



## Havaittajan asema kvanttimekaniikan kööpenhaminalaisessa tulkinnassa

Tarja Kallio-Tamminen



**Kvanttimekaniikan ns. Kööpenhaminan tulkinta edellyttää syvällisiä uudistuksia todellisuuskäsitykseen, kun taas kvanttimekaniikan myöhemmät tulkinnat ovat pyrkinet pitäytymään klassisen fysiikan perusoletuksiin kuten determinismiin, reduktionismiin ja syrjässä olevaan havaittajaan. Tulkintojen välinen konflikti kulminoituu kvanttimekaniikan mitta-ongelmissa. Koko sitkeä ongelma häviää, jos ihminen nähdään Niels Bohrin tavoin evolutiivisena agenttina, joka voi osaltaan suunnata maailman irreversiibileitä, palautumattomia prosesseja.**



Uuden ajan taitteessa todellisuus jaettiin kahteen toisistaan riippumattomaan osaan: aineen ja hengen maailmat, *res extensa* ja *res cogitans*, eivät vuorovaikutaneet keskenään. Fysiikka alkoi tutkia ulottuvaista ja mitattavissa olevaa aineen maailmaa, eikä ollut kiinnostunut toiseen todellisuuteen kuuluvista subjektiivisista ajattelun ilmiöistä. Newtonin mekaniikan myötä aineen maailmasta onnistuttiin esittämään selkeä ja havainnollinen malli. Determinististen lakien hallitsemassa lainalaisessa maailmassa ei voinut tapahtua mitään, mikä ei ollut periaatteessa ennustettavissa. 1800-luvun lopulla uskottiin yleisesti, että fysiikka oli paljastanut maailman todellisen luonteen; syrjässä olevana havaittajan toimintu ihmismieli oli tavoittanut kaiken kattavan objektiivisen näkökulman koko kosmokseen.



Seuraavan vuosisadan alussa atomaarisia ilmiöitä tutkittaessa mekanistinen Newtonin mekaniikka osoittautui kuitenkin rajoittuneeksi. Se korvattiin abstraktilla ja indeterministisellä kvanttimekaniikalla, joka tarjosi samankaltaisen laaja-alaisen, tutkimusta ohjaavan teoreettisen viitekehyksen kuin Newtonin mekaniikka aikanaan. Tämän moniulotteisia avaruuksia käyttävän kompleksisen teorian tulkinta osoittautui kuitenkin vaikeaksi. Yli 70 vuotta jatkunut tulkintakeskustelu ei ole johtanut yksimielisyyteen edes siitä, onko kvanttiteorialla joitakin syvällisiä vaikutuksia todellisuuskäsitykseen. Esimerkiksi aalto-hiukkas-dualismia, epätarkkuusperiaatetta ja epälokaalisuutta on vaikea selkeästi ymmärtää ja käsitteellistää totutussa klassiseen fysiikkaan pohjautuvassa havainnollisessa viitekehyksessä.



Kvanttimekaniikan ensimmäisen ja edelleen yleisimmin hyväksytyt Kööpenhaminan tulkinnan kehittäjät, jotka suurelta osin vastasivat myös itse teorian konstruomisesta, olivat vakuuttuneita siitä, että kvanttiteoriaa ei voinut tyydyttävästi tulkita ja ymmärtää klassisen fysiikan mekanistis-deterministisessä viitekehyksessä. He esittivät syvällisiä uudistuksia niin ontologiaan kuin epistemologiaankin. Erityisesti Niels Bohr edellytti perinteisen ajattelutavan radikaalia uudistamista. Hänen komplementaarissa viitekehyksessään havaittajan rooli ja hänen asemansa todellisuudessa ymmärretään uudella, Descartesin jyrkkää dualismia purkavalla tavalla.



Monet kvanttimekaniikan myöhemmät tulkinnat, kuten David Bohmin kausaalitulkinta tai monen maailman tulkinta, pyrkivät säilyttämään totutut metafysiset perusoletukset. Ne olettavat maailman olevan perustaltaan deterministinen ja reduktionistinen, ja havaittaja voi tarkastella maailman prosesseja syrjästä niitä mitenkään häiritsemättä. Nämä myöhemmät tulkinnat on usein tulkittu realistisiksi, kun niitä on arvioitu vieläkin yleisesti vaikuttavan klassisen fysiikan todellisuuskäsityksen pohjalta. Tällöin Kööpenhaminan tulkinnan realistinen peruspyrkimys on jäänyt havaitsematta, ja se on tulkittu positivistiseksi, idealistiseksi tai muuten antirealistiseksi.



Kööpenhaminalaiset itse kuitenkin kielsivät olevansa positivistejä. He pyrkivät nimenomaan uuden kokemuksen pohjalta syvemmin ymmärtämään todellisuuden luonnetta. Heidän myöhemmät tulkinnat näyttävätkin yrityksinä pitäytyä klassiseen metafysiikkaan postuloimalla erilaisia perusteettomia apuhypoteeseja. Kuhnilaisittain ilmaistuna he yrittävät pitää kiinni totutusta "normaalitieteestä", klassisesta metafysiikasta, vaikka uudet tulokset näyttäisivät vaativan kokonaan toisenlaisia lähestymistapoja.



## Kvanttimekaniikan indeterministisyys

Kvanttimekaniikan uudet piirteet saivat kööpenhaminalaiset vakuuttuneiksi siitä, että teoria edellytti joidenkin aikaisempien ennakkokäsitysten hylkäämistä. Heidän lähtökohtaansa kuvaa hyvin Max Bornin kysymys: "Kuinka voimme puhua objektiivisesta todellisuudesta, kun atomaarinen maailma ei voi edes paljastaa itseään ilman havaitsijaa ja hänen mittalaitteitaan?"[1].

Kööpenhaminalaiset tulivat näkemään luonnontieteen aikaisemman objektiivisen maailman suoraviivaisena yksinkertaistuksena tai ideaalisena raja-arvona, joka ei ollut koko todellisuus [2]. Klassisessa fysiikassa oli oletettu, että systeemin tila oli aina periaatteessa määritettävissä halutulla tarkkuudella mittaamalla tiettyjä suureita.

Kvanttimekaniikassa kuitenkin, kun tutkittiin erittäin pieniä objekteja, mittaus häiritsi niiden tilaa ennakoimattomalla tavalla [3]. Tämän "häiriön" luonne oli vaikea havainnollistaa tai käsitteellistää. Sitä kuvattiin jonakin luontoon sisäisesti kuuluvana tekijänä, jota ei voitu poistaa paremmilla mittausvälineillä tai -tekniikoilla. Sen seurauksena havaittavan objektin ja mittausvälineen välistä vuorovaikutusta ei voitu enää unohtaa tai täysin kontrolloida. Mittaaminen ei ollut mahdollista ilman mittalaitteiden aiheuttamaa tilastollista vaikutusta tutkittavaan systeemiin, jonka tila muuttui mittausprosessin aikana. Lisäksi epätarkkuusrelaation myötä systeemin kaikkia attribuutteja ei voitu yhtäaikaan määrittää tarkasti. Klassisessa fysiikassa hiukkasen tarkan paikan ja liikemäärän yhtäaikainen tunteminen oli ollut ennakoehto niin hiukkasen radan määrittämiselle kuin sen tulevaisuuden ennustamiselle. Kvanttifysiikassa sitä vastoin mitä tarkemmin esimerkiksi hiukkasen paikka haluttiin määrittää sitä huonommin sen liikemäärä voitiin tuntea. Kvanttimekaniikan voitiin näin ajatella paljastaneen jonkinlaisen luonnossa vallitsevan syvemmän ykseyden tai yhteenkietoutumisen. Niels Bohr puhui niin mekaanisten käsitteiden käyttökelpoisuutta koskevasta odottamattomasta rajoituksesta kuin mittausprosessin jakamattomuudesta ja yksilöllisyydestä. [4]

Planckin vaikutuskvantin löytäminen oli paljastanut atomaaristen prosessien sisäisen yhteenkietoutumisen. Kun kvanttimekaniikan symboliset operaattorit eivät kommutoineet keskenään, algoritmi ei sallinut klassisessa fysiikassa käytettyä mekanistista ja reduktionistista aika-avaruuskuvailua. Täten mahdollisuus käyttää totuttua kuvailutapaa, joissa kaikki tapahtuminen voitiin esittää objektiivisina liikkeinä aika-avaruudessa, oli rajoittunut vain makroskooppiseen maailmaan. Mikrotasolla kaikki ilmiöt eivät olleet rajoittamattomasti jaettavissa osiinsa tai kuvattavissa toisistaan riippumattomina. Edes subjektia ei voitu aina erottaa objektista yksikäsitteisellä tavalla. Mittausvälineen ja objektin välinen raja ei ollut selkeästi määritettävissä, kun tietynlaiset havainnot voidaan saada esiin vain tietynlaisissa havainto-olosuhteissa. [5]

Kööpenhaminalaiset kiinnittivät vakavaa huomiota havaitsemaansa uudenlaiseen holistiseen piirteeseen kvanttimekaniikan kuvaamassa maailmassa. Bohr kiisteli asiasta vuosikymmeniä Albert Einsteinin kanssa. Niin sanottu EPR-paradoksi ratkesi hänen edukseen vasta vuosikymmeniä molempien kuoleman jälkeen, kun Alain Aspectin suorittamissa kokeissa voitiin osoittaa, että perinteiset lokaaliset realistiset teoriat johtivat virheellisiin ennusteisiin. Myös viimevuosien kokeet yksittäisten systeemien kvanttikoherensseilla ovat todentaneet tietynlaisen kaukana toisistaan sijaitsevien systeemien yhteenkietoutumisen (*quantum entanglement*). Näitä koetuloksia kuvataan yhä odottamattomiksi ja terveen järjen vastaisiksi [6], vaikka ne tuskin olisivat millään tavoin yllättäneet tai hämmästyttäneet kööpenhaminalaisia. Tämä epäuskottava epälokaalisuus on selkeästi ennakoitavissa itse kvanttiteorian rakenteessa, vaikka tuloksia on vaikea ymmärtää perinteisessä viitekehysessä, jossa maailman ajatellaan muodostuvan mekaanisesti vuorovaikuttavista erillisistä hiukkasista.

Saksalainen fysiikan professori Arthur March pyrki selkiyttämään kööpenhaminalaisen ajattelutavan perusteita. Hän kuvasi uutta tilannetta sanomalla mikromaailman ilmiöiden koostuvan elementaarisista prosesseista tai akteista, joita ei voi tarkemmin analysoida. Näin luonnon atomistisuus ei koske vain materiaa vaan myös tapahtumia. Sen seurauksena emme voi tietää, mitä atomissa tapahtuu fotonin emissio- tai absorptioprosessin aikana. Kun nämä ilmiöt sen



enempää kuin esimerkiksi fotonin ja elektronin törmäysprosessikaan eivät ole tarkemmin analysoitavissa, kausaalisuusperiaatteen soveltaminen tällaisiin prosesseihin ei onnistu, ja ne näyttävät meille epäjatkuvin. Nykyisten ja tulevien ilmiöiden välillä on vain todennäköisyysrelaatioita. [7]



Kun kvanttimekaniikassa ei voi tehdä ennustuksia tai havaintoja viittaamatta havaitsemaan tai havaintovälineisiin, kööpenhaminalaiset näkivät riippumattoman ulkopuolisen maailman illuusion särkyvän mikrotasolla. Werner Heisenberg yhdisti tämän siihen kiistattomaan seikkaan, että luonnontiede on ihmisen muotoilemaa. Luonnontieteen ei pidä täten olettaa kuvailevan luontoa sellaisena kuin se on. Luonnontiede voi antaa kuvan luonnosta vain sellaisena, kuin se ihmisen kulloisellekin kysymyksenasettelulle näyttää. Siten tiede ei vain yksinkertaisesti kuvaa ja selitä luontoa vaan on osa luonnon ja oman itsemme välistä vuorovaikutusta. [8]



### Kööpenhaminalaisia selityksiä indeterminismille



Kvanttimekaniikka vakuutti kööpenhaminalaiset siitä, että uusi fysiikka oli luonteeltaan olennaisesti tilastollista. Klassinen kausaalisuus käsite ei ollut käytettävissä, kun hyvin määritellyissä koetilanteissa lopputulokset eivät olleet varmuudella ennustettavissa, ainakaan ihmisen kyvyillä varustetulle tarkkailijalle. Erilaisissa havaintotilanteissa esiin nousi erilaisia ilmiöitä, jolloin ihmisen havaintotoiminnan ja riippumattoman ulkopuolisen maailman suoraviivainen erottaminen ei ollut mahdollista: ihminen myös muokkasi maailmassa havaitsemiensa tapahtumien kulkua, eikä vain seurannut niitä sivusta. Heisenberg totesi, että tämä oli mahdollisuus, jota Descartes ei ollut tullut ajatelleeksi. Maailmaa ja havaitsevaa minää ei voitu aina täysin selkeästi erottaa toisistaan. [9]



Kööpenhaminalaiset ymmärsivät, että tämä osui klassisen metafysiikan ytimeen ja edellytti jonkinlaista kannanottoa. Asian seurauksia ei kuitenkaan ole vielä kukaan helppo ymmärtää. Jos syrjässä oleva havaitseja ei tavoita kaikkia materiaalsen maailman mekanismeja, olisiko syytä luopua koko syrjässäolon oletuksesta vai pitäisikö etsiä jonkinlaisia piilomuuttujia, joiden voisimme olettaa takaavan maailman tarkat deterministiset rakenteet, vaikka emme koskaan voisikaan havaita niitä? Operationalismiin taipuva fyysikko ei lähde spekuloidaan tällaisilla asioilla, joita ei voi kokeellisesti ratkaista. Hän tyytyy vallitsevaan tilanteeseen ja liittyy tilastollisen kausaliteetin idean niihin kysymyksiin, joita ei voida ennustaa varmasti. Satunnaisuuden käsitteellä on oma roolinsa, jota klassinen fysiikka ei tavoittanut. [10]



Vaikka kööpenhaminalaiset olivat yhtä mieltä siitä, että havaittavassa maailmassa tapahtui jotakin, joka oli parhaiten kuvattavissa sattuman käsitteellä, he eivät tyytyneet vain tämän seikan huomaamiseen. He halusivat tietää miksi. Wolfgang Pauli ja Werner Heisenberg ehdottivat ontologisia uudistuksia. Pauli ei halunnut uskoa, että tilastollinen kausaliteetti olisi sokea. Hän täydensi luonnollisen syyn puutteen metafysisellä syyllä. Paulin psykofyysisessä ja irrationaalisessa todellisuudessa luonto itse suoritti valinnan tilafunktion sallimien mahdollisuuksien välillä, kun kosmiset arkkityypit ohjasivat niin aineen kuin mielenkin maailmaa. Ne saattoivat toimia myös ihmisen alitajunnan kautta.



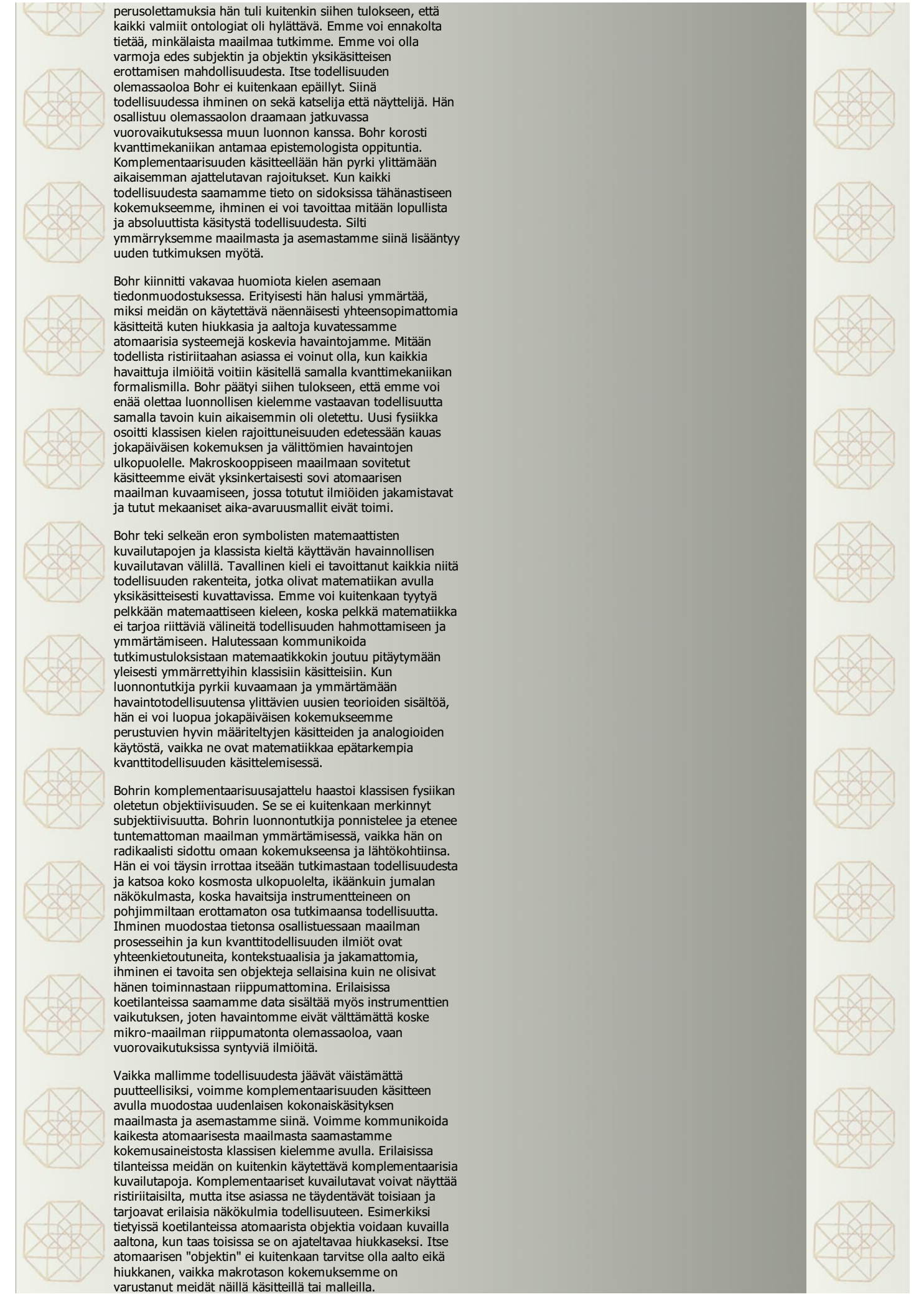
Myös Heisenberg kiinnitti huomionsa syyn käsitteeseen, jolla oli ollut aikaisemmassa filosofiassa paljon laajempi merkitys. Uuden ajan taitteessa universumilta riisuttiin kaikki persoonalliset ja yliluonnolliset aspektinsa. Näkyvä maailma ei ollut enää ilmaus henkisistä todellisuuksista vaan se oli läpikäymättömän materiaalsen ja vailla syvempiä sisäisiä merkityksiä. Kun kaiken tapahtumisen luonnossa ajateltiin olevan yksikäsitteisesti määräytynyttä, vain vaikuttava syy Aristoteleen käsittelemistä neljästä syystä hyväksyttiin. Heisenberg ei epäröinyt esittää, että fysiikan uudet tulokset antoivat uskottavuutta joillekin Aristoteleen ideoille. Hän ajatteli todennäköisyyden merkitsevän tendenssiä johonkin. Se oli tulkittavissa määrälliseksi versioksi Aristoteleen potentian käsitteestä. Se oli jotakin, joka sijoittui tapahtumisen idean ja itse aktuaalisen tapahtumisen väliin; outo fyysikaalinen todellisuus pelkän mahdollisuuden ja reaalisen todellisuuden välillä. [11]



Myös Niels Bohr oli vakuuttunut siitä, että todellisuuden perimmäistä luonnetta ei enää voinut pitää itsestäänselvästi tunnettuna. Punnitessaan klassisen fysiikan







perusolettamuksia hän tuli kuitenkin siihen tulokseen, että kaikki valmiit ontologiat oli hylättävä. Emme voi ennakolta tietää, minkälaista maailmaa tutkimme. Emme voi olla varmoja edes subjektin ja objektin yksikäsitteisen erottamisen mahdollisuudesta. Itse todellisuuden olemassaoloa Bohr ei kuitenkaan epäillyt. Siinä todellisuudessa ihminen on sekä katselija että näyttelijä. Hän osallistuu olemassaolon draamaan jatkuvassa vuorovaikutuksessa muun luonnon kanssa. Bohr korosti kvanttimekaniikan antamaa epistemologista oppituntia. Komplementaarisuuden käsitteellään hän pyrki ylittämään aikaisemman ajattelutavan rajoitukset. Kun kaikki todellisuudesta saamamme tieto on sidoksissa tähänastiseen kokemukseemme, ihminen ei voi tavoittaa mitään lopullista ja absoluuttista käsitystä todellisuudesta. Silti ymmärryksemme maailmasta ja asemastamme siinä lisääntyyn uuden tutkimuksen myötä.

Bohr kiinnitti vakavaa huomiota kielen asemaan tiedonmuodostuksessa. Erityisesti hän halusi ymmärtää, miksi meidän on käytettävä näennäisesti yhteensopimattomia käsitteitä kuten hiukkasia ja aaltoja kuvatessamme atomaarisia systeemejä koskevia havaintojamme. Mitään todellista ristiriitaa asiassa ei voinut olla, kun kaikkia havaittuja ilmiöitä voitiin käsitellä samalla kvanttimekaniikan formalismilla. Bohr päätyi siihen tulokseen, että emme voi enää olettaa luonnollisen kieleemme vastaavan todellisuutta samalla tavoin kuin aikaisemmin oli oletettu. Uusi fysiikka osoitti klassisen kielen rajoittuneisuuden edetessään kauas jokapäiväisen kokemuksen ja välittömien havaintojen ulkopuolelle. Makroskooppiseen maailmaan sovitettut käsitteemme eivät yksinkertaisesti sovi atomaarisen maailman kuvaamiseen, jossa totutut ilmiöiden jakamistavat ja tutut mekaaniset aika-avaruusmallit eivät toimi.

Bohr teki selkeän eron symbolisten matemaattisten kuvailutapojen ja klassista kieltä käyttävän havainnollisen kuvailutavan välillä. Tavallinen kieli ei tavoittanut kaikkia niitä todellisuuden rakenteita, jotka olivat matematiikan avulla yksikäsitteisesti kuvattavissa. Emme voi kuitenkaan tyytyä pelkkään matemaattiseen kieleen, koska pelkkä matematiikka ei tarjoa riittäviä välineitä todellisuuden hahmottamiseen ja ymmärtämiseen. Halutessaan kommunikoida tutkimustuloksistaan matemaattikkokin joutuu pitäytymään yleisesti ymmärrettyihin klassisiin käsitteisiin. Kun luonnontutkija pyrkii kuvaamaan ja ymmärtämään havaintotodellisuutensa ylittävien uusien teorioiden sisältöä, hän ei voi luopua jokapäiväisen kokemukseemme perustuvien hyvin määriteltyjen käsitteiden ja analogioiden käytöstä, vaikka ne ovat matematiikkaa epätarkempia kvanttitodellisuuden käsittelemisessä.

Bohrin komplementaarisuusajattelu haastoi klassisen fysiikan oletetun objektiivisuuden. Se se ei kuitenkaan merkinnyt subjektiivisuutta. Bohrin luonnontutkija ponnistelee ja etenee tuntemattoman maailman ymmärtämisessä, vaikka hän on radikaalisti sidottu omaan kokemukseensa ja lähtökohtiinsa. Hän ei voi täysin irrottaa itseään tutkimastaan todellisuudesta ja katsoa koko kosmosta ulkopuolelta, ikäänkuin jumalan näkökulmasta, koska havaitsija instrumentteineen on pohjimmiltaan erottamaton osa tutkimaansa todellisuutta. Ihminen muodostaa tietonsa osallistuessaan maailman prosesseihin ja kun kvanttitodellisuuden ilmiöt ovat yhteenkietoutuneita, kontekstuaalisia ja jakamattomia, ihminen ei tavoita sen objekteja sellaisina kuin ne olisivat hänen toiminnastaan riippumattomina. Erilaisissa koetilanteissa saamamme data sisältää myös instrumenttien vaikutuksen, joten havaintomme eivät välttämättä koske mikro-maailman riippumatonta olemassaoloa, vaan vuorovaikutuksissa syntyviä ilmiöitä.

Vaikka mallimme todellisuudesta jäävät väistämättä puutteellisiksi, voimme komplementaarisuuden käsitteen avulla muodostaa uudenlaisen kokonaiskäsityksen maailmasta ja asemastamme siinä. Voimme kommunikoida kaikesta atomaarisesta maailmasta saamastamme kokemusaineistosta klassisen kieleemme avulla. Erilaisissa tilanteissa meidän on kuitenkin käytettävä komplementaarisia kuvailutapoja. Komplementaariset kuvailutavat voivat näyttää ristiriitaisilta, mutta itse asiassa ne täydentävät toisiaan ja tarjoavat erilaisia näkökulmia todellisuuteen. Esimerkiksi tietyissä koetilanteissa atomaarista objektia voidaan kuvailla aaltona, kun taas toisissa se on ajateltavaa hiukkaseksi. Itse atomaarisen "objektin" ei kuitenkaan tarvitse olla aalto eikä hiukkanen, vaikka makrotason kokemukseemme on varustanut meidät näillä käsitteillä tai malleilla.



Komplementaarisia kuvailutapoja ei pidä ymmärtää miksiäkään mielivaltaisiksi konstruktioiksi. Ne on sidottu selkeään ja intersubjektiiviseen makrotason kokemukseen ja ne viittaavat todellisiin ilmiöihin. Toisin sanoen näennäiset ristiriitaisuudet komplementaarisuudessa eivät aiheudu todellisuuden ristiriitaisuudesta, vaan mekaanisten malliemme ja klassisen kiellemme riittämättömyydestä.



Bohr korosti sitä, että komplementaarisuus sallii klassisen kausaalisen kuvailun niissä makrotason tilanteissa, jotka ovat riippumattomia havaitsemisen aiheuttamasta vaikutuksesta. Esimerkiksi taivaankappaleiden käyttäytymiseen havaitsemisellamme ei ole merkitystä. Mikrotasolla tai ihmistieteiden piirissä tämä ehto ei yleensä ole voimassa, eikä omaa vaikutustamme tilanteen kehittymiseen voi välttää. Tällöin kuvailu on palautettava yleisempään komplementaariseen kuvailuun. Se pyrkii tarjoamaan aikaisemman kausaalisuusideaalin rationaalisen yleistyksen, eikä viittaa mihinkään rajoituksiin kvanttimekaanisessa kuvailussa. [12]



### Ratkaisematon mittausingelma



Kööpenhaminalaisten aloittamaa filosofista suuntausta, joka edellyttää syviä käsitteellisiä ja metafysisiä muutoksia todellisuuskuvaan, ei ole jatkettu fysiikassa. Ennemmin klassisen metafysiikan perusoletuksia ja sen objektiivista kuvailuideaalia on pidetty itsestään selvänä lähtökohtana. Luottamus matematiikkaan on usein liittynyt instrumentalismiin, mikä ei luonnollisestikaan ole lisännyt todellisuuden luonnetta koskevaa ymmärtämystä. Valittu tie ei ole estänyt fysiikkaa kehittymästä. Kvanttimekaniikkaa on voitu menestyksellisesti soveltaa mitä erilaisimpiin tilanteisiin. Vain mittaamista koskeva ongelma on jäänyt ratkaisematta.



Tunnettu fyysikko Abner Shimony kuvasi superpositiotilan reduktiota koskevaa käsitteellistä ongelmaa pieneksi pilveksi fysiikan kirkkaalla taivaalla, joka muuten voidaan ajatella täysin havaittavan olemassaolosta riippumattomaksi. Hän ennakoiki tämän pienen pilven parhaimmillaan voivan tuoda jotakin valoa mielen ja aineen mysteeriseen yhteisloon ja vuorovaikutukseen. Ovathan erittäin menestyksellisissä teorioissa havaitut pienet pilvet usein aikaisemminkin edeltäneet suurta valaistumista. [13]



Yleisesti uskotaan, että kattavan teorian pitäisi kuvata yhtä hyvin mikroskooppisia objekteja kuin makroskooppisia koelaitteistoja. Klassisessa fysiikassa mittausingelmaa voitiin tarkastella ikäänkuin objektiivisesti ulkopuolelta, kun mittaustuloksia verrattiin teorian luomaan todellisuusmalliin. Kvanttiteoria ei kuitenkaan luo todellisuudesta sellaista mallia, johon mittaustuloksia voisi verrata. Se ei kykene kuvaamaan, miten kvanttiteorian tavoittamasta epätarkasta ja epäklassisesta kvanttitodellisuudesta mittausingelmaan kuluessa päästään tuttuun makroskooppiseen maailmaan, jossa objektit voidaan olettaa pysyviksi ja selkeästi erillisiksi. Kun mittaustilannetta yritetään käsitellä soveltamalla kvanttiteoriaa sekä mittausingelmaan että mikroskooppisiin objekteihin, systeemin lopputilaksi saadaan tilavektorien superpositiotila, mikä yleisen käsityksen mukaan ei kuitenkaan ole mikään määrätty, havaittava tila. Lopputilaksi pitäisi saada niin kutsuttu sekoitettu tila, mutta sellaista transformaatiota ei ole, joka muuntaisi puhtaat lähtötilat sekoitetuiksi lopputiloiksi. Tällöin voidaan sanoa, että mittaaminen näyttää kvanttiteorian mukaan mahdottomalta. [14]




Fyysikot ovat kokeilleet monia keinoja, kuten supervalintasäännöt, dekoherenssi, äärettömät vapausasteet ja yleistetyt observaabelit, voidakseen esittää selkeät kriteerit kvanttiivitekehelyssä havaitsemillemme klassisille piirteille. Ne eivät kuitenkaan ole osoittautuneet tyydyttäväksi menetelmiksi mittausingelman käsittelyssä, vaan kaikki yritykset ovat johtaneet epäjohtonmukaisuuksiin, joihin ei ole voitu löytää ilmeisiä ratkaisuja [15]. Yhä useammat fyysikot ovatkin alkaneet epäillä, että avoimeksi jääneellä mittausingelmalla saattaa olla pitkälle meneviä vaikutuksia objektiivista todellisuutta koskevaan kysymykseen fysiikassa. [16]




Kun teorian yleispätevyyttä ei kuitenkaan ole syytä epäillä, totutun ajattelutavan pohjalta on lähes mahdoton ymmärtää, miksi mittausingelmaan objektiivointi ei ole onnistunut. Kattavan teorian olisi pitänyt suhteellisen yksinkertaisesti kyetä generoimaan malli myös mittaamiselle. Kun tämä ei kuitenkaan ole onnistunut, voi jo epäillä kykeneekö







perinteinen dualistinen viitekehys ylipäättään tarjoamaan ratkaisua tähän sitkeään dilemmaan. Itse asiassa myös kvanttimekaniikan tulkintaongelma kulminoituu mittausingelmaan. Konflikti Kööpenhaminan tulkinnan ja myöhempien tulkintojen välillä kärjistyy niiden erilaisissa tavoissa käsitellä mittausta. Kun myöhemmät tulkinnat ovat pyrkineet säilyttämään klassiset mittaamista koskevat ideat, kööpenhaminalaisten on joskus sanottu ratkaisevan mittausingelman yksinkertaisesti sanomalla, että siihen ei ole ratkaisua [17]. Sanoisin kyllä mieluummin, että Bohrille asiassa ei ole ongelmaa.



Itse asiassa Kööpenhaminan tulkinnan sisällä mittausta on käsitelty kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla. Ne molemmat korostavat havaittavan maailman roolia, mutta täysin toisistaan poikkeavilla tavoilla. Ortodoksisessa mittausteoriansa vuodelta 1932 John von Neuman pyrki löytämään ongelmaan traditionaalisen objektiivisen ratkaisun ottamalla käyttöön aaltofunktion kollapsoinnin käsitteen. Tämä postulaatti sanoo yksinkertaisesti, että mittaustapa aiheuttaa yhtäkkiä ja palautumattoman muutoksen, jossa puhdas tila muuttuu sekoietuksi tilaksi. Näin kvanttimekaanisen systeemin aikakehitys voisi tapahtua kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla ja mittauksia pitäisi käsitellä eri tavoin kuin kaikkia muita vuorovaikutuksia. Von Neuman ei esittänyt projektiopostulaatilleen selkeää syytä, mutta myöhemmin se on johtanut idealistisiin ja subjektivistisiin tulkintoihin, kun tietoisuuden on ajateltu jollakin tavoin kollapsoivan aaltofunktion.




Koko kollapsoinnin tapahtumisesta ei kuitenkaan ole mitään faktuaalisia todisteita. Fysiikan standardien nojalla kaikki puheet kollapsoinneista, reduktioista ja kvanttiyhyyistä ajatellaankin yleensä metaforisiksi, vaikka näitä puhetapoja on vaikea välttää, kun mittausta pyritään kuvaamaan totutulla klassisella tavalla. Niels Bohrin lähestymistapa välttää nämä perinteisen tarkastelutavan karikot. Hän ei puhunut aaltofunktion kollapsoinnista eikä pitänyt yleistä käsitystä kvanttimekaanisen mittausteorian tarpeesta perusteltuna. Bohr ei uskonut, että mittausingelman traditionaalinen käsittely voisi olla mahdollista, kun kvanttimekaniikka vaati koko aikaisemman aika-avaruuskuvailun hylkäämistä [18]. Kun kerran mikromaailmasta ei voi luoda havainnollista visualisoituvaa mallia, on turha yrittää luoda kuvaa myöskään siitä, miten kvanttitasolta päästään tavanomaiseen makroskooppiseen todellisuuteen. Klassinen kieli ei kykene antamaan kaiken kattavaa ja objektiivisesti oikeata mallia mittaustapaolosuhteista.




Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että mittaamiseen liittyy joitakin todellisia ongelmia. Bohr vältti koko mittausingelman käsittelemällä mittalaitteita klassisilla termeillä. Makroskooppisen maailman ilmiöt, kuten kaikki mittalaitteisiin jääneet merkit ovat selkeästi kuvattavissa klassisella kielellä. Myöskään mittaustapaolosuhteiden kvanttimekaaninen käsittely ei aiheuta Bohrille ongelmia, koska makroskooppisten systeemien superpositiioita ei voi käytännössä erottaa sekoietuista tiloista. Mittauksen tarkoitus ei ollut Bohrille niinkään tarkistaa jonkin ennaltaolevan suuren arvoa kuin saada tietoa todellisuudesta osallistumalla sen prosesseihin. Kun tutkittava systeemi ei ole mittaustapaolosuhteiden aikana yksikäsitteisesti erotettavissa mittalaitteistosta, tilanne ei ole suljettu, eikä havaintoprosessin vaikutus todellisuuteen aiheuta mitään fyysikaalisia ongelmia. Niin sanotussa objektiivisessä todellisuudessa tapahtuvien prosessien kulku voi muuttua erilaisia valintojemme seuraavissa erilaisissa vuorovaikutuksissa. Mittaustapaolosuhteiden ja koelaitteistojen vaikutus valintamme ovat osa ihmisen irreversibiiliä toimintaa. Komplementaarisuuden viitekehyksessä kaiken kattavan ennaltamääräytymisen idea on korvattava luonnollisen evoluution käsitteellä. [19]

### Evoluutiivinen vaikuttaja



Niels Bohrin komplementaarisuusajattelu tarjoaa perustellun mahdollisuuden mittausingelman välttämiseen. Se ratkaisee myös muut kvanttimekaniikkaan liitetyt näennäiset paradoksit postuloimatta mitään havaintojen ja teorian ulkopuolisia apuhypoteeseja. Bohrin lähestymistapa merkitsee kuitenkin radikaaleja uudistuksia totuttuun todellisuuskäsitykseen. Subjekti-objekti-dualismin kyseenalaistaminen haastaa luonnontieteiden perustavan paradigman. Descartesin uskomus, että Jumala sen enempää kuin mikään muukaan maailmassa oleva rationaalinen sielu ei koskaan häiritse





luonnon kulkua millään tavalla [20], on luonnehtinut koko modernin ajan tutkimustraditiota. Tämän perustavan dualismin hylkääminen merkitsi luultavasti samankaltaista radikaalia ajattelutavan murrosta kuin tapahtui antiikissa tai uuden ajan taitteessa, jolloin kulttuuria pitkään luonnehtineet olevan perusluonnetta koskevat metafysiset oletukset myös muuttuivat. Tässä valossa kvanttimekaniikan myöhemmät tulkinnat voidaankin nähdä kattilanpaikkuu-yrityksinä. Pienillä epäuskottavuuksillaan ne ovat pyrkineet välttämään suuria muutoksia.

Fysiikka voisi ehkä jatkossakin tulla toimeen ilman todellisuuden luonnetta koskevia uusia linjauksia ja tulkintoja. Onhan sanottu, että filosofisiin haasteisiin tarttuvaa fysiikkaa uhkaa putoaminen nopeasti kiitävästä kehityksen junasta [21]. Aikansa eläneisiin ennako-oletuksiin takertuminen saattaakin olla tuhoisampaa muulle kulttuurillemme. Descartesin dualismi, samoin kuin sen tuottaman psykofyysisen ongelman ratkaisuyritykset, kuten materialismi ja idealismi, nojasivat mekanistiseen luonnonkäsitykseen. Sen pohjalta ei ole onnistuttu luomaan selkeätä käsitystä ihmisen asemasta maailmassa. Mitkä ovat hänen rajansa ja vaikutusmahdollisuutensa. Kvanttimekaniikan paljastamat indeterministiset ja irreversibelit prosessit tekevät tilaa uudelle pelikentälle, jossa myös ihmisen ja hänen toimintansa suhdetta todellisuuteen voidaan tarkastella uusista perspektiiveistä.

Klassisen fysiikan passiivinen havaitsija korvautuu Bohrin ajattelussa aktiivisella osallistujalla ja evolutiivisella vaikuttajalla, joka on syvässä yhteydessä ympäröivään todellisuuteen. Ihmisen tieto, arvot ja päämäärät vaikuttavat hänen toimintatapojensa kautta suoraan todellisuudessa ilmenevien mahdollisuuksien jakautumiin. Kun tietomme todellisuuden prosesseista kasvaa, voimme yhä enemmän vaikuttaa myös sellaisiin luonnon alueisiin, joita aikaisemmin pidettiin ikäänkuin objektiivisesti annettuina ja ihmisen ulottumattomissa olevina. Lisääntyneisiin vaikutusmahdollisuuksiin liittyy kuitenkin lisääntynyt vastuu. Kun mekanistisen luonnonkäsityksen pohjalta ajateltiin usein, että voimme hallita ja manipuloida materiaalsen maailman deterministisiä prosesseja miten haluamme, kvanttimekaniikka teki selväksi syvän riippuvaisuutemme luonnon kokonaisuudesta. Toimintamme seuraukset näkyvät niin itsessämme kuin tulevaisuudessa osuhteissamme.

Bohrin ihmistä koskevat ideat sopivat yhteen kehittymässä olevan symmetrioita ja kompleksisia systeemeitä koskevan tiedon kanssa. Kuten jo Herman Weyl sanoi symmetrioita käsittelevässä teoksessaan: "Totuus, sellaisena kuin sen tänään näemme on tämä: luonnonlait eivät määrää yksikäsitteisesti juuri sitä maailmaa, joka on olemassa." Luonnon perustavat symmetriat, joihin säilymislait liittyvät, ovat yksinkertaisia. Yksinkertaisin tässä mielessä olisi niin sanottu kaiken teoria. Luonnon yksinkertaiset symmetriat voivat johtaa moniin mahdollisiin lopputuloksiin, kun sen symmetriat yleensä ennemmin tai myöhemmin rikkoutuvat. Juuri symmetrioiden rikkoutuminen sallii universumin lisääntyvän monimutkaisuuden ilmenemisen. Symmetrioiden rikkoutuessa systeemissä olevat hyvin pienet asymmetrisyydet ovat ilmeisesti ratkaisevassa asemassa siinä, mitkä lakien sallimista monista mahdollisuuksista todella toteutuvat [22]. Kukaan tuskin haluaa kiistää, että myös ihmiset kykenevät generoimaan joitakin symmetriarikkoja. Niiden merkitys maailmankaikkeuden mittakaavassa voi olla pieni, mutta oman kompleksisen lähiympäristömme laatu riippuu ratkaisevasti myös siitä, miten viisaasti järkeämme käytämme.

## VIITTEET

[1] Max Born, *Physik im Wandel meiner Zeit*. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1983, s. 59.


[2] Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*. London: George Allen & Unwin Ltd, 1971, s. 88.

[3] Arthur March, *Quantum mechanics of particles and wave fields*. New York: John Wiley & Sons, 1951, s. 1.

[4] Nils Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*. New York: John Wiley & Sons, 1958, s. 61, 74, 90, 92.

[5] Bohr, *Essays 1958/62 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New York: Interscience, 1963, s. 2, 14, 92.

[6] S. Haroche, "Entanglement, Decoherence and the



Quantum/Classical Boundary." Physics Today, July 1998.

[7] March (1951) s. 1-3 ja March, Das neue Denken der modernen Physik. Hamburg: Rowohlt, 1957, s. 47-50.

[8] Heisenberg, Das Naturbild der heutigen Physik. Hamburg: Rowohlt, 1955, s. 18-21 (1962, 81).

[9] Heisenberg, Physics and Philosophy. New York: Harper&Row, 1962, s. 81.

[10] March (1951), s. 9-11.

[11] Heisenberg (1955) s. 24, Heisenberg (1962) s. 40.

[12] Bohr (1958) s. 82 ja Bohr (1963) s. 6.

[13] A. Shimony, "Role of observer in Quantum Theory". Ann. Journal Physics, vol. 31, (1963), s. 773.

[14] Dugald Murdoch, Niels Bohr's Philosophy of Physics. Cambridge: Cambridge University Press 1989, s. 113.

[15] Sunny Y. Auyang, How is Quantum Field Theory Possible. New York: Oxford University Press 1995, s. 82.

[16] Peter Mittelstaedt, The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process. Cambridge, Cambridge University Press 1998, s. IX, 103.

[17] Jim Baggot, The Meaning of Quantum Theory. Oxford: Oxford University Press 1992, s. 194.

[18] Henry J. Folse, The Philosophy of Niels Bohr - The Framework of Complementarity. New York: North Holland 1985, s. 68-70.

[19] Bohr (1958), s. 81.

[20] René Descartes, Discourse on Method and related Writings. London: Penguin Books 1999 (1637), s. 112.

[21] Kari Enqvist, Olemisen porteilla, Porvoo: WSOY 1998.

[22] Stewart and Gikubitsky, Fearful symmetry. London: Penguin Books 1993, s. 15-17.

*Kirjoittaja viimeistelee kvanttimekaniikan tulkintaan liittyvää väitöskirjaa Helsingin yliopiston Filosofian laitoksella ja toimii tutkijana Nykyaian teologia ja länsimaisen todellisuus- ja historiakäsityksen muutos -projektissa, jonka järjestämässä Infinity, Causality and Determinism -kollokviossa (8.-9.5.2000) pidettyyn esitelmään artikkeli perustuu.*