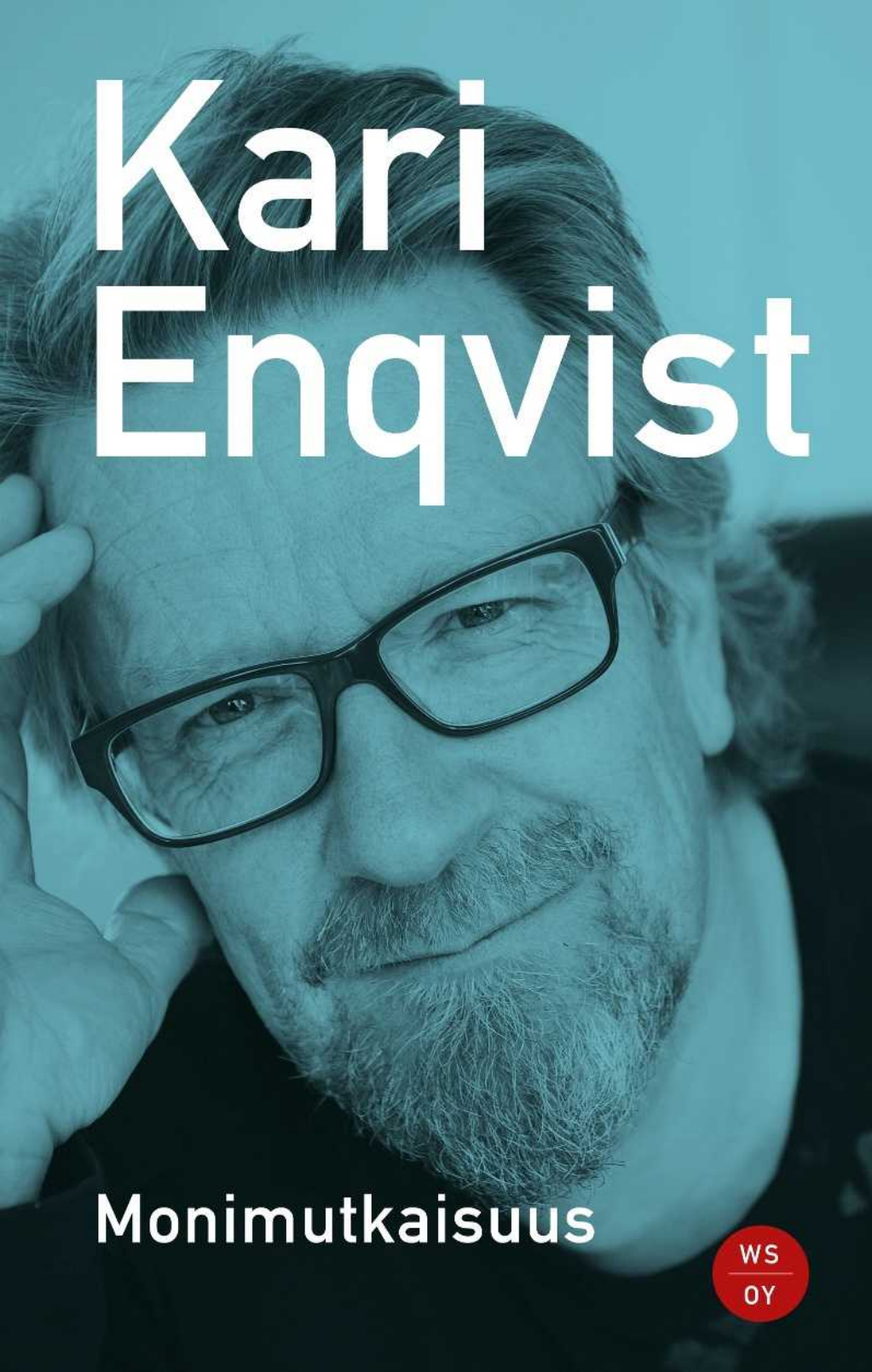


Kari Enqvist

A close-up portrait of Kari Enqvist, a man with a grey beard and glasses, resting his head on his hand. The image has a teal tint.

Monimutkaisuus

WS
OY

Kari Enqvist

Monimutkaisuus

Elävän olemassaolomme perusta



Werner Söderström Osakeyhtiö
Helsinki

© KARI ENQVIST ja WSOY 2007, 2014

ISBN 978-951-0-40263-4

PAINETTU EU:SSA

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT 7

PROLOGI 11

I ENERGIA 25

1. LUKU *Kreivi Rumfordin kanuunat* 27
2. LUKU *Jatkuvan aineen tappio* 39
3. LUKU *Energian eri lajeista* 47
4. LUKU *Luonto rakennusmestarina* 53
5. LUKU *Massan mysteeri* 61
6. LUKU *Konfiguraatioavaruus* 73
7. LUKU *Kvanttifiysiikan klassikot eivät ole klassisia* 85
8. LUKU *Feynmanin polkusuoma* 95
9. LUKU *Alkeishiukkaset – viimeinkin* 103
10. LUKU *Olevaista jäljittämässä* 111
11. LUKU *Resoluutio* 121

II ENTROPIA 129

12. LUKU *Fysiikan lain muoto* 131
13. LUKU *Neljä Jaloa Totuutta* 143
14. LUKU *Klassisen todellisuuden nousu ja uho* 147
15. LUKU *Tuhlaajapoika saapuu* 159
16. LUKU *Mahdollisten tilojen laskuoppi* 173
17. LUKU *Todennäköinen vastaan satunnainen* 181
18. LUKU *Ikuinen paluu* 187
19. LUKU *Myytti rakentamisesta* 197

20. LUKU *Maxwellin demoni* 201
21. LUKU *Informaation monet kasvot* 211
22. LUKU *Kvantti-informaatio* 225
23. LUKU *Järjestys ja epäjärjestys* 237

III EMERGENSSI 249

24. LUKU *Epälineaarisuus* 251
25. LUKU *Turbulenssi ja kaaos* 259
26. LUKU *Ihmismaailman epälineaarisuudet* 269
27. LUKU *Elämän pehmeys* 281
28. LUKU *Reduktionismin rappusilla* 295
29. LUKU *Laatu muuttuu* 307
30. LUKU *Luonnon heikko emergenssi* 317
31. LUKU *Olemassaolon emergentti dynamiikka* 329
32. LUKU *Lisää jaloja totuuksia* 337
33. LUKU *Merkitysten maailma* 347

VIITTEET 361

SANASTO 373

HAKEMISTO 381

ALKUSANAT

TÄMÄ kirja pyrkii esittämään kaikkien monimutkaisten luonnonilmiöiden takaisen yksinkertaisen perustan, joka on sama sekä alkeishiukkasille että perunalle, sama galakseille ja eläville soluille. Tällöin puhutaan teoreettisen fysiikan sydämenverestä: energiasta, tilastollisuuden määrittävästä entropiasta sekä luonnonkuvailun karkeistuksen kautta nousevasta laadullisesta muutoksesta eli emergenssistä. Ne ovat läsnä kaikkialla fysiikassa ja johtavat niin hämmentävään monimuotoisuuteen, että maailmanselitys ei muita elementtejä kaipaa: aine, elämä ja viime kädessä tietoisuuskin ovat ainakin periaatteessa ymmärrettävissä niiden avulla. Näin siksi, että aineen käyttäytymisen määräävät lait muuttuvat laadullisesti, kun kuvailun tarkkuus muuttuu, kuten tässä kirjassa esitetään. Mikä tärkeintä luonto rakentaa kuvailun eri tasot kuin itsestään eli dynaamisesti.

Teoreettinen fysiikka on näin osin ominut traditionaalisen metafysiikan roolin. Sen sanomaa ei kuitenkaan voi ymmärtää ilman kirkasta näkemystä fysikaalisen lain luonteesta. Siksi kirjan osa I ottaa historiallisen näkökulman ja johdattaa lukijan energiaan ja sen merkitykseen. Puhumme lämmöstä, kitkasta, aalloista ja siitä, miten massa kasvaa, kun kappaleen leikkaa kahtia. Tutustumme klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan välisiin yhteisiin nimittäjiin ja luonnonkuvailun reduktiiviseen luonteeseen samalla kun pyrimme ymmärtämään aineen ja energian pohjimmaisen olemuksen ja sen, miksi maailmassa on atomeja, molekyylejä ja galakseja.

Osassa II etualalla ovat monien alkeishiukkasten, molekyylien tai kappaleiden muodostamat systeemit: mitä tapahtuu, kun ainetta on paljon? Informaatio, entropia, tilastollisuus ja kollektiivinen käytös ovat osan II keskiössä. Tarkastelun kohteena ovat niin klassiset kaasut kuin maailmankaikkeuden kanssa lomittuneet kvanttisysteemitkin. Informaation dynaamisen hukkaamisen keskeistä merkitystä luonnonkuvailulle valotetaan sekä kvanttidarvinismilla että mustilla aukoilla. Puhumme myös Maxwellin demonista, Poincaré-toistumisajasta, mahdollisten tilojen laskuopista, holografias-
ta ja siitä, miten vesi ja jää eroavat toisistaan.

Osat I ja II luovat perustan osassa III tapahtuvalle luonnon monimutkaisuuden yksityiskohtaisemmalle tarkastelulle. Luonnonlakien epälineaarisuudesta nousevat tasot nähdään seurauksina energian ja entropian välisestä kamppailusta. Puhumme eloperäisestä aineesta, talouden ennustamisesta fysiikan keinoin, täpläverkkoperhosista, vedestä ja öljystä, molekyylien silmistä sekä ennen kaikkea laajasti reduktionismista, dynaamisesta emergenssistä ja mahdollisesta tavasta, jolla merkitykset voivat nousta mykän fysikaalisen todellisuuden povesta. Osassa III sivutaan myös ihmisen tietoisuuden suhdetta atomaarisiin vuorovaikutuksiin.

Näin muodostuva fysikaalinen maailmanselitys edellyttää käsitteitä, joihin törmää harvoin: hamilton, konfiguraatioavaruus ja sidottu tila ovat eräitä esimerkkejä. Nämä vieraat termit on lyhyine määritelmineen koottu kirjan loppuun erilliseksi sanastoksi. Toivon, että ne kuitenkin kristallisoituisivat lukijan mielessä vähä vähältä yhä tutummiksi.

”Monimutkaisuudessa” avautuva näkemykseni fysiikasta on muovautunut vuosien mittaan ja pala palalta, ja moni kollega on tietämättään ja ehkä myös tahtomattaan tullut tarjonneeksi murusia sen rakenneosiksi, mistä kiitän heitä kaikkia. Erikseen haluan kiittää professori Ilkka Hanskia täpläverkkoperhostutkimustensa selvityksistä, professori Kai Kailaa hänen hermosignaaleihin liittyvistä tiedoistaan, professori Pekka Pyykköä hänen tarttuvasta

innostuksestaan kemiaan sekä professori Ritva Serimaata pehmeän aineen tutkimuksen kärsivällisestä kuvailusta. Olen myös kiitollinen professori Keijo Kajantielle monista fysiikkaa koskevista keskusteluista, jotka ovat syventäneet omaa käsitystäni aina silloin, kun ne eivät ole hämmentäneet sitä.

WSOY:n kirjallisuussäätiö, Suomen tietokirjailijat ry sekä Taiteen keskustoimikunta ovat tukeneet apurahoin kirjan valmistumista, mistä esitän kiitokseni.

Kari Enqvist

PROLOGI

Niinpä Kepler ja muut kopernikanistit saavat kunnian siitä, että he olivat uskoneet ja filosofoineet oikein, vaikka tämä on vain alkusoitto ja tulee pysymään alkusoittona sille, että kirjafilosofit yleisesti tulevat arvioimaan meidät niukan ymmärryksen omaaviksi miehiksi ja käytännöllisesti katsoen hölmöiksi.

GALILEO GALILEI kirjeessä GIULIANO DEI MEDICILLE

Prologi (kreik. prologos): Kreikk. draaman alku, sittemmin näytelmää edeltävä runollinen esitys

IHMISSILMÄN erotuskyky on millimetrin kymmenesosan luokkaa, emmekä näe esimerkiksi bakteereita. Yötaivaalta erotamme vain muutaman tuhatta tähteä, vaikka Linnunradassa niitä on satoja miljoonia. Vastaavasti fysiikan havaintolaitteilla on omat sisäiset rajoituksensa. Esimerkiksi atomien lämpöliike mikrosiruissa aiheuttaa elektronista kohinaa, joka peittää alleen kaikkein heikoimmat signaalit. Siksi kuva, jonka voimme muodostaa todellisuudesta, on aina karkea kuva. On kuin kalastaisimme totuutta verkolla, jonka silmää ei voi pienentää loputtomiin. Ja silmien välistä voi aina liivahtaa jotakin.

Todellisuuteen ei liity välttämättömyyttä. Yksisarvisia voisi olla olemassa, niitä nyt ei vain ole. Mikään jumalallinen mahti ei vaadi, että elektroneja tai sähköä on pakko olla olemassa. Mutta maailmassa nyt vain sattuu olemaan sähköä. Kosmoksen suuressa suunnitelmassa planeetta Maan ei tarvitsisi olla olemassa ja kiertää Aurinkoa sadanviidenkymmenen miljoonan kilometrin etäisyydellä. Maapallon synty, joka on seurausta nuoren aurinkokunnan kaasun tuiverruksesta ja pölyhiukkasten sattumanvaraisesta törmäilystä, on valtaisan monimutkaisen tapahtumaketjun tulos. Pienikin muutos missä tahansa sen miljardeista lenkeistä olisi suistanut historian aivan toisenlaiseen uomaan. Niinpä myöskään ihmisten olemassaolo ei liity välttämättömyyttä. Mikään siinä ei ole etukäteen saneltua. Meidän arkkitehtuurimme eli avaruudellinen muoto, johon

molekyylit ja niistä muodostuvat solumme ovat asettautuneet, voisi olla toinen. Taipumuksemme, tapamme toimia ja jopa tietoisuutemme voisivat olla tyystin erilaisia. Siksi kokemuseräinen tieto on ainoa keino ymmärtää, millaisia me olemme. Vain kokemuseräisen tiedon avulla selviää, millaisessa universumissa me elämme ja millaista on aine, josta se rakentuu. Ilman kokemusta, ilman tietoa ympäröivästä todellisuudesta, ei ole olemassa maailmankatsomusta tai metafysiikkaa.

Mutta kuinka paljon tuota kokemusta tai tietoa tarvitaan? Riittävätkö pelkästään ihmisen arkihavainnot? Voiko niiden varaan rakentaa kokonaisen filosofian?

Näin tietysti on tehty jo vuosisatojen ajan. Mutta kenties se ei riitä – kenties meidän tulisi pystyä tutkimaan maailmaa tarkemmin, jotta voimme muodostaa kuvan olemassaolosta oikein. Meidän tiedämme, että arkihavainnot tavoittavat vain mitättömän nurkan olevaisen monimutkaisuudesta. Kun esimerkiksi hollantilainen kangaskauppias Anton van Leeuwenhoek, joka oli tutustunut suurentaviin linssihin jo oppipoikavuosinaan – niitä käytettiin kankaiden lankojen laskemiseen –, onnistui vuoden 1670 tienoilla valmistamaan tehokkaita mikroskooppeja, hänelle avautui uusi, ennen näkemätön ulottuvuus. Hän löysi hiiva- ja siittiösolut, ja 270 kertaa suurentavan kojeensa avulla van Leeuwenhoek oivalsi vesipisaran olevan oma mikrokosmoksensa, kun näkökenttään lipui ”uskomattoman suuri joukko eläviä pikkueliöitä, jotka uivat ketterämmin kuin mikään aiemmin näkemäni”.

Galileo Galilei oli jo aiemmin järkyttänyt katolista kirkkoa vaatimattoman teleskooppinsa avulla. Sillä hän havaitsi vuorijonoja ja laaksoja Kuussa, jota pidettiin Neitsyt Maarian symbolina ja siksi puhtaan turmeltumattomana, ja kirjoitti¹: ”Kuun pinta ei ole sileä, tasainen eikä täsmälleen pallon muotoinen, kuten filosofien suuri parvi uskoo sen kuten muidenkin taivaankappaleiden olevan, vaan päinvastoin se on epätasainen, karkea ja täynnään onkaloita ja kärkeä, joten se muistuttaa Maan vuoriketjujen ja syvien laaksojen

uurtamia kasvoja.” Kaukoputkellaan Galileo löysi myös neljä uutta kiertolaista, jotka vastoin kaikkia filosofisia totuuksia eivät kiertäneet Maata vaan Jupiteria.

Viimeisten neljänsadan vuoden aikana kaikkiin luonnontieteen edistysaskeliin on aina tavalla tai toisella liittynyt ihmisen aistit ylittävä tai niiden erotuskykyä parantava apuväline. Ilman kojeita luonnosta ei saa tarkkaa ja täsmällistä tietoa. Tätä ei kukaan varmaankaan pyri kiistämään. Mutta sen sijaan voidaan väittää, että maailmankatsomukselliselta tai filosofiselta kannalta nämä kokemuseräiset havainnot eivät sittenkään ole oleellisia.

”Hyvä on”, ihmisen keskeisyyttä korostava hermeneutikko voi argumentoida, ”mikroskoopilla nähdään bakteereita ja atomivoimamikroskoopilla kuulemma jopa yksittäisiä atomeja. Mutta entä sitten? Bakteerit ovat pikkuruisia elikoita ja atomit vain pieniä ainejyväsiä. Kaikki me täällä Tampereella olemme jo pitkään tienneet, että on olemassa eläimiä ja ainetta. Mitä filosofisesti uutta tämä järjettömän kalliiksi käyvä luonnontieteellinen koohotus muka tuo?”

Tämä voisi olla oikeutettu kysymys, jos ainetta murustellessamme löytäisimme aina sitä samaa mutta yhä vain pienempänä ja jos myös luonnonlakien muoto pysyisi oleellisesti samana. Näin kuvittelivat antiikin Kreikan atomistit, Demokritos ja hänen opettajansa Leukippos, jotka esittivät, että emme voi pilkkoa ainetta loputtomiin. Viimein vastaan tulee aineen jakamaton osanen, kreikaksi *a-tomos*. Mutta Demokritoksen atomit olivat olemukseltaan samanlaisia kuin kiinteät makroskooppiset kappaleet. Ne eivät olleet pistemäisiä vaan sisälsivät tasaisesti jakautunutta ainetta, ja niitä oli erikokoisia ja -muotoisia. Demokritoksen mukaan esimerkiksi makeuden aiheuttavat pyöreät, isohkot atomit. Katkerasta mausta ovat vastuussa atomit, jotka ovat hyvin pieniä ja tasaisia mutta samalla käyrystyneitä.

Demokritoksen pohdiskelut olivat pelkkiä arvauksia ja menivät siksi pahasti metsään. Nyt tiedämme, ettei mikroskooppisen kokoskaalan aine ole samanlaista kuin meille tutussa arkimaailmassa, vaan sen käyttäytymistä määräävät kvanttifysiikan oudot lait. Jopa

normaali logiikka nyrjähtää mikromailmassa sijoiltaan. Lisäksi atomit eivät ole elastisesti toisistaan kimpoavia pallukoita, jotka silloin tällöin takertuvat mekaanisesti toisiinsa kuin kaksi koukua, vaan niiden välillä vallitsee voimakenttiä, jotka ovat vastuussa kaikesta havaittavasta rakenteesta. Taivaalle katsoessamme emme myöskään näe pelkästään suurempia ja suurempia kappaleita vaan ajan ja avaruuden, jotka kietoutuvat toisiinsa suhteellisuusteorian kuvaamalla tavalla, joka sekin on arkiajattelulle vieras. Kauas katsoessamme me näemme samalla menneisyyteen, alkuräjähdykseen asti, aikaan jolloin universumi oli lähes tasa-aineinen ja koostui kuumasta plasmasta.

Ne luontoa kuvaavat peruslait, jotka fysiikan tutkimus on viimeisten sadan vuoden aikana paljastanut, ovat siis osoittautuneet niin mielikuvituksellisiksi, että kukaan ei ole voinut ennustaa moista monimutkaisuutta nojatuolista käsin. Kerta toisensa jälkeen luonto on yllättänyt sekä filosofit että konservatiiviset luonnontieteilijät, usein housut kintuissa. Mutta silti paatunut hermeneutikko voisi vielä yrittää pyyhkäistä nämäkin tosiseikat syrjään puhtaan filosofoinnin tieltä.

”Hyvä on”, hän saattaisi sanoa, nyt jo hieman kireällä äänellä, ”kvanttifysiikka ja suhteellisuusteoria ovat täysin käsittämättömiä – ainakin minulle. Mutta entä sitten? Miten se muka vaikuttaa ihmisyyteen? Ihminen on havaitseva subjekti, jonka ymmärryksen läpi kaikki pitää suodattaa. Miksi meitä pitäisi kiinnostaa, mitä jotkin mustat aukot tai hengettömät elektronit puuhastelevat? Mitä se meitä liikuttaa – eihän niillä ole mitään tekemistä oikean filosofian ja ihmisen olemisen kanssa.”

Hermeneutikko voisi olla oikeassa, jos todellisuuden eri tasot olisivat toisistaan riippumattomia. (Siihen, mitä nämä tasot täsmällisesti ottaen ovat ja mitä riippumattomuudella tarkoitetaan, palaamme vielä myöhemmin.) Silloin voisimme kuvitella, että meillemme riittäisi pelkkä arkiajattelu niin kauan kuin emme eksy mustien aukkojen tai kvanttien pariin; että esimerkiksi ihmisen tietoisuu-

den ongelmat ratkeavat ilman mitään viittausta atomaariseen tai molekulaariseen maailmaan. Tämä ei tietenkään vaadi vaikkapa alkeishiukkasfysiikan kieltämistä mutta edellyttää uskoa siihen, että olemassaolon suuret ongelmat ovat täysin omalakisia.

Onko näin, on sattumanvaraista. Vaikka en itse siihen usko, esimerkiksi tietoisuus *voisi* olla kvantti-ilmiö, kuten eräät ajattelijat ovat esittäneet. Ei ole olemassa välttämättömyyttä, joka pakottaisi tietoisuuden tai arkimaailman yleisesti jäännöksettömästi itse itsensä selittäväksi ja mikroskooppisesta todellisuudesta riippumattomaksi. Tämä on asia, josta meillä ei voi olla mitään etukäteistietoa. Vain havainnot ja kokeet voivat sen määrätä. Tämä noidankehä on humanistin painajainen: jotta voisimme unohtaa fysiikan, meidän on ensin varmistuttava siitä, että se voidaan unohtaa. Mutta varmistus voi tapahtua vain fysiikan keinoin, emmekä siinä tapauksessa voikaan unohtaa fysiikkaa!

Monet filosofit kuitenkin ajattelevat Wittgensteinin lailla², että nimi "filosofia" voitaisiin antaa sille, "mikä on mahdollista ennen kaikkia uusia löytöjä ja keksintöjä". Tämän kannan mukaan filosofia ei tarvitse fysiikan tarkkuushavaintoja vaan ainoastaan sen, mikä meille kaikille on tuttua. Filosofissa ei ole keksintöjä eikä yllätyksiä, ja sen ainoa työkalu on arkikieli. Se luo maailmamme ja samalla tieteen rajat, kuten Wittgenstein esitti. Hänen mukaansa elämän käytännöt tarjoavat meille kaiken tiedonhankinnan perustan, jota emme yksinkertaisesti voi järkevästi epäillä, vaikkemme voi sitä osoittaa todeksikaan. Emme esimerkiksi oletta, että tuolit ja pöydät voivat äkkiä kadota huoneen yhdestä nurkasta ja ilmestyä taas toiseen nurkkaan. Oletus luonnonilmiöiden lainomaisuudesta on eräs elämänmuotomme perusta. Jos joku etsisi vaikkapa saksia, katsoisi sen vuoksi laatikkoon ja todetessaan laatikon tyhjäksi jäisi odottamaan, että sakset jostakin syystä ilmestyisivät sinne, emme kiittelisi häntä skeptisestä filosofisesta katsannosta vaan sanoisimme Wittgensteinin tavoin³, että "hän ei ole vielä oppinut etsimään esineitä".

Tieteen tehtävä olisi sitten varmistaa, mitkä nuo luonnonlait ovat, mutta niistä itsestään ei filosofinen puristi enää olisi kiinnostunut. Se, onko maailmassa elektroneja vai selektroneja tai kiertävätkö planeetat Aurinkoa vai Pohjois-Ruotsissa sijaitsevaa riimukiveä, ei olisi hänestä filosofisesti merkittävää.

Mutta tiedämmekö todella, että sakset eivät noin vain voi ilmes-
tyä laatikkoon? Entäpä jos katsomme tarkemmin? Ihmisistä näytti
vuosisatoja siltä, että Aurinko kiertää Maata, mutta kun taivaal-
le katsottiin tarkemmin, kävi ilmeiseksi, että asia on päinvastoin.
1500-luvun lopulla tanskalainen Tyko Brahe määrittä Marsin liik-
keen kiintotähtien suhteen tuohon aikaan ennennäkemättömän tar-
kasti. Tulosten avulla Johannes Keplerin oli pakko päätellä, että
Marsin rata on ellipsi, jonka toisessa polttopisteessä Aurinko si-
jaitsee⁴. Tyko Braheella oli apunaan pitkä tähtäinsauva, jonka an-
siosta planeetan sijainti taivaanpallolla saatiin kirjattua aiempaa
paljon luotettavammin, mutta havaintonsa hän teki paljain silmin.
Niihin ei liittynyt mitään salaperäistä ja filosofisesti arveluttavaa
insinööripuuhaa. Marsin radan käytös olisi voinut olla tuttua
kaikille Tyko Brahen aikalaisille, jos he vain olisivat katsoneet tai-
vaalle riittävän tarkasti. Niinpä tuntuu oudolta tehdä ero arkikielen
ja tieteen kielen välille. Pikemmin voisi sanoa, että tiede on arkisten
havaintojen jatko, ja viime kädessä kysymys on vain siitä, että luon-
toa katsotaan paremmalla erotuskyvyllä. Samoilla linjoilla oli myös
vuonna 2000 kuollut amerikkalaisfilosofi Willard Van Orman Qui-
ne, jonka mukaan filosofia ei voi toimia kaiken tiedon ylituomarina.
Hänen kuuluisa iskulauseensa oli: ”Ei ole ensimmäistä filosofiaa.”
Luonnontiede ja filosofia muodostavat pikemmin eräänlaisen jatku-
mon kuin kaksikerroksisen talon, jonka sisääntuloaulassa filosofia
sanelisi yläkerroksessa asustelevalle luonnontieteelle, mitkä ovat
ne puitteet, joissa tiedettä sopii tehdä.

Vaikka Quinen näkemykset ovat lähellä fyysikon yleiseetosta,
en halua ankkuroitua niihin varauksetta. Tarkoitukseni ei ole fi-
losofoida, olen liikkeellä paljon primitiivisemmällä tasolla. Minus-

ta on kuitenkin selvää, että syvää ymmärrystä ei ole ilman tietoa maailmasta: mitä on olemassa ja miten nämä olemassa olevat asiat suhtautuvat toisiinsa. Ja se, mitä on olemassa, on – kuten olen jo aiemmin esittänyt⁵ – lopulta kokemuseräisen fysiikan kysymys⁶. Se kysyy pieniä kysymyksiä siinä toivossa, että ennen pitkää niihin saatavien vastauksien puroset kasvavat niin suureksi virraksi, että ne tarjoavat eväitä myös vastauksiksi kaikkein suurimpiin ongelmiin.

Pienten kysymysten politiikka voi aluksi tuntua liian vaatimatomalta. Ovathan filosofit jo vuosisatoja kysyneet suuria, syvällisiä kysymyksiä: Mitä on aine? Mitä on liike? Mitä on elämä? Mitä on ihmisyy? Mutta valitettavasti näihin suuriin, syvällisiin kysymyksiin on saatu vain epämääräisiä ja usein huonosti määriteltyjä vastauksia, jotka useimmiten olivat parhaimmillaankin pelkkiä arvauksia. Tilanne muuttui radikaalisti 1600-luvulla. Tuolloin luonnonfilosofeiksi itseään kutsuneet ajattelijat nöyrytyivät, unohtivat puhtaan ajattelun hybriksen ja alkoivat kysyä pieniä ja rajoitettuja kysymyksiä: Riippuuko kappaleen putoaminen sen painosta? Miten kaasun tilavuus muuttuu, kun sitä puristetaan? Mikä täsmälleen ottaen on Marsin rata?

Luonnonfilosofit pyrkivät löytämään syvällisiä totuuksia luontoa tarkkailemalla. Vaikka jälkiviisauden valossa kutsumme heitä nykyisin fyysikoiksi tai tähtitieteilijöiksi, esimerkiksi Isaac Newton piti itseään filosofina. Hänen pääteoksensa nimi olikin *Luonnonfilosofian matemaattiset perusteet*.

Pieniin ja rajoitettuihin kysymyksiin saatiin täsmällisiä ja hyvin määriteltyjä vastauksia, ja sen vuoksi ne voitiin pukea matematiikan kielelle. Samalla kenties yllättäen osoittautui, että pienet, rajoitetut kysymykset ja niiden täsmälliset vastaukset pohjustivat tien, joka johti myös vastauksiin suuriin, syvällisiin kysymyksiin. Esimerkiksi Newton saattoi ratkaista liikkeen olemuksen tarkastelemalla pelkästään pistemäisten massakappaleiden putoamista sekä Maan pinnalla että Maan ulkopuolella. Näin hän pystyi formuloi-

maan teorian universaalista gravitaatiosta ja selvittämään pitkään jatkuneen kiistan jumalallisen kuunylisen ja korruptoituneen kuunalisen liikkeen eroista toteamalla, että ne ovat täsmälleen samantajista liikettä.

Newtonin aikaan fysikaalisen kuvauksen kohteena oli tyypillisesti muutama hiukkanen tai jokunen planeetta, joiden keskinäiset vuorovaikutukset ovat useimmiten heikkoja siinä mielessä, että vuorovaikutus muuttaa systeemin liiketilaa vain vähän. Käytän tässä ja muuallakin sanaa ”vuorovaikutus” siinä merkityksessä, jonka fyysikot ovat sille antaneet: että jotakin tapahtuu. Niinpä kaikki fysiikassa esiintyvät voimat ilmentävät vuorovaikutuksia. Esimerkiksi telinevoimistelijan kokema painovoima johtuu hänen ja maapallon välisestä vuorovaikutuksesta. Kun hän lopuksi leiskauttaa rekiltä näyttävän alastulon ja tömähtää lattialle, jalkojen ja puulattian molekyylien väliset sähkömagneettiset vuorovaikutukset estävät miestä vajoamasta maapallon ytimeen, jonne painovoima häntä vetää. Kuten tulemme näkemään, termistä ”voima” voidaan itse asiassa luopua kokonaan. Ei ole voimia, on vain vuorovaikutuksia.

Vuorovaikutuksella on aina välittäjä. Jonkin agentin täytyy viedä tietoa kappaleesta toiseen, jotta jotain voi tapahtua. Tapahtumilla on aina syynsä (tosin kvanttifysiikka vaatii tämän arkijärjelle ilmeisen seikan täsmentämistä). Esimerkiksi kappaleen liiketilan muuttuminen vaatii energiaa. Silloin täytyy löytyä postimies, joka kantaa vaaditun energia-annoksen oikeaan osoitteeseen. Sähkömagneettisten vuorovaikutusten osalta vastuussa ovat fotonit eli sähkömagneettisen säteilyn kvantit. Ne ovat massattomia hiukkasia, jotka kuitenkin ovat eräänlaisia energiapaketteja. Painovoiman välittäjinä pidetään samankaltaisia mutta vielä havaitsemattomia hiukkasia, gravitoneja.

Tavallinen valo on sähkömagneettista säteilyä. Jokainen tietää kokemuksesta, että se vuorovaikuttaa aineen kanssa varsin heikosti. Kun kattolamppu sytytetään pimeässä huoneessa, ihmiset eivät lennähdä jaloiltaan valomyrskyn piiskaamina, vaikka fotonit aiheutta-

vatkin pienen paineen. Valosta juontuvaa voimaa voidaan hyödyntää vain silloin, kun muut vuorovaikutukset ovat vielä heikompia. Esimerkki tästä on folion kaltainen suunnaton aurinkopurje, johon kohdistuva Auringon mitätön säteilypaine kiihdyttäisi planeettojen välisessä painottomuudessa kelluvan avaruusaluksen vähä vähältä huimiin nopeuksiin.

Kun vuorovaikutukset ovat heikkoja, systeemeitä voidaan tarkastella eristettyinä ja ikään kuin muuta maailmankaikkeutta ei olisi olemassakaan. Mutta ihmisen arkimaailman ilmiöistä suurin osa ei ole tällaisia. Tavallinen aine, pörssikurssit, päivittäisen säätilan vaihtelut ja vaikkapa meille kaikille tuttu vesi ovat kaikki äärimmäisen monimutkaisia ja monitahoisesti kytkeytyneitä ilmiöitä. Pienetkin muutokset voivat syöstä ne aivan uusiin tiloihin. Tällainen käyttäytyminen on tyypillistä silloin, kun vuorovaikutukset ovat sekä voimakkaita että epälineaarisia.

Epälineaarisuus tarkoittaa sitä, että seuraus ei ole suoraan verrannollinen vuorovaikutuksen voimakkuuteen, kuten luvussa 24 selvitämme. Epälineaarisuuteen liittyy myös takaisinkytkentä, sillä kappaleet vaikuttavat aina toisiinsa, A kappaleeseen B ja B takaisin kappaleeseen A. Vain jos vuorovaikutus on heikko ja lineaarinen, takaisinkytkentä voidaan käytännössä unohtaa.

Epälineaarisuus ja takaisinkytkentä voivat yhdessä johtaa hyvin monimutkaisiin tilanteisiin. Sellaiset ovat tyypillisiä systeemeille, joissa on suuri määrä rakenneosasia. Hyvä esimerkki on solu, joka sisältää monenlaisia molekyylejä alkaen proteiineista ja DNA:sta aina solukalvon lipideihin, jotka kaikki vuorovaikuttavat toistensa ja solu ympäristönsä kanssa. Näin monimutkaisia systeemeitä on vaikea kuvailla täsmällisesti, ja siksi meidän on käytännössä aina turvauduttava tilastollisiin menetelmiin. Tilastollinen fysiikka, joka muodostaa oman suunnattoman tieteenalansa, onkin sekä kompassi että kaikuluotain kartoitettaessa luonnon monimutkaisuutta. Sen käytäntöjä sovelletaan lähes kaikkiin luonnonilmiöihin aina alkuräjähdyksen hiukkaspuurosta perunatärkkelykseen. Tilastol-

linen fysiikka on bio-etuliitteellä varustettuna tunkemassa itseään ovenraosta elämän kuvailuun, ja yrittääpä se kunnostautua yhteiskunnallisten ja talouden ilmiöiden sarallakin, kuten osassa III kerrotaan.

Hiukkasten tai osasten suuri lukumäärä ei sinänsä ole monimutkaisuuden riittävä edellytys. Voimme antaa luotettavia kvantitatiivisia kuvauksia silloin, kun monihiukkassysteemit ovat lämpötasapainossa eli näyttävät keskimäärin samanlaisilta jokaisessa osassaan, kuten esimerkiksi Auringon, laboratoriossa tutkittavan nestemäisen heliumin tai varhaisen maailmankaikkeuden tapauksissa. Mutta arkimaailmassa vallitsee fysiikan kannalta jatkuva epätasapaino. Elämä on mahdollista vain ulkopuolisen energialähteen eli Auringon ansiosta. Jos ihminen ei syö, hän ennen pitkää tuuperuu kuolleen maahan.

Ihmisen ja ympäristön takaisinkytkentä ei ole luonnontieteitä ja ihmistieteitä erottava periaatteellinen tekijä, kuten usein näkyy väitettävän. Kaikki alkeishiukkasten väliset perusvuorovaikutukset ovat epälineaarisia, ja tässä mielessä kaikki luonnonilmiöt ovat kompleksisia. Niinpä psykoterapeutin ja potilaan välinen keskustelutilaisuus on sekin vuorovaikutusta paitsi psykologisessa myös fysikaalisessa mielessä. Psykiatrin äänihuulten värähtely, jonka vaikutusta suuontelo vahvistaa, aiheuttaa ilmassa eteneviä painevaihteluita, jotka saattavat kuuloluut resonoimaan potilaan välikorvassa. Nämä puolestaan heiluttavat pikkuruisia karvoja, joiden liike aiheuttaa niihin kiinnitettyihin hermosäikeisiin sähkökemiallisen impulssin. Impulssi etenee aivoihin ja vaikuttaa siellä toisiin hermosäikeisiin, joista signaali edelleen ryntää äänihuuliin ja vaikuttaa puheena takaisin psykiatrin tajuntaan. Kyseessä on tavattoman monimutkainen mutta kuitenkin puhtaasti fysikaalinen tapahtuma.

Kuten jokainen ymmärtää, tästä kuvailusta puuttuu oleellinen elementti, keskustelijoiden tietoinen elämys ja puheen merkitys. Tietoisuus on koko ihmisyyden perusta, mutta vain atomit liikuttavat atomeja. Mikään inhimillinen tahto tai henki ei siihen pysty.

Miten maailmankaikkeus on rakentunut?

Kunnianhimoinen katsaus todellisuuden rakenteeseen lähtökohtana energia, joka vaikuttaa kaikessa atomeista galakseihin ja perhostesta perunaan.

Monimutkaisuus esittelee fysiikan syvät periaatteet uudella tavalla ja sivuaa samalla myös filosofisia ongelmia. Mistä todellisuus on rakentunut? Entä miten luonnon pyörryttävä monimutkaisuus syntyy? Maailmanjärjestyksen perusta on energia ja sen virittämä maisema, joka sanelee aineen arkkitehtuurin ja näyttäytyy kaikkialla. Energia on sekä elävän että elottoman alku, keskikohta ja loppu. Monimutkaisuus on laaja ja kunnianhimoinen katsaus todellisuuden rakenteeseen nykytieteen valossa. Se antaa eväitä ja kysyy haastavia kysymyksiä fysiikan tarjoaman maailmankuvan ymmärtämiseksi, esittelee kuuluisien fyysikkojen elämäntyötä ja havainnollistaa luontoa kuvaavia teorioita muun muassa kaunokirjallisuuden lennokkailla esimerkeillä.

53 978-951-0-40263-4

Pääillyksen kuva Veikko Somerpuro
Pääillys Martti Ruokonen



9 789510 402634