



Keskustelua

Fysiikan reunaehdot emergenssille (Tapio Ala-Nissilä)

Tieteessä tapahtuu -lehden tämän vuoden kahdessa ensimmäisessä numerossa on käyty vilkasta keskustelua emergenssistä ja reduktionismista sekä fysiikan että filosofian kannalta. Erityisesti filosofien Sami Pihlströmin (Pihlström 1999) ja Matti Kampin (Kamppinen 1999) puheenvuorot ovat olleet mielenkiintoisia katsauksia näihin kysymyksiin liittyvään moderniin filosofiseen ajatteluun.

Vaikka kollegani Kari Enqvist onkin yrittänyt puolestaan vastata filosofien kritiikkiin (Enqvist 1999), on keskustelussa selvästi havaittavissa kahden eri tieteenalan välisen kommunikoinnin ongelma – filosofit ovat amatöörejä fysiikan suhteen eivätkä Enqvistinkään yritykset selvittää emergenssin luonnetta ehkä aina ole olleet kovin onnistuneita.

Yritän tässä kirjoituksessani fysiikkona valaista emergenssin hämäryyttä vielä hieman lisää ja ehkä hieman toiselta kannalta kuin Enqvist – mieluummin rautalangasta vääntäen kuin rautakangella survoen. En suinkaan halua esiintyä filosofina, mutta mielestäni nykyfysiikka pystyy sanomaan emergenssistä ja reduktionismista asioita, joita filosofienkin tulisi ottaa huomioon.

Fysiikkona edustan tietenkin filosofien terminologisen laattikoleikin mukaisesti "positivistista fysikaalista realismia jne.", eli uskon periaatteessa siihen, että (ainakin mikrotasolla) on olemassa havaitisijasta riippumaton todellisuus, jota voidaan kuvailla fysiikan lakien mukaan. Mielestäni tämä lähtökohta, joka ei kaikille filosofeille ole varmaankaan mieleen (esim. Niskanen 1999), on tarpeellinen emergenssistä puhuttaessa jolleme halua uppoutua filosofisen väittelyn suohon nivusiamme myöten jo ensimmäisellä mättäällä. Se on tietenkin välttämätön silloin kun puhutaan fysikaalisesta emergenssin tulkinnasta.

Sille on myös olemassa niin vahva teoreettinen ja empiirinen perusta, ettei sitä voida ohittaa muuta kuin kaljakuppilakeskustelun tai muun metafysisen hörhöilyn tasolla.

Karkeistetulla teoriolla keskeinen rooli

Mitä täsmälleen pystyy nykyfysiikka tällä hetkellä sitten sanomaan emergenssistä ja reduktionismista? Fysikaalisessa reduktionismissa keskeinen rooli on ns. karkeistetulla teoriolla, joista Kari Enqvistkin on puhunut useaan otteeseen. Hän on aivan oikein selittänyt, että karkeistetuissa teorioissa jotka kuvaavat yhä monimutkaisempia, ylemmän tason systeemejä, tarkasti ottaen menetetään informaatiota koska fysikaalisten muuttujien (vapausasteiden) määrä väistämättä pienenee. Jos tämä karkeistus tehdään onnistuneesti, saadaan kuitenkin tuloksena teoria, josta voidaan johtaa uusia tuloksia. Onko tässä jotain ristiriitaista? Ei suinkaan!

Fysiikasta löytyy lukuisia esimerkkejä tällaisista tapauksista. Olennaista on se, että nämä uudet ilmiöt aina sisältyvät jo alkuperäiseen teoriaan, mutta niiden laskeminen (ennustaminen) sen pohjalta on joskus tavattoman vaikeaa. "Emergenssi" ei siis ole fysikaalisen paradigman mukaan mitään muuta kuin kullekin kuvaustasolle olennaisten, efektiivisten muuttujien ja vuorovaikutusten identifiointia. Karkeistettuihin teorioihin liittyy monia mielenkiintoisia piirteitä. Ensinnäkin perimmäinen syy siihen, miksi karkeistusta tarvitaan, on tietenkin epälineaarisuus ja erityisesti ns. monen kappaleen vuorovaikutukset. Se on yhteinen tekijä useimpien mielenkiintoisten fysikaalisten ilmiöiden taustalla – atomien, molekyylien, solujen tai ihmisten muodostama lineaarinen systeemi, kokonaisuus joka on vain "kaikkien osiensa summa", ei anna meille mitään uutta.

Vasta vuorovaikutusten epälineaarisuus tuottaa kokonaisuuden, joka on paljon enemmän kuin yksittäisten atomien tanssi tyhjiydessä ja jossa esiintyy "emergentejä" ilmiöitä. Jostain syystä juuri tämä asia, joka on fyysikoille varsinkin luonnollinen, tuntuu aiheuttavan filosofeille ideologisia ongelmia (ks. em. Pihlström ja Kampin) kun kyseessä ovat monimutkaisemmat tapaukset, vaikka tämä periaate on selvästi universaali kaikissa tietämässämme tapauksissa. Tässä mielessä pitäisi muuten visusti varoa käyttämästä keskustelun yhteydessä sellaisia ilmaisuja kuin "osiensa summa" (vrt. Pihlström ja Enqvist) koska lineaarisesta summasta ei todellakaan ole kysymys.



Toinen tärkeä huomio on se, että eri tasoilla toimivat fyysikaalisia ilmiöitä kuvaavat karkeistetut teoriat voivat olla rakenteeltaan ja tulkinnoiltaan hyvinkin erilaisia, ilman että niillä on mitään selvää yhteyttä. Monessa tapauksessa karkeamman tason teoriat toimivat itsenäisinä teorioina ilman mitään periaatteellista riippuvuutta mikrotason ilmiöistä. Esimerkkinä voitaisiin mainita jokapäiväiseen elämään liittyvät olomuodon muutokset (esim. veden jäätyminen tai höyrystyminen). Molekyyli tasolla veden jäätyminen on toki suora seuraus vesimolekyylien kvanttimekaaniikkaan pohjautuvista vuorovaikutuksista, mutta jäätyminen teoreettisena ilmiönä ei ole millään tavalla riippuvainen kvanttimekaniikan olemassaolosta.

Tässä mielessä fysiikka antaa hyvin selkeän vastauksen metafysiikan reduktiota koskevaan kysymykseen siitä, miten eri tason ilmiöt riippuvat toisistaan (ks. Kampainen): eri tasojen välinen riippuvuus on yksi moneen niin, että kutakin korkeamman tason kuvausta voi vastata useita, ehkä jopa ääretön määrä erilaisia mahdollisia alempia tasoja. Tämä on myös suora seuraus siitä, että karkeistuksessa menetetyt vapausasteita ei saada takaisin; voidaan siis hyvin perustein väittää, että fysiikka sallii karkeistuksen mutta ei reduktiota! [1] Samasta syystä eri tasojen riippuvuus ei ole tarkasti ottaen ns. vahvaa (ks. Kampainen), koska joitain alemman tason vapausasteita voidaan muuttaa ilman että ylempi taso siitä välittää.

Kolmas tärkeä huomio liittyy kysymykseen siitä, että jos kerran mikrotason teoriat periaatteessa sisältävät kaikki mahdolliset vapausasteet ja ilmiöt, miksi niiden laskeminen niistä (tai jostain fundamentaalista yhtenäisteoriasta) on niin vaikeaa? Onko tämä "vaikeus" pelkästään tekninen ongelma? Voidaanko joskus kaikki mahdollinen laskea jo kehitetään tarpeeksi nopea tietokone?

Fysiikan vastaus tähän kysymykseen on nykytiedon mukaan yksiselitteisesti ei. Mikrotason teorioiden kannalta makroskooppisten ilmiöiden laskenta on monessa tapauksessa mitä selvemmin ns. NP-täydellinen (non-polynomial tai nondeterministic polynomial) ongelma (esim. Hayes 1997).

Tällainen ongelmatyyppi, joka esiintyy varsin yleisesti fysiikassa ja matematiikan optimointiongelmissa tarkoittaa sitä, että ongelman ratkaisemiseen tarvittava laskennallinen aika (joka voidaan määritellä algoritmisesti) kasvaa nopeammin vapausasteiden määrän myötä kuin mikään polynominen funktio. Tämä tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että tällaisia ongelmia ei koskaan voida "laskea" ainakaan digitaalisilla tietokoneilla. Toisaalta epälineaarit systeemit ovat usein hyvin herkkiä muuttujien alkuarvoille, jolloin laskenta pienemmälläkin muuttujamäärällä epäonnistuu herkästi (tämä pätee mm. sääennustuksiin).

Lopullinen naula kaiken laskemisen arkkuun yhtenäisteoriasta tulee kvanttimekaniikasta – alkuarvojen tarkka määrittäminen ei onnistu edes empiirisesti epätasällisyysperiaatteen takia.

Peitsenheilutukselle aina tarve

Eräs filosofien kielipelien keskeinen kohde on emergenssin luonne: onko se ontologinen vai episteeminen käsite (vrt. Pihlström ja Kampainen). Mielestäni tämä koko kysymys on fyysikaaliselta kannalta katsoen enkelten tanssia neulan kärjessä, kun otetaan huomioon fyysikaalisten teorioiden erilaisten karkeistustasojen monimuotoisuus. Todellisuus on yhtä lailla kvanttifluktuaatioita, atomeja, molekyylejä, soluja, ihmisiä, planeettoja kuin galaksejakin – kyse on vain siitä karkeistuksen tasosta, millä todellisuutta halutaan kuvailla. Kari Enqvistin tulkinta todellisuudesta kvanttifysiikan mukaan on siis tietenkin fysiikan teorioiden mukaan aivan oikea, mutta varsin rajoitettu koska se helposti sulkee muut kuin fysiikan asiantuntijat (ja kiivastuneet filosofit) keskustelusta pois. Lisäksi kannattaa muistaa, ettei edes meillä fyysikoilla ole lopullista yhtenäisteoriaa käsissämme, emmekä voi koskaan edes välttämättä tietää, onko kehittämämme "mikroskooppisin" teoria todella sellainen (tai onko sellaista edes olemassa).

Ontologiselta kannalta katsoen eri karkeistustasot antavat mahdollisuuden hyvinkin erilaisiin tulkitoihin vaikka fyysikaalisuuden vaatimuksesta pidettäisiin kiinni. Herääkin kysymys siitä, pitäisikö koko filosofinen emergenssin käsite viedä reduktion kanssa saunan taakse ja lopettaa.

Kuten Enqvistkin mainitsee, ei fysiikka suinkaan trivialisoi emergenssiä vaan antaa sille täsmällisen sisällön. Voidaan tietysti hyvällä syyllä kysyä, voidaanko fyysikaalista paradigmaa soveltaa sellaisiin ongelmiin kuin esimerkiksi ihmisen tai tietoisuuden tutkimus. Nykyfysiikka ei tähän pysty antamaan kvantitatiivista vastausta, koska emme vielä hallitse

epälineaaristen, dynaamisten systeemien teoriaa kuin nimeksi; ehkä emme vielä edes osaa kysyä oikeita kysymyksiä.

Kuitenkin tämän alan tutkimus, jota itsekin edustan, on jo nyt johtanut kokonaisten uusien ilmiöluokkien tunnistamiseen – "emergenssi" ilmenee jälleen karkeistetuissa teorioissa!

Yksi fysiikan tällä hetkellä nopeimmin kehittyvistä aloista on juuri biofysiikka, joka pyrkii mallintamaan (yksinkertaisia) biologisia prosesseja fysiikan keinoin. Ei näytä olevan mitään periaatteellista syytä siihen, miksei ensin yksittäisten solujen ja lopulta jopa eliöiden mallintaminen voisi onnistua fysikaalisin mallein.

Tältä pohjalta katsoen Kamppisen mainitsema kognitiivisen sulkeuman teesi on alkanut vaikuttaa lähinnä ontolta uskonkappaleelta. Epälineaarisuus ja kaottilisuus viittaavat kylläkin siihen, että vaikka mallinnus onnistuisikin, ei "laskeminen" (ennustaminen) silti käy päinsä. Tämä ei suinkaan merkitse sitä, että fysikaalinen ontologia tulisi hylätä. Fysiikka ei myöskään millään tapaa väheksy tai pyri asettamaan filosofiaa, uskontoja, taiteita, urheilua tai muitakaan filosofi Jyri Puhakaisen (Puhakainen 1999) mainitsemia inhimillisiä toimintoja vähäarvoisiksi tai harhaisiksi. Onhan selvä, että ne ovat olemassa niissä samoissa aivoissa, joissa fysikaalisia teorioitakin kehitetään. Humanistisille tieteille ja filosofien peitsenheilutukselle riittää varmasti aina tarvetta.

HUOMAUTUS

[1] Fysiikassa käytetään termiä "reduoidut teorit" usein juuri päinvastaisessa merkityksessä kuin filosofiassa, eli niillä tarkoitetaan karkeistettuja teorioita joista vapausasteita on redusoitu pois.

KIRJALLISUUTTA

Enqvist, Kari (1999): "Kommentti Pihlströmille". Tieteessä tapahtuu 2/1999: 45.

Hayes, Brian (1997): "Can't get no satisfaction". American Scientist, vol. 85, 1997: 108-112.

Kamppinen, Matti (1999): "Reduktion ja ihmistieteet - filosofisen metafysiikan puolustus". Tieteessä tapahtuu 2/1999: 41-44.

Niskanen, Vesa A. (1999): "Pitääkö pyörä taas keksiä". Yliopisto 3/99: 35-36.

Pihlström, Sami (1999): "Emergenssistä". Tieteessä tapahtuu 1/1999: 42-46.

Puhakainen, J. (1999): useita kirjoituksia Helsingin Sanomissa, helmikuu 1999.

Ala-Nissilä, T. ja Alatalo, M. (1999): "Fysiikan monen maailmankuvat". Helsingin Sanomat 18.2.1999.

Kirjoittaja on fysiikan professori Fysiikan tutkimuslaitoksessa Helsingin yliopistolla.

alanissi@csc.fi

– Olemisen porteilla vaiko portinpielessä? (Kullervo Rainio):

"Tietomme on sirpaloitumassa yhä kapea-alaisempiin erityistieteisiin", totesi Kari Enqvist Vieraskynä-kirjoituksessaan Helsingin Sanomissa 12.1.1999 ja jatkoi: "Tiedonsirpaleiden sijasta me tarvitsemme nyt synteesiä; yhtenäistä peruskalliota, jolle koko inhimillinen tieto rakentuu." Tähän hartaaseen toiveeseen yhtyy varmaan jokainen kulttuurin tarkkailija – niin humanisti kuin luonnontieteen harjoittajakin. Mutta sensijaan se Enqvistin varsinkin Tieto–Finlandia-palkinnon saaneessa kirjassaan vahvasti viljelemä käsitys, että fysiikassa piankin löydettävissä oleva "kaiken teoria" olisi tuo kertakaikkinen synteesi, on saanut meidän oloissamme suorastaan vilkkaan keskustelun aikaan.

Helsingin Sanomissa 18.1. Lauri Rauhala esitti tiukan asiallisesti perusteita sitä Enqvistin käsitystä vastaan, ettei todellisuuden ymmärtämiseksi ole tarvetta edellyttää muita kuin fysikaalisia rakenteita ja suhteita. Jyri Puhakaisen kiihas arvostelu ja vastenmielisyys tiivistyi kysymykseksi, miksi Enqvist ei saanut kirjastaan "huuhaa" -palkintoa (HS 2.3.). Enqvistin puoltajakin Hesarin mielipidepalstoille ilmaantui. *Tieteessä tapahtuu* -lehdessä 1/99 Raimo Lehti ironisoi erittäin Enqvistin kirjan intomielisimpiä kohtia, mutta ilmoitti sivuuttavansa elämän ja ajattelun fysiikkaan redusoimisen aihepiiriin. Vahinko! – Samassa numerossa Sami Pihlström

analysoi Enqvistin käsitystä emergenssistä ilmoittaen varovaisesti olevansa "taipuvainen yhtymään fysikalismien arvostelijoihin". Numerossa 2/99 Matti Kampainen arvioi puolestaan rinnakkain Enqvistin Olemisen porteilla -teoksen ja Jyri Puhakaisen julistuskirjan *Persoonan kieltäjät*.

Enqvist on vastineissaan hivenen pehmentänyt sanontojaan, mutta pysynyt kuitenkin fysikalistisessa ontologiassaan. Enqvist on ajatuksillaan tonkaissut syvältä filosofisen keskustelumme yleensä uneliasta muurahaipesestä. Moni toivoo, että vilskettä riittäisi vielä pitkään. – Haluan seuraavassa palauttaa vuoropuhelun alkulähteilleen, Enqvistin kirjan keskeisiin kohtiin – psykofyysiseen ongelmaan ja reduktionismiin.

Jos kirjan tyyli on arvioinnin oleellinen kriteeri, silloin Kari Enqvist on hyvin Finlandia-palkintonsa ansainnut. Harvoin saa lukeakseen niin älyllisesti leimahtelevaa ja mielikuvituksen kepeyttämää tietokirjaa kuin *Olemisen porteilla*. Teoksessa näkyvät henkevästi liikkuvuuden merkit.

Esitystä tämän tästä keventävät hyppäykset asiasta toiseen ja sivuhuomautukset kertovat laajasta lukeneisuudesta. Jotkut löydökset ovat peräti muhavia - lukija muistaa ainakin "kosmisen hikan" esittelyyn liittyvän Venedikt Erofejevin toteamuksen neuvostoalkoholismin eräistä piirteistä: "Hikka on kaikkien lakien yläpuolella".

Enqvistin kirjaa lukiessa tulevat mieleen Aaro Hellaakosken säkeet: "Joku rakastaa koko maailmaa kuin riepumattoa kirjavaa, mutta toisen rakkaus on valinnan tulos: yks' sisään ja kaikki muu ulos". Teoksen alkupuoli - varsinaista kvanttifysiikkaa koskeva - on tietorunsaudessaan häikäisevä "riepumattoa kirjavaa", mutta loppu, ontologiaa, olemassaolon kysymyksiä selvittämään tarkoitettu sensijaan "valinnan tulos" "yks" – nimittäin materialistisen reduktionismin maailmankuva "sisään ja kaikki muu ulos". Suunnilleen sivulta 176 alkavat opuksen marginaalit täytyä lukijan kysymysmerkeistä.

On varmastikin aivan paikallaan Enqvistin terävällä kielellä nujertaa kaikenkarvaiset "kvanttimystikot", jotka uuden muodin oikkuna yrittävät näennäistieteellisellä kielellä lumota maallikkosieluja. Mutta – niinkuin aina – leimaa lätkittäessä leimattujen pinoon voi osua aivan sinne kuulumattomiakin. Enqvist ei sentään suoranaisesti väitä "kvanttimystikoiksi" sellaisia huomattavia toisinajatteliijoita kuin Sir John Eccles ja Roger Penrose, mutta esityksen sävy on vähättelevä ja melko ironinen.

Väärin tulkittu Eccles

Ecclesin teoriasta Enqvist antaa suorastaan virheellisen kuvan: "Vain hyvin harvat ovat kuitenkaan dualistien tapaan sitä mieltä, että tietoisuus on 'oma aineensa', joka voi vaikuttaa atomeihin kvanttitasolla. Näkyvin poikkeus on neurobiologi ja nobelisti John C. Eccles, joka on keksinyt tarjota tietoisuuden perustaksi aivoista riippumattomia mutta niihin kytkeytyviä 'psykoneja'. Hän esittää, että psykoneit vaikuttavat aineeseen ja aine psykoneihin, mutta kaikki tämä on vain ylimalkaisen väittämän tasolla." (s. 176)

Tosiasiaa Eccles, joka tosin tunnustautuu eräänlaiseksi dualistiksi, sanoutuu jyrkästi irti decartesilaisesta dualismista eikä hänen teoriansa mitenkään ole "toista ainetta".

Päinvastoin hän esittää tieteellisesti hyvin vakuuttavalla tavalla ratkaisun ns. psykofyysiseen ongelmaan. Yhdessä Darmstadtin teknisen yliopiston teoreettisen ydinfysiikan osaston johtajan Friedrich Beckin kanssa hän viimeisessä teoksessaan *How the Self Controls Its Brain* osoittaa neuronien välillä tapahtuvien impulssien synapsisten ylitysten olevan aitoja kvanttitaso todennäköisyysilmiöitä. Mentaalinen tila vaikuttaa näiden synapsinylitysten todennäköisyyksiin samanaikaisesti suuressa neuroniryhmässä eli dendronissa tai dendronijoukossa saaden aikaan havaittavan aivofysiologisen reaktion. Eccles korostaa sitä, ettei hänen teoriansa näinollen ole ristiriidassa fysikaalisten säilymislakien kanssa. Ja koska kysymys on todennäköisyyksien muutoksista, ei voida puhua mistään "toisesta aineesta". Mentaaliset tilat ovat aineettomia (todennäköisyyskenttiä). – Empiirisesti mentaalisten tilojen spontaanit vaikutukset aivoihin voidaan todeta ns. "hiljaista ajattelua" (silent thinking) koskevilla aivofysiologisissa tutkimuksissa, joissa on osoitettu, että mentaalinen tila sellaisenaan (ilman ulkopuolisia ärsykeitä) aktivoi kulloinkin määrättyjä aivoalueita. Tämän lähemmäksi teorian todistamista ei fysikaalisiin mittarein voidakaan päästä.

("Mentaalisiin tiloihin" ei voida sijoittaa detektoreita, mikä olisi kai ainoa tapa saada fyysikko uskomaan jonkin ilmiön olemassaoloon.) Karkea kuvitelma joskus mahdollisesta mentaalisten tilojen fysikaalisesta mittaamisesta näyttää olevan se perusajatus, joka saa fyysikot, Enqvistinkin, uskomaan, että jollakin "fundamentaalisella kaiken teoriolla" paljastettaisiin

kerran kaikki henkinen tapahtuminen materiaalisten ("monimutkaisten") tapahtumien "emergenteiksi ominaisuuksiksi". Mistä tämä merkillinen hybrisi? Edellä oleva yksityiskohtainen selvittely Ecclesin tapauksesta osoittaa, miten Enqvistinkin kaltaiset lahjakkuudet fysiikan piirissä saattavat sivuuttaa syvälliset ontologiset kysymykset ennakkoluulojen vallassa.

On vain kvarkkeja

Kvanttifysiikan metodeja esitellessään Enqvist erottaa terävällä tavalla "efektiivisen" teorianmuodostuksen "fundamentaalisesta" korostaen sitä, että käytännössä toimimme aina efektiivisiä, karkeistettuja kuvauksia käyttäen. (Efektiivinen kuvaus = "keskiarvotettu ja/tai likiarvotettu todellisuutta yksinkertaistava ja karkeistava kuvailu". Fundamentaalin teoria = "perimmäinen teoria, jonka seurauksia viime kädessä kaikki efektiiviset teoriat ovat"; s. 232). Ihmetyttää, ettei Enqvist tässä yhteydessä ollenkaan viittaa Eino Kailaan, jonka mukaan kaiken inhimillisen tiedonpyrkimyksen tavoitteena ovat invarianssit (ks. "Inhimillinen tieto"). Tätä taustaa vasten tarkasteltuna efektiivinen kuvaus ei nähdäkseni ole mitään oleellisesti uutta: meidän (kaikki!) tietomme on aina idealisoivaa. Mutta jos Enqvist olisi tuntenut läpikotaisin nämä Kailan ajatukset (ja esimerkiksi hahmopsykologian löydökset), hän tuskin olisi voinut pitää kiinni ehdottoman "fundamentaalin teorian" mahdollisuuden olettamuksesta – mikä ilmeisesti olisi johtanut luopumiseen reduktionismista. Nyt tuntuu aivan kestävämmältä sellainen Enqvistin loputtomaan reduktioon johtava ontologinen asenne, jonka mukaan ei (enää) "ole olemassa" sen enempää elektroneja kuin positronejakaan, kun on todettu niiden muodostuvan kvarkeista. (Ei riitä Enqvistin tapaan vain todeta, että ne ovat "luonnollisesti olemassa jossakin efektiivisessä mielessä", s. 221. Asia on paljon syvällisempi.) Mitä mielikuvitusrikkaampi ja liikkuvampi ajatuksissaan jonkin alan erikoisasiantuntija on, sitä suurempi näyttää aina olevan vaara, että hän käsitellessään itselleen vieraan alan probleemoja ajaa omia raiteitaan liian pitkälle. Innostuksen junassa ei ole niitä jarruja, joilla toisen alan tarkka tuntemus hillitsisi raisua menoa. Enqvistin suistuminen alkaa tietoisuuden tarkastelusta. Hänellä ei ole sisäistettyä psykologin näkemystä tajunnasta merkitysten maailmana eikä sen aktiivisuudesta suhteessa ns. todellisuuteen – siihen, että todellisuus tulkitaan aina merkitysten kautta. Kerran hän puhuu "aktiivisesta tajunnasta", mutta silloinkin hän näkee sen vain "peilaavan maailmaa" (s. 230).

Tietoisuus ja rautatanko

Tietoisuuden olemuksesta Enqvistillä on fysikalistinen kanta: "Miksipä tietoisuus ei voisi olla emergentti ilmiö samassa mielessä kuin rautatangon ominaisuudet ovat emergenttejä; emergentti mutta kuitenkin ainakin periaatteessa palautettavissa atomaarisen tason ilmiöihin" (s. 220). Jonkinlaisena myönnytyksenä niille, jotka pitävät tällaista räikeää materialismia liian pitkälle menevänä, Enqvist huomauttaa luistavasti, "että vaikka ihmisen käyttäytyminen, toiveet, arvot ja itsetietoisuus olisivat palautettavissa alkeishiukkasten välisiin vuorovaikutuksiin – ja näin uskon itse – emme käytännössä koskaan pysty 'laskemaan ihmistä'" (s. 228). Huomattakoon sana "käytännössä". Siis periaatteessa, filosofisessa mielessä, se kuitenkin olisi mahdollista vai kuinka? Ryhtyessään tarkastelemaan vapaan tahdon ongelmaa, Enqvist on ehdoton materialistinen reduktionisti: "... tietoisuus muodostaa efektiivisen kuvailun. On vain atomeita, energian kasaumia ilman tahtoa tai itsetietoisuutta. On vain ainetta, energiaa, miksi maailman pohjimmasta olemusta sitten haluammekin nimittää; muuta ei ole" (s. 223). Niinpä hän pitää "luonnollisena" ajatusta, että "valintamme, halumme ja toiveemme ovat vain alkeishiukkasten vuorovaikutuksista nousevia emergenttejä piirteitä" (s. 223). Millä tavalla "nousevia"? Enqvist ei huomaa, että hänen esityksensä on tässä yhtä hämärää kuin niiden "kvanttimestikkojen", joita hän arvostelee.

Atomeja joulupadan ääressä

Enqvistin mukaan vapaa tahto "näyttäisi olevan hyvin illusorinen, kuin hätäpäissä jälkikäteen annettu meriselitys" (s. 225). Vaikka Enqvist – nähdäkseni terveesti – "ei tohdi uskoa,

että aivot toimisivat tietokoneen lailla" (s. 226), hän kuitenkin heti perään – pohtiessaan kysymystä, paneeko Pelastusarmeijan joulupataan rahaa vai ei – päätyy toteamukseen: "Periaatteessa, jos alkuehdot tunnettaisiin riittävän tarkasti, voisimme jopa laskea, miten (tilastollisessa mielessä) tulen toimimaan joulupadan ääressä." (s. 227). Tässä näyttäytyy hyvin selvänä materialismin kanta tietoisuuteen: Jos rakennettaisiin kyllin monipuolisen elektronisen ohjauksen avulla toimiva auto, joka tekisi katuverkoston ja liikenteen vaatimat väistö-, jarrutus- ja vauhdinantoliikkeet ulkonaisesti tavallisen ajajan tapaan (siis ilman, että poliisi huomaisi mitään erikoista) ja vielä reagoisi tarvittavalla tavalla paikanmäärityskarttatietoihin suunnistaen risteilyohjauksen tapaan, silloin autolla olisi vähintään autonajajan tietoisuus "emergenttinä ominaisuutena". Lyhyesti sanoen: Jos on olemassa laite, joka simuloi (jäljittelee) inhimillistä käyttäytymistä niin, ettei mitattavia eroja ole simuloitujen ja aidon käyttäytymisen välillä, emergenttisen materialismin mukaan on katsottava, että laitteella tai ohjelmalla on vastaava tietoisuus. Tai – Enqvistin esimerkein – jos rakennetaan laite, joka ohjelmoidaan tunnistamaan joulupadan hahmo ja siinä rahanpudotusaukko sekä pudottamaan tietyllä todennäköisyydellä raha aukkoon – tai olemaan pudottamatta – silloin tämä laite on suorittanut eettisen valinnan siinä missä ihminenkin, koska Enqvistin mukaan ihminen on juuri atomaaristen hiukkasten ohjaama laite.

Unohdettu merkitysten maailma

Virhe on se, ettei oteta huomioon ihmisen olemusta tietoisena olentona: ihminen on tietoisuudessaan merkityksillä operoiva olento. Merkitykset eivät ole fysikaalisesti mitattavia asioita. Itsehavainnon avulla voimme kuitenkin vakuuttua niiden olemassaolosta ja kommunikaation tietä päätellä niiden olemassaolon myös toisten tietoisuudessa. Merkityksiä voidaan toki simuloida koodaamalla niitä, mutta simuloitujen merkitykset ovat vain merkitysten merkkejä, koodeja. Niiden käsittely tietokoneohjelmissa voi olla vain koodien vaihtoa toisiin koodeihin joidenkin sääntöjen mukaan. Lasketaanpa merkitysten koodeista mitä tahansa uusia koodeja ja koodien koodeja, ei saada tulokseksi merkityksiä, koska merkki ei voi muuttua tarkoiteekseen. Vapaa tahto – tahto ylilmukaan – on kognitiivista toimintaa, jota ohjaavat arvo-merkitykset. Koska se edellyttää merkityksenmuodostuksen, sitä ei voi olla simuloituilla "olennoilla" (ohjelmilla, ohjelmien säätelämillä laitteilla). Näyttää siltä, että kuvitelma simuloinnin kaikkivoipaisuudesta on tuottanut fysikalistien omituisen käsityksen, ettei vapaata tahtoa voi olla. Enqvistin esityksessä tämä virhe tuottaa paljon sekaannusta. Lopullisesti Enqvist sinetöi esityksensä kapeuden teoksensa viimeisellä sivulla: "Olemassaoloon ei liity syvää filosofiaa. Se on pohjimmiltaan fysiikan kysymys" (s. 230). Tätä näköalan supistumista ei pysty korjaamaan esityksen eloisuus eikä rehevyyskään – valitettavasti – vaan tässä kohdassa alkaa tuntua siltä, että tyli on ollutkin itsetarkoitus. Toivo, että olisi vihdoinkin saatu teos, joka kykenisi rakentamaan siltä kahden kulttuurin – luonnontieteellisen- teknologisen ja humanistisen – välisen kuilun yli, sammuu kirjan loppuluuvissa. Ehkä välillä on jo olemisen porteilla pistäytytty, mutta avain osoittautuu vääräksi ja meidän on pakko edelleenkin jäädä hortoilemaan portinpieleen.

Kirjoittaja on sosiaalipsykologian emeritusprofessori.

– Vielä kerran emergenssistä (Kari Enqvist):

Monet henkilöt ovat viime aikoina ottaneet kantaa kysymykseen emergenssistä ja ennen kaikkea fysiikan siitä antamaan kuvaan. Sami Pihlströmin Tieteessä tapahtuu -lehdessä 1/1999 ollutta kirjoitusta olen jo lyhyesti kommentoinut aiemmin. Viimeisimmässä Tieteessä tapahtuu -lehdessä 2/1999 Matti Kamppinen analysoi ansiokkaasti emergenssiin ja reduktioon liittyvää käsitteistöä. Hän päätyy kuitenkin esittämään, että "korkeamman tason kuvaukset poimivat todellisuudesta uusia ominaisuuksia, joita alemmilla tasoilla ei löydy." Tämä lause on vahvan emergenssin kannattajien perusväittäjä. Se on myös manifestisti epätosi lause.

Ymmärtääksemme puheen eri tason kuvauksista meidän tulee

ensimmäiseksi suunnata katseemme sinne, missä ilmiöt ovat riittävän yksinkertaisia jotta niitä voidaan käsitellä täsmällisesti ja kvantitatiivisesti. Näin on asiain laita fysiikassa. Fysiikka tarjoaakin lukuisia esimerkkejä

korkeamman tason kuvauksien synnystä ja tätä kautta emergenssistä, kuten kirjassani Olemisen porteilla olen kertonut.

Yksittäiset atomit eivät tunne kitkaa tai painetta, mutta silti ne ovat tärkeitä ominaisuuksia nesteiden ja kaasujen kuvauksessa. Kitka ja paine eivät kuitenkaan ole "todellisuudesta poimittuja

uusia ominaisuuksia" jotka salaperäisesti ilmaantuvat siirryttäessä molekyylikuvasta nestekuvaan. Ne ovat yksinkertaisesti kuvailun karkeistuksesta juontuvia ilmiöitä. Molekyylikuvassa riippumattomia muuttujia kuvaa molekyylien paikka- ja impulssijakauma $f(x,p,t)$ ja sen aikakehitystä Boltzmannin yhtälön nimellä tunnettu differentiaaliyhtälö [1], jossa molekyylien keskinäinen vuorovaikutus huomioidaan ns. kollisionintegraalin kautta, joka voidaan laskea.

Oletamalla isotrooppinen molekyylijakauma ja ottamalla summa (ts. integroimalla)

kaikista mahdollisista molekyyli-impulsseista saadaan uusi, Navierin–Stokesin yhtälö. Se on yksi hydrodynamiikan perusyhtälöistä. Navierin-Stokesin yhtälön riippumattomat muuttujat ovat energiatiheys, paine ja kitka, ja nämä käsitteet ilmaantuvat vain ja ainoastaan siksi, että summausoperaatiomme hävittää systeemiä kuvaavaa informaatiota. Ne vastaavat erilaisia jakaumalla $f(x,p,t)$ painotettuja momenteja. – Käytän muuten informaatio-sanaa tässä hyvin yksinkertaisessa merkityksessä: se tarkoittaa fyysikaalisen systeemin tilan kuvaamiseen tarvittavaa bittien määrää.

Tämä hydrodynaaminen karkeistus on fyysikaalisen emergenssin arkkityyppi, jonka tiedämme ulottuvan kemiaan asti.

Emergenssi fysiikassa on siis aina Kamppisen tarkoittamaa yksi–moneen-tyyppiä: korkeamman tason ilmiö realisoituu alitason monella erilaisella konfiguraatiolla. Tästä johtuen se on myös tyypillisesti heikkoa merkityksessä, että alemman tason muutokset eivät aina aiheuta muutoksia ylemmällä tasolla.

Esimerkiksi paine säilyy samana vaikka kahden identtisen kaasumolekyylin avaruudelliset paikat vaihdettaisiin.

Kamppisen esimerkki vahvasta riippuvuudesta, rautakangen rakenneosien kuumentamisen vaikutus rautakangen lujuuteen, sen sijaan perustuu fysiikan (ja rautakangen) väärinymmärtämiseen. Yksittäistä atomia emme voi kuumentaa, sillä lämpötila on tilastollinen ja siksi efektiivinen käsite. Rautakangen atomit absorboivat säteilyä joka dissipoituu hilavärähtelyiksi, jonka sitten voimme mitata kangen lämpenemisenä. Kyseessä on kollektiivinen ilmiö, jonka syytä emme voi osoittaa mitään tiettyä atomia tai atomien joukkoa.

Nestedynamiikka ei ehkä tunnu yhtä kiehtovalta kuin ihmisen tietoisuus, mutta etuna on se, että siinä esiintyvän emergenssin hallitsemme matemaattisesti. Emmekä missään näissä yhtälöissä, emme yhdenkään matemaattisen symbolin kohdalla, voi löytää vahvistusta väittämälle, että "korkeamman tason kuvaukset poimivat todellisuudesta uusia ominaisuuksia, joita alemmilla tasoilla ei löydy."

Väite ei siis päde tähän, eikä moniin muihinkaan vastaavanlaisiin fysiikasta löytyviin esimerkkeihin.

Mikä silloin on tällaisten filosofisten argumenttien arvo? Ne pyrkivät sanomaan jotakin yleistä maailman olemuksesta, mutta ajautuvat konfliktiin jo kaikkein yksinkertaisimpien systeemien kohdalla. Sellainen filosofia seisoo murenevilla savijaloilla, ja siihen tarrautuminen päinvastaisen evidenssin edessä on sokeutta.

Fyysikoillakin on sentään ammattitaito

Vaikka Kamppinen tuntuu lukeneen kirjaani huolellisesti, hän valitettavasti sivuuttaa sen keskeiset fyysikaaliset perustelut kuin ne pohjaisivat tutkimustiedon sijasta pelkkään semantiikkaan. Kenties tässä on takana periaate, jonka niin monet kirjoittajat tuntevat omaksuneen fysiikan opetuksista puhuttaessa: "Jos et ymmärrä sitä, vähättele sitä".

Merkillistä kyllä, sama suhtautumistapa pätee osittain jopa Raimo Lehteen. Hän toteaa Tieteessä tapahtuu -lehdessä 1/1999 dekoherenssistä, joka on oleellinen käsite puhuttaessa klassisen fysiikan todellisuuden nousemisesta mikrotason kvanttitodellisuudesta, että kyseessä "on lingvistinen pelastusyritys asioille, joiden kohdalla konkreettinen reduktio epäonnistuu". Lehti kirjoittaa vielä: "Mikäli kuvitelma makromaailman redusoitumisesta kvanttimekaniikan

mukaiseen mikromaailmaan on oikea, pitää kaikkien [...] törmäilyjen [...] olla samaisen kvanttimekaniikan mukaisia". Ja totta kai ne ovat [2]. Fysiikoillakin on sentään jonkinlainen ammattitaito.

On tietenkin täysin mahdollista, että emergenssi fysiikassa on erilaista kuin esimerkiksi biologiassa tai neurofysiologiassa. Mutta silloin kysymys tuon merkillisen filosofisen demarakaatiolinjan olemassaolosta tulisi olla empiirisen tieteen ratkaistavissa. Missä muutos tapahtuu? Kuinka suurissa systeemeissä? Millaisissa tiheyksissä? Millaisissa paineissa? Kuinka monta atomia tarvitaan? Ja ennen kaikkea, miksi? Kemian uskotaan yleisesti olevan periaatteessa johdettavissa fysiikasta. Tapahtuuko kemiasta molekyylibiologiaan siirryttäessä jotakin uutta? Vai vasta hypätessä molekyylibiologiasta solubiologiaan? Yksinkertaisin oletus luonnollisesti on, että ei tapahdu; että emergenssi on kaikkialla täsmälleen samanaatuisista kuin fysiikan esimerkit osoittavat. Esimerkiksi proteiinien taittumista voidaan mallintaa fysiikan keinoin, joten siinä ei ainakaan näyttäisi vielä ilmaantuvan mitään fysiikalle vierasta.

Ikään kuin vastavetona tähän voi nostaa Kampin lauseen:

Ajatuksia ja muuta mentaalista aktiviteettia ei löydy yksittäisistä neuroneista". Tämä on argumentti, jonka filosofinen iskuvoima on yhtä suuri kuin ylikeitetyllä spagetilla. Siitä huolimatta se esiintyy emergenssiä käsittelevissä kirjoituksissa yhä uudelleen ja uudelleen erilaisissa inkarnaatioissa. Jostakin syystä ajatelmaa ei haluta tarjoilla sen demystifoidussa muodossa, esimerkiksi "vetyatomia ei löydy yksittäisestä elektronista.

Miten totta, mutta miten triviaalia. Vetyatomi on eri systeemi kuin yksittäinen elektroni. Molekyyli on eri systeemi kuin yksittäinen atomi. Neuronit ovat eri systeemi kuin yksittäinen molekyyli. Aivot ovat eri systeemi kuin yksittäinen neuron. Samaa sarjaan kuuluu mm. Lauri Rauhalan Helsingin Sanomissa (HS mielipide 4.2.1999) esittämä oivallus, jonka mukaan Beethovenin viulukonsertto fysiikan kielellä on vain häiriöitä ilman tasapainossa. Näinhän se tietysti on, mutta eiväthän nuo häiriöt tunkeudu ihmisen pääkoppaan ja siellä mystisesti transformoidu majesteettilliseksi musiikiksi. Ilman painevaihtelut liipaisevat korvaan saavuttuaan liikkeelle hermosignaaleja, joiden modulaatiot aivoimme kokevat musiikkina. Lukiessamme sanojen hahmot aiheuttavat neuraalisen aktiviteetin jonka seurauksena ymmärrämme kirjoitusta (kun ensin olemme oppineet liittämään tiettyihin hahmoihin tietyn merkityksen). Kyseessä on siis aivojen, ei tarkkailun kohteena olevien fysikaalisten systeemien ominaisuudet.

Kaikki nämä esimerkit palautuvat samaan vanhaan ja vielä vailla vastausta olevaan kysymykseen: miten ihmisen tietoisuus muodostaa merkityksiä ja subjektiivisia kokemuksia. Tärkeätä on kuitenkin koko ajan pitää tarkka vaari siitä, puhutaanko fysikaalisen systeemin A ominaisuuksista vai sen kanssa vuorovaikutuksessa olevan ("sitä tarkkailevan") systeemin B ominaisuuksista.

Rainion perustelematon kvanttiloikka

Tämän lehden kirjoituksessaan Kullervo Rainio antaa mielenkiintoisesti ymmärtää, että neurobiologi John C. Eccles todella olisi löytänyt ilmiötason, jossa emergenssi olisi muutakin kuin karkeistusta. Kyse on synaptisten ylitysten kvanttiluonteesta, josta on taittanut peistä myös amerikkalainen fyysikko Henry P. Stapp. Kun Rainio kirjoittaa, että "Mentaalinen tila vaikuttaa näiden synapsinylitysten todennäköisyyksiin", kyseessä on kuitenkin perustelematon ja valtaisa kvanttiloikka. Mentaalinen tila varmasti vaikuttaa synapsinylityksiin, mutta sikäli kun tiedämme, kvanttimekaanisiin todennäköisyyksiin ei voi vaikuttaa millään tavalla. Tämä on kvanttifysiikan perusviesti: todellisuuteen liittyvä aito ja sisäinen tilastollisuus, jota mikään fysikaalinen prosessi ei pysty poistamaan.

Sen perusteella mitä tiedämme kvanttifysiikasta, tuntuu äärimmäisen vaikealta kuvitella monen synapsin samanaikaisesti toimivan yhtenä kvanttilana. Dekohärenssi, joka sekuntien miljardiosien murto-osissa hävittää kvanttifysikaalisen objektin aalto-ominaisuudet, toimii varmasti aivoissakin.

Ilmiön kvanttimekaaninen luonne voidaan osoittaa lähinnä interferenssi-ilmiön avulla. Olen varma, että sellaista koetta Eccles ei synapsien yhteydessä ole voinut järjestää. Jos interferenssiä ei havaita, emme voi tietää, onko kyseessä tavanomainen tilastollinen vai aito kvanttifysikaalinen tapahtuma. Tässä

yhteydessä on hyvä muistuttaa, että kuvailun (ja fysikaalisen systeemin toimintojen) karkeistus voi tehdä deterministisestä kuvailusta stokastisen tai vaikkapa stokastisesta deterministisen, kuten matemaatikko Antti Kupiainen Tieteen päivien esitelmässään kertoi. Monimutkainen, näennäisesti satunnainen makrotason käyttäytyminen voi siis hyvin perustua täysin deterministiselle mutta alkuarvoherkälle teorialle. Toki tiedämme, että luonto ei kvanttitasolla ole deterministinen. Rainio kysyy myös, olisiko ihmisen "laskeminen" mahdollista periaatteessa. Vastaus on: ei. Kuten kirjassani kerron, universumi on liian pieni jotta kaikille mahdollisille kvanttimekaanisille observaabeleille löytyisi klassinen mittarinsa.

Periaatteellisen mahdottomuuden lisäksi on olemassa myös käytännön mahdottomuus, kuten Tapio Ala-Nissilä tässä lehdessä huomauttaa: digitaaliseen laskemiseen tarvittava aika voi ylittää koko universumin iän.

Rainio arvelee lisäksi, että jos voisimme simuloida jollakin laitteella inhimillisiä ominaisuuksia, "emergenttisen materialismin mukaan on katsottava, että laitteella tai ohjelmalla on vastaava tietoisuus". En ole aivan varma, mitä "emergenttisellä materialismilla" tarkoitetaan, mutta omaa kantaani en Rainion lauseesta tunnista. Mielestäni tässä jälleen sekoitetaan fysikaalisen systeemin A ominaisuudet ja sitä tarkkailevan systeemin B ominaisuudet. Koska monet erilaiset sisäiset mikrotilat voivat johtaa samaan karkeistettuun makrotilaan, voimme hyvin kuvitella ihmistä imitoivan laitteen, joka kuitenkin ei ole tietoinen (voisiko digitaalinen imitaatio kuitenkin olla sataprosenttinen on toinen kysymys; ilmeisesti esimerkiksi Daniel C. Dennett ajattelee, että ei voi). Fysiikassa sanoisimme, että systeemeillä on identtiset vuorovaikutukset mutta erilaiset rakennekonfiguraatiot.

Kysymys vapaasta tahdosta ei siis myöskään perustu simulaatioajatteluun, kuten Rainio tuntuu uskoavan. Ihminen on merkityksillä operoiva olento, ja tässä ilman muuta olen samaa mieltä Rainion kanssa. Ohjaavatko nämä merkitykset fysikaalista maailmaa vai fysikaalinen maailma niitä on asia, josta kiistellään.

En kuitenkaan kuvittele, että tietoisuus tai neurofysiologia voitaisiin tai pitäisi korvata fysiikalla. Hiukkasfysiikan soveltaminen oopperaan olisi todella irrationaalista, kuten Kamppinen toteaa. Olisin odottanut tarkkasilmäisten filosofien huomanneen, etten milloinkaan ole puhunut tutkimusohjelmien välisestä reduktiosta, vaikka Kamppinen niin "rivien välistä" uskoo lukeneensakin. Viittaan vain tässä yhteydessä nobelisti Steven Weinbergiin, jota myös lainasin kirjassani (s. 54). Hän sanoo: "Minulle reduktionismi ei ole opas tutkimusohjelmien tekoon vaan tietty luontoa koskeva asenne".

Lienee ilmeistä, että ihmisellä on kognitiivisia rajoitteita [3], kuten Kamppinen ehdottaa. Mutta ei ole olemassa merkkiäkään siitä, että tällä hetkellä kolkuttelisimme noita rajoja. Keskiajalla eräät filosofit uskoivat, että kuuntakainen maailma ei jumalallisen olemuksensa vuoksi olisi ihmisjärjen käsitettävissä. Nyt tilalle tarjotaan tietoisuutta. Kuten tähtitieteilijät aikoinaan, tämän päivän neurofysiologit viitannevat oikeutetusti kintaalla tällaisille heppoisille arveluille.

Opettavainen eläinsatu


Monet kirjoittajat ovat päätteeksi esittäneet keventävän ja ylentävän loppuhenkosen. Niinpä minäkin haluan tarjota lopuksi aina niin opettavaisen eläinsadun:

Olipa kerran eräs kylä, jossa linnut olivat tuiki harvinaisia. Lähellä oli kuitenkin suuri synkkä metsä, jossa lintujen tiedettiin pesivän. Uskottiin myös, että metsän keskellä, muiden lintujen suojaamana, asui myyttinen feeniks-lintu. Toiset sanoivat sen sulkia purppuraisiksi, toiset kultaisiksi; jotkut väittivät sillä olevan neljä siipeä, toiset arvelivat siipien luvuksi kuusi. Mutta oli eräs mies, joka oli nähnyt linnun. Tai jos rehellisiä ollaan, sen oli nähnyt hänen työtä pelkäämätön serkkunsa; mies itse tapasi vain makailla uunin pankolla.


Serkku oli viettänyt monta pimeää yötä ja sateista päivää metsän laidalla kunnes kerran onnistui saamaan kiikareihinsa varpusen. Se oli ruskea ja sillä oli kaksi siipeä. Niinpä mies sanoi kyläläisille: "Kaikki linnut eivät ehkä ole ruskeita, eikä kaikilla välttämättä ole vain yhtä siipiparia, mutta eikö yksinkertaisin lähtöoletus kuitenkin ole, että kaikki linnut, feeniks mukaanlukien, ovat enemmän tai vähemmän varpusen kaltaisia?"

HUOMAUTUKSIA

[1] Se seuraa Liouvilin teoreemasta, joka kertoo




todennäköisyysjakauman säilyvän sen faasiavaruuteen piirtämällä trajektorilla. (Ks. E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevski, *Physical Kinetics*, Pergamon Press, Great Britain 1981).



[2] Dekoherenssin täsmällisempi määritelmä on, että kvanttimekaanisen monitilasysteemin alisysteemiä vastaava redusoitu tiheysoperaattori diagonalisoituu dynaamisesti. Tämä ei ole lingvistiikkaa vaan matematiikkaa. (Ks. esim. Roland Omnes, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, USA 1994, luku 7.). Dekoherenssin kehittyminen on myös havaittu kokeellisesti.

[3] K. Enqvist, *Näkymätön todellisuus*. WSOY 1996, s. 276–277.



Kirjoittaja on teoreettisen fysiikan dosentti Helsingin yliopiston Teoreettisen fysiikan laitoksella.

