

I. A. KIESEPPÄ.

MISTÄ FYSIIKAN FILOSOFIASSA ON KYSE?

Vaikeudet, joita zen-buddhalaisuuteen perehdyttäessä kohdataan, on joskus kiteytetty toteamukseksi, jonka mukaan "ne, jotka tietävät, eivät puhu; ja ne, jotka puhuvat, eivät tiedä". Vaikka populaaritieteellisessä kirjallisuudessa toisinaan esiintyvät rinnastukset modernin fysiikan teorioiden ja idän uskontojen välillä ovatkin suurimmalta osin perusteettomia, mainittu aforismi sopii valitettavan usein kuvaamaan fysiikan filosofiasta suomalaisissa medioissa käytävää keskustelua.

Julkisuudessa keskustellaan melko vilkkaasti modernin fysiikan teorioista ja niiden filosofisista ongelmista. Kuitenkin vain valitettavan harvat tämän keskustelun osanottajista ovat perehtyneet modernin fysiikan matemaattisesti raskaisiin teorioihin syvällisemmin kuin mitä populaaritieteellisten, matemaattisesti hankalia aiheita kaihtavien teosten välityksellä on mahdollista. Monet fyysikot ovat valmiita kuittaamaan oman tieteenalansa perusteisiin liittyvät ongelmat väittämällä, että ne aiheutuvat vain siitä, että arkikielen lauseita sovelletaan arkipäivän maailmasta kaukana oleviin tilanteisiin. (Seuraavassa kritisoin lyhyesti tällaista ratkaisua kvanttimekaniikan mittausergelmaa tarkastellessani.) Fyysikoiden joukossa myönteisen poikkeuksen on muodostanut lähinnä vain emeritusprofessori K. V. Laurikainen, jonka populaaritieteellisissä teoksissa on esitelty asiantuntevasti kvanttimekaniikkaa ja sen filosofisia ongelmia.

On kuitenkin valitettavaa, että Laurikaisen teoksille ja muiden keskustelijoiden puheenvuoroille on ollut yhteistä yksi heikkous: niissä on tarkasteltu vain joidenkin yksittäisten fyysikkojen näkemyksiä sen sijaan, että olisi yritetty systemaattisesti selvittää, mitkä kaikki vastaukset fysiikan filosofiaan ongelmiin ovat mahdollisia ja järkeviä. Laurikaisen puheenvuorojen keskeisenä sisältönä on ollut kvanttimekaniikan alkuperäisen *kööpenhaminalaistulkinnan* puolustaminen ja erityisesti Werner Heisenbergin ja Wolfgang Paulin näkemysten eksegeesi. Joidenkin toisten keskustelijoiden puheenvuoroissa on taas esitelty Niels Bohrin näkemyksiin painottuvaa *kööpenhaminalaistulkinnan* varianttia tai puolustettu vakaumuksellisesti David Bohmin filosofisia teorioita.

Tällainen keskustelu tuottaa vääristyneen kuvan fysiikan filosofiasta tai *fysiikan perusteiden tutkimuksesta* (en seuraavassa yritä piirtää tarkkaa rajaa näiden alojen välille). Monet keskustelijat ovat esittäneet, että heidän tarkastelemansa filosofiset opit olisivat ominaisia koko modernille fysiikalle eivätkä vain heidän referoimilleen yksittäisille fyysikoille¹. Tosiasiassa ei ole kuitenkaan tapahtunut mitään sellaista "kvanttivallankumousta", joka pakottaisi meidät hyväksymään tai hylkäämään joitakin tiettyjä filosofia oppeja tai joka edes luonnollisesti johtaisi joihinkin tiettyihin filosofisiin oppeihin.

Ei ole mitään syytä uskoa, että kvanttimekaniikan keksineiden fyysikoiden sille alunperin antama ja esimerkiksi professori Laurikaisen kannattama kööpenhaminalaistulkinta muodostaisi kvanttimekaniikan "oikean" tulkinnan vain siitä syystä, että tuo tulkinta sattuu olemaan ensimmäinen lajissaan — vaikka Laurikainen itse tuntuukin näin ajattelevan. Jotkut David Bohmin teorian kannattajat ovat esittäneet, että kööpenhaminalaistulkinta olisi tullut bohmilaisen tulkinnan sijasta yleisesti hyväksytyksi vain täysin satunnaisista, historiallisista syistä. Tällaiseen teesiin on syytä lisätä, että vaikka näin olisikin käynyt, se ei tietenkään merkitsisi, että kvanttimekaniikka jotenkin pakottaisi meidät hyväksymään "oikeaoppisen", kööpenhaminalaisen filosofian sijasta Bohmin filosofian.

Julkinen keskustelu on kuitenkin jähmettynyt koskemaan edellä mainittuja kahta kvanttimekaniikan tulkintaa. Professori Kari Enqvistin toivomus, jonka mukaan kvanttimekaniikan filosofiassa tarvittaisiin enemmän "älyllistä rehellisyyttä"², onkin erittäin aiheellinen. On kuitenkin muistettava, että julkisuudelta näkymättömissä fysiikan filosofiaa on Suomessa harrastettu myös vähemmän yksipuolisella tavalla. Esimerkiksi Tapio Hyvösen väitöskirjatutkimuksessa *Fysiikan tietoteoreettiset perusteet fenomenologian ja kielipeliin valossa* (1995) on yritetty etsiä yhteyksiä fysiikan ja useiden eri filosofisten suuntausten välillä. Pekka Lahden *mittauksen teorian* koskeneet julkaisut lienevät kuitenkin fysiikan filosofiaa tutkineitten suomalaisten töistä ainoita, jotka ovat saavuttaneet kansainvälistä mainetta.

Kari Enqvistin ansiokasta toivomusta voitaneen täydentää toisella. Älyllistä rehellisyyttä kaivattaisiin myös modernin fysiikan teorioiden merkitystä *puhtaasti fyysikaaliselta kannalta* tarkasteltaessa.

Meillä ei ole mitään asiallisia perusteita uskoa, että oman aikamme fyysikaalisten teorioiden aineen rakenteesta antama kuva olisi lopullinen. Ei ole mitään syytä olettaa, että maailmankaikkeudessa ei ole sellaisia alkeishiukkasia eikä sellaisia niiden välisiä voimia, joiden havaitseminen on nykyisin välinein mahdotonta ja joiden olemassaolo ei sovi nykyisiin teorioihin — nämähän ovat vain tähänastisten havaintojen pohjalta tehtyjä yleistyksiä. Ei ole myöskään mitään järkevää syytä uskoa, ettei jo tunnetuilla alkeishiukkasilla ole sellaista sisäistä rakennetta, jota nykyiset fyysikaaliset teoriamme eivät kuvaa eivätkä voikaan kuvata, koska tuo rakenne ei ilmene missään meille toistaiseksi mahdollisessa koejärjestelyssä.

Tähänastinen historiallinen kokemus tuo koejärjestelyssä oletuksia. Vaikka monien nykyään tunnettujen alkeishiukkasien olemassaolo on voitu johtaa etukäteen jostakin teoriasta, toiset niistä on löydetty yllättäen, ilman että niiden olemassaololle olisi voitu antaa löytämishetkellä mitään teoreettista perustelua. Klassisia esimerkkejä jälkimmäisestä tapauksesta ovat myonien löytyminen 1934-1935 ja ensimmäisten nk. "outojen" hiukkasten löytyminen 1950-luvun alussa. Kvarkkiteoria, jonka voidaan katsoa selittävän jälkimmäisten hiukkasten olemassaolon, keksittiin vasta myöhemmin

— alkuperäisessä, nykyistä paljon yksinkertaisemmassa muodossaan se esitettiin vuonna 1961. Edelleen esimerkiksi protonien ja neutronien (joista atomien ytimet muodostuvat) on aiemmin ajateltu olevan vailla sisäistä rakennetta, mutta nykyään kvarkkiteorian tultua yleisesti hyväksytyksi kunkin niistä uskotaankin sisältävän kolme kvarkkia.

Ei ole mitään syytä olettaa, ettei tällainen fysiikan kehitys jatkuisi tulevaisuudessakin. Uusia, aiempiin teorioihin sopimattomia alkeishiukkasia tullaan varmaankin vastedeskin löytämään, ja jo tunnettujen alkeishiukkasten (kuten kvarkkien) sisäinen rakenne paljastuu tulevaisuudessa varmaankin oletettua mutkikkaammaksi. Tästä huolimatta nykyiseen empiriseen evidenssiin pohjaavan *string-teorian* eli *säieteorian* (jota käsittelen myöhemmin hivenen lisää) tarkoituksena on olla luonnon kaikki perusvoimat selittävä Kaiken Teoria (*Theory of Everything*; nimitystä ei ole tarkoitettu ironiseksi).

Miten tämä on mahdollista? Miten on mahdollista, että vaikka edellä mainitsemani historialliset tosiseikat ovat varmasti jokaiselle fyysikolle tuttuja, jotkut heistä silti uskovat tai pitävät ainakin vakavasti otettavana mahdollisuutena sitä, että Kaiken Teoria olisi valmis pian, tai vaikkapa kymmenen vuoden kuluttua?³ Mikä saa fyysikot uskomaan esimerkiksi, että luonnossa olisi kaiken kaikkiaan vain neljä perusvoimaa, jotka nykyään tunnettujen ilmiöiden selittämiseen tarvitaan? Ei tunnu olevan mitään järkevää perustetta uskoa, että tällainen oletus olisi tosi, vaikka sillä saattaakin tietenkin olla jotakin sellaista esteettistä arvoa, jonka Steven Weinbergin maineikkaassa modernin fysiikan kehitystä esittelevässä teoksessa *Dreams of a Final Theory*⁴ kerrotaan soveltuvan fysikaalisten hypoteesien valinnan kriteeriksi.

Riippumatta siitä, miten näiden uskomusten syntyä selittää, joudutaan toteamaan, että “älyllistä rehellisyyttä” kaivattaisiin lisää useilla eri tahoilla — ja sitä maksuttaessa fysiikan filosofiasta saattaisi olla apua. Seuraavassa esittelen joitakin fysiikan filosofian perusongelmia. Suuntaan päähuomioni kvanttimekaniikkaan, mutta liikkeelle lähdän kuitenkin fysiikan filosofian perinteisimmältä laidalta: vaikeuksista, jotka liittyvät siihen, että ihmisellä näyttää voivan olla *kokemuksesta riippumatonta* tietoa *fysikaalisen* avaruuden rakenteesta.

Ajan ja avaruuden filosofiaa: perusongelmia

Klassisessa newtonilaisessa fysiikassa avaruuden oletettiin olevan *absoluuttinen*. Isaac Newton postuloi *Principia*-teoksessaan, että absoluuttinen aika virtaa aina samanlaisena ja riippumattomana mistään ja että absoluuttinen avaruus pysyy aina samanlaisena ja muuttumattomana. Käytännössä tämä merkitsi, että klassisen fysiikan avaruus oli tavanomainen kolmiulotteinen, joka suuntaan loputtomiin samanlaisena jatkuva *euklidinen* avaruus.

Klassisen fysiikan mukaisen maailmankuvan keskeinen filosofinen ongelma oli, miten nämä oletukset voidaan tietää tosiksi. Sitä, että avaruus jatkuu joka suuntaan loputtomiin, ei tietenkään voida loogisesti johtaa mistään äärellisestä määrästä havaintolauseita. Tämä väite ei myöskään näytä olevan tähänastisen kokemuksen perusteella tehty *yleistys* missään tavanomaisessa mielessä. Se ei perustu siihen, että emme vielä tähän asti ole koskaan havainneet avaruuden päättyvän mihinkään; pikemminkin se näyttää perustuvan siihen, että emme kykene kuvittelemaan tilannetta, jossa avaruus päättyisi.

Edelleen tuntuu kummalliselta, että voimme johtaa kokemukseen vetoamatta geometrisia teoreemoja, jotka soveltuvat fysikaalisen avaruuden osiin. Jos lähdän liikkeelle euklidisen geometrian aksiomista, voin todistaa vaikkapa, että

“Uudemmissa fysikaalisissa teorioissa avaruudella on oletettu olevan vielä mutkikkaampia geometrisia rakenteita ... String-teoriassa on postuloitu, että avaruudella olisi tietyssä mielessä 10-ulotteinen tai kenties 11-ulotteinen rakenne.”

11-kulmion kulmien summa on 1620 astetta. Tällöin tietoni näyttää olevan *synteettistä* — toisin sanoen sen sisältö ei näytä palautuvan siinä esiintyvien käsitteiden merkityksiin — sillä se, että 11-kulmion kulmien summa on juuri 1620 astetta, ei tunnu mitenkään kuuluvan 11-kulmion määritelmään tai 11-kulmion käsitteen merkitykseen.

Lisäksi tietoni näyttäisi olevan myös *apriorista* eli relevanttiin kokemukseen perustumatonta. Ensinnäkään se ei ole 11-kulmioita koskevan tähänastisen kokemuksen pohjalta tehty yleistys: tieto ei perustu esimerkiksi siihen, että joku olisi leikellyt paperista suuren joukon 11-kulmioita, mittaillut niiden kulmia ja havainnut kulmien summaa koskevan säännönmukaisuuden. Se ei näyttäisi perustuvan kokemukseen myöskään sillä mutkikkaammalla tavalla, jolla tavanomaisten tieteellisten teorioiden seuraukset perustuvat kokemukseen. Jos johonkin arvostelmaan on päädytty vetoamalla todeksi uskottuun fysikaaliseen teoriaan, arvostelma ei ole apriorinen vaan *aposteriorinen*, kokemukseen perustuva: voisimmehan näet hyvin kuvitella tilanteen, jossa fysikaalinen teoria olisi epätosi, ja siksi emme selvästikään voi tietää ilman kokemusta, onko tuo arvostelma tosi vai ei. Sitävastoin geometriset teoreemat näyttävät apriorisilta, koska sellaista tilannetta, joka osoittaisi ne epätosiksi, ei voida lainkaan kuvitella — tai ei voitu kuvitella, ennen kuin epäeuklidinen geometria (jota pikapuoliin tarkasteltava yleinen suhteellisuusteoria ja esimerkiksi string-teoria hyödyntävät) oli keksitty.

Immanuel Kant esitti ongelmaan tunnetun vastauksen, jonka mukaan aika ja avaruus ovat *intuition muotoja*, joiden avulla inhimillinen tietoisuus jäsentää todellisuutta. Voimme tietää kokemuksesta riippumatta, että fysikaalisen avaruuden pisteet ja suorat toteuttavat tiettyjä teoreemoja, sillä nuo teoreemat kertovat meille vain ihmismielen jäsentämästä todellisuudesta — eivät todellisuudesta sellaisena kuin se on ihmismielestä riippumatta.

Ratkaisusta seuraa, että emme voi tietää ihmismielestä riippumattomasta todellisuudesta juuri mitään. Emme voi tietää, onko olioilla sinänsä joitakin ominaisuuksia, jotka vastaavat niitä avaruudellisia ja ajallisia suhteita, joiden avulla jäsenämme niiden aiheuttamia, meidän havaitsemiamme ilmiöitä. Meillä ei ole myöskään mitään tapaa saada selville, onko olemassa joitakin muita todellisuuden jäsentämisen menetelmiä kuin ihmiselle tunnusomaiset menetelmät tai vertaamaan noita menetelmiä omiimme. Vaikka joillakin ihmisestä riittävän radikaalisti poikkeavilla otuksilla saattaakin olla jokin tapa kuvata todellisuutta niin, että avaruuden ja ajan käsitteitä ei lainkaan tarvita, me emme pysty kuvittelemaan, millainen tuo kuvailutapa on, emmekä selvittämään, sopiiko se

olioiden sinänsä kuvaamiseen paremmin vai huonommin kuin ihmisen käyttämät menetelmät.

Ajan ja avaruuden filosofiaa: suhteellisuusteorian luoma uusi tilanne

Edellä esitetty ongelma ja Kantin siihen tarjoama vastaus lie-
nevät filosofian historiaan perehtyneelle lukijalle tuttuja. Ken-
ties hivenen vähemmän tuttua on, kuinka *erityisen*
suhteellisuusteorian keksiminen on muuttanut tätä perinteis-
tä kysymyksenasettelua. Suhteellisuusteoria motivoi seuraavaa
yksinkertaista vastausta kysymykseen, kuinka meillä voi
olla kokemuksesta riippumatonta tietoa fyysikaalisen avaruuden
rakenteesta: ei meillä mitään sellaista tietoa olekaan.

Erityisessä suhteellisuusteoriassa esitetään, että Newtonin
postuloimaa absoluuttista aikaa ja absoluuttista avaruutta ei
ole ja että avaruuden ja ajan rakenteet *kytkettyvät toisiinsa*
tavalla, josta meillä ei selvästikään voi olla apriorista tietoa.
Yleisen suhteellisuusteorian mukaan fyysikaalinen avaruus ei
ole kaikkialla samanlainen euklidinen avaruus, vaan sen geo-
metrinen rakenne määräytyy mutkikkaalla tavalla siinä ole-
van *aineen* jakaumasta. Tuo geometrinen rakenne selittää puo-
lestaan *painovoiman*: yleisen suhteellisuusteorian mukaan aine
"käyristää" avaruutta, ja kappaleet, jotka olisivat Newtonin
painovoimateorian mukaisessa kuvauksessa painovoiman aiheuttamassa
kiihtyvässä liikkeessä, kulkevatkin itse asiassa (tietyissä abstraktissa
mielessä) "suoraan" aineen "käyristämässä" avaruudessa.

Uudemmissa fyysikaalisissa teorioissa avaruudella on olet-
tettu olevan vielä mutkikkaampia geometrisia rakenteita.
Esimerkiksi Einstein yritti kehittää yleiselle suhteellisuusteorialle
yleistystä, jossa avaruuden rakenteen avulla voitaisiin selittää
painovoiman lisäksi myös sähkömagneettinen kenttä. String-teoriassa
on postuloitu, että avaruudella olisi tietyissä mielessä 10-ulotteinen
tai kenties 11-ulotteinen rakenne. (Se, että arkikokemuksesta tuttu
fyysikaalinen avaruus on kolmiulotteinen, merkitsee olennaisesti,
että voimme kiinnittää siihen koordinaatiston, jossa on kolme toisiaan
vasten kohtisuoraa akselia, ja ilmaista avaruuden kunkin pisteen
paikan antamalla kolme lukua, sen kolme koordinaattia tuossa
koordinaatistossa. String-teorian mukaan koordinaatteja tarvitaan
itse asiassa kymmenen. Tämä ei kuitenkaan merkitse, että string-
teorian mukaan olisi olemassa joitakin "korkeammassa ulottuvuudessa"
sijaitsevia fyysikaalisen avaruuden paikkoja, jotka olisivat "kaukana"
niistä paikoista, jotka voidaan saavuttaa kolmessa meillä tutussa
ulottuvuudessa kulkemalla. Teorian ideana on, että kaikki avaruuden
pisteet ovat seitsemän "ylimääräisen" ulottuvuuden suhteen niin
lyhyen etäisyyden päässä toisistaan, että muiden kuin mikrofysikaalisten
systeemien paikkojen ilmaisemiseen tarvitaan vain arkikokemuksesta
tutut kolme ulottuvuutta; "isot" kappaleet ovat kaikki "suunnilleen
samassa paikassa" noiden ulottuvuuksien suhteen.)

Tällainen fysiikan kehitys mahdollistaa seuraavan vastauksen
antamisen geometrisen tiedon mahdollisuutta koskevaan ongelmaan.
Erilaiset geometrian aksiomajärjestelmät vain nimeävät olioita
(pisteitä, suoria jne.) ja väittävät näiden toteuttavan tietynlaisia
relaatioita. Apriorista geometrista tietoa voi olla olemassa vain
siinä mielessä, että kokemuksesta riippumatta voidaan tietää, mitä
jostakin tietystä aksiomajärjestelmästä seuraa loogisesti ja mitä
ei. Tällainen tieto ei ole synteettistä vaan *analyttistä* sanan 'analyttinen'
laajassa mielessä: voimme sanoa, että se on totta siinä esiintyvien
käsitteiden merkitysten nojalla, jos ajattemme, että kukin geometrian
aksiomajärjestelmä implisiittisesti kuvaa siinä

esiintyvien geometrinen käsitteiden merkitykset. Siihen, että
minulla voi olla tällaista apriorista analyttistä tietoa, ei näytä
liittyvän mitään erityistä ongelmaa: jos osaan pelin säännöt eli
jos tiedän, mitä aksiomia ja mitä päättelysääntöjä saan käyttää,
minulla voi tietenkin olla tietoa siitä, millaisiin lopputilanteisiin
peli voi johtaa, eli millaisia teoreemoja voin saada todistetuksi.

Toisaalta se, onko todellisuudessa mitään olioita, joilla olisi
jonkin geometrisen aksiomajärjestelmän mukaiset ominaisuudet,
on viime kädessä empiirinen kysymys. Aina, kun on puhe fyysikaalisen
avaruuden geometriasta, tarvitaan kokemusta ratkaisemaan, ovatko
sen ominaisuudet samoja kuin käytetyn aksiomajärjestelmän mukaisen
avaruuden ominaisuudet.

Suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan ongelmallinen suhde

Ajan ja avaruuden filosofian perinteinen ongelma näyttäisi
näin tulleen ratkaistuksi tavalla, joka ei johda samanlaiseen
skeptisismiin kuin Kantin ehdottama ratkaisu. Suhteellisuusteoria
tuottaa kuitenkin uusia filosofisia ongelmia: sen sovittaminen
yhteen *kvanttimekaniikan* kanssa on ongelmallista. Osa vaikeuksista
liittyy siihen, että *tapahtumien keskinäinen aikajärjestys* voi
erityisessä suhteellisuusteoriassa vaihdella käytetystä koordinaatistosta
riippuen seuraavaksi esiteltävällä tavalla.

"Ei ole mitään selvää syytä, miksi kvanttimekaniikan mukaan olisi
mahdotonta, että jonkin tapahtuman vaikutus etenisi yli valon nopeudella.
Einstein, Podolsky ja Rosen esittivätkin vuonna 1935 kuuluisan argumentin,
niinkutsutun EPR-argumentin, jonka mukaan kvanttimekaniikka tietyissä
mielessä sallii tuollaisen "liian nopean", suhteellisuusteoriaan sopimattoman
vaikutuksen."

Ajatellaan, että A ja B ovat kaksi tapahtumaa, joista kumpikin on
sattunut jossakin aika-avaruuden hyvin määritellyssä pisteessä eli tietyissä
paikassa tiettyyn aikaan. Jos tapahtumat ovat sellaisia, että valon nopeudella
etenevä signaali olisi ehtinyt tapahtumasta A tapahtumaan B, niin erityisen
suhteellisuusteorian mukaan kaikkien mahdollisten havaitsijoiden koordinaatistoissa
pätee, että A tapahtui ennen kuin B. Jos taas signaali ei olisi ehtinyt kummastakaan
tapahtumasta toiseen, aikajärjestys riippuu suhteellisuusteoriassa koordinaatiston
valinnasta: joissakin koordinaatistoissa pätee, että A tapahtui ennen kuin B,
ja joissakin toisissa että B tapahtui ennen kuin A.

Tämä merkitsee, että tilanne, jossa jokin tapahtuma olisi toisen tapahtuman
syy ja jossa edellisen vaikutusta jälkimäiseen välittämään tarvittaisiin
yli valon nopeudella etene-

vä signaali, ei sopisi yhteen suhteellisuusteorian kanssa; tällöinhän joissakin koordinaatioissa pätsi, että myöhemmin sattunut tapaus olisi aikaisemman tapauksen syy. Se tavanomainen kvanttimekaniikka, jota käytetään esimerkiksi atomien spektrejä koskevia ennusteita laskettaessa, ei kuitenkaan ole relativistinen, suhteellisuusteoriaan nojautuva teoria lainkaan. Ei ole mitään selvää syytä, miksi kvanttimekaniikan mukaan olisi mahdotonta, että jonkin tapahtuman vaikutus etenisi yli valon nopeudella. Einstein, Podolsky ja Rosen esittivätkin vuonna 1935 kuuluisan argumentin, niinkutsutun EPR-argumentin, jonka mukaan kvanttimekaniikka tietystä mielessä sallii tuollaisen ”liian nopean”, suhteellisuusteoriaan sopimattoman vaikutuksen.

Argumentissa tarkastellaan tilannetta, jossa tiettyjen kahden suureen arvoja mitataan kahdelta eri alkeishiukkaselta, joista seuraavassa käytän nimityksiä hiukkanen 1 ja hiukkanen 2. Hiukkaseen 1 kohdistuva mittausta tehdään (suhteessa käytettyyn koordinaatioon) ensin. Kummaltakin hiukkaselta voidaan kussakin koejärjestelyssä mitata vain toinen suureista (eli suureet ovat *komplementäärisiä*), mutta kuitenkin kumpi tahansa niistä. Lisäksi kvanttimekaniikan mukainen kuvaus systeemin tilasta on sellainen, että kullakin ajanhetkellä kummankin hiukkasen kohdalla vain yhdellä suureella kerrallaan voi olla hyvin määritelty arvo. (Edellä mainitut oletukset eivät ole ristiriitaisia, koska kvanttimekaniikassa ajatellaan, että jos mittaamme suureen, jolla ei ole arvoa ennen mittausta, itse mittaustapahtuma siirtää tarkasteltavan systeemin tilaan, jossa kyseessä olevalla suureella on hyvin määritelty arvo.)

Hiukkasen 1 ja hiukkasen 2 suuren arvot riippuvat toisistaan: jos mittaamme jommankumman suureen arvon hiukkaselta 1, on mahdollista ennustaa, mikä arvo saataisiin, jos sama suure mitattaisiin hiukkaselta 2.

Argumentin esittäjät tekevät tervejärkisen oletuksen, jonka mukaan sellaista fyysikaalista suuretta, jonka arvon voimme ennustaa varmasti etukäteen fyysikaalista systeemiä häiritsemättä, täytyy vastata jokin fyysikaalisen todellisuuden elementti. Yllä kuvaillussa tilanteessa tämä merkitsee, että heti sen jälkeen, kun jompikumpi suureista on mitattu hiukkaselta 1, fyysikaalisessa todellisuudessa on elementti, joka vastaa kyseessä olevan suureen arvoa hiukkasen 2 kohdalla. Nyt jää vain kaksi vaihtoehtoa: joko 1) kummallakin suureella on hiukkasen 2 kohdalla ollut todellisuudessa arvot jo ennen hiukkasen 1 kohdistuvaa mittausta, missä tapauksessa kvanttimekaniikan mukainen kuvaus tilanteesta on puutteellinen, tai 2) hiukkaseen 1 kohdistuva mittausta saa hiukkasen 2 *heti* siirtymään tilaan, jossa hiukkaselta 1 mitatulla suureella on hyvin määritelty arvo. Vaihtoehto 2) on ristiriidassa paitsi terveen järjen myös suhteellisuusteorian kanssa, koska siirtymä tapahtuu heti, eikä vasta sitten, kun valon nopeudella etenevä signaali (joka ”kertoo”, kumpi suureista mitattiin hiukkasen 1 kohdalla) olisi ehtinyt hiukkasen 1 luota hiukkasen 2 luolle.

Argumentti on johtanut mutkikkaaseen tilanteeseen. Se ei osoita suhteellisuusteoriaa ja kvanttimekaniikkaa keskenään ristiriitaisiksi missään suoraviivaisessa mielessä, sillä argumentissa käytetty fyysikaalisen todellisuuden ”elementtejä” koskeva lisäoletus voidaan kiistää. Suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka olisivat selvässä ristiriidassa keskenään, jos hiukkasen 1 luona oleva fyysikko voisi välittää hiukkasen 2 luona olevalle fyysikolle *informaatiota* yli valon nopeudella valitsemalla ”viime hetkellä”, kumman suureen hän mittaa. Mittaustulosten välinen yhteys, jonka olemassaolon EPR-argumentti osoittaa seuraavan kvanttimekaniikasta, ei kuiten-

kaan sovellu tällaiseen viestintään, koska hiukkasen 1 luona oleva fyysikko ei pysty ennustamaan, minkä mittaustuloksen hän saa — näin siksi, että kvanttimekaniikka on indeterministinen, vain tilastollisia ennusteita tuottava teoria. EPR-argumentti osoittaa kuitenkin, että *kvanttimekaniikan, suhteellisuusteorian ja joidenkin hyvin ilmeisiltä tuntuvien fyysikaalista todellisuutta koskevien oletusten yhdistelmä on ristiriitainen*.

Tieteenfilosofisessa ja fysiikan perusteita koskevassa tutkimuksessa on käyty laaja EPR-argumenttia koskeva keskustelu. Kvanttimekaniikkaan liittyvistä vaikeuksista tätä argumenttia tunnetumpia lienevät kuitenkin ne, jotka liittyvät teorian edellä jo mainittuun *indeterministisyyteen* sekä siinä postuloitujen aineen ”*aaltomaisten*” ja ”*hiukkasmaisten*” ominaisuuksien suhteeseen. Seuraavaksi tarkastelen lyhyesti näitä aihepiirejä.

Kvanttimekaniikan indeterminismi ja tulkintaongelmat

Kvanttimekaniikka on tilastollinen teoria: vaikka se kuvaus, jonka kvanttimekaniikka antaa jonkin fyysikaalisen systeemin tilasta, oletettaisiin tarkoin tunnetuksi, tästä ei voitaisi päätellä, millaisia mittaustuloksia saadaan, kun systeemin tilaa kuvaavia suureita mitataan. Teoriasta johdetut mittaustuloksia koskevat ennusteet ovat *tilastollisia*.

Tämän kvanttimekaniikan peruspiirteen on toisinaan katsottu olevan osoitus jostakin, jota on nimitetty ”todellisuuden irrationaalisuudeksi”. Tällaisesta ”irrationaalisuudesta” ei tietenkään mitenkään seuraa, että inhimillinen tieto ei voisi kohdistua siitä riippumattomaan todellisuuteen. Näin ymmärrettyä irrationaalisuudessaan on päinvastoin kyse siitä, että tiedossamme on kuvaukset jonkin inhimillisestä tietoisuudesta riippumatta olemassaolevan olion tilasta kahdelta eri ajanhetkellä — esimerkiksi hiukkasen aaltofunktio ja kuvaus, jonka mukaan hiukkanen on osunut tiettyyn pisteeseen valokuvauslevyllä — ja että näille kuvauksille on ominaista, että toista ei voida johtaa loogisesti toisesta fysiikan lakien avulla.

Tämä kenties ilmeiseltä vaikuttava toteamus on tarpeen, koska professori K. V. Laurikainen on esittänyt julkisuudessa kvanttimekaniikan filosofiasta käydyssä keskustelussa, että edellä mainittu ”irrationaalisuus” perustelisi *antirealismia*. Melko tuore muotoilu tälle ajatukselle löytyy hänen esseestään ”Realismin kriisi pähkinänkuoressa”²⁵, jossa hän väittää todellisuuden irrationaalisuuden ilmenevän yksittäistapauksissa, joita ei voida ennustaa, ja toteaa sitten: ”Tämän irrationaalisuuden vuoksi emme voi tavoittaa itse todellisuutta rationaalisessa kuvailussamme vaan todellisuus on periaatteessa ihmisajattelun tavoittamattomissa”.

Laurikaisen ja Wolfgang Paulin — joka myös on käyttänyt samaa käsitettä — tarkoittama irrationaalisuus näyttää kuitenkin olevan vain sitä, että kvanttimekaniikasta johdetut mittaustuloksia koskevat ennusteet ovat tilastollisia. Voidaan sanoa, että kvanttimekaniikka *ei selitä kaikkea*. Tässä suhteessa deterministiset teoriat eivät kuitenkaan poikkea kvanttimekaniikasta. Ihminen ei voi löytää vastausta kysymykseen, miksi fysiikan lait ovat sellaisia kuin ne ovat. Tällaiseen kysymykseen voidaan vastata vain johtamalla joitakin fysiikan lakeja toisista niitä yleisemmistä laeista, jolloin jää epäselväksi, miksi nuo yleisemmät lait ovat sellaisia kuin ovat. Jos fysiikan lait olisivat deterministisiä, voisimme selittää, miksi maailmankaikkeuden tila on jollakin ajanhetkellä *t* sellainen kuin se on, lähtemällä liikkeelle sen tilasta jollakin aikaisemalla ajanhetkellä *t*₀ (jos sen tuntisimme). Tässäkään tapauk-

“Kuten eksistentialismin perinteessä on oikein oivallettu, ihminen on heitetty absurdiin, mielivaltaiseen ja — jos tätä sanaa halutaan käyttää — irrationaaliseen maailmaan. On vaikea nähdä, miten fysiikan teorioiden deterministisyys tai indeterministisyys voisi olennaisesti muuttaa tätä tilannetta. Toisaalta tällaisesta irrationaalisuudesta ei seuraa, että todellisuutta koskeva inhimillinen tieto olisi mahdotonta.”

sessä mikään tieteellinen teoria ei voisi selittää, miksi tuo tila oli hetkellä t_0 se, mikä se oli, viittaamatta johonkin toiseen yhtä selittämättömään tosiseikkaan. Kuten eksistentialismin perinteessä on oikein oivallettu, ihminen on heitetty absurdiin, mielivaltaiseen ja — jos tätä sanaa halutaan käyttää — irrationaaliseen maailmaan. On vaikea nähdä, miten fysiikan teorioiden deterministisyys tai indeterministisyys voisi olennaisesti muuttaa tätä tilannetta. Toisaalta tällaisesta irrationaalisuudesta ei seuraa, että todellisuutta koskeva inhimillinen tieto olisi mahdotonta.

Ei näytäkään olevan mitään asiallisia syitä pitää sitä seikkaa, että kvanttimekaniikka tuottaa vain tilastollisia ennusteita, *itsessään* filosofisesti ongelmallisena. Filosofisesti ongelmallinen on kuitenkin se tapa, jolla kvanttimekaniikasta johdetut ennusteet kiinnittyvät sen tuottamaan fysikaalisen todellisuuden kuvaan.

Kvanttimekaniikassa fysikaalisen systeemin tilaa esittää *aaltofunktioksi* nimitetty matemaattinen entiteetti, joka on jonkin Hilbert-avaruuden alkio. Yksinkertaisimmassa mahdollisessa tapauksessa, jossa tarkastellaan yhtä ainoata hiukkasta ja sen ominaisuuksista vain sen paikkaa, aaltofunktioksi voidaan ottaa kussakin avaruuden pisteessä määritelty funktio, jonka arvot ovat kompleksilukuja. Aaltofunktion aikakehitys on kvanttimekaniikassa *determinististä*: jos aaltofunktion kussakin avaruuden pisteessä jollakin ajanhetkellä saamat arvot oletetaan tunnetuiksi, niistä voidaan laskea sen arvot kullakin tätä myöhäisemmällä ajanhetkellä. Teorian indeterministisyys aiheutuu siitä, että aaltofunktio ei yksikäsitteisesti määrää niitä tuloksia, jotka saadaan, kun kvanttimekaanisen systeemin havaittavia ominaisuuksia *mitataan*.

Tästä syystä mittauksen käsitteellä on kvanttimekaniikassa kummallinen status. Näyttää siltä, että *mittaustapahtuma* katkaisee systeemin muuten deterministisen kehityksen. Jos mittauksen käsite ymmärretään tässä jonkin tiedostavan subjektin suorittamaksi mittaukseksi — kuten mm. *von Neumann* sen tulkitsi — tulos tukee antirealismia. Näin tulkittuna kvanttimekaniikasta seuraa, ettei myöskään tavanomaisilla,

makroskooppisia kappaleita kuvaavilla fysikaalisilla suureilla ole arvoja, jos kukaan ei ole niiden arvoja mittaamassa — ei ainakaan tilanteissa, joissa niiden arvot riippuisivat joistakin yksittäisistä mikrofysikaalisista tapahtumista. Toisaalta mittauksen käsite voidaan ymmärtää myös niin, että mittalaitteissa tapahtuvat prosessit ovat mittauksia silloinkin, kun kukaan ei ole niiden tuloksia seuraamassa, kuten mm. Niels Bohr ajatteli ja kuten kvanttimekaniikkaa käytäntöön soveltavien fyysikoiden valtava enemmistö epäilemättä edelleen ajattelee. Tällainen kanta on tervejärkinen, mutta se jättää epäselväksi, missä mikrofysikaalisen ja makrofysikaalisen todellisuuden välinen raja kulkee.

Mittausongelma on keskeisin modernin fysiikan ja filosofian rajamaastoon kuuluvista ongelmista, ja sille on ehdotettu monenlaisia ratkaisuja. Toisaalta ongelma on myös usein siirretty syrjään väittämällä sen johtuvan vain siitä, että arkikielen lauseet eivät sovellu mikrofysikaalisen, arkikokemukselle vie-raan todellisuuden kuvailuun. Tällainen ratkaisu on kuitenkin selvästi epätydyttävä — ainakin jos sen esittäjät eivät halua täsmentää, mitä kaikkia arkikielen lauseita he tarkoittavat.

Rinnastus suhteellisuusteoriaan havainnollistaa asiaa. Kuten edellä jo todettiin, tapahtumien aikajärjestys voi suhteellisuusteorian mukaan riippua käytetystä koordinaatistosta. Jos käyttäisimme suhteellisuusteoriassa ilmaisua “Tapahtuma A oli ennen tapahtumaa B” (jossa ei mainita koordinaatistoa, jossa tapahtumien ajankohtia vertaillaan) samaan tapaan kuin arkikielessä, saisimme helposti aikaan loogisia ristiriitoja. Tämä ei kuitenkaan ole mikään todellinen ongelma. Suhteellisuusteoriassahan esitetään täsmällinen ja järkeenkäypä sääntö, joka kertoo, millaisten tapahtumien kohdalla tuo puhetapa tuottaa ristiriitoja ja millaisten ei, niin että voimme edelleenkin käyttää puhetapaa tapauksissa, joissa se on ongelmaton.

Kvanttimekaniikassa tilanne on toinen. Kvanttifysiikassa tarkasteltavia systeemejä joudutaan luonnehtimaan arkikielen lausein — eihän kukaan ole esittänyt mitään vaihtoehtoista puhetapaa, jossa esimerkiksi muotoa “Alkeishiukkasten A ja B törmätessä syntyvät alkeishiukkaset C ja D” ja “Alkeishiukkanen A on alueessa P” olevia ilmaisuja ei lainkaan tarvittaisi. Edelleen alkeishiukkasfysiikkaa kokonaisuutena luonnehditaan toisinaan sanomalla, että alkeishiukkasfysiikka selvittää, *mistä maailma koostuu*. On kuitenkin täysin epäselvää, mikä tällaisten puhetapojen oikeutus on, jos osa arkikielen lauseista on fysikaalisen todellisuuden kuvailuun soveltumattomia ja jos ei ole esitetty mitään sääntöjä, joiden avulla kahta eri tyyppiä olevat arkikielen lauseet voitaisiin erottaa toisistaan. Viimeksi mainittu mahtipontinen arkikielinen puhetapa saattaa olla käytännöllinen esimerkiksi, kun alkeishiukkasfyysikoiden työkseen harjoittamalle käyttäytymiselle etsitään rahoitusta, mutta niin kauan kuin kukaan ei ole kertonut, mitkä arkikielen ilmaisut ovat sallittuja ja mitkä kiellettyjä, ei ole kerrassaan mitään syytä pitää sitä tuon käyttäytymisen osuvana luonnehdintana.

Useimmat mittausongelmaan ehdotetuista vastauksista ovat kuitenkin kiinnostavampia kuin kvanttimekaniikan selvästi epätydyttävien piirteiden älyllisesti epärehellinen kiistäminen. Yksi esimerkki vaihtoehtoisista vastauksista on seuraavaksi tarkasteleman *David Bohmin teoria*. Bohm halusi nähdä mittausongelmaan esittämänsä ratkaisun osana kehittämänsä laajempaa filosofista maailmankuvaa, johon sisältyy toisilleen vastakkaisten ja jopa ristiriitaisten tunteisia elementtejä. Bohmin kirjoitusten lukijasta saattaa tuntua epäselvältä jopa se, tulisiko meidän hänen omasta mielestaan asennoitua hänen teoriaansa realismiin vai instrumentalismiin

mukaisesti. Suomalaisessa keskustelussaärkevimmän tulkinnan Bohmin teorialle on mielestäni esittänyt Tiina Seppälä. Hänen mukaansa Bohmin ajattelussa on erotettava toisistaan hänen asenteensa “fyysikon realismiin” ja “filosofin realismiin”; edellistä Bohm Seppälän mukaan kannattaa ja jälkimmäistä vastustaa. Fyysikon realismilla tarkoitetaan tässä lähinnä vaatimusta, että fyysikaalisen teorian on annettava selkeä kuva fyysikaalisista ilmiöistä, että se ei saa olla esim. matemaattinen formalismi vailla tulkintaa. Filosofin realismi on taas metateoreettinen asenne, jonka mukaan teoreettiset termit viittaavat todellisiin entiteetteihin, jolloin (ainakin parhaat) tieteelliset teoriat voivat olla sananmukaisesti tosia.⁶ Perusideana tällaisessa erottelussa näyttää olevan, että “fyysikon realismin” kannattajan tulee teorianmuodostuksessaan toimia “filosofin realismin” kannattajan tavoin, vaikka hänen ei tarvitsekaan sitoutua mihinkään tieteenharjoittamisen käytännön kannalta irrelevantteihin filosofisiin oppeihin.

Fysikaaliseksi hypoteesiksi ymmärrettynä Bohmin teoria on joka tapauksessa mielenkiintoinen. Bohmin teoriassa huomio on kiinnitetty paikan mittauksiin, ja siinä hiukkasille postuloidaan monimutkaiset radat, jotka tilastollisesti keskimäärin tuottavat kvanttimekaniikan mukaiset mittaustulokset. Tällaisella radalla liikkuvan yksittäisen hiukkasen liike ei toteuta *liikemäärän säilymlakia*, ja teoria on sopuoinnussa *energian säilymlain* kanssa vain, jos päätetään postuloida uusi energiamuoto, kvanttipotentialin energia, joka on täsmälleen sen suuruinen, että kokonaisenergian määrä säilyy hiukkasen liike-energian vaihdellessa. Ajankohtainen kysymys on, onko olemassa koejärjestelyjä, joiden kohdalla Bohmin teoria tuottaisi tavallisesta kvanttimekaniikasta poikkeavia ennusteita. On ehdotettu, että sopivasti tulkittuna Bohmin teoriasta voitaisiin johtaa alkeishiukkasten *tunneloitumiseen ja heijastumiseen kuluva aikka* koskevia ennusteita, jotka eivät seuraisi tavallisesta kvanttimekaniikasta ja jotka mahdollistaisivat teorian testaamisen. Relevantit kokeet lienevät kuitenkin vielä tekemättä.⁷

Bohmin teoria on *piilomuuttujateoria*. Sen mukaan kvanttimekaniikan mukainen kuvaus systeemin tilasta on *epätäydellinen*, ja se täydentää tuota kuvausta lisäämällä siihen “piilomuuttujan” eli hiukkasen paikan. Esimerkkinä filosofisemmista mittausingelman ratkaisurytyksistä voidaan mainita *kvanttilogiikka*, jossa on etsitty loogisia sääntöjä, jotka tavanomaista kaksiarvoista logiikkaa paremmin soveltuisivat aaltokuvan (jossa on puhe laajalle avaruuden alueelle levinneestä aallosta) ja hiukkaskuvan (jossa hiukkanen on kullakin hetkellä jossakin pisteessä) yhteensovittamiseen.

Mittausingelmaan ehdotetut ratkaisut johtavat toisistaan poikkeaviin kvanttimekaniikan tulkintoihin. Filosofisten teorioiden ja noiden tulkintojen välinen suhde on mielenkiintoinen ja mutkikas aihe, jota koskevaa tasokasta tieteellistä tutkimusta julkaistaan mm. tärkeimmässä tieteenfilosofisissa lehdissä sekä esimerkiksi *Foundations of Physics* -lehdessä. Suomessa vakavasti otettava (ja medioissa näkymätön) fysiikan filosofian tai fysiikan perusteiden alaan kuuluva tutkimus on toistaiseksi kuitenkin kohdistunut suurelta osin yhteen melko kapeaan osa-alueeseen, *kvanttimekaaniseen mittauksen teoriaan*, jota käsitelen seuraavaksi.

Mittauksen teoria

Kvanttimekaanisen mittauksen teorian perusideana on, että mittaustapahtumaa tarkastellaan erottelemalla toisistaan mittalaite ja mikrofysikaalinen systeemi, jota mittausta koskee. Teoriassa myös *makroskooppisen mittalaitteen ajatellaan ole-*

van systeemi, jonka tilalle voidaan antaa kvanttimekaniikan mukainen kuvaus, ja siinä pyritään selvittämään, onko (edes periaatteessa) mahdollista kuvata mittalaitteen ja mittauksen kohteena olevan systeemin muodostamaa yhdistettyä systeemiä kvanttimekaniikan kanssa sopuoinnussa olevalla tavalla.

Ideana siis on, että mittalaitteen ja mittauksen kohteen yhdessä muodostamaa systeemiä kuvaa jokin aaltofunktio (tai teoriassa käytetyssä yleistetyssä formalismissa jokin jälkiluokkaoperaattori), joka muuttuu mittaustapahtumassa. Teoriassa ei pyritä kuvaamaan yksityiskohtaisesti tuota muutosta (mikä ei tietenkään olisi mahdollistakaan; eihän meillä ole kvanttimekaniikan mukaista kuvausta mistään todellisesta, valtaisan joukon alkeishiukkasia sisältävästä mittalaitteesta). Sen sijaan teoriassa tutkitaan, voiko ylipäättään olla olemassa funktioita, jotka kuvaavat yhdistetyn systeemin tilan muutosta mittaustapahtumassa (toisin sanoen funktioita, jotka liittyvät kuhunkin yhdistetyn systeemin tilaan, jossa se voi olla ennen mittausta, toisen tilan, jossa se on mittauksen jälkeen) ja jotka toteuttavat joitakin fyysikaalisesti luontevia ehtoja.

Tällaisessa teoriassa on välttämätöntä esittää kvanttimekaniikan matemaattinen formalismi tavanomaista täsmällisemmin. Siinä käytetty täsmennetty ja yleistetty formalismi soveltuu täsmällisten vastineiden antamiseen monille muillekin kvanttimekaniikassa käytetyille filosofisesti ongelmallisille käsitteille, esimerkiksi *komplementäärisyydelle* ja *epätarkkuusperiaatteille*. Toisaalta matemaattisen täsmällisyyden painottaminen johtaa etäntymiseen kvanttimekaniikan soveltamisen käytännöstä. Esimerkiksi yleistettyä formalismia ja sen sovelluksia esittelevä tärkeä suomenkielinen monografia, Pekka J. Lahden ja Kari Ylisen *Johdatus kvanttimekaniikkaan*, muistuttaa ulkonaisesti pikemminkin puhtaan matematiikan kuin fysiikan alaan kuuluvaa teosta.

Viime vuoden elokuussa Firenzessä järjestetyssä tieteenfilosofisessa konferenssissa minulla oli tilaisuus kuulla, kuinka fysiikan perusteita käytännönläheisellä tavalla tutkinut professori Nancy Cartwright varsin poleemisessa hengessä kertoi mittauksen teoriaa harrastaneelle Peter Mittelstaedtille, että monissa tilanteissa, joita mittauksen teorian mielessä kutsutaan mittauksiksi (kuten spinin mittauksessa), havainnosta suureen arvoon johtava päättelyketju ei ole yhtään lyhyempi kuin tilanteissa, joita ei nimitetä mittauksiksi. Tästä syystä Cartwrightin mukaan fysiikan filosofiassa tarvittaisiinkin tutkimusta, jossa aikaisempaa yksityiskohtaisemmin selvittäisiin, miten kokeelliset fyysikot tosiasiaassa kuvaavat kvanttimekaanisten systeemien tilojen muutoksia mittaustapahtumissa; muussa tapauksessa tuotettaisiin “näennäisvastauksia näennäisongelmiin”.

Tällainen kritiikki olisi aiheellista ainakin, jos mittauksen teoriaan kuuluvista teoreemoista vedettäisiin joitakin radikaaleja kvanttimekaniikan tulkintaa koskevia johtopäätöksiä. Toisaalta on selvää, että fysiikan perusteet -oppiaineeseen kuuluu, paitsi Cartwrightin toivomaa, kokeellisen fysiikan käytäntöä tarkkailevaa tutkimusta, myös sentyyppistä matemaattisten formalismien ominaisuuksiin kohdistuvaa tutkimusta, jota esimerkiksi Mittelstaedt ja Lahti ovat harrastaneet. Ei ole mitään syytä, miksi näistä tutkimussuunnista tarvitsisi valita vain toinen. Kvanttimekaniikan joitakin perusideoita ovat, että teoriassa kunkin fyysikaalisen systeemin tilaa vastaa kullakin hetkellä jonkin Hilbert-avaruuden alkio, että tuon alkion avulla voidaan laskea eri mittaustulosten todennäköisyydet, kun jokin systeemiä kuvaava suure mitataan, ja että suureen arvo mittauksen jälkeen on se arvo, joka ko. mittauksessa saatiin. Tästä syystä yksi fysiikan perusteet -oppiaineen

tehtävistä on selvittää, mitä loogisia seurauksia edellä mainituilla opinkappaleilla on. Toisaalta fysiikan perusteiden alaan kuuluu myös Cartwrightin toivomaa tyyppiä oleva tutkimus, jossa yritetään saada selville, ottavatko tieteenharjoittajat kvanttimekaniikkaa käytäntöön soveltaessaan tällaisia opinkappaleita vakavasti. Tätä kysymystä selvitettäessä tutkimuksen menetelmiä voidaan nimittää tieteen sosiologisiksi; edellisessä tapauksessa tutkimus taas muistuttaa puhdasta matematiikkaa.

Fysiikka, sen filosofia ja tieteellinen muutos

Olen edellä kritisoinut radikaalien filosofisten johtopäätösten vetämistä modernin fysiikan teorioista huomauttamalla, että johtopäätöksiä voidaan vetää monin eri tavoin. Filosofisten johtopäätösten vetämistä voidaan kritisoida toisestakin, miltei yhtä ilmeisestä syystä. Edellä nähtiin, että fysiikan filosofian ongelmat ovat kiinteästi sidoksissa kulloinkin vallitseviin fysikaalisiin teorioihin; siirtymä Newtonin mekaniikasta suhteellisuusteoriaan muutti miltei irrelevantiksi kantilaisen kysymyksenasettelun, joka oli aiemmin ollut keskeinen avaruuden ja ajan filosofiassa. Filosofinen tutkimus, jossa ratkaistaan filosofisia ongelmia johonkin tieteelliseen teoriaan viittaamalla, voi olla mielekästä vain, jos tuo teoria ei enää perusteiltaan muutu. Seuraavassa yritän selvittää, miksi oletan, että tällainen oletus on fysiikan kohdalla virheellinen. (Tämä argumentti ei tietenkään sovellu sellaisen fysiikkaan kytkeytyvän filosofisen tutkimuksen kritiikiksi, jolla on jokin vaatimattomampi päämäärä: esimerkiksi olemassaolevien fysikaalisten teorioiden sisällön ja tulkintavaihtoehtojen täsmällinen ja älyllisesti tyydyttävä esittäminen.)

Tämän kirjoittajassa hänen useita vuosia sitten suorittamansa kvanttimekaniikan opinnot herättivät tunteen, joka voidaan kiteyttää lauseeksi: "Tässähän me näitä episyklejä piirtelemme." Se tosiseikka, että kvanttimekaniikka on niin valtaisan menestyksellinen tieteellinen teoria (aivan kuten keskiaikainen, taivaanmekaniikassa käytetty sfäärien järjestelmäkin oli omana aikanaan), ehkäisee meitä näkemästä, että varsin yksinkertaisissakin sovelluksissa tuon teorian matemaattinen kalusto kiinnittyy havaittavaan fysikaaliseen todellisuuteen varsin epäsuoralla tavalla (analogisesti havaitsemattomien sfäärien järjestelmän kanssa, jonka avulla planeetoille johdettiin havaintojen kanssa yhteensopivia, episyklin muotoisia ratoja). Kvanttimekaniikan matemaattisen koneiston monimutkaisuus kasvaa valtaisaan vauhtia tarkasteltavien systeemien mutkikkouden kasvaessa. (Jos aiemmin mainitulla yksittäisellä hiukkasella oletetaan olevan myös spin, sen tilaa kuvaamaan tarvitaan funktio avaruuden pisteiltä ei kompleksiluvuille, vaan kompleksiarvoisille matriiseille; jos hiukkasia on kaksi, tarvitaankin jo kahden muuttujan funktio, joka liittyy jokaiseen kahden fysikaalisen avaruuden pisteen pariin kompleksiarvoisen matriisin, jne.)

Joskus on ehdotettu, että *Bohmin teoria* tarjoaisi tällaiselle "abstrakteja matemaattisia formalismeja" rakentavalle teorianmuodostukselle "fysikaalisia malleja" käytettävän vaihtoehdon. Näin ei selvästikään ole. Bohmin teoria soveltuu tilanteisiin, joissa mitattavat suureet ovat alkeishiukkasten *paikkoja*, ja tuollaisissa tapauksissa se poikkeaa tavanomaisesti fysiikan opiskelijoille opetettavasta kvanttimekaniikasta sikäli, että siinä alkeishiukkasia, jotka ovat sen mukaan kullakin hetkellä hyvin määritellyissä paikoissa, ohjaa aaltofunktion avulla määritelty kenttä. Tuo kenttä ei ole oleellisesti yksinkertaisempi matemaattinen olio kuin se aaltofunktio, jonka avulla se määritellään ja jota "tavallisessa"

kvanttimekaniikassa käytetään tällaista tilannetta kuvattaessa: kumpikin niistä on funktio, joka on määritelty kullekin tarkasteltavien hiukkasten paikkojen yhdistelmälle. (Kenttä on tosin sikäli yksinkertaisempi, että sen arvojen voidaan katsoa olevan — kun Bohmin teoriaa tulkitsee sopivasti — reaalityyppisiä eikä kompleksilukuja, kuten aaltofunktion arvot.)

Kvanttimekaniikalle valittavasta tulkinnasta riippumatta sen matemaattinen formalismi perustuu niille työkaluille, ennen muuta *kentän* käsitteelle, jotka ovat osoittautuneet arki-kokemukseen sitä läheisemmin kytkeytyvillä fysiikan aloilla hedelmällisiksi. Sekä kvanttimekaniikassa että vaikkapa klassisessa elektrodynamiikassa esiintyvät kentät ovat olennaisesti (yksi- tai useampipaikkaisia) funktioita fysikaaliselta avaruudelta joillekin reaalityyppisten avulla määritellyille matemaattisille olioille; edellisessä tapauksessa nämä oliot ovat vain paljon mutkikkaampia kuin jälkimmäisessä. Siirryttäessä klassisen fysiikan kentistä kvanttimekaniikan aaltofunktioihin ei tapahdu mitään *radikaalia käsitteellistä muutosta* (kuten esimerkiksi episykliä vaihtuessa ellipseihin tapahtui).

Voitaisiinko sitten määritellä joitakin toisenlaisia matemaattisia entiteettejä, joiden keksiminen vaatisi tuollaista käsitteellistä muutosta ja joilla mikrofysiikan systeemejä voitaisiin kuvata — entiteettejä, joiden määritelmät eivät kenties perustuisi reaalityyppiseen käsitteeseen lainkaan? Voitaisiinko tällaisten entiteettien varaan rakentaa mikrofysiikan teoria, joka ei vain *pelastaisi ilmiöitä* kuvaamalla niitä formalismilla, jonka mutkikkuus kasvaa tarkasteltavien hiukkasten lukumäärään verrannollisena, vaan — niin sanoakseni — kuvaisi *luonnon omaa konstruktioita*? Uskon, että tällainen teoria on mahdollinen ja että kun se on löytenyt, fysiikka ja sen filosofia ovat kovin toisenlaisia kuin nykyään.

Viitteet

1. Ks. esim. *Kanava* 8/95
2. *Kanava* 9/95
3. Ks. esim. *Helsingin Sanomat* 30.9.95, s. D2
4. Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992
5. K. V. Laurikainen, "Realismin kriisi päähinänkuoressa", *Arkhimedes* 1/1996
6. Seppälä, Tiina, "Realismista ja instrumentalismista David Bohmin fysiikassa", teoksessa Kiesepää, Pihlström ja Raatikainen, *Tieto, totuus ja todellisuus*, Gaudeamus, Helsinki 1996, s. 176-184
7. Laurikainen et al 1994; Cushing, 61-70

Lisälukemista

Systemaattisia johdatuksia *ajan ja avaruuden filosofiaan* ovat esimerkiksi L. Sklar: *Space, time, and space-time* (1974), ja A. Grünbaum: *Philosophical Problems of Space and Time* (1964). Ansiokas, historiallisessa järjestyksessä etenevä (mutta valitettavasti 70-luvulle päättyvä) johdatus *kvanttimekaniikan filosofiaan* on M. Jammer: *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley, 1974). Tuoreempi esitys aiheesta on esimerkiksi P. Forrest: *Quantum Metaphysics* (Basil Blackwell, 1988). Suppea esitys alan joistakin perusongelmista on myös P. Lahti: *Kvantti-teoria ja realismi*, *Ajatus* 42, s. 69-105.

Käytännöllisesti (ja filosofian vastaisesti) suuntautunut esitys modernin fysiikan kehityksestä on esimerkiksi S. Weinberg: *Dreams of a Final Theory* (Pantheon Books, 1992). Lyhyt populaaritieteellinen esitys *string-teorian* perusideoista on M. Mukerjee: *Explaining Everything* (*Scientific American*, January 1996, s. 72-78). *David Bohmin* teoriaa esitellään systemaattisesti teoksessa D. Bohm, & B. Hiley, B: *The Undivided Universe* (Routledge, 1994).