta nähdään, että symmetriat eivät ole erillisiä toisistaan eivätkä muista relevanteista fysikaalisista tekijöistä (elementeistä, parametreista). Siksi esitän, että symmetriat ilmenevät perustavimpien fysikaalisten elementtien yhteyksissä ja vuorovaikutuksissa. Mutta se, miten nämä kussakin tapauksessa selittyvät, vaihtelee. Esimerkiksi kvarkkien massojen tulisi olla samoja, jos eksakti SU(6)-symmetria vallitsisi. (Koska niillä on massa, kyseessä ei voi olla mittasymmetria, joka edellyttää massattomat hiukkaset tai kentät ja koskee vektoribosoneita.) Symmetria on rikkoutunut Higgsin mekanismin kautta, mutta mikä antaa sysäyksen tälle, ei ole tiedossa. Sikäli nimitys ”spontaani” symmetriarikko on tämän tunnustamista. Energian säilyminen ajan symmetriana on eksakti, joten sillä on ”metalakina” kumoamaton vahvuus, kuten toistaiseksi vaikuttaa. Itse asiassa voidaan argumentoida, että ilman energian säilymistä meillä ei olisi fysiikkaa sellaisena kuin se on – ehkei fysiikkaa lainkaan, eli universumi olisi aidosti akausaalinen.

Ontologisesti vahvimmat ja eksaktit symmetriat ovat siten niin vahvoja säännönmukaisuuksia (eivät itsenäisiä lakeja ontologisesti) perustavimmissa vuorovaikutuksissa, että niistä seuraavat heikompien symmetrioiden asemat symmetriarikkojen kautta.¹³ Metafyysinen kokonaiskuva on siten eräänlainen lokaalein vuorovaikutuksin rakentuva holismi. Perustavimmat fysikaaliset elementit vaikuttavat toisiinsa, ja mitään "sisäisiä" (engl. *intrinsic*) ominaisuuksia tai suureita ei ole. Hyvä esimerkki tästä on universumin kattava Higgsin kenttä, joka antaa kvanttikentille massat johtuen näiden liikkeestä siinä. (Tämä tarkoittaa myös, että massaa *sui generis* ei ole.) Samoin hiukkas-ten varaukset eivät ole vakioita, ja tämä johtuu tyhjiön polarisaatiosta eli varausten varjostumisesta hiukkas-antihhiukkasparien muodostumisesta niiden ympärille. Esimerkiksi elektronin "paljas" varaus kasvaa, mitä lähemmäs elektronia päästään virtuaalisten elektroni-positroni-parien muodostaman hiukkas-antihhiukkasparien pilven läpi.

Tämä yleinen näkemys jättää avoimeksi kaksi vielä perustavampaa ongelmaa: 1) miten vahvimmat symmetriat (ja luonnon "vakiot") ovat saaneet alkunsa? ja 2) miten symmetriarikot ovat mahdollisia? Tässä ollaan sekä ääri-fysiikan että äärimetafysiikan alueella; ehkä tuleva fysiikka vastaa näihin kysymyksiin, ainakin pyrkimys on kattava ja kiivas. Taustalla on kuitenkin ikiaikainen pohdinta siitä, miten universumimme tuli olemaan, eli miksi on jotain sen sijaan ettei olisi mitään.

¹³ Tämä sopii yhteen edellä mainittuun Christopher Martinin näkemukseen mittasymmetrioiden yhteydestä muihin fysikaalisesti relevantteihin tekijöihin. Eri vahvuiset symmetriat fysikaalisina ja niiden suhteet muihin relevantteihin elementteihin tukevat myös Bradingin ja Brownin (2003) näkemystä, sillä vahvimpia symmetrioita voidaan pitää suhteellisen riippumattomina heikommista, vaikkei erillisinä ontologisesti.

Symmetriat ja energian säilyminen

Koska olen edellä laittanut panokseni energian säilyvyyden keskeisyydelle, tarkastelen kirjoitukseni loppuksi vielä yhtä argumentaatiota energian säilymislain universaalisuutta vastaan (Maudlin *et al.* 2020).¹⁴ Otan esille kolme seikkaa, joihin Maudlin *et al.* keskittävät huomionsa (ja joita arvioitsija myös painotti). Nämä ovat suhteellisuusteorioiden asema ja Noetherin teoreemat, kvanttimekaniikan standardiformalismi ja kvanttigravitaatio.

Aloitetaan suhteellisuusteoreettisista tarkasteluista. Tiedetään että yleisessä suhteellisuusteoriassa pelkkä energian säilyminen ei päde, mutta energia-liikemäärä-tensori (tai engl. ns. *stress-energy tensor*) vastaa yleisempää säilymislakia. Näin ollen en näe, miksi tämä yleistys osoittaisi, että fysiikan perustavimassa säilymislaissa olisi jotain suhteellisuusteoreettisesti ongelmallista. Päinvastoin on odotettavissa, että teoria, joka muokkaa käsityksiämme aika-avaruudesta siinä määrin kuin yleinen suhteellisuusteoria on tehnyt, muokkaa myös ontologisia tekijöitä. (Joka tapauksessa diffeomorfismit eli koordinaatistojen vertailut säilyttävät symmetriaroolinsa.) Tulee myös huomata, että argumenttinsa kulussa Maudlin *et al.* itse asiassa myöntävät, ettei energia-liikemäärä-yleistys ole riittävä argumentti lokaalia energian säilymistä vastaan. Lisäksi he huomauttavat, että yleisessä suhteellisuusteoriassa ollaan tekemisissä idealisointujen mallien kanssa, mutta antavat ymmärtää tästä seuraavan ongelmia todellisten fysikaalisten systeemien suhteen. Tämä huomautus on kuitenkin irrelevantti, sillä kaikki fysiikan alat sisältävät idealisointeja (kuten tieteenalat yleisesti). Idealisaatiot kuuluvat tieteellisiin selityksiin ja malleihin, eivätkä ne sinänsä ole ongelmallisia. Lisäksi energian säilyminen ei ole idealisaatio vaan yksi fysiikan perustavin tarkka symmetria.

¹⁴ Toinen arvioija painotti artikkelia Maudlin *et al.* 2020. Se on tärkeä, mutta kuten pyrin osoittamaan, en pidä sen argumentteja riittävinä energian säilymisen epäilemiseksi. Artikkelin on myös melko rönsyilevä, joten sen kattava käsittely ei ole tässä mahdollista.

Kvanttimekaniikan ja energian säilymislain suhteen tulee erottaa epärelativistinen kvanttimekaniikka relativistisista eli kvanttikenttäteorioista. Itse asiassa epärelativistinen versio ei ole relevantti aiheeni kannalta, sillä se ei voi selittää keskeisiä relativistisia seurauksia, kuten spin ja antimateria. Lisäksi kuten edellä todettiin, epärelativistinen Schrödingerin yhtälö ei ole lokaalisti mittainvariantti. Tähän liittyy kaksi muuta huomiota. Maudlin *et al.* olettavat kvanttimekaniikan niin sanotun ominaistila-ominaisarvo-linkin (engl. *the Eigenstate–Eigenvalue link*), mutta sen asema on nykyään kiistanalainen ja nähdäkseni hyvin perustein (Wallace 2008, 43).¹⁵ Toiseksi he väittävät, että kvanttimekaniikan standardiformalismi ei salli tarkkaa analyysiä säilymislaeista. Tämä kuitenkin kääntyy helposti *tollens*-argumentiksi, eli sen huonompi standardiformalismille – vaikken tässä voi kyseistä argumentaatiota esittää. (Normaalia sivumääräisempi *Ajatus*-nidekään tuskin riittäisi siihen.)

Mitä tulee kvanttikenttäteorioihin, Maudlin *et al.* epäilevät jossain määrin Noetherin teoreemojen fysikaalisia seurauksia. (Tässä ongelmana on, etteivät he erottele teoreemojen globaalia ja lokaalia versiota toisistaan. Yleensäkin heidän artikkelinsa käsittelytapa on puutteellinen, sillä se keskittyy globaaleihin versioihin säilymislaeista – siis täysin kvanttikenttäteorioiden fysikaalisen hengen vastaisesti.) He argumentoivat, että globaali säilymislaki voi päteä, vaikka lokaali ei pätsi. Esimerkiksi lokaalinen suure kuten energia voi hävitä tietyistä alueesta ilman, että se siirtyy jatkumona (engl. *continuously*) – eli lokaalisesti – alueen rajojen läpi muihin alueisiin. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, ellei oleteta niin kutsuttuja viivästettyjä potentiaaleja (engl. *retarded potentials*), jotka kieltävät kenttien olemassaolon. Viivästetyt potentiaalit ovat kuitenkin pudonneet pois kenttien tieltä; Lange (2002, 112–19) esittää tämän puolesta

¹⁵ Ominaistila-ominaisarvo-linkki tarkoittaa lyhyesti sitä, että kvanttisysteemillä on tietyn suureen arvo ainoastaan, kun kyseinen systeemi on tätä suuretta vastaavassa ominaistilassa. Ominaistila puolestaan on tila, joka ei muutu, kun kvanttimekaanista operaattoria (kuten liikemäärää tai positiota vastaava) sovelletaan siihen.

kattavan argumentaation, joten vastaesimerkki lokaalille säilymiselle ei päde fysikaalisesti. Lisäksi heidän ”standardiformalismiin” käsittelynsä sulkee lähtökohtaisesti pois kvanttikenttäformalismit, erityisesti Feynmanin diagrammit, joten on epäselvää, kuinka heidän väitteensä yleistyvät relativistisiin vuorovaikutuksiin.

He myös esittävät Noetherin teoreemoihin liittyen oudon väitteen, etteivät säilyvät kvantiteetit ole selkeästi reaalisia fysikaalisia suureita vaan matemaattisia varjoja (engl. *shadows*) Lagrangen yhtälöiden globaaleista symmetriaominaisuuksista. Eli esimerkiksi liikemäärä ja sen säilyminen eivät olisi fysikaalista eikä fysikaalisesti varmennettua? Tämä ei pidä paikkaansa. *Punkt*. Myönnettäköön ettemme edelleenkään tiedä, mitä energia on, mutta tästä ei seuraa, ettei se olisi säilyvä suure.¹⁶

Lopuksi muutama sana kvanttigravitaatiosta ja efektiivisistä teorioista. Kuten arvioija oikein esittää, aika-avaruutta ja sen metriikkaa on alettu pitää efektiivisinä, eli niitä ei oleteta ontologisesti teorian perusrakenteeksi (toisin kuin kvanttikenttäteorioissa). Käsittäakseni tämä on toistaiseksi kuitenkin vain heuristinen laajennus varsinaisesta efektiivisten teorioiden alkuperäisestä lähestymistavasta, joka on hallinnut kvanttikenttäteoreettista tutkimusta noin kolmekymmentä vuotta. Sen motiivi oli renormalisaation ongelmat eli hiukkasten/kenttien vuorovaikutusprosessien laskemisen tuottamat äärettömät tulokset energiaskaalan kasvaessa. Sinänsä efektiivisyyden ydinajatus ei liity symmetrioiden ja säilymislakien ontologiseen asemaan. Efektiivisyys tarkoittaa sitä, että energian kasvaessa joudutaan ottamaan huomioon uusia vuorovaikutuksia ja siten mahdollisesti uusia hiukkaslajeja (kuten skaalassa 80–90 GeV sähköheikon voiman vektoribosonit). Siksi on laskennallisesti

¹⁶ Lisäksi he väittävät, että on ”eri energioita” riippuen eri ”ajankaltaisista symmetrioista”. Mutta ei ole ”eri ajankaltaisia symmetrioita”; aika ei ositu näin kvanttikenttäteorioissa. Suppeassa suhteellisuusteoriassa jokaisella inertiaalikoordinaatistolla, eli fysikaalisella systeemillä, on oma ominaisaikansa (engl. *proper time*), mutta tämä on irrelevanttia, sillä kyse on koordinaatistojen välisistä muunnoksista, jotka säilyttävät suureiden arvot samoina.

hyödyllistä katkaista tuo skaala jossain kohtaa, jotta laskujen tulokset pysyvät kurissa. Itse asiassa tämä tavallaan kieltää renormalisaation relevanssin, sillä laskutulosten äärettömyydet eivät ilmene. (Nykyään sovelletaan niin sanottuja renormalisaation ryhmäyhtälöiden menetelmiä (engl. *renormalization group equations*), mutta tässä en voi mennä niihin.) Kvanttigravitaation teorioissa efektiivisyys ei ole ensisijaisesti laskennallista vaan ontologista. Kuten todettua, aika-avaruutta pidetään monissa niissä efektiivisenä rakenteena, joka ei ole itsenäisenä olemassa perustavimmalla tasolla. Tällöin ongelmana on, miten aika-avaruus syntyy, ja tämän selittäminen edellyttää fysikaalista mekanismia. Se, että tässäkin energiaskaala kasvaa etäisyyden lyhetessä, ei kerro mitään energian säilymistä vastaan.¹⁷

Mitä tulee energian säilymiseen, ilmeisesti Maudlin *et al.* väittävät, että on edellytettävä klassinen aika-avaruus, jotta säilymlakeja voitaisiin edes käsitellä. Jos näin on, tämä on heikko argumentti, sillä tietääkseni ei ole matemaattisesti tai fysikaalisesti riittävän vahvaa vihjettä, saati että olisi osoitettu kvanttigravitaation perustumattomuus joillekin keskeisille säilymlaeille, eritoten energian säilymiselle. Tai ettei "fundamentaalisella fysikaalisella tasolla" olisi säilyviä suureita. Lisäksi on huomautettava siitä, että esimerkiksi silmukkkvanttigravitaatioteorioissa aikaa ei oleteta, joten saattaa olla, ettei Heisenbergin energian ja ajan välinen epätarkkuusrelaatio ole ainakaan sellaisenaan voimassa perustavimmalla tasolla. Näin olisi mahdollista, että energia säilyy yksittäisprosesseissakin.¹⁸ Joka tapauksessa Maudlinin *et al.* argumentaatio energian universaalista säilymistä vastaan ei vaikuta kestävältä. Nähdäkseni sen

¹⁷ Karen Crowther (2016) painottaa emergenssiä aika-avaruuden efektiivisyyden selittävänä mekanismina. Tosin paikoin hän ei tee riittävää eroa efektiivisyyden laskennallisiin ongelmiin.

¹⁸ Tapana on olettaa, että yleistä suhteellisuusteoriaa tulee muuntaa kvanttimekaniikan hyväksi kvanttigravitaatiossa. Mutta miksei olisi siten, että kvanttimekaniikkaa tulee muuntaa, jotta se sopisi yhteen yleisen suhteellisuusteorian kanssa? Kolmas vaihtoehto on tietenkin, että kumpaakin teoriaa on muunnettava.

perusvirhe on, etteivät he käsittele säilyvien suureiden ja säilymislakien perustavaa asemaa tämän hetken toisen perustavimman teoriarakennelman eli lokaalisten kvanttikenttäteorioiden kannalta. Vallitseva tilanne on, että teoriaa ei oteta vakavasti, ellei se ole lokaalisti mittainvariantti symmetrioineen.

Toki tulee olla valmis perustaviin muutoksiin tieteessä – en väitä, että energian säilyminen on *a priori* ehdoton – mutta energian säilymisen mahdollinen rikkoutuminen ei ole mikään yksittäinen tapahtuma tai edes tapahtumaluokka. Se koskisi koko fysiikkaa ja romuttaisi sen perusteissaan. Jos energia ei säilyisi, myöskään relativistinen liikemäärä ei säilyisi, mikä romahduttaisi universumin kausaaliset suhteet, eivätkä ajan-, valon- ja avaruudenkaltaisten tapahtumien yhteydet pätisi. (Tätä Maudlin *et al.* eivät edes näytä huomaavan.) Väitänkin, että ilman säilyviä suureita, varsinkin energian säilymistä, meillä ei olisi nykyistä fysiikkaa ja ehkei fysiikkaa lainkaan – eikä todellisuus toimisi kuten se toimii.

Helsingin yliopisto

Kirjallisuus

- Armas, Jacomé (2021). *Conversations on Quantum Gravity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Armstrong, David (1978). *A Theory of Universals*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Armstrong, David (1993). "The Identification Problem and the Inference Problem", *Philosophical and Phenomenological Research* 53, 421–422.
- Atkins, Peter (2018). *Conjuring the Universe. The Origins of the Laws of Nature*. Oxford: Oxford University Press.
- Bangu, Sorin (2013). "Symmetry". Teoksessa Robert Batterman (toim.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. New York: Oxford University Press, 287–317.
- Brading, Katherine ja Elena Castellani (toim.) (2003). *Symmetries in Physics. Philosophical Reflections*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brading, Katherine ja Elena Castellani (2003). "Introduction". Teoksessa Brading ja Castellani 2003, 1–28.

- Brading, Katherine ja Harvey Brown (2003). "Symmetries and Noether's Theorems". Teoksessa Brading ja Castellani 2003, 89–109.
- Coleman, Sidney & David Gross (1973). "Price of Asymptotic Freedom", *Physical Review Letters* 31, 851–4.
- Crowther, Karen (2016). *Effective Spacetime: Understanding Emergence in Effective Field Theory and Quantum Gravity*. Cham: Springer International Publishing.
- Elitzur, Shmuel (1975). "Impossibility of Spontaneously Breaking Local Symmetry", *Physical Review D* 12, 3978–82.
- Feynman, Richard (1967). *The Character of a Physical Law*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Friederich, Simon (2013). "Gauge Symmetry Breaking in Gauge Theories – In Search of Clarification", *European Journal for Philosophy of Science* 3 (2), 157–82.
- Froggatt, Colin ja Holger Nielsen (toim.) (1991). *Origin of Symmetries*. Singapore: World Scientific.
- Fröhlich, Jürg, Giovanni Morchio ja Franco Strocchi (1981). "Higgs Phenomenon without Symmetry Breaking Order Parameter", *Nuclear Physics B* 190, 553–82.
- Healey, Richard (2007). *Gauging What's Real. The Conceptual Foundations of Contemporary Gauge Theories*. Oxford: Oxford University Press.
- Higgs, Peter (1964). "Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons", *Physical Review Letters* 13, 508–9.
- Higgs, Peter (1966). "Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons", *Physical Review* 145, 156–63.
- Houtappel, Raymond, Hendrik Van Dam ja Eugene Wigner (1965). "The Conceptual Basis and Use of the Geometric Invariance Principles", *Reviews of Modern Physics* 37, 595–632.
- Kibble, Tom (1967). "Symmetry Breaking in Non-Abelian Gauge Theories", *Physical Review* 155, 1554–61.
- Kosso, Peter (2000a). "The Epistemology of Spontaneously Broken Symmetries", *Synthese* 122, 359–76.
- Kosso, Peter (2000b). "The Empirical Status of Symmetries in Physics" *British Journal for the Philosophy of Science* 51 (1), 81–98.
- Kosso, Peter (2000c). "Fundamental and Accidental Symmetries", *International Studies in the Philosophy of Science* 14 (2), 109–21.
- Lange, Marc (2002). *An Introduction to the Philosophy of Physics. Locality, Fields, Energy, and Mass*. Oxford: Blackwell Publishers.

- Lange, Marc (2007). "Laws and Meta-Laws of Nature: Conservation Laws and Symmetries", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38 (3), 457–81.
- Lewis, David (1983). "A New Work for a Theory of Universals", *Australasian Journal of Philosophy* 61, 343–77.
- Lyre, Holger (2008). "Does the Higgs Mechanism Exist?", *International Studies in the Philosophy of Science* 22 (2), 119–33.
- Mainzer, Klaus (1996). *Symmetries of Nature. A Handbook for Philosophy of Nature and Science*. Berliini: Walter de Gruyter.
- Martin, Christopher (2002). "Gauge Principles, Gauge Arguments and the Logic of Nature", *Philosophy of Science* 69, S221–34.
- Martin, Christopher (2003). "On Continuous Symmetries and the Foundations of Modern Physics". Teoksessa Brading ja Castellani 2003, 29–60.
- Maudlin, Tim, Elias Okon ja Daniel Sudarsky (2020). "On the Status of Conservation Laws in Physics: Implications for Semiclassical Gravity", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 69, 67–81.
- Nielsen, Holger (1991). "Catastrophe Theory Program". Teoksessa C. Froggatt & H. Nielsen 1991, 566–81.
- Robinson, Matthew (2011). *Symmetry and the Standard Model Mathematics and Particle Physics*. New York: Springer.
- Roos, Matts (2015). *Introduction to Cosmology*. Fourth Edition. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Rovelli, Carlo (2014). "Why Gauge?", *Foundations of Physics* 91 (1), 91–104.
- Smeenk, Chris (2006). "The Elusive Higgs Mechanism", *Philosophy of Science* 73 (5), 487–99.
- t'Hooft, Gerard (2001). "Obstacles in the Way Towards the Quantisation of Space, Time and Matter – and Possible Resolutions", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32 (2), 157–80.
- Tooley, Michael (1987). *Causation*. Oxford: Clarendon Press.
- van Fraassen, Bas (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford: Clarendon Press.
- Wallace, David (2008). "Philosophy of Quantum Mechanics". Teoksessa Dean Rickles (toim.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics*. Aldershot: Ashgate, 16–98.
- Weinberg, Steven (1999). *Unelmia viimeisestä teoriasta*. Suom. Jukka Maalampi, Helsinki: Art House.
- Wigner, Eugene (1967). *Symmetries and Reflections*. Bloomington, IN: Indiana University Press.