



Hiukkasfysiikan standardimalli ja unifikationsmi

ARI PEUHU

Johdanto

Kartoitan hiukkasfysiikan Standardimallin ja unifikationsistisen tieteenfilosofian yhteyksiä. Ensin esitän narratiivin Standardimallin kehityksestä, jonka avulla kritisoin muutamia unifikationsiomalleja, erityisesti niiden oletusta unifikationsion ja konfirmationsion yhteydestä. Kritisoin myös Michael Friedmanin unifikationsiomallia, ja puolustan lyhyesti Philip Kitcherin unifikationsionia eritoten Standardimallin suhteen. Lisäksi pyrin osoittamaan Standardimallin kehitykseen vedoten, että *ad hoc* -hypoteeseilla on merkittävä rooli unifikationsiivisten teorioiden kehittämisessä: niistä tulee päättelyitä parhaaseen selitykseen. Tätä piirrettä unifikationsionistisessa teoriadynamiikassa ei ole aiemmin painotettu.

Kvanttisähködynamiikka

Standardimallin ja unifikationsmin tarkastelu on luontevaa alkaa kvanttisähködynamiikasta (QED; *Quantum Electro Dynamics*).¹ Se perustuu Diracin yhtälöön, joka yhdisti erityisen suhteellisuusteorian kvanttimekaniikkaan ja ennusti sekä spinin että antimaterian (Dirac 1928). Kvanttisähködynamiikka selittää elektronien ja fotonien vuorovaikutukset, elektronien magneettiset ominaisuudet ja paljon muita sähkömagneettisia ilmiöitä. Näissä keskeisessä roolissa ovat niin samotut virtuaaliset fotonit, jotka välittävät vuorovaikutuksia. Tämä liittyy sähkömagnetismin kytkentävakioiden, ja nämä vuorovaikutuksen *minimiverteksit* on tapana ilmaista Feynmanin kaavioiden avulla. Ne paljastavat havainnollisesti myös QED:n perustavan matemaattisen ongelman eli verteksien laskennan tuottamat äärettömyydet. Fysikaalisesti tämä seuraa siitä, että vuorovaikutusten laskemisessa eivät riitä ensimmäisen kertaluvun prosessit, kuten elektronien sironta fotonin vaihdolla. Koska fotonit ovat virtuaalisia, niitä ei voi havaita suoraan mittalaitteilla, toisin kuin niiden kausaalisia vaikutuksia esimerkiksi vetyatomin energiatasojen eroissa. Virtuaalisuus johtuu siitä, että Heisenbergin ajan ja energian välinen epätarkkuusrelaatio sallii energian "lainaamisen" eli tilapäisen energian säilymislain rikkoutumisen, kunhan tuo laina maksetaan takaisin prosessin päättyessä, eli että kokonaisprosessissa energia säilyy. Tarkemmin ilmaistuna $\Delta E \Delta t \sim \hbar$, josta $\Delta t \sim \hbar / \Delta E < \hbar / mc^2$ (josta saadaan vuorovaikutuksen etäisyysmitta $r \sim c \Delta t \sim \hbar / mc$).

QED:n virtuaalihiukkaset koostuvat paitsi fotoneista myös elektroni–positroni-pareista, näiden muuttumisesta uusiksi virtuaalifotoneiksi ja niin edelleen. Kun kaikki mahdolliset virtuaaliprosessit integroidaan eli lasketaan yhteen, tulokset ovat fysikaalisesti mielettömiä niin massan kuin varauksen suhteen.

¹ Standardimallista kiinnostunut voi perehtyä aiheeseen lukemalla Ursa 1980; Watkins 1986; Schweber 1994; Icke 1995; Feynman 2002; Schumm 2006. Teknisiä oppikirjoja on leegio, mutta suositeltavia ovat Greiner & Reinhardt 1994; Greiner & Schäfer 1995; Greiner & Müller 1996; Aitchison & Hey 2013a, 2013b.

Yksikkösähkövaraukseen (kytkentävakioon) e liittyvä QED-hienorakennevakion α arvo on noin $1/137$ ($= e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$; ϵ_0 on tyhjiön dielektrisyysvakio ja $\hbar = h/2\pi$), ja jokaiset kaksi uutta verteksiä vaikuttavat e^2 kertaa heikommin virtuaaliprosesseissa. Esimerkkinä tästä on elektroni–elektroni-sironta, jossa elektroniparista muodostuu virtuaalinen foton, siitä elektroni–positroni-pari, joka annihiloituu virtuaaliseksi fotoniksi, ja tämän hajotessa muodostuu taas elektronipari ($e^-e^- \rightarrow \gamma \rightarrow e^-e^+ \rightarrow \gamma \rightarrow e^-e^-$). Kun kaikki mahdolliset virtuaaliprosessit otetaan huomioon, tulokset pysyvät äärettöminä, vaikka α pienenee niissä suhteessa $1/137$.²

Läike integraalien äärettömiin arvoihin, niin sanotut renormalisaatiotekniikat (Schwinger 1958, 1996), kehitettiin 1940-luvulla. Ne ovat matemaattisesti monimutkaisia, mutta fysikaalinen idea on suoraviivainen (Teller 1995, 149–69). Koska laskut antavat äärettömiä tuloksia, mutta mitatut arvot massalle ja varaukselle ovat äärellisiä, korvataan laskuissa alkuperäiset arvot mitatuilla siten että ne kumoavat toisensa, joten tulokset ovat

² Arvioitsija kysyi Feynmanin kaavioiden sisältämien virtuaalisten ”kummitusten” (*ghost fields*) reaalisesta tulkinnasta. Nähdäkseni niitä ei voi ottaa reaalisina siinä mielessä, että ne olisivat kokeellisesti todettavissa, kuten esimerkiksi sähköheikon voiman virtuaalibosonit. Richard Healey (2007, 168) kannattaa samanlaista ontologista asennetta: siitä, että aavekenttiä käytetään laskuissa mittainvarianssin säilymiseksi, ei seuraa, että ne toisivat esiin havaittavia ominaisuuksia millään tavalla, saati niiden omaa reaalisuutta. Lisäksi tulee se, että ne ovat ristiriidassa spin-statistiikka-teoreeman kanssa, joka on yksi perustavimmista kvanttikenttäteorian elementeistä ja joka tekee eron fermionien ja bosonien välillä. On tapana erottaa hyvät ja pahat aaveet; edellisiä käytetään mittainvarianssin ja unitaarisuuden (positiivisen todennäköisyyden) säilyttämisessä; jälkimmäiset ovat tyystin epäfysikaalisia. Joka tapauksessa hyvätkin aaveet eroavat virtuaalihiukkasista siinä, ettei niitä voi todeta reaalisina. Tulee myös huomata, että jotkin mitat (*gauge*) eivät johda aaveisiin. Se, että aaveita ilmenee yhtälöihin, on tietenkin ongelma, joka voi viitata kvanttikenttäteorioiden matemaattisen perustan puutteisiin, mutta mihin tarkalleen ottaen, on epäselvää.

äärellisiä. Toinen tapa selittää renormalisaatio on, että koska "alastoman" elektronin varausta ja massaa ei voida suoraan mitata, koska se on aina virtuaalifotonipilven varjostama (sekä elektroni-positroni-parien korkeampien kertalukujen prosesseissa), voidaan sen arvoksi valita mikä vain, jotta saadaan vastaavuus mittaustuloksiin.³ Sama pätee fotoniin, sillä sen ympärillä kuhisee koko ajan virtuaalisia elektroni-positroni-pareja, jotka polarisoivat tyhjiön eli varjostavat fotonia. Se mitä havaitaan on tämä kokonaisprosessi, joten fotonin liikemäärä-energia prosessin alussa ja lopussa säilyy ja voidaan siten renormalisoida. Merkittävä ilmiö, jolla oli keskeinen sija QED:n ja renormalisaation kehittämisessä, on Lambin siirtymä eli s ja p orbitaalelektronien energiaero vetyatomissa (noin 1040 MHz), jota Diracin yhtälö ei ennusta (Lamb & Retherford 1947). Siirtymä selittyy tyhjiön energiafluktuaatioiden ja elektronin vuorovaikutuksina, jotka aiheutuvat virtuaalisista fotoneista. Toinen seuraus on, että hienorakennevakio ei ole vakio vaan riippuu käytetystä energiasta ja siten etäisyydestä: mitä lähemmäs alastonta elektronia päästään, sen suuremmaksi varaus kasvaa ja kääntäen. (Tosin renormalisaatio pettää suurilla energioilla, koska tuolloin häiriöteoriaa (*perturbation theory*) ei voi soveltaa ja renormalisaatio pätee vain häiriöteoreettisesti.)

Kvarkit ja kvanttiväridynamiikka

Murray Gell-Mann julkaisi 1960-luvun alussa kaksi tutkimusta vahvasta voimasta, joissa hän postuloi kvarkit ("Eightfold

³ Tätä ei tule sotkea tyhjiön virtuaalihiukkasiin, sillä ne on todettu muissa ennustetuissa ilmiöissä, kuten Casimir-efektissä. Arvioitsija kysyi Casimir-efektin tulkinnasta realismin suhteen. Nähdäkseni vastaus on selvä: Casimir-efektin todennus hyvin tarkasti laskuja vastaavana oikeuttaa päättelemään virtuaalisten prosessien reaalisuuteen. (Casimir-efektissä kaksi tyhjiössä lähekkäin olevaa metallilevyä lähestyy toisiaan niiden välissä tapahtuvista virtuaalisista prosesseista johtuen, kuten elektroni-positroni-parien muodostuminen ja häviäminen. Tällöin varausten polarisaatio vaikuttaa levyihin.)

Way”) (Gell-Mann 1961, 1964); Yuval Ne’eman oli toinen teoreetikko samoilla linjoilla (Ne’eman 1961). Alkuperäiset kvarkit seuraavat matemaattisesti SU(3)-ryhmän perustavasta esityksestä, ja niitä on kolme: ylös (*up*), alas (*down*) sekä outo (*strange*). Samaan aikaan myös George Zweig esitti, että SU(3) on olenainen ryhmä, ja postuloi ”ässät” (*aces*) (Zweig 1964a, 1964b); tämä oli niin sanottu konstituenttikvarkkimalli (CQM).⁴ Hadronit eli mesonit ja baryonit eivät siten voineet koostua mieltävaltaisista yhdistelmistä, vaan mesonit ovat kvarkki-antikvarkki-pareja ja baryonit kolmen kvarkin yhdistelmiä. Kumpikin malli sopi hyvin yhteen tuolloisten koetulosten kanssa; erityisesti voi mainita Gell-Mannin ennusteen Ω :n massalle.

Kolmas malli oli Feynmanin partonit (*partons*) (Feynman 1969a, 1969b). Kuten paljas elektroni, ovat myös protoni ja neutroni virtuaalisen hiukkasparven ympäröimiä (erityisesti pionien), mutta QED:hen verrattuna laskut ovat paljon vaikeampia, sillä vahvan voiman kytkentävakio g on huomattavasti suurempi – $g \approx 1$ – joten jokainen kertaluku lisää vaikeuksia. Kuitenkin suurilla energioilla eli törmäytettäessä elektroneja ja positroneja lyhyillä etäisyyksillä nukleoneihin ne läpäisevät virtuaalipilven tehokkaammin, ja tuloksista nähdään, että partonit vaikuttavat käyttäytyvän kuin vapaat hiukkaset. Tämä käy ilmi niiden liikemääräjakautumasta, sillä erillisinä partoneita ei havaittu.

Partonit olivat tehokas hypoteesi tuolloin löydetyn mitta-kaavaominaisuuden selittämisessä (*scaling*). Kyseessä on niin sanottujen syvien epäelastisten sirontojen (*deep inelastic scattering*) seuraus, kun esimerkiksi elektroni törmää protoniin ja syntyy muita hiukkasia (tästä nimitys epäelastinen; elastisessa prosessissa uusia hiukkasia ei synny). Huomattiin, että tällaiset reaktiot noudattavat yhdenmukaisia suhteita elektronien ja

⁴ Kuten tunnettua, Gell-Mannin nimitys James Joycen *Finnegans Wake*sta jäi voimaan; ”Three quarks for Muster Mark! Sure he hasn’t got much of a bark. And sure any he has it’s all beside the mark.” (Joyce 1966, 383).

protonien välisille liikemääräjakaumille sekä elektronin energian muutoksille. Näitä kuvaavat rakennefunktiot (*structure functions*), dimensiottomat luvut W_1 ja νW_2 , jotka riippuvat suureista q^2 sekä ν (ν on elektronin energiahäviö ja q^2 elektronin ja protonin välisen liikemäärän arvo) ja asettuvat yhtenäiselle kuvaajalle. Rakennefunktioiden paljastama liikemääräriippuvuus varsinkin suurilla sirontakulmilla selittyi hyvin partonien avulla, ja kun lisäksi niiden muut kvanttiominaisuudet vastasivat kvarkkeja – erityisesti se, että niiden spin oli $\frac{1}{2}$ – ei kestänyt kauaa ennen kuin ne samaistettiin kvarkkeihin.

Aivan näin tiukka yhteensopivuus ei kuitenkaan aluksi vallinnut. Rakennefunktiot antoivat noin 2 kertaa liian suuren arvon. Mallia muokattiin postuloimalla valenssikvarkkien (ylös, alas, outo) lisäksi ”kvarkki-antikvarkki-meri”, sillä hadronit ovat virtuaalipilven ympäröimiä. Näin rakennefunktiot saivat enemmän empiiristä luotettavuutta, vaikkeivät vieläkään riittävä. Tämä heikkous hälväni kuitenkin seuraavina vuosina.

Kolmen kvarkin sisältämä ryhmäteoreettinen SU(3)-symmetria on rikkoutunut, eli kvarkkien massat eroavat toisistaan, mutta malli toimi silti hyväksyttävästi. Hadronit vuorovaikuttavat vahvan voiman välityksellä, mutta ne tuntevat myös heikon voiman, joka muuttaa niiden makuja toisikseen. Kolmen kvarkin malli sallii esimerkiksi heikon voiman prosessin, jossa kaoni K_L^0 hajoaa myoni-antimyoni-pariksi. Prosessi on seuraava: K koostuu alaskvarkista ja antioutokvarkista ja hajoaa siten, että alaskvarkista syntyy virtuaalinen ylöskvarkki-W-pari, josta muodostuu outo-antiouto-pari, ja se synnyttää virtuaalisen Z^0 :n, joka lopulta hajoaa myoni-antimyoni-pariksi. Tätä outouden muuttavaa heikon neutraalin virran prosessia (SCNC, *strangeness changing neutral currents*) ei kuitenkaan havaita. Selitys on, että kyseinen prosessi kumoutuu tarkasti kaikkien huomioon otettavien Feynman-diagrammien interferenssissä, ja tämä edellyttää uutta kvarkkimakua, jolla on sama sähköheikko varaus kuin ylöskvarkilla; kyseessä on lumokvarkki, c (*charm*). Lumokvarkki vaikuttaa siten, että mainitussa prosessissa outokvarkki muuntuu alaskvarkiksi ja tämä annihiloituu

ylöskvarkin kanssa tuottaen outokvarkin W^+ -outokvarkki-parin kautta, joka puolestaan kumoaa tarkasti ylöskvarkki- W^- -virtuaaliparin kontribuution. Muutamit teoretikot olivat ehdottaneet lumoa jo 1964, mutta eri perusteesta; lumoa ikään kuin pidettiin mukana koko 1960-luvun ajan uskomatta sen reaalisuuteen. Hieman yksinkertaistaen lumon postulointiin outouden pariin vaikutti selittävän ilmiön *puuttuminen*. Tämä selitys, edellä esitetty GIM-mekanismi (Glashow, Iliopoulos & Maiani 1970), hyväksyttiin pian, ja sen myötä lumokvarkkia alettiin metsästä. Se löytyi niin kutsutussa Marraskuun vallankumouksessa 1974, kun Brookhavenin protoni-berylliumydin-törmäytysten ja Stanfordin elektroni-positroni-törmäytysten tulokset osoittivat J/ψ -hiukkasen eli lumo-antilumoparin haajoamisia 3.1 GeV energiatasolla.⁵

Ennen tätä suoraa lumon todennusta CERN tuotti jo sähköheikkoa teoriaa vahvistavia tuloksia. Weinberg-Salam-malli ennustaa neutraalin heikon virran prosesseja, joissa hiukkasten sähkövaraus ei muutu (esimerkiksi neutriino-neutroni-sironnassa), joten oli ensisijaista löytää niitä. CERN:iin oli asennettu 1970-luvun alussa entistä suurempi ja siten tehokkaampi Gargamelle-kuplakammio, jolla neutraalin virran prosesseja voitiin löytää, ja niitä myös löydettiin. Tämä antoi suoraa tukea Weinberg-Salam-mallille siihen saakka hyväksytyyn $V-A$ -teorian sijaan, jossa neutraaleja virtoja ei ollut. (Sähköheikosta voimasta kohta enemmän.)

Värivarauksen postuloiminen vahvan voiman säilyvänä suureena ja kvarkkien vuorovaikutusten selittäjänä johtui seuraavasta ongelmasta. Kolme kvarkin malli ei selittänyt esimerkiksi sitä, että spin $3/2$ -baryonikymmenikössä hiukkasilla on

⁵ Elektronivoltti on myös hiukkasten massan mitta. 1 eV vastaa noin $1,8 \cdot 10^{-33}$ g (yksiköissä eV/c²). B-kvarkki eli kauneus todennettiin pian lumokvarkin jälkeen 1977, ja t-kvarkki eli totuus 1995. (Tau-leptoni todennettiin 1977 mennessä, siten epäsuorasti sen neutriinopariksi.) Näin Standardimallin kolme toisiaan vastaavaa leptoni-kvarkki-perhettä olivat koossa. Gluonit todennettiin useissa hadronisuihkukokeissa (*hadron jets*) 1970-luvun loppuun mennessä, ja $W^{+,-}$ ja Z^0 CERNissä 1983.

symmetriset aaltofunktiot. Viimeksi mainittu on ristiriidassa Paulin kieltosäännön kanssa, sillä kvarkit ovat fermioneja, joten niistä koostuvan baryonin aaltofunktion on oltava antisymmetrinen (eli sen merkki vaihtuu, kun kaksi hiukkasta vaihdetaan toisiinsa; bosoneilla aaltofunktion merkki ei vaihdu.) Näin edes kaksi kvarkkia ei voi olla samassa tilassa. Ongelma ratkeaa, jos postuloidaan kolme värivarausta, jolloin kukin kvarkki on eri tilassa. Samalla selittyi matemaattisesti myös se, että hadronit esiintyivät värittöminä yhdistelminä (yhdistelmät kuten kvarkki–kvarkki–antikvarkki olisivat värillisiä) (Greenberg 1964; Han & Nambu 1965). Kokeellisesti värivaraus sai tukea muun muassa siitä, että pioni hajoaa useimmiten kahdeksi fotoniksi, mutta ennustettu todennäköisyys tälle suhteessa kvarkkien määrän neliöön ei vastaa värittömien kvarkkien antamaa; sen sijaan kolmen värin malli ennustaa sen oikein. Toinen mallia tukeva prosessi on elektroni–positroni-parin hajoaminen välillä hadroneiksi, välillä myoni–antimyoni-pariksi, jossa näiden todennäköisyyksien (vaikutusalojen, *cross sections*) suhde vastaa kolmen värin antamaa ennustetta.

Seuraava askel fysikaalisesti (ei kronologisesti) oli gluonien postulointi. Peruste on, että vapaina hiukkasina valenssikvarkit etäännyisivät toisistaan ja hadronit eivät pysyisi koossa. Gluonit ovat massattomia ja vailla sähkövarausta, mutta välittävät osan protonien ja neutronien liikemäärästä. Edellä mainitusta Gargamellen neutriino–protoni-törmäytysten tuloksista voitiin jo päätellä, että puolet liikemäärästä kulkeutui sähköisesti neutraalien ja leptonisesti vuorovaikuttamattomien hiukkasten myötä, mikä antoi tukea gluonipostulaatiolle.

Tässä kohtaa Standardimallin osat olivat saatavilla, mutta eivät vielä toimivassa yhteydessä. Ilmeisin vaikeus oli, ettei yksittäisiä kvarkkeja ja gluoneja oltu koskaan havaittu. Tämä oli ongelmallista varsinkin siksi, että kiihdyttimien energiat alkoivat olla sitä luokkaa, että niitä olisi tullut ilmentyä. Tähän ongelmaan toi ratkaisun kvarkkien ja gluonien asymptootinen vapaus ja sen käänteisilmiö kvarkkien kahliutuminen (*asymptotic freedom; confinement*) ja sen myötä kvanttiväridynamiikan eli QCD:n hyväksyminen vahvan voiman mittakenttäteoriaksi.

Asymptoottinen vapaus tarkoittaa sitä, että värivaraus heikkenee etäisyyden lyhetessä (energian ja liikemäärän kasvaessa) ja kasvaa etäisyyden lisääntyessä. Lyhyillä etäisyyksillä tämä kävi ilmi edellä mainituissa syvissä epäelastisissa sironnoissa, joissa partonit käyttäytyivät kuin vapaat hiukkaset. Etäisyyden kasvaessa värivaraus kasvaa sillä seurauksella, ettei yksittäisiä kvarkkeja ja gluoneja voida havaita, sillä kahliutumisen seurauksena syntyy vain uusia mesoneja ja baryoneja, kun yrittää erottaa kvarkkeja toisistaan. Tämän käänteisilmiön osoittivat Politzer (1973) sekä Gross ja Wilczek (1973).

Mittakentäteoriat

Ennen kuin pääsemme sähköheikon voiman teoriaan, on käsiteltävä mittakentäteoriaa (*gauge field theory*). Näin siksi, että massattomat gluonit tulivat jo esille, ja mittakentän piirteet tekevät ymmärrettäväksi sähköheikon voiman massiivisten vektoribosonien ongelman: lyhyen kantaman voimana bosoneilla on oltava massa kvanttimekaanisista syistä. Kuitenkin tärkein mittateorian, tai tarkemmin mittainvarianssin (*gauge invariance*), peruste on, että se osoittautuu perusvaatimukseksi hyväksyttävälle relativistiselle kvanttikentäteorialle, ja tämä edellyttää massattomia vektoribosoneita voiman välittäjiksi.

Relativistiset kvanttikentäteoriat perustuvat symmetrioille. Symmetria tarkoittaa sitä, että objektille tai systeemille suoritettava operaatio ei muuta sen kokonaistilaa. Esimerkiksi ympyrä voi kääntyä infinitesimaalisesti sen säilyessä ympyränä, eikä muunnosta erota alkutilasta. Symmetrioiden keskeisyys hiukkasfysiikassa perustuu siihen, että Noetherin kahden teoreeman myötä niistä seuraa invariansseja ja siten säilymlakeja (Noether 1918). Ensimmäisen teoreeman (globaalin) myötä esimerkiksi avaruuden pisteen kiertojen symmetriasta seuraa kulmaliikemäärän (impulssimomentin) säilyminen ja ajanhetkien samanarvoisuudesta energian säilyminen. Näiden ulkoisten – avaruudellisten – symmetrioiden lisäksi Standardimalli sisältää sisäisiä symmetrioita, joita matemaattinen ryhmäteoria kuvaa ja joista mittainvarianssi saa fysikaalisen merkittävyytensä.

Yleisesti todettuna jokainen symmetria säilyttää jotain muuttumattomana, joka on siten invariantti ja fysikaalisesti säilyvä suure.

Konkreettisen käsityksen sisäiseen symmetriaan perustuvasta mittainvarianssista saamme seuraavasta. Protonien ja neutronien isospin ei erottele niitä vahvan voiman suhteen, eli ne ovat sama hiukkanen, milloin sähkömagnetismia ei oteta lukuun. Kun yhdessä avaruusajan pisteessä on tehty valinta, kumpi hiukkanen on protoni ja kumpi neutroni, tämä lyö lukkoon samalla universumin muiden nukleonin yksilöinnin protoneina ja neutroneina. Tämä on niin sanottu globaali mittainvarianssi (*global gauge invariance*), jonka ryhmäteoreettinen esitys on $SU(2)$. Mutta kuten Yang & Mills (1954a, b) perustelivat, tämä on epäfysikaalista, sillä suppeampi suhteellisuusteoria rajoittaa signaalien kulkunopeuden valon nopeudeksi. Näin yhden avaruusajan pisteen protoni-neutroni-yksilöinti ei voi lyödä *samanaikaisesti* lukkoon muiden nukleonien identiteettiä, vaan tämä edellyttää informaation kausaalista välittymistä muihin avaruusajan pisteisiin. Tämä puolestaan johtaa lokaalisiin mittainvarianssiin (*local gauge invariance*), ja se puolestaan edellyttää tuon informaation välittävää hiukkasta.

Kvanttisähködynamikka tarjoaa fysikaalisemman esimerkin. Schrödingerin aaltofunktion vaihe on globaalisti invariantti, eli sen muunnoksen sisältävät vakion, joka on sama kaikissa avaruusajan pisteissä. Koska tällainen invariantti ei ole fysikaalisesti sallittu, vaaditaan lokaali vaiheinvariantti eli avaruusajan pisteiden riippumattomuus toisistaan. Tämä ei kuitenkaan toteudu vapaalle hiukkaselle, ja lisäksi Schrödingerin yhtälö on ei-relativistinen. Relativistinen yhtälö edellyttää lokaalisen vaiheinvariantin, ja tämä puolestaan tuo mukanaan vuorovaikutuksen ja siten voimaa välittävän kentän tai hiukkasen. Kvanttisähködynamikan tapauksessa näin muunnettu aaltofunktio tuo mukanaan potentiaalin, joka kuvaa vuorovaikutusta sähkömagneettisen kentän kanssa. Tällä vuorovaikutuksella on fotonin ominaisuudet, joten se on sähkömagneettisen voiman (varauksen) välittäjä. Lisäksi, koska välittäjähiukkasen postulaatio perustuu tarkkaan mittasymmetriaan, sen on oltava

massaton, kuten fotoni on.⁶ Näin on siksi, että vain (lepo)massattomilla hiukkasilla on periaatteessa ääretön kantavuus, joka mahdollistaa edellä mainitun informaation välittymisen koko universumiin.

Tämä lokaali mittainvarianssi on ehdoton fysikaalinen edellytys kvanttikenttäteorian hyväksyttävyydelle. (Noetherin toinen teoreema koskee näitä lokaaleja invariansseja.) Lokaali mittainvarianssi on yleistettävissä, mikä tarkoittaa kaikkien perusvuorovaikutusten välittäjähiukkasten massattomuutta. Sähköheikko voima tuo mukanaan merkittävän ongelman tässä suhteessa.

Sähköheikko voima

Heikon voiman varaus on niin sanottu heikko isospin analogisena edellä mainitulle vahvan voiman isospinille. Heikko isospin muuntaa perustavien fermioniduplettien (kuten elektroni –

⁶ Formaalisemmin ilmaistuna hiukkasta kuvaavan kentän ja siten aaltoyhtälön vaihe $e^{i\alpha}$ ei ole mitattavissa, joten sitä voi muunnella ilman, että mikään muuttuu fysikaalisesti. Vaihe-erot ovat kuitenkin todettavissa ja ilmenevät muun muassa interferenssinä. Tällainen yhtälöiden muuntelu edellyttää kompensatiotermin mukaan tuomista. Se on niin sanottu kovariantti derivaatta (*covariant derivative*) $D^\mu \equiv \partial^\mu - iqA^\mu$, missä q on varaus ja A on potentiaali. Kuten todettiin, sähkömagnetismissä tätä termiä vastaa fotoni. Toisin sanoen vapaalle hiukkaselle tai kentälle ei saada mittainvarianssia, vaan se edellyttää vuorovaikutusta. Ryhmäteoreettisesti välittäjähiukkaset saadaan ryhmän virittäjäalkioista; QED:lle tämä on (jatkuva) ääretön Lien ryhmä $U(1)$, unitaariryhmä yhdessä kompleksidimensiossa; $SU(2)$ on Lien (spesiaalinen) unitaariryhmä $n \times n$ matriisille kahdessa kompleksidimensiossa ja vastaavasti $SU(3)$ kolmessa dimensiossa. $U(1)$ on abelinen ryhmä, eli sen operaatioiden suoritusjärjestyksellä ei ole merkitystä; ne kommutoivat. Sen sijaan $SU(2)$ ja $SU(3)$ ovat ei-abelisia, joten niiden operaatiot eivät kommutoi. Fysikaalisesti tämä tarkoittaa sitä, että fotonilla ei ole varausta, mutta heikon ja värivoiman välittäjillä on, joten ne vaikuttavat toisiinsa. Kattava esitys asiasta on Schumm 2006, 161–82.

elektronin neutriino ja ylös–alas-kvarkkipari) hiukkaset toisikseen vektoribosonien välityksellä. Heikon voiman kantama on erittäin lyhyt, noin 10^{-16} cm, joten kvanttimekaanisista syistä (mitä lyhyempi etäisyys, sen suurempi energia/massa) välittävän hiukkasen on oltava massiivinen. Enrico Fermi esitti 1930-luvulla teorian, jossa vuorovaikutus tapahtuu yhdessä avaruusajan pisteessä, mutta juuri tästä johtuen se oli epäfysikaalinen omine äärettömine tuloksineen. Sen jälkeen esitettiin edellä mainittu V–A-teoria (Feynman & Gell-Mann 1958), (Sudarshan & Marshak 1958), jossa vuorovaikutus välittyi kahden massiivisen W-bosonin, W^- ja W^+ vaihdolla.⁷ Teoria ei ollut renormalisoituva, mutta koska se sopi riittävästi yhteen koetulosten kanssa, asia tavallaan lakaistiin maton alle, varsinkin kun ensimmäisen kertaluvun laskut pysyivät kurissa.

Seuraava askel oikeaan suuntaan otettiin myös useamman teoreetikon toimesta. Sheldon Glashow oli pohtinut sähkömagneettisen ja heikon voiman yhteyttä ja julkaisi teorian, joka sisälsi varattuja bosoneita ja singletin, jotka vastasivat massiivisia vektorihiuksia ja massatonta fotonia. Mallissa neutraali massiivinen bosoni ja singletti sekoittuivat kvanttimekaanisesti siten, että seurauksena on massiivinen hiukkanen ja massaton foton (Glashow 1961). Abdus Salam ja John Ward julkaisivat oman vastaavan teorian (Salam & Ward 1964). Yhteistä näille oli, että välittäjäbosoneilla on massa ja massatermit oli sijoitettava yhtälöihin väkisin ("*by hand*"), sillä ne eivät seuranneet suoraan kyseisistä teorioista, mikä puolestaan tarkoittaa sitä,

⁷ V–A tarkoittaa "vektori miinus aksiaalivektori". Heikko voima välittyy vektorihiuksilla kuten sähkömagneettinen ja värivoima. Koska pariteetti (peilirefleksio) rikkoutuu heikoissa vuorovaikutuksissa, vuorovaikutuksen on oltava sekoitus vektori–aksiaalivektori (spin 1, pariteetti +). Tämä liittyy neutriinoiden vasenkätisyyteen, eli ne eivät osallistu oikeakätisiin prosesseihin. (Kätisyys on spinin projektio hiukkasen liikkeen suuntaan, ja oikeakätisyys tarkoittaa sitä, että kun oikean käden peukalo osoittaa liikkeen suuntaan, sormilla on spinin suunta eli myötäpäivään; vasenkätisyys on vastapäivään.) Toisin sanoen aksiaalivektorivirrat rikkovat pariteetin.

että ne olivat renormalisoitumattomia. Steven Weinberg julkaisi oman versionsa sähköheikosta voimasta (Weinberg 1967). Siinä esiintyy neljä bosonia, W^- , W^+ , W^0 ja B^0 , ja fotonit on kombinaatio $B^0 \cos \theta_w + W^0 \sin \theta_w$, jossa θ_w on "Weinbergin kulma", $\sin^2 \theta_w = 0,23$. (Myös Z^0 on B^0 ja W^0 -kombinaatio; itse asiassa tarkoin arvo Weinbergin kulmalle on 0,21215 (Schumm 2006, 336).) Sitten "Weinberg-Salam-malli" sekä Glashowin versio vakiintuivat tiettyjen kokeellisten tulosten myötä perusteoriaksi 1970-luvun alkupuolella. Miten siis massaongelma ja renormalisaatio ratkaistiin?

Sähköheikon voiman teoria ei ole renormalisoituva, ellei vektoribosonien massoja saada spontaanilla symmetriarikolla eli Higgsin mekanismilla (Englert & Brout 1964; Guralnik *et al.* 1964; Higgs 1964). Se on prosessi, jossa fyysisen systeemin symmetria säilyy mutta esiintyy "spontaanisti" rikkoutuneena (*spontaneous symmetry breaking*) yhtälöiden ratkaisussa ja vastaavien systeemien käyttäytymisessä. Tunnettu esimerkki on ferromagnetismi, jossa magneettikenttä tulee tietyn suunnaiseksi lämpötilan laskiessa ja atomien spinien asettuessa yhdensuuntaisiksi.

Higgsin mekanismeissa oletetaan vastaavasti yksi suunta, joka rikkoo tyhjiön symmetrian (vaikka se säilyy yhtälöiden suhteen eksaktina); suunta voi olla mikä tahansa, mutta jokin suunta on oltava. Kvanttimekaaninen tyhjiö on alin energiatila – ei siis tyhjä ei-mitään; keskeisin tyhjiön ominaisuus on, että se synnyttää koko ajan virtuaalipareja. Näin tyhjiö ei myöskään ole välttämättä hiukkasvapaa tila, ja alemmassa energiatilassa hiukkasia voi olla enemmän kuin korkeammassa, ja tällöin symmetria on rikkoutunut. Vektoribosonit voivat vuorovaikuttaa tällaisessa tilassa, ja tämän vahvuus on verrannollinen niiden värähtelyenergiaan ja siten massaansa, joka vähentää tyhjiön energiaa samalla määrällä. Näin jokin vähemmän energian tila – suunta – on tullut esiin taustan korkeamman energian symmetrisestä tilasta. Teknisesti tämä tarkoittaa sitä, että massallisilla hiukkasilla on kaksi vapausastetta enemmän kuin massattomilla ja nämä aikaansaavat massan. (Massattomalla hiukkasella ei voi olla liikesuuntansa mukaista pitkittäispolarisaatiota

(*longitudinal polarization*), koska se liikkuu aina valon nopeudella.) Lopuksi, koska fotonit ei saa massaa, jäljelle on jätävä yksi massiivinen bosoni, Higgsin bosoni. (Higgsin mekanismin matematiikasta ks. Greiner & Müller 1996, 111–18.)

Fysikaalisemmin sanottuna universumin kattavassa tyhjiössä oletetaan olevan sähköisesti neutraali kenttä, joka hidastaa välittäjäbosonien kulkua (kuten valon kulku hidastuu väliaineessa tai fotonien kulku loppuu Faradayn häkkiin sähkömagneettisena eristeenä) ja antaa niille *tehollisen massan*. Energeettisesti tällainen kenttätila on edullisempi kuin jos kyseistä kenttää ei olisi. Siihen liittyy potentiaalienergia, joka saa pienimmän arvonsa, kun Higgsin kentän arvo ei ole 0, jolloin se rikkoo symmetrian. Koska se on sähköisesti neutraali kenttä, se ei vaikuta fotoniiin ja siksi se on massaton, mutta varattuihin vektoribosoneihin, leptoneihin ja kvarkkeihin se vaikuttaa, joten ne saavat massan. Kuten tiedetään, Higgsin bosoni todennettiin 2012 CERN:ssä, mikä löi lukkoon Standardimallin niin sanotun näkyvän aineen perusteorian.

Sähköheikko voima Higgsin mekanismilla täydennettynä oli aluksi kuriositeetti, sillä sitä ei pidetty renormalisoituvana. Gerardus 't Hooft kuitenkin todisti renormalisoituvuuden ('t Hooft 1971). Todistus edellytti spontaania symmetriarikkooa ja siten Higgs-mekanismia. Tultuaan hyväksytyksi 't Hooftin todistus aiheutti vyöryn mittakenttäteoreettiseen tutkimukseen, ja tämä yhteys Marraskuun vallankumouksen kautta vakiinnutti renormalisoituvat mittakenttäteoriat ainoana vakavasti otettavina ehdokkaina perusvoimien teoriarakenteeksi. X

Standardimalli ja unifikaatio

Lyhyt kuvaus Standardimallista on viimein paikallaan. Se sisältää 3 toisiaan vastaavaa leptoni–kvarkki-sukupolvea e^- , ν_e – u , d ; μ^- , ν_μ – s, c ; τ^- , ν_τ – b , t . Välittäjäbosonit ovat fotonit, vektoribosonit W^+ , W^- ja Z^0 , sekä 8 värillistä gluonia; lisäksi on Higgsin bosoni.

Ryhmäteoreettinen rakenne on $(U1) \times SU(2)$ ja $SU(3)_c$ (c on värivaraus). Ontologinen ja selittävä ydin on lokaalisen mittainvarianssin vaatimus, joka seuraa teorian sisäisistä kvanttimekaanisista symmetrioista ja relativistisuudesta. Tähän liittyy kiinteästi vaatimus teorian renormalisoituvuudesta, sillä vain lokaalit mittakenttäteoriat ovat renormalisoituvia, joten renormalisoituvuus on välttämätön ehto teorian fysikaaliselle hyväksyttävyydelle. Itse asiassa lokaali mittavaatimus ja renormalisaatio käyvät käsi kädessä, sillä Sidney Coleman ja David Gross osoittivat, että ainoastaan lokaalit mittateoriat ovat renormalisoituvia (muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta) (Coleman & Gross 1973). Mittainvarianssin vaatimus edellyttää Higgsin mekanismin eli spontaanin symmetriarikon, sillä heikon voiman vektoribosoneilla on massa, jota niillä ei tulisi olla mittainvarianssin säilymiseksi. Mitä tulee QCD:n poikkeavuuteen, värivoimalla on asymptoottisen vapauden ominaisuus, eli se heikenee etäisyyden lyhetessä (energian kasvaessa). Käänteisenä tämä ilmenee kvarkkien ja gluonien kahliutumisena: erillisiä kvarkkeja ja gluoneja ei esiinny, sillä yritys saada ne erilleen johtaa vain uusien baryonien ja mesonien syntyyn. Tosin kahliutumista ei ole tiukasti todistettu QCD:n välinein, mikä johtuu siitä, että kasvavilla etäisyyksillä häiriöteoriaa ei voi soveltaa. (Hilateoreettiset laskut ovat kuitenkin olleet lupaavia.)

Usein huomautetaan, ettei Standardimallin ryhmäteoreettinen rakenne ole tiukasti unifioiva, eritoten sähköheikon voiman $SU(2) \times (U)1$ suhteen, koska se ei ole yksinkertainen ryhmä vaan ryhmien tulo. Yksi seuraus tästä on, että fotonin ja Z^0 ovat superpositiotila, joka edellyttää Weinbergin kulman tyhjiön symmetriarikon suuntana jättäen fotonin massattomaksi. Margaret Morrison on argumentoinut tähän ryhmärakenteeseen nojautuen, että tulee erottaa reduktiivinen ja synteettinen unifikaatio. Edellinen koskee teorioita, jotka sisältävät identiteettejä – jälkimmäinen yhtenäistäviä matemaattisia rakenteita. Identiteettiunifikaatiosta Morrison käyttää esimerkkinä Maxwellin teoriasta seuraavaa valon identifikaatiota sähkömagneettisen kentän värähtelytaajuuteen ja etenemisnopeuteen, ja synteetti-

sestä unifikaatiosta rakennetta $SU(2) \times U(1)$. Äkkiseltään katsottuna tämä pitää paikkansa, mutta nähdäkseni Morrisonin johtopäätökset eivät aivan kohtaa. Identifikaatio- ja synteettisen unifikaation erottelu siten, että jälkimmäinen käyttää enimmäkseen matemaattisia tai formaaleja rakenteita, ei ole Standardimallin tapauksessa ratkaisevaa.⁸ Sähkömagneettinen ja heikko voima ovat erillisiä normaaleissa tilanteissa sekä matalan energian kokeissa, sillä heikon voiman kantama on vain 10^{-16} cm. Kuitenkin kun koettimen kuten elektronin energiaa ja liikemäärää kasvatetaan lähestyen vektoribosonien W^+ , $-$ ja Z^0 massa-energioita (noin 80 ja 90 GeV), sähkömagneettiset ja heikot vuorovaikutukset eivät enää erotu selvästi, ja esimerkiksi kahden elektronin sironta voi tapahtua yhtä todennäköisesti fotonin kuin Z^0 :n vaihdolla (joka on tarkemmin sanoen B^0 - W^0 -superpositiotila Weinbergin kulman mukaisesti). Asian ontologinen ydin on siten jälleen lokaali mittainvarianssi, joka ”pakottaa” välittäjäbosonit. Tässäkin mittainvarianssi on niin vahva unifioiva tekijä, että ryhmäteoreettisen yhtenäisrakenteen puute on sivuseikka. Mittainvarianssi edellyttää vektoribosoneita voimien välittäjinä ja on postulaatio, joka yhtenäistää koko Standardimallin selitykset hiukkasmultipleille ja niiden ominaisuuksille, tyypillisille reaktioille (ja joidenkin esiintymättömyydelle) sekä renormalisaation soveltuvuuden. Tämä teoreettisempi kokonaisuus on niin tiivis, että formaalin yhtenäisyyden puute ei ole riittävä argumentti unifikaatiota vastaan.⁹

⁸ Alun perin sähköheikon voiman kehittämisen motivaatio ei ollut unifikaatio, vaan heikkojen prosessien ymmärtäminen uudella tavalla (Morrison 2000, 120, 124–5), sikäli kuin esimerkiksi Sheldon Glashowin jälkikäteiseen luonnehdintaan työstään on luottamista. Tämä ei tietenkään kumoa sitä, että riittävä unifikaatio oli seuraus.

⁹ Kirjallisuudessa on keskusteltu niin sanotusta ”mitta-argumentista” (*gauge argument*), jonka mukaan formaalisista tai matemaattisista kenttä- ja liikeyhtälöiden manipulaatioista ei sinänsä seuraa mitään fysikaalista; ks. Teller 2000; Lyre 2001; Martin 2002, 2003. Kuten painotan, mittainvarianssi ja renormalisaatio ovat kumpikin edellytyksenä selittävälle hiukkasteorialle, joten mitta-argumentilla yksinään ei ole fysikaalista painoarvoa. Christopher Martin (2002, 230–31) näyttää

Välijohtopäätöksenä on, että Standardimallin fysiikka on vahvasti unifikaationistista ja että argumentit tätä vastaan perustuvat heikkoihin erotteluihin, kuten reduktiivinen identifikaatiounifikaatio/synteettinen unifikaatio. Unifikaationismin mukaan teorioiden selitysvaikutus kasvaa kahdella tavalla. Ensimmäisenkin unifioiva teoria selittää ilmiöitä eri aloilta siten, että ne ovat joko perustaltaan samoja tai että samat lait kattavat erilaisia ilmiöitä. Toiseksi unifikaation aste kasvaa, kun tällaisia teorioita voidaan liittää toisiinsa yleisemmiksi selittäviksi rakenteiksi. Standardimallia edeltävinä esimerkkeinä voi mainita Newtonin gravitaatioteoria, Maxwellin sähködynamiikka ja Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria. Toisin sanoen unifikaationismin ydinteesi on selitysten alan kattavuuden kasvu vähemmällä oletuksilla kuin aiemmin. Keskeinen kysymys kuuluu, mitkä tai minkä tyyppiset tekijät saavat aikaan kummankin unifikaation. Standardimallin tapauksessa mittasymmetriat ja selitystä kappavat koetulokset (tai niiden puute mikä johti outokvarkein postulaatioon) johtavat ensimmäisen tyyppin unifikaatioon. Mittasymmetriat ovat vielä keskeisempiä teorioiden välisessä unifikaatiossa, itse Standardimallin kokonaisrakenteessa: ilman niitä meillä ei olisi Standardimallia. (Vastaavia tekijöitä löytyy muun muassa evoluutiobiologian standardimallissa DNA:n ja transkriptiotekijöiden tasolla.)

Unifikaationismi ei ole normatiivinen kanta, eli se ei pyri sanelemaan, miten tiedettä tulisi tehdä. Se on kuvaileva näkemys siitä, miten tiede on edistynyt tiettyjen selittävien teorioiden myötä. (Toisaalta koska unifikaationistiset esimerkit ovat niin vakuuttavia, päätelmään "tulee pyrkiä unifioiviin teorioihin" on helppo lipsahtaa.) Unifikaationistit eivät myöskään väitä, että unifikaatio on ainoa selitys tieteellisen tiedon edistymisestä; kuten tiedetään, yhtälö "unifikaationismi = selittäminen" ei ole yleisesti pitävä jo siitä syystä, että tiede sisältää myös selityksiä,

päätyvän samanlaiseen tulokseen, joskaan hän ei keskustele asiasta laajemmin. Lisärajoituksena voi pitää myös ei-abelisten mittateorioiden asymptoottista vapautta.

joilla ei ole laajaa teoriarakennetta taustanaan. Hyvä argumentaatio unifiikaation ja selittämisen samaistusta vastaan löytyy mainitusta teoksesta (Morrison 2000).^{10, 11}

Seuraavassa käsittelen lyhyesti muutamaa viimeaikaista unifiikaatiomallia ja kritisoin niitä erityisesti, mitä tulee konfirmaation ja unifiikaation suhteeseen. Sitten käsittelen Michael

¹⁰ Hintikka ja Halonen (1999) argumentoivat, että selittäminen ja unifiikaatio ovat eri asioita, mutta heidän argumenttinsa olettaa unifikacionistien samaistavan ne. Näin ei kukaan unifikacionisti tee (tai jos tekee, ei tulisi tehdä).

¹¹ Unifikacionismi ja (tieteellinen) realismi ovat riippumattomia toisistaan, mutta keskustelu niiden välisistä suhteista on toinen polveileva aihe. Lyhyesti, Standardimallin kokeellisten todennusten (kuten lumo, $W^{+,-}$, Z^0 , Higgsin bosoni) ontologisena seurauksena sen postuloimia entiteettejä voidaan pitää reaalina. Tämä on minimaalinen oletus siinä mielessä, että se on useimpien hiukkasfyysikoiden kannan mukainen; se edustaa entiteettirealismia. Sitä vastoin niin kutsuttu strukturaalinen realismi on nähdäkseni hyvin ongelmallinen kanta, jos sillä tarkoitetaan vain, ettei ole olemassa objekteja (Ladyman *et al.* 2007). Standardimallin entiteetit ovat "abstrakteja" (kuten arvioitsija huomautti), eivätkä siten missään selkeässä mielessä objekteja. (Tietenkään kyse ei ole abstrakteista entiteeteistä, vaan siitä, että Standardimallin postuloimien entiteettien esitystapa on kovin matemaattinen ja hiukkasten monilla ominaisuuksilla, kuten isospin, ei ole vastinetta klassisessa fysiikassa.) Standardimallilla voidaan tukea entiteettirealismia perustavuutta argumentoimalla, että kaikki "rakenteet" perustuvat kvarkkien ja leptonien vuorovaikutuksiin, vaikkeivät ne ole "objekteja"; nukleoneja voidaan pitää rakenteina, mutta ne ovat kvarkkien koosteita. (Tämä on liian laaja argumentti tässä kehiteltäväksi.) Mitä tulee symmetrioihin ja mittainvarianssiin realismin suhteen, symmetrioiden empiiriset seuraukset ovat melko ilmeisiä vaikkeivät suoria. Symmetrioiden empiirisestä toteamisesta (Kosso 2000a, 2000b). Marc Lange argumentoi, että symmetriaperiaatteet selittävät säilymislait ja eksplikoi tätä kontrafaktuaaleilla (Lange 2007). Ongelma tässä on, että kontrafaktuaalien teoria on edelleen epäyhtenäinen, joten nähdäkseni parempi lähestymistapa on suurempi: symmetriat – lokaali mittainvarianssi ja säilymislait.

Friedmanin ja Philip Kitcherin ehdotuksia, joista erityisesti jälkimmäinen soveltuu hyvin Standardimalliin.

Unifikaationismi ja konfirmaatio

Unifikaation ja konfirmaation suhteista on kirjoitettu verrattain paljon. Painotus on ollut jälkimmäisessä, mutta nähdäkseni tämä ei ole perusteltua, vaan unifikaatio on ensisijaista. Seuraavassa argumentoin kantani puolesta kritisoimalla kahta konfirmaatiota painottavaa unifikaatiomallia. Wayne Myrvold on argumentoinut bayesilaisen konfirmaation kautta unifikaationismiin (Myrvold 2003, 2017).¹² Hän perustaa unifikaation sellaisten hypoteesien tai propositioiden keskinäiseen informaationaaliseen relevanssiin (*informational relevance*), jotka unifioivat alun perin toisistaan riippumattomia ilmiöitä ja joita hän nimittää keskinäiseksi informaationaaliseksi unifikaatioksi (*mutual informational unification*). Myrvoldin mukaan etuna on se, ettei oletusta unifikaatiosta tarvitse sisällyttää hypoteesien alkutodennäköisyyksiin (*prior probabilities*). Bayesin teoreemasta seuraa niiden ilmiöiden tuen asteen kasvu, jotka hypoteesi itse asiassa unifioi. Relevanssi puolestaan eksplikoituu propositioita koskevalla todennäköisyysfunktiolla, jonka ydin on, että muutokset todennäköisyyksissä ovat muutoksia informaatioissa ja siten sen keskinäisessä relevanssissa (Myrvold 2003, 409–11, 2017, 96–7).

Informaationaalinen relevanssi on kuitenkin heikko unifikaation eksplikaatio: milloin vain kaksi hypoteesia liittyy toisiinsa, niillä on informaationaalinen yhteys, jonka ei tarvitse edes olla selittävä. Siten informaation sijasta bayesilaisille malleille keskeistä on konfirmaatio. Tämä on kuitenkin melko itsestään selvää, sillä yleensä konfirmaation aste ja määrä kasvaa, kun kaksi hypoteesia tai teoriaa voidaan yhdistää, tai kun yksi teoria yhdistää yhä useampia ilmiöitä. Poikkeuksena ovat tapaukset, joissa aiemman teorian jokin postulaatio hylätään uuden unifioivan teorian tieltä eli jotkin ilmiöt eivät enää vaadi selitystä.

¹² Ilkka Niiniluoto (2017) on myös argumentoinut konfirmaation ja unifikaation yhteydestä, mutta bayesilaisittain.

Eetterin hylkääminen siirryttäessä suppeampaan suhteellisuus-teoriaan on hyvä esimerkki. Siten voidaan perustellusti esittää, että konfirmaation aste on unifikaation seuraus – ei sitä luonnehtiva piirre. Tämä nähdään selvästi Standardimallin kehityksessä, sillä 1960-luvulla ja 1970-luvun alussa koetulokset olivat melko erillisiä ja niiden tuki postulaatioille kuten lumokvarkki ja neutraalin virran reaktiot oli heikko. Tilanne muuttui nopeasti Gargamellen tulosten, asymptoottisen vapauden ja lumon löytämisen myötä. Tällöin aiempien tulosten konfirmaation aste kasvoi, koska ne voitiin sijoittaa unifioivaan teoriaan, joka sisälsi vahvan yhtenäistävän tekijän eli mittainvarianssin vaatimuksen.

Kriittinen elementti Myrvoldin mallissa on Bayesin teoreemasta seuraava ”unifikaatiotekijä” $U^{(n)}$, joka antaa asteen, jolla hypoteesi tai hypoteesit unifioivat selitettävän ilmiöjoukon p_1, \dots, p_n yksittäisten hypoteesien konfirmaation määrän lisäksi (Myrvold 2003, 412). Jokaisella yksittäisellä hypoteesilla on oma konfirmaatiokontribuutionsa, mutta koska ne ovat yksittäisiä (vaikka informaationaalisesti relevantteja suhteessa toisiinsa), ne eivät sellaisinaan riitä unifikaatioon. Jää kuitenkin epäselväksi, miten $U^{(n)}$ on motivoitu, sillä se vaikuttaa vain ympätyn mukaan. Tietenkin bayesilaisessa analyysissä on oltava jokin unifikaation astetta ilmaiseva tekijä, kuten muissakin malleissa, mutta $U^{(n)}$ sinällään ei selitä mitään eikä Myrvold anna vakuuttavaa esimerkkiä siitä. Nähdäkseni tällaiset ”unifikaatiotekijät” osoittavat yhden bayesilaisuuden (ja yleensä formaalisten mallien) heikkouden sikäli, että ne ovat irrallisia tieteen käytännöstä.

Bayesilaisuus on myös laajemmin ongelmallinen. Sen perusongelma *a priori* -evidenssin yksilöinnistä on edelleen ratkaisematta, mikä on olennaista aiheemme kannalta, sillä usein on niin, että evidenssiaineiston yksilöinti (ja edes evidenssiksi hyväksyminen) edellyttää sitä luonnehtivan teorian unifikaatiivista voimaa. Standardimallin kehittyessä monia koetuloksia hylättiin, koska ne eivät soveltuneet mittakenttäinvarianssin vaatimukseen tai eivät täyttäneet renormalisoituvuusehtoa.

Bayesilaiset analyysit ovat ongelmallisia myös siksi, etteivät ne ole juurikaan kohdanneet tieteen empiriaa. Tarkoitin sitä, että yleisenä formaalisena viitekehyksenä bayesilaisen analyysin hypoteesien empiiriselle tuelle tulisi soveltua lähes mille tahansa tieteenalalle. Näin ei kuitenkaan ole, vaan analyysit ovat jääneet itsetarkoituksellisiksi formaalisiksi ehdotelmiksi ilman, että niitä olisi tuettu riittävin unifikaatioon liittyvin esimerkein. Tähän liittyy se, että bayesilaisuus on normatiivinen näkemys (Myrvold painottaa tätä). Kuten edellä totesin, unifikatoinismi on deskriptiivistä, joten on ilmeistä, että niitä ei voi helposti liittää toisiinsa, jos lainkaan. Voisi jopa argumentoida Hume'n giljotiiniin vedoten, että normatiiviset analyysit ovat tuomittuja deskriptiivisiin verrattuina. Myrvold tuo esiin unifikatoinismin deskriptiivisyyden, mutta vähättelee sitä bayesilaisuuteen verrattuna (Myrvold 2017, 400). Hän huomauttaa, ettei meillä ole tarkkoja numeerisia asteita uskomuksille, ja arviomme hypoteesien lupaavuudesta ovat epämääräisiä. Myrvold pitää näitä vain kognitiivisina rajoituksina, ikään kuin suorituksiin liittyvinä puutteina verrattuna kompetenssiin, joka olisi bayesilainen, mikäli meillä olisi riittävästi aikaa todennäköisyyksien ehdollistamiseen suhteessa taustatietoon. Tämä on tunnettu siirto muillakin aloilla (erityisesti kielitieteessä), mutta en näe, miten se puolustaisi bayesilaisuutta normatiivisena, sillä kognitiivinen aktiviteettimme perustuu noihin "rajoituksiin". Kompetenssi vaikuttaa usein olevan vain idealisoiviin formaalisiin oletuksiin perustuva myytti. Mikäli pyrimme selittämään tieteellistä selittämistä ja siten osaltaan unifikaatiota, ei normatiivinen lähtökohta vaikuta kovin onnistuneelta.

Nähdäkseni tulee huomioida myös, että bayesilaisuus keskittyy konfirmaation kvantitatiivisiin piirteisiin, mikä rajoittaa sitä liiaksi. Vaikka *experimentum crucis* tieteenä on harvinaista, ei konfirmaation kvantiteetti ole niin keskeinen kuin sen *kvantiteetti*. Monella tieteenalalla on muutama keskeinen koe tai mallisysteemi, jota testataan johtuen sen relevanssista kyseisen alan keskeiselle teorialle. On myös muutama unifioiva teoria, joita ei voi testata määrällisesti (paitsi triviaalisti toistamalla kokeita); yleinen suhteellisuusteoria oli tällainen alkutaipaleellaan.

Usein hyvin suoritettu laadullinen testi on tieteelle arvokkaampi kuin määrälliset testit. Tämä on yksi peruste sille, miksi kiistanalaisia kokeita ja tuloksia pyritään tukemaan riippumattomasti eli miksei tiede ole konfirmaation liukuhihnatoimintaa. Edellä mainittuina esimerkkeinä ovat lumo, $W^{+, -}$, Z^0 ja Higgsin bosonin todennukset. Näin ollen kvantitatiivinen viitekehys saattaa jopa vääristää kuvaa tieteen konfirmaatiokäytännöistä. Yleisenä johtopäätöksenä konfirmaation ja unifikaation yhteydestä voidaan siten esittää, ettei bayesilainen konfirmaatio luonnehdi unifikaatiota, vaan sen asteen tai määrän kasvu on seuraus unifikaation asteesta.

Ioannis Votsis ei ole bayesilainen, mutta on esittänyt unifikaation ja konfirmaation suhteesta oman mallinsa (2017). Hänen ajatuksensa on unifikaatio kahden proposition konfirmaationaalisenä yhteytenä (*confirmational connectedness*) ja niiden sisällön kasvuna siten, että niiden kuvaamat todellisuuden piirteet liittyvät toisiinsa; näin tuki leviää hypoteesien välillä, ja kaikkien relevanttien hypoteesien konfirmaatio kasvaa.

Votsis antaa formaalisen säännön tuen määrälle (Votsis 2017, 89), mutta se on riittämätön, sillä se sallii propositioiden (hypoteesien) lisäämisen periaatteessa, kunnes unifikaation ja konfirmaation määrä on maksimi suhteessa teoriaan (ja koko tieteenalaan, milloin sillä on yksi perustava teoria). Votsis myöntää tämän, mutta näkee sen unifikaatiomallinsa etuna (Votsis 2017, 90). On vaikea nähdä, miten se olisi etu, sillä propositioiden lisääminen määrällisesti ei ole tieteellisen tutkimuksen tavoite, vaan niiden laadullinen taso, kuten edellä todettiin. Näin ollen unifikaation aste kasvaa keskeisten ongelmallisten tapausten selvittämisen myötä, ei hypoteesien lisäämisen vuoksi (ja siten niiden triviaalina konfirmaation ja sisältöjen kasvuna). Lisäksi Votsis sallii propositioiden hyvin liberaalin valinnan, jolloin ne kattavat lähes kaiken keskeisistä hypoteeseista ja laeista aina satunnaisiin yleistyksiin. Vaarana on, että mitä enemmän tällaisia sallitaan, sen löyhempää unifikaatiosta tulee, sekä Votsisin mallissa että yleensä. Standardimallin kehityksestä näimme, että hypoteesien ehdottaminen on rajoitettua; vaikka hiukkasfyysikoilla on mielikuvitusta, fysikaaliset perusoletukset rajoittavat

vakavasti otettavien ehdotusten määrää sekä laatua, ja ilman hypoteesin mittainvarianssia ja renormalisaatiota siitä ei kiinnostuta. Joka tapauksessa Votsisin ehdotus unifikaation ja konfirmaation yhteydestä vaikuttaa heikolta sekä sisäisistä että Standardimalliin liittyvistä syistä.

Friedman

Michael Friedman on esittänyt konfirmaatioon liittyvän unifikaatiomallin, joka on edellä mainittuja uskottavampi sikäli, että se perustuu tosiasiallisiin teorioihin – ei tieteestä irrallaan oleviin formalisointeihin tai yksittäisten propositioiden käsittelyyn (Friedman 1983). Friedmanin pääaihe on aika-avaruusteorioiden kehitys Newtonista Einsteinin yleiseen suhteellisuusteoriaan. Tiivistettynä hänen ajatuksensa on, että se, mikä on oikeuttanut absoluuttisen avaruuden ja ajan eliminoinnin, on ”jatkuvien konfirmaatiopuskujen” (*continuing boosts of confirmation*) karttuminen toisiaan seuraavien teorioiden sarjassa, kun selitettävät ilmiöt sisällytetään teorian antamiin yhä uni-fioivampiin malleihin; näin konfirmaation aste tai määrä riippuu unifikaation asteesta (Friedman 1983, 2659). Toisin sanoen Friedman ymmärtää unifikaation ja konfirmaation suhteen oikein.

Friedman käsittelee myös tilastollista mekaniikkaa ja atomihypoteesia eksplikoidessaan unifikaationismia. Tässä hänen perusideansa ovat teorian mallien ja sen havaintoseuraamusten mallien suhteet. Oletetaan teoreettinen malli A ja sen alimalli B , jotka koskevat teorian entiteettejä, ominaisuuksia ja relaatioita. Kun mallin ja alimallin suhde tulkitaan identiteettikuvaukseksi (*mapping*), B -entiteetit identifioidaan reduktiivisesti A -mallin entiteettien kanssa. Ei-realistinen tulkinta johtaa vain kuvaukseen, jossa B on sisällytettävissä (*embeddable*) A -malliin, mutta tämä edellyttää useita kuvausfunktioita ilman reduktiivista unifikaatiota. Reduktiivinen identiteettikuvaus on:

$$\langle B, R_1 \rangle \subseteq A \text{ ja } A \in \Delta_1$$

$$\langle B, R_2 \rangle \subseteq A \text{ ja } A \in \Delta_2$$

$$\langle B, R_1, R_2 \rangle \subseteq A \text{ ja } A \in \Delta_1 \cap \Delta_2$$

Sisällytyskuvaus puolestaan

$$\exists A \exists \phi: \langle B, R_1 \rangle \rightarrow A \text{ ja } A \in \Delta_1$$

$$\exists A' \exists \psi: \langle B, R_1, R_2 \rangle \rightarrow A' \in \Delta_2$$

$$\exists A'' \exists \chi: \langle B, R_1, R_2 \rangle \rightarrow A'' \text{ ja } A'' \in \Delta_1 \cap \Delta_2$$

Päätelynä jälkimmäinen ei ole validi, koska A ja A' ovat eri malleja, mutta vaikei näin olisi, täytyisi kuvaus χ olla yhteisenä, mikä edellyttää uutta teoreettista elementtiä. Unifikaatiota tukeva seuraus on, että identiteettikuvauksen myötä A -malli voidaan liittää muihin samalla tavoin realistisesti tulkittuihin malleihin, mikä lisää jatkuvia konfirmaatiopuskuja. Näin esimerkiksi atomihypoteesi tuli hyväksytyksi 1900-luvun alkupuolella aiemmasta vastustuksesta huolimatta.

Friedmanin konfirmaatiopuskujen asemaa selventänee, kun huomataan kyseessä olevan eräänlainen käänteinen Duhem-Quine-teesi. Tämän teesin mukaan mikään teorian yksittäinen osa ei *diskonfirmoidu* teorian kohdatessaan vastaavidenssiä, vaan syy voi olla apuhypoteeseissa tai teorian vielä epäselvässä elementissä. Näin myöskään mikään teorian selkeä yksittäinen osa ei *konfirmoidu*, vaan koko teoria (sekä mahdolliset osateoriat). Siten jatkuvat konfirmaatiopuskut ikään kuin leviävät katetaan koko teorian, jonka osaa testataan.

On selvää, että Friedmanin unifikaatiomalli joko kestää tai kaatuu identiteettikuvauksen myötä. Identiteettikuvaus sinänsä on ontologisesti neutraali, sillä antirealisti voi käyttää sitä yhtä hyvin ilman identiteetti- tai reductioitoumuksia, koska se on mallien tasolla formaalinen. Konfirmaatiopuskut seuraavat automaattisesti myös ei-realistisessa tulkinnassa, joten erottelu teoreettinen malli/observationaalinen alimalli ei ole ontologisesti relevantti – ainakaan mitä tulee konfirmaation asteeseen, sillä se on sama kummassakin tulkinnassa. Esimerkiksi van

fraassenilainen empiirisen adekvaattisuuden näkemys tieteellisistä teorioista ja niitä tukevasta aineistosta soveltuu tällaiseen kantaan.¹³ Näin ollen Friedmanin identiteettikuvauksen taustalla vaikuttaa jo olevan sellaisia ontologisia oletuksia, jotka kantavat unifikaatiota, joten unifikaatio ei seuraa mallien realistisesta tulkinnasta. Samoin identiteettikuvaus reduktion realistisena tulkintana ei ole riittävästi puolustettavissa ainakaan Friedmanin premissien pohjalta. Seuraus on, että unifikaatio on määräävässä asemassa identiteettireduktioon ja siten realismiin nähden.

Friedmanin mallissa on kuitenkin jyrkkä ontologinen kontrasti Standardimallin unifikaatioon. Hänen analyysissään aika-avaruus-teorioiden yhtenäistävä voima edellyttää postulaatioiden eliminointia, kun Standardimallissa unifikaatiovoiman kasvu on edellyttänyt postulaatioiden lisäämistä (erityisesti kvarkkimaut). Toisaalta tämä on ongelma vain, mikäli ajetaan takaa yhtä kaiken kattavaa unifikaation käsitettä. Päinvastoin tämä 180° ontologinen vastakkaisuus viittaa siihen, että unifikaation tyyppi riippuu tieteenalasta ja kohteesta. Aika-avaruus-teorioiden suhteen vähemmän on enemmän – hiukkasfysiikassa enemmän on paremmin.

Argumentoin edellä, että konfirmaatio on unifikaation seuraus, ei unifikaatiota luonnehtiva. Tietenkin konfirmaation aste kasvaa, kun teorioiden ilmiöitä yhtenäistävä teho kasvaa, mutta konfirmaation aste tai määrä ja unifioiva selitysvaikutus ovat erilisiä. Standardimallin teoreettinen yhtenäisyys mittainvarianssin myötä on ensisijainen ja fysikaalisesti välttämätön vaatimus teorian hyväksymiselle. Koetulosten konfirmoiva panos on

¹³ Morrison argumentoi Friedmanin reduktiounifikaationismia vastaan myös sähköheikon voiman unifikaation asteeseen vedoten (Morrison 2000, 109–46). Lisäksi hän esittää yleisen argumentin, jonka mukaan Friedman edellyttää realistisen uskomuksen teorian totuuteen sen sijaan, että unifikaatio tarjoaisi oikeutuksen sille. Nähdäkseni tämän argumentin ydin on, että Friedmanin argumentaatio kulkee kumppaanin suuntaan akselilla unifikaatio – tieteellinen realismi (Morrison 2000, 40–43).

yhtä luovuttamatonta, mutta konfirmaatiopuskut eivät ole automaattisia ennen kuin unifioiva teoreettinen viitekehys on riittävän kehittynyt. Mikäli unifikaatio riippuisi konfirmaatiosta, lisäämällä konfirmoivia tuloksia unifikaation määrä kasvaisi. Mutta tämä on triviaalia, joten tilanne on käänteinen: lisäämällä unifikaatiota eli teoreettista perustaa uusia *konfirmaatioalueita* liitetään yhteen ja konfirmaation aste kasvaa unifikaation myötä, hyvänä esimerkkinä jälleen neutraalit heikon virran prosessit ja lumokvarkki. Näin ollen on hedelmällisempää keskittyä unifikaatioon selitysvoiman eksplikoinnissa.

Kitcher

Kannatetuimman unifikaatiomallin on esittänyt Philip Kitcher (Kitcher 1989). Kitcher pitää kiinni teorioiden lausenäkemyksestä ja pitää selityksiä deduktiivisina derivaatioina. Lyhyesti, K on joukko väitteitä, ne uskomukset, jotka hyväksytään tiedeyhteisössä tietyllä hetkellä. (K on tietenkin idealisointi ja koostuu osajoukoista k_i , $i = 1, 2, \dots, n$, jossa $1, 2, \dots, n$ voidaan pitää eri tieteenalojen uskomuskokonaisuuksia. Aktuaalisesti nämä eivät ole ristiriidattomia.) $E(K)$ on ristiriidaton ja deduktiivisesti suljettu K -selitysvaranto (*explanatory store*), johon derivaatiot sisältyvät. $E(K)$ systematisoi parhaiten K -uskomukset, ja unifikaatio on systematisoinnin asteen kriteeri, eli se argumenttien tai argumenttimallien (*argumentative patterns*) joukko, joka parhaiten unifioi K :n (Kitcher 1989, 431).

Kitcherin esimerkit unifikaatiosta ovat genetiikan kehitys klassisesta Mendelin mallista Watson–Crick-teoriaan, evoluutioteorian kehitys sekä kemiallisten sidosten teorian kehitys Daltonista kvanttimekaniikkaan perustuviin selityksiin (Kitcher 1989, 438–47). Tässä riittääköön tarkennukseksi, että kemiallisen sidoksen teorian keskeinen argumenttimalli koskee daltonilaisen atomipainon selityksen tarkennusta valenssien kautta nykyisin käytössä olevaan sidosten määrään liittyvään hapetusluvun käsitteeseen sekä molekyyliorbitaalimalleihin;

viimeksi mainituissa unifioiva argumenttimalli on Schrödingerin yhtälö, joka kertoo, miten elektronien jakauma muuttuu atomiorbitaalien hybridisaatiossa molekyyliorbitaaleiksi.

Kitcherin sanoin: ”Tiede etenee ... johtamalla monien ilmiöiden kuvauksia käyttämällä samoja derivaatiomalleja yhä uudestaan [ja näin osoittaa] miten redusoida niiden tosiasioiden tyyppien määrää, jotka meidän on hyväksyttävä perimmäisinä...” (Kitcher 1989, 432). Unifikaatiota ohjaa argumenttimallien tiukkuus (*stringency*), joka tarkoittaa, että mitä enemmän rajoituksia argumenttimalli asettaa, sitä tiukempi ja siten hyväksyttävämpi se on. Tiukkuuden vaatimus sopii hyvin Standardimalliin, sillä mittainvarianssi ja renormalisaatio asettavat erittäin tiukat edellytykset hyväksyttävälle teorioille, joten ne rajaavat kyseistä joukkoa ankarasti – jopa niin, että $U(1) \times SU(2)$ ja $SU(3)$ ovat uniikkeja. Standardimallissa hiukkasia ja vuorovaikutuksia kuvaavat *yhtälöt* ovat monimutkaisia; esimerkiksi sähköheikon voiman Lagrangen yhtälön esittäminen tässä veisi koko sivun. (Kiinnostunut lukija löytää sen kohdasta (Greiner & Müller 1996, 158–9).) Tämä on kuitenkin sivuseikka, sillä unifikaatiolle olennaista on, että tämä monimutkaisuus perustuu kahteen argumenttimalliin, mittainvarianssiin ja renormalisaatioon. Argumenttimallien tiukkuus puolestaan on ontologisesti neutraalia, mitä voidaan pitää Kitcherin mallin etuna, sillä näin se sallii postulaatioiden lisäämisen, kunhan se tapahtuu tiukkuuden rajaamana. Kvarkkimaut, gluonit ja Higgsin mekaniismi sekä Higgsin bosoni ovat esimerkkejä tästä.

Kitcher ei juuri puhu teorioiden konfirmaatiosta, vaan vaikuttaa siltä, että hän ottaa sen itsestäänselvyytenä. Tämä voidaan jälleen nähdä osoituksena unifikaation ensisijaisuudesta. Huomautettava on myös K:n sisällöstä: Kitcher pitää niitä tiedeyhteisön uskomuksia ilmaisevina, mutta nähdäkseni K voi sisältää myös teorioita, joista jotkut on jo unifioitu. Tämä on luontevaa, kun omaksutaan perinteisen lausejoukkokäsityksen sijaan esimerkiksi strukturalistinen teoriakäsitys (Balzer *et al.*

1987).¹⁴ Hyvin kiinnostava sen sijaan on Kitcherin näkemys, että maailman kausaaliset prosessit ja rakenteet selittyvät teoreettisesti, millä hän tarkoittaa unifikaatiota. (Ei tietenkään yksinomaan, mutta merkittävältä osin.) Yksittäistapausten tai tapaustyyppien kausaaliset selitykset eivät ole ensisijaisia, vaan se teoreettinen tausta, jolla ilmiö luokitellaan kausaaliseksi. Tämä sopii täysin yhteen Standardimallin kanssa, sillä voidaan argumentoida sen selittävän kausaation. Argumentti on, että Standardimallin lokaali mittainvarianssi edellyttää vektoribosonit kausaalisten vuorovaikutusten välittäjinä, kausaation ontologisena perustana. Mittainvarianssi sinänsä ei ole kausaalinen tekijä, vaan tietyistä symmetrioista seuraava vaatimus kausaalisuudelle eli relativistiselle signaalinopeuden rajoitukselle. Kuten alaviitteessä 6 selitettiin, lokaalin mittainvarianssin vaatimus tuo mukanaan kompensatiotermi yhtälöihin, jotka vastaavat vektoribosoneita. Koska unifioivista symmetrioista Noetherin (lokaalin) teoreeman myötä seuraavat invarianssit eivät ole kausaalisia, vektoribosonien kausaalinen rooli perustuu ei-kausaalisiin edellytyksiin. Standardimallin mukaan universumin kausaalinen kudelma perustuu symmetriaominaisuuksiin ja niistä seuraaviin lokaaleihin mittainvariansseihin. Näin kausaatio on seuraus Standardimallin unifioivasta selitysrakenteesta.¹⁵

¹⁴ Niiniluoto on huomauttanut strukturalistisesta vaihtoehdosta unifikaationismiin soveltuvana (Niiniluoto (2016, 116). Strukturalismin muotoilu auttaa myös ohittamaan Paul Humphreysin kitcherilaista unifikaatiota vastaan esittämään kritiikin, että se lauseisiin keskittyvänä on altis formaalis-loogisille vastaväitteille (Humphreys 1993).

¹⁵ Laajempi argumentaatio tämän kausaationäkemyksen puolesta on Heathcote 1989. Tässä on myös paikallaan puuttua tunnettuun Kitcherin mallin vastaesimerkkiin, jonka on esittänyt Eric Barnes (1992), koska se perustuu fysiikkaan ja vastaukseni siihen liittyy Standardimalliin. Argumentti on, että newtonilaisessa mekaniikassa ei ole eroa prediktio ja retrodiktio välillä (suljetuissa systeemeissä), mutta retrodiktio ei voi pitää selittämisenä eikä siten unifikaationa. Tietenkin parempi vastaesimerkki olisi yleinen suhteellisuusteoria, sillä se sisältää Newtonin teorian, on unifioivampi kuin tämä ja sen yhtälöt

Viime aikoina on keskusteltu russellilaisesta "antikausalismista". Bertrand Russellin argumentti oli, ettei kausaliteetilla ole mitään sijaa fysiikassa, vaan kausaalisuuden sijasta kyse on funktionaalista suhteista differentiaaliyhtälöiden myötä.¹⁶ (Usein esitetty väite, ettei sanaa "kausaatio" esiinny perusfysiikassa, on naiivi argumentti, sillä perusfysiikka käsittelee kausaalisia prosesseja. Lisäksi argumentti on virheellinen: sana esiintyy monissa hiukkasfysiikan tutkimuksissa ja oppikirjoissa.) Teoksen (Corry & Price, 2007) artikkeleissa puolustetaan russellilaista kantaa puolittain, sillä kausaatiota pidetään hedelmällisenä käsitteenä, mutta sille ei myönnetä sijaa perusfysiikassa. Useimpien kirjoittajien käsitys kausaatiosta on kuitenkin interventionistinen tai agenttikausaatioon perustuva, jonka mukaan kausaation perustilanne on puuttuminen luonnon prosessien kulkuun esimerkiksi muutellen parametreja kahden tapahtuman välillä, tai niiden yhteyden paljastaminen vahvempana kuin korrelaationa. Tämä sopii arkitoimiimme sekä tieteellisten teorioiden testaamiseen, mutta se ei voi selittää, miten interventio on mahdollista, koska se on myös kausaalinen prosessi. Toisin sanoen on oltava olemassa perustavampi kausaation taso, johon interventio- ja agenttikausaatio perustuu. (Interventiokäsitys kertoneekin enemmän siitä, miten kausaation käsite on alun perin omaksuttu – ei itse kausaatiosta ontologisena.) Edellä esitetyn mukaisesti argumenttini on, että tuo taso

ovat ajan suhteen symmetrisiä. Silti asia ei ole näin helppo. Tieteessä prediktiot ovat tärkeitä, eivät retrodiktio – toisin sanoen "ajalla on suunta". Tapahtumat voivat yhtälöiden tasolla kääntyä taaksepäin, mutta todellisuudessa tämän todennäköisyys on *äärimmäisen* pieni. Kyse on nähdäkseni siitä, että yleisen suhteellisuusteorian lisäksi asiaan liittyy Standardimallin teorioita ja siten fysikaalisia prosesseja, sillä CP-invarianssi rikkoutuu joissakin heikoissa vuorovaikutuksissa. Siten myös CPT-teoreeman on rikkouduttava eli ajankääntösymmetria ei päde universaalisti. (Vihjeitä T-rikosta onkin löydetty; ks. Banuls & Bernabeu 1999, 2000.) Johtopäätös on, ettei Barnesin vasta-argumentti päde.

¹⁶ Toinen arvioitsija viittasi tähän aiheeseen.

on Standardimallin vektoribosonien taso. Siten väite ettei kausaatiolla ole roolia perustavassa fysiikassa on virheellinen ja russellilaisuus kausaalisuuskysymyksissä kumoutuu. Tietenkin ongelmaksi jäävät hiukkastason ja muiden ontologisten tasojen, kuten biologian tasojen, väliset kausatiiviset relaatiot. Tämä on kuitenkin erillinen ongelma; olennaista on, että kausaatio perustuu mittainvariantteihin kvanttikenttiin ja vektoribosoneihin.

***Ad hoc* -postulaatiot ja päättely parhaaseen selitykseen**

Edellä todettiin, että aika-avaruus-teorioiden unifikaationismiksi karsii ontologisia postulaatioita, mutta Standardimallissa se edellyttää niitä. Itse asiassa tilanne jälkimmäisen suhteen on ongelmallisempi, sillä useimmat mittainvarianssin ja renormalisaation edellyttämät postulaatiot olivat aluksi selvästi *ad hoc*. Näin oli heti outokvarkin tapauksessa, vaikka se yhtenäisti silloista hadronitarhaa, mutta vielä korostetumpi *ad hoc* -piirre oli lumokvarkin tapauksessa. Kvarkkien värit puolestaan postuloitiin jo 1964, mutta niitä ikään kuin pidettiin mukana, kunnes niiden reaalisuus liittyneenä QCD:n asymptotiseen vapautteen/kvarkkien kahliutumiseen osoitettiin seuraavan mittainvarianssista. Ja tietenkin spontaani symmetriarikko oli alun perin selkeä *ad hoc* -manööveri, itse asiassa kahdellakin tavalla: sekä Higgsin kenttä että Higgsin potentiaali olivat arveluttavia postulaatioita, vaikka toimivat. Kenttää ei voitu perustella tuolloin millään selkeällä vektoribosonien massoista riippumattomalla tavalla. Lisäksi se, että potentiaali pakottaa kentälle nollasta poikkeavan arvon, oli *ad hoc*. Kenttä ja potentiaali hyväksyttiin vasta, kun sähköheikon voiman teorian ennustamat heikkojen neutraalivirtojen reaktiot todennettiin Gargamellessa ja t'Hooft osoitti sähköheikon teorian renormalisoituvuuden edellyttävän Higgsin mekanismia.

Muista *ad hoc* -postulaatioista tulee mainita Weinbergin kulma, eli kvanttimekaanisen sekoittumisen (superposition) määrä $W^0 - B^0$, sillä se ei perustunut teoriaan, vaan sisällytettiin

siihen ”käsin lisäämällä”. Se on kuitenkin olennainen sähköheikolle teorialle, sillä ilman sitä teorian ennusteet tyypillisille vuorovaikutuksille eivät toimisi eikä meillä edes olisi yhtenäistä sähköheikon voiman teoriaa. Standardimallin kehityksen kannalta merkittävimmäksi osoittautunut *ad hoc* -manööveri oli QED:n renormalisaatio. Feynman piti sitä matemaattisena kikkana, ja vieläkin jotkut teoretikot suhtautuvat siihen skeptisesti, koska heidän mukaansa se ei ole fysikaalisesti perusteltu. Renormalisaatiosta tuli kuitenkin laskennallisista syistä hyväksyttävää, ja pian se muuttui teorian hyväksyttävyyden kriteeriksi muillekin hiukkasteorioille. Eritoten tämä korostui, kun osoitettiin, että mittainvarianssi ja renormalisaatio edellyttävät toisiaan, jotta hiukkasteoria antaa fysikaalisesti mielekkäitä tuloksia.

Standardimalli koostui siten alkutaipaleellaan monista *ad hoc* -elementeistä, ja vasta mittainvarianssin vaatimus $SU(2) \times U(1)$ ja $SU(3)$ -ryhmien myötä asetti ne fysikaalisesti mielekkäisiin suhteisiin.¹⁷ Kun QCD vakiintui vahvan voiman mittakent-

¹⁷ Nykyään puhutaan paljon efektiivisistä teorioista, mikä tarkoittaa sitä, että tavallaan renormalisaatiota ei tarvitse ottaa vakavasti. Se heijastelee kutakin energiaskaalaa ja siten sen ilmentäviä hiukkasia sekä niiden välisiä prosesseja. Kun energian määrää lisätään, uuden tyypisiä ilmiöitä tulee esiin ja alemman energia-alueen teorit osoittautuvat approksimaatioiksi (tämä on niin sanottu ”Uusi fysiikka”). On vaikea nähdä, miten tämä sinänsä riistäisi renormalisaation roolin, sillä se voi osoittautua vaatimukseksi myös tarkemmille teorioille. Yksi ongelma tässä on, että häiriöteoria pettää energiaa kasvatettaessa (QCD:ssä kääntäen johtuen kvarkkien kahliutumisesta) ja renormalisaatio pätee vain häiriöteoriassa. Tämän kaiken ei kuitenkaan tarvitse vaikuttaa unifikaation etenemiseen: ”uuden fysiikan” teorit voivat yhtenäistää nykyisen vanhan fysiikan. (Tosin GUT ehdotus $SU(5)$ yhtenäisteoriaksi, joka sisältää sekä sähköheikon että värivoiman, ei ainakaan ole kyseinen unifikaatio: se kaatuu protonin eliniän ennusteesensa.) Häiriöteorian soveltumattomuus on tietenkin ongelma, mutta sitäkin voidaan approksimoida hilateoreettisilla menetelmillä, eritoten QCD:ssä.

täteoriaksi, kaikista sen *ad hoc* -postulaatioista tuli teorian olennaisia elementtejä (kvarkki- ja gluonivärit, kvarkkimaut), toisinaan sanoen niistä tuli *päätelyitä parhaaseen selitykseen*. Sama koskee sähköheikon voiman $SU(2) \times U(1)$ teoriaa, mitä tulee spontaaniin symmetriarikkoon ja Higgsin bosonin reaalisuuden vaatimukseen neutraalien heikkojen virtojen ja lumokvarkin sekä W^+ , - ja Z^0 todennuksien myötä. Nähdään myös, että vaikka konfirmaatiolla on roolinsa tässä, teoreettiset tekijät ohjaavat unifikaatiota, ja sen myötä aiemmista koetuloksista tulee konfirmoivia. Tilanne oli se, että oli useita erityyppisiä koetuloksia, jotka eivät konfirmoineet sinällään mitään eikä niiden konfirmaation aste juurikaan kasvanut *ad hoc* -postulaatioiden myötä. Tulokset muuttuivat konfirmaatiopuskuiksi vasta unifioivien mittakenttäteoreettisten selitysten hyväksymisen myötä.

Kokonaiskuva on siten seuraava. Standardimallin kehitykseen liittyi kirjava paletti erilaisia ja erillisiä *ad hoc* -postulaatioita. Mittainvarianssin keskeisyys ja renormalisaatiopakko tunnustettiin, ja siten esimerkiksi sähköheikon voiman elementit olivat saatavissa, mutteivät kiistatta hyväksytyinä – kunnes t'Hooftin todistus muutti kaiken. Värivoiman tie kulki vastaavasti monien *ad hoc* -postulaatioiden kautta, kunnes asymptoottinen vapaus osoitettiin ei-abelisten mittateorioiden keskeiseksi piirteeksi, jolloin osat lukkiutuivat toisiinsa. Kummassakin tapauksessa mittainvarianssi ja renormalisaatio asettavat hyvin tiukat kriteerit hiukkasteorioiden hyväksyttävyydelle ja siten unifioivat niiden *ad hoc* -postulaatiot.¹⁸

Päätely parhaaseen selitykseen ei ole yksikäsitteistä. Tässä tarkoitan ontologisia aspektoja, kvanttikenttiä/hiukkasia sekä niiden ominaisuuksia ja mekanismeja, joita koetulosten selittämiseksi postuloitiin. Kuten *ad hoc* -hypoteesit eivät myöskään

¹⁸ Toinen arvioitsija huomautti, että (ei-relativistisen) kvanttiteorian synty ja kehitys sisälsi *ad hoc* -postulaatioita sekä toisiinsa liittyvien rajoitusten tiukkuutta. Tämä pitää paikkansa, sillä itse kvanttihypoteesi oli alun perin *ad hoc*, mutta pian todettiin sen olevan luovuttamaton. Arvioitsija otti esille myös Heisenbergin epätarkkuusrelaatiot, ja tämä pätee erityisesti kvanttikenttäteoriassa, sillä sen prosesseihin liittyvä energian ja ajan epätarkkuus on yksi tyhjiön perusominaisuus.

päätelyt parhaaseen selitykseen ole luonnehdittavissa kerta-kaikkisesti, saati määriteltävissä yleispätevästi (kuten aiemmassa tieteenfilosofiassa yritettiin). Meillä ei ole kattavaa (unifioivaa!) teoriaa *ad hoc* -hypoteeseista eikä päätelyistä parhaaseen selitykseen.¹⁹ Ehkä tämä kertoo riittävästi kummastakin: ne ovat avoimia ja tilannekohtaisia; varsinkin Standardimallin *ad hoc* -postulaatioiden moninaisuus osoittaa tämän. Kuitenkin unifikaatiolla on tässä johtava osa, sillä *ad hoc* -postulaatiot muuttuivat päätelyiksi parhaaseen ontologiseen selitykseen mittateorioiden yhtenäistävien vaatimusten myötä. Ehkä voisi esittää hypoteesin, että ontologinen päätely parhaaseen selitykseen edellyttää unifioivaa taustateoriaa – laajemman selitysrakenteen, joka vasta tekee hyväksyttäväksi yksittäiset ontologiset (ja muutkin) alun perin *ad hoc* -postulaatiot.

¹⁹ Jarrett Leplin on luonnehtinut *ad hoc* -hypoteeseja kattavimmin, mutta ei ole esittänyt niille määritelmää tai yleistä teoriaa, mistä on pääteltävissä, ettei hänkään pidä sellaisia mahdollisina (Leplin 1975). Leplinin esityksen ehto 2(c): *ad hoc* -hypoteesilla ei ole riippumatonta teoreettista tukea, ei päde Standardimalliin, sillä mittainvarianssi on kaikkien sen *ad hoc* -postulaatioiden taustavaateena. Samoin ehtoon 5(a) sisältyvä väite, että teoria T on ei-perustava, ei myöskään sovellu Standardimalliin. Lisäksi Leplin liittää *ad hoc* -hypoteesit ilmiöiden esiintymiseen, mutta edellä nähtiin, että ne voivat liittyä myös ilmiöiden esiintymättömyyteen, kuten kolmen kvarkin mallin outouden muuttavat neutraalien virtojen reaktiot.

J. Christopher Hunt argumentoi, ettei *ad hoc* -hypoteeseille voi antaa yleispätevää teoriaa, joten käsitteestä tulisi luopua (Hunt 2012). Vaikka Standardimalli on yksittäistapaus (tosin rikas *ad hoc* -postulaatioineen), en olisi yllättynyt, mikäli muilta tieteenaloilta löytyisi vastaavaa dynamiikkaa. Tulee myös muistaa, ettei kaikki käy edes suhteessa tiettyyn teoreettiseen taustaan, joten *ad hoc* -hypoteesit ovat riittävän yhtenäisiä ja käsitteestä ei tarvitse luopua.

Johtopäätökset

Tiivistän edeltävän argumentaation tulokset. Ensinnäkin on outoa, etteivät unifikaatioteoreetikot ole käsitelleet Standardimallia – onhan se unifikacionistista tiedettä *par excellence*. Olen yrittänyt korjata tämän puutteen. Keskeisin tulos on, että lokaali mittainvarianssi ja siihen liittyvä renormalisaatiovaatimus muodostavat Standardimallin unifikacionistisen ytimen. Näistä seuraa ontologisia postulaatioita, jotka hyväksyttiin aluksi erillisinä vain alustavasti (vektoribosonit, spontaani symmetriarikko, Higgsin bosoni, kvarkki- ja gluonivärit sekä kvarkkimaut). Sähköheikon teorian renormalisoitavuuden ja QCD:n asymptotoittisen vapauden osoittamisen sekä Marraskuun valankumouksen myötä ne kuitenkin muurautuivat Standardimalliin kiinteästi. Tässä on kyseessä eräänlainen *Gestalt*-muutos: kun teoreettiset palat loksahavat paikoilleen unifikatiivisesti, yksittäiset postulaatiot nähdään uudella tavalla. Standardimallin ydinedellytykset ovat niin vahvoja, että keskeisten ennusteiden varmentuessa alunperin *ad hoc* -postulaatioista tuli päätteilyitä parhaaseen selitykseen, ja siten ne sisältävät entiteetit ja prosessit hyväksyttiin reaalisiksi.

Kolmas johtopäätös on, että konfirmaation asteen tai määrän kasvu ei määritä unifikaatiota, vaan se on unifikaation seuraus ja itse asiassa melko triviaalia: kun teorioiden yhtenäisyys kasvaa, niiden konfirmaatioinstanssit tulevat automaattisesti mukana toisiinsa liitettynä.

Helsingin yliopisto

Kirjallisuus

- Aitchison, Ian ja Hey, Anthony (2013a). *Gauge Theories. A Practical Introduction. Volume 1: From Relativistic Quantum Mechanics to QED*, 4. painos. Boca Raton: CRC Press.
- Aitchison, Ian & Hey, Anthony (2013b). *Gauge Theories in Particle Physics. A Practical Introduction. Vol. 2: Non-Abelian Gauge Theories: QCD and the Electroweak Theory*, 4. painos. Boca Raton: CRC Press.
- Balzer, Wolfgang, Moulines, Ulysses ja Sneed, Joseph (1987). *An Architectonic for Science*. Dordrecht: D. Reidel.

- Banuls, Mari-Carmen ja Bernabeu, José (1999). "CP, T and CPT versus Temporal Asymmetries for Entangled States of the Bd-System", *Physics Letters B* 464, 117–22.
- Banuls, Mari-Carmen ja Bernabeu, José (2000). "Studying Indirect Violation of CP, T and CPT in a B Factory", *Nuclear Physics B* 590, 19–36.
- Barnes, Eric (1992). "Explanatory Unification and the Problem of Asymmetry", *Philosophy of Science* 59 (4), 558–71.
- Coleman, Sidney ja Gross, David (1973). "Price of Asymptotic Freedom", *Physical Review Letters* 31, 851–4.
- Corry, Richard ja Price, Huw (toim.) (2007). *Causation, Physics, and the Constitution of Reality: Russell's Republic Revisited*. Oxford: Clarendon Press.
- Dirac, Paul (1928). "The Quantum Theory of the Electron", *Proceedings of the Royal Society A* 117, 610–24.
- Englert, François ja Brout, Robert (1964). "Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons", *Physical Review Letters* 13, 321–3.
- Feynman, Richard (1969a). "Very High-Energy Collisions of Hadrons", *Physical Review Letters* 23, 1415–7.
- Feynman, Richard (1969b). "The Behavior of Hadron Collisions at Extreme Energy". Teoksessa Chen Yang et al. (toim.), *High Energy Collisions*. New York: Gordon and Breach, 237–58.
- Feynman, Richard (2002). *QED. Valon ja aineen ihmeellinen teoria*, suom. Kimmo Pietiläinen. Helsinki: Art House.
- Feynman, Richard ja Gell-Mann, Murray (1958). "Theory of the Fermi Interaction", *Physical Review* 109, 193–8.
- Friedman, Michael (1983). *Foundations of Space-Time Theories. Relativistic Physics and Philosophy of Science*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Fritzsch, Harald ja Gell-Mann, Murray (1972). "Current Algebra: Quarks and What Else?". Teoksessa John Jackson & Arthur Roberts (toim.), *Proceedings of the XVI International Conference on High Energy Physics, National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, 6–13 September 1972*. Batavia: National Accelerator Laboratory, 135–65.
- Fritzsch, Harald, Gell-Mann, Murray ja Leutwyler, Heinrich (1973). "Advantages of the Color Octet Gluon Picture", *Physics Letters* 47B, 365–8.
- Gell-Mann, Murray (1961). "The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry", *Caltech Synchrotron Laboratory Report CTSL-20*.

- Gell-Mann, Murray (1962). "Symmetries of Baryons and Mesons", *Physical Review* 125, 1067–84.
- Gell-Mann, Murray (1964). "A Schematic Model of Baryons and Mesons", *Physical Letters* 8, 214–5.
- Glashow, Sheldon (1961). "Partial Symmetries of Weak Interactions", *Nuclear Physics* 22, 579–88.
- Glashow, Sheldon, Iliopoulos, John ja Maiani, Luciano (1970). "Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry", *Physical Review*, D2, 1285–92.
- Greenberg, Oscar (1964). "Spin and Unitary-Spin Independence in a Paraquark Model of Baryons and Mesons", *Physical Review Letters* 13, 598–602.
- Greiner, Walter ja Reinhardt, Joachim (1994). *Quantum Electrodynamics*, 2. painos. Berliini: Springer.
- Greiner, Walter ja Schäfer, Andreas (1995). *Quantum Chromodynamics*. Berliini: Springer.
- Greiner, Walter ja Müller, Berndt (1996). *Gauge Theory of Weak Interactions*, 2. korjattu laitos. Berliini: Springer.
- Gross, David ja Wilczek, Frank (1973). "Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories", *Physical Review Letters* 30, 1343–6.
- Guralnik, Gerald, Hagen, Carl ja Kibble, Tom (1964). "Global Conservation Laws and Massless Particles", *Physical Review Letters* 13, 585–7.
- Han, Moo-Young ja Nambu, Yoichiro (1965). "Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry", *Physical Review*, 139B, 1006–10.
- Healey, Richard (2007). *Gauging What's Real The Conceptual Foundations of Contemporary Gauge Theories*. Oxford: Oxford University Press.
- Heathcote, Adrian (1989). "A Theory of Causality = Interaction (As Defined by a Suitable Quantum Field Theory)", *Erkenntnis* 31, 77–108.
- Higgs, Peter (1964). "Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons", *Physical Review Letters* 13, 508–9.
- Hintikka, Jaakko ja Halonen, Ilpo (1999). "Unification – It's Magnificent But Is It Explanation?", *Synthese* 120, 27–47.
- Hoddeson, Lillian, Brown, Laurie, Riordan, Michael ja Dresden, Max (1997). *The Rise of the Standard Model. Particle Physics in the 1960s and 1970s*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Humphreys, Paul (1993). "Greater Unification Equals Greater Understanding?", *Analysis* 53 (3), 183–88.

- Hunt, J. Christopher (2012). "On Ad Hoc Hypotheses", *Philosophy of Science* 79 (1), 1–14.
- Icke, Vincent (1995). *The Force of Symmetry*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jones, Todd (1995). "How the Unification Theory of Explanation Escapes Asymmetry Problems", *Erkenntnis* 43 (2), 229–40.
- Joyce, James (1966). *Finnegans Wake*, 12. painos. New York: The Viking Press.
- Kitcher, Philip (1989). "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World". Teoksessa Philip Kitcher ja Wesley Salmon (toim.), *Scientific Explanation. Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol.13. Minneapolis: University of Minnesota Press, 410–505.
- Kosso, Peter (2000a). "The Empirical Status of Symmetries", *British Journal for the Philosophy of Science* 51 (1), 81–98.
- Kosso, Peter (2000b). "Fundamental and Accidental Symmetries", *International Journal in the Philosophy of Science* 14 (2), 109–21.
- Ladyman, James, Ross, Don, Spurrett, David ja Collier, John (2007). *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford: Oxford University Press.
- Lamb, Willis ja Retherford, Robert (1947). "Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method", *Physical Review* 72 (3), 241–3.
- Lange, Marc (2007). "Laws and Meta-Laws of Nature: Conservation Laws and Symmetries", *Journal on History and Philosophy of Modern Physics* 38 (3), 457–81.
- Leplin, Jarrett (1975). "The Concept of an Ad Hoc Hypothesis", *Studies in History and Philosophy of Science* 5 (4), 309–45.
- Lyre, Holger (2001). "Principles of Gauging", *Philosophy of Science* 68, S371–S381.
- 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 Katherine Brading ja Elena Castellani (toim.), *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*. Cambridge: Cambridge University Press, 29–60.
- Morrison, Margaret (2000). *Unifying Scientific Theories. Physical Concepts and Mathematical Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Myrvold, Wayne (2003). "A Bayesian Account of the Virtue of Unification", *Philosophy of Science* 71(2), 205–15.
- Myrvold, Wayne (2017). "On the Evidential Import of Unification", *Philosophy of Science* 84 (1), 92–114.
- Nambu, Yoichiro ja Jona-Lasinio, Giovanni (1961a). "A Dynamic Model of Elementary Particles Based upon on Analysis with Superconductivity, I", *Physical Review* 122, 345–58.
- Nambu, Yoichiro ja Jona-Lasinio, Giovanni (1961b). "A Dynamical Model of Elementary Particles Based upon on Analysis with Superconductivity, II", *Physical Review* 124, 246–54.
- Ne'eman, Yuval (1961). "Derivation of the Strong Interaction from a Gauge Invariance", *Nuclear Physics* 26, 222–9.
- Niiniluoto, Ilkka (2016). "Unification and Confirmation", *Theoria* 31 (1), 107–23.
- Noether, Emmy (1918). "Invariante Variationsprobleme", *Königlich Gesellschaft der Wissenschaften Göttingen Nachrichten Mathematik-Physik Klasse* 1918, 2, 235–67.
- Politzer, H. David (1973). "Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?", *Physical Review Letters* 30, 1343–6.
- Salam, Abdus (1962). "Renormalizability of Gauge Theories", *Physical Review* 127, 331–4.
- Salam, Abdus (1968). "Weak and Electromagnetic Interactions". Teoksessa Nils Svartholm (toim.), *Elementary Particle Theory. Relativistic Groups and Analyticity*. Tukholma: Almqvist and Wiksell, 367–87.
- Salam, Abdus ja Ward, John (1964). "Electromagnetic and Weak Interactions", *Physics Letters* 13, 165–71.
- Salmhofer, Manfred (1999). *Renormalization. An Introduction*. Berliini: Springer Verlag.
- Schumm, Bruce (2006). *Syvällä asioiden sydämessä. Hiukkasfysiikan kauneus*, suom. Kimmo Pietiläinen. Helsinki: Terra Cognita.
- Schweber, Silvan (1994). *QED and the Men Who Made It. Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Schwinger, Julian (1958). *Quantum Electrodynamics*, toim. Julian Schwinger. New York: Dover.
- Sudarshan, George ja Marshak, Robert (1958). "Chirality Invariance and the Universal Fermi Interaction", *Physical Review* 109, 1860–2.
- Teller, Paul (1995). *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

- Teller, Paul (2000). "The Gauge Argument", *Philosophy of Science* 67, S466–S481.
- t'Hooft, Gerardus (1971). "Renormalizable Lagrangians for Massive Yang-Mills Fields", *Nuclear Physics*, B35, 167–88.
- Ursa (1980). *Alkeishiukkasten maailma. Kvarkeista aikojen alkuun*. Helsinki: Ursa.
- Votsis, Ioannis (2017). "Unification Through Confirmation". Teoksessa Michela Massimi, Jan-Willem Romeijn ja Gerhard Schurz (toim.), *EPSA 15, Selected Papers, European Studies in Philosophy of Science*, Vol. 5, 83–93.
- Watkins, Peter (1986). *Story of the W and Z*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Weinberg, Steven (1967). "A Model of Leptons", *Physical Review Letters* 19, 1264–6.
- Yang, Chen ja Mills, Robert (1954a). "Isotopic Spin Conservation and a Generalized Gauge Invariance", *Physical Review* 95, 631.
- Yang, Chen ja Mills, Robert (1954b). "Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance", *Physical Review* 96, 191–5.
- Zweig, George (1964a). "An SU3 Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking", *CERN preprint 8181/TH 401* (17. Jan 1964).
- Zweig, George (1964b). "An SU3 Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking: II", *CERN preprint 8419/TH 412* (21. Feb 1964).

