



## Kokonaisuus on vähemmän kuin osiensa summa

Kari Enqvist



**Ihmisen ja alkeishiukkasten väliin mahtuu monta kuvauksen tasoa. Psykologia ei ole sama kuin biologia, biologia on erilaista kuin kemia, ja kemia erilaista kuin fysiikka. Niiden käyttämät käsitteet tuntuvat olevan miltei mystisellä tavalla yhteismitattomia. Usein saatetaan puhua emergenteistä ominaisuuksista: väitetään, että kokonaisuus on enemmän kuin osiensa summa. Vaikka aineen tiedetään koostuvan atomeista ja niiden osasista, on olemassa lukuisia ilmiöitä, joiden on vaikea kuvitella palautuvan vain ja ainoastaan niiden välisten vuorovaikutusten ryppääksi.**



Lisäksi mikromaailmaa vallitsevan kvanttifysiikan mukaan alkeishiukkaset ovat todellisuudessa eräänlaisia haamumaisia todennäköisyysaaltoja. Siitä huolimatta me tiedämme arkimaailmamme olevan käsin kosketeltavaa ja tavattoman konkreettista. Miten koko klassinen fysiikka, Newtonin yksikäsitteiset planeettaradat ja kaikki arkitodellisuutemme selkeärajaiset kappaleet – mukaanlukien ihminen – voi nousta kvanttiusvasta?



Entä miten mahdollista, että niin itseriittoisen tuntuaisella ilmiöllä kuin ihmisen tietoisuudella voisi olla jotakin tekemistä atomien tai alkeishiukkasten liikkeen kanssa?



Joskus on jopa sanottu, että "kvanttimekaniikka on mysteeri, tietoisuus on mysteeri – kenties ne ovat sama mysteeri". Esimerkiksi tunnettu fyysikko ja matemaatikko Roger Penrose on kahdessa viimeaikaisessa kirjassaan pyrkinyt etsimään tietoisuuden ja kvanttimekaniikan yhteiseksi lähteeksi kvanttigravitaatiota. Tietoisuuden ongelma onkin suurin haaste, joka fysiikan reduktionistiselle (ja tähän saakka menestyksekkäälle) tutkimusohjelmalle voidaan heittää.



Haluan esittää, että emergenssiä on olemassa, mutta että se ei johdu luonnon selittämättömästä holistisesta luonteesta. Emergenssi on nimenomaan ymmärrettävissä reduktionismin puitteissa ja johtuu informaation katoamisesta. Se mitä kutsumme kokonaisuudeksi ei ole enemmän kuin osiensa summa vaan tavallisesti paljon, paljon vähemmän.



Selityksen eri tasot syntyvät näet karkeistamisen seurauksena: kun haluamme kuvailla tietyn koko- tai aikaskaalan ilmiöitä, voimme huoletta ottaa eräänlaisen keskiarvon kaikesta siitä, mitä paljon pienemmissä skaaloissa tapahtuu. Tällöin fysiikassa puhutaan efektiivisestä kuvailusta tai efektiivisistä teorioista.



Reduktionismin hengessä on olemassa vain yksi ja toistaiseksi tuntematon fundamentaalinen teoria, jota kutsutaan (vaatimattomasti) nimellä "teoria kaikesta". Kaikki muu kuvailu on efektiivistä ja on periaatteessa (muttei useinkaan käytännössä) ymmärrettävissä kaiken teorian pohjalta.



### Molekyyleistä hydrodynamikkaan



Arkimaailmassamme törmäämme joka ikinen päivä valtaisaan joukkoon hyvin erilaisia luonnonilmiöitä. Sadevesi virtaa jalkakäytävän vettä, savukiehkura purskahtaa pyörteisenä voimalan piipusta, tuuli vavisuttaa puiden oksia ja lennättää niiden lehtiä, merellä rahtilaiva puskee harmaita aaltoja vasten ja vieläkin harmaampaa pilvihuopaa pudistellaan taivaankannella.

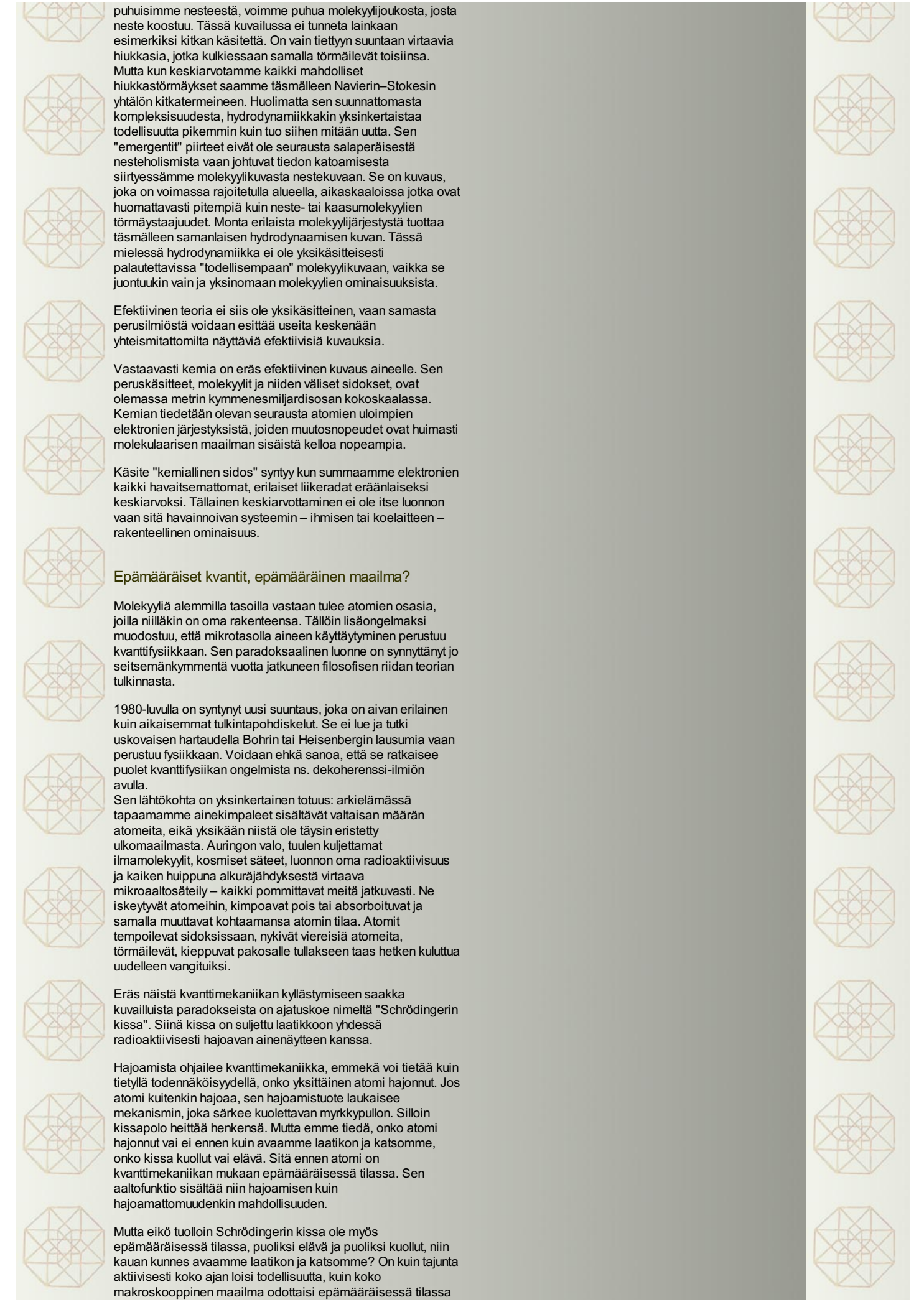


Kaikkia näitä ilmiöitä vallitsee yksi teoria, hydrodynamikka. Se on fysiikan haara, joka tutkii nesteiden ja kaasujen ominaisuuksia. Niitä kuvaillaan 1800-luvulla vaikuttaneiden fyysikkojen, ranskalaisen Claude Navierin ja irlantilaisen George Stokesin, mukaan nimetyllä yhtälöllä, joka kertoo miten aineen tiheys, paine ja virtausnopeus käyttäytyvät. Lisäksi Navierin–Stokesin yhtälö ottaa huomioon kitkan. Sitä on mahdoton ratkaista matemaattisen täsmällisesti ja siksi se kuvailee myös ilmiöitä, joita tavataan nimittää kaoottisiksi, kuten nesteen turbulenssia. Säätilan ennustamattomuus on sekin seurausta Navierin–Stokesin yhtälöiden luonteesta.



Mutta hydrodynamikka on efektiivinen teoria. Sen sijaan että





puhuisimme nesteestä, voimme puhua molekyylijoukosta, josta neste koostuu. Tässä kuvailussa ei tunneta lainkaan esimerkiksi kitkan käsitettä. On vain tiettyyn suuntaan virtaavia hiukkasia, jotka kulkiessaan samalla törmäilevät toisiinsa. Mutta kun keskiarvotamme kaikki mahdolliset hiukastörmäykset saamme täsmälleen Navierin–Stokesin yhtälön kitkatermeineen. Huolimatta sen suunnattomasta kompleksisuudesta, hydrodynamiikkakin yksinkertaistaa todellisuutta pikemmin kuin tuo siihen mitään uutta. Sen "emergentit" piirteet eivät ole seurausta salaperäisestä nesteholismista vaan johtuvat tiedon katoamisesta siirtyessämme molekyylikuvasta nestekuvaan. Se on kuvaus, joka on voimassa rajoitetulla alueella, aikaskaaloissa jotka ovat huomattavasti pitempiä kuin neste- tai kaasumolekyylien törmäystaajuudet. Monta erilaista molekyylijärjestystä tuottaa täsmälleen samanlaisen hydrodynaamisen kuvan. Tässä mielessä hydrodynamiikka ei ole yksikäsitteisesti palautettavissa "todellisempaan" molekyylikuvaan, vaikka se juontuukin vain ja yksinomaan molekyylien ominaisuuksista.

Efektiiivinen teoria ei siis ole yksikäsitteinen, vaan samasta perusilmioistä voidaan esittää useita keskenään yhteismitattomilta näyttäviä efektiiivisiä kuvauksia.

Vastaavasti kemia on eräs efektiiivinen kuvaus aineelle. Sen peruskäsitteet, molekyyli ja niiden väliset sidokset, ovat olemassa metrin kymmenesmiljardisosan kokoskaalassa. Kemian tiedetään olevan seurausta atomien uloimpien elektronien järjestyksistä, joiden muutosnopeudet ovat huomattavasti molekulaarisen maailman sisäistä kelloa nopeampia.

Käsite "kemiallinen sidos" syntyy kun summaamme elektronien kaikki havaitsemattomat, erilaiset liikeradat eräänlaiseksi keskiarvoksi. Tällainen keskiarvottaminen ei ole itse luonnon vaan sitä havainnoivan systeemin – ihmisen tai koelaitteen – rakenteellinen ominaisuus.

#### Epämääräiset kvantit, epämääräinen maailma?

Molekyyliä alemmilla tasoilla vastaan tulee atomien osasia, joilla niilläkin on oma rakenteensa. Tällöin lisäongelmaksi muodostuu, että mikrotasolla aineen käyttäytyminen perustuu kvanttifysiikkaan. Sen paradoksaalinen luonne on synnyttänyt jo seitsemänkymmentä vuotta jatkuneen filosofisen riidan teorian tulkinnasta.

1980-luvulla on syntynyt uusi suuntaus, joka on aivan erilainen kuin aikaisemmat tulkintapohdiskelut. Se ei lue ja tutki uskovaisen hartaudella Bohrin tai Heisenbergin lausumia vaan perustuu fysiikkaan. Voidaan ehkä sanoa, että se ratkaisee puolet kvanttifysiikan ongelmista ns. dekoherenssi-ilmion avulla.

Sen lähtökohta on yksinkertainen totuus: arkielämässä tapaamamme ainekimpaleet sisältävät valtaisan määrän atomeita, eikä yksikään niistä ole täysin eristetty ulkomaailmasta. Auringon valo, tuulen kuljettamat ilmamolekyyli, kosmiset säteet, luonnon oma radioaktiivisuus ja kaiken huippuna alkuräjähdyksestä virtaava mikroaaltosäteily – kaikki pommittavat meitä jatkuvasti. Ne iskeytyvät atomeihin, kimpoavat pois tai absorboituvat ja samalla muuttavat kohtaamansa atomin tilaa. Atomit tempoilevat sidoksissaan, nykivät viereisiä atomeita, törmäilevät, kieppuvat pakosalle tullakseen taas hetken kuluttua uudelleen vangituiksi.

Eräs näistä kvanttimekaniikan kyllästymiseen saakka kuvailluista paradokseista on ajatuskoe nimeltä "Schrödingerin kissa". Siinä kissa on suljettu laatikkoon yhdessä radioaktiivisesti hajoavan ainenäytteen kanssa.

Hajoamista ohjailee kvanttimekaniikka, emmekä voi tietää kuin tietyllä todennäköisyydellä, onko yksittäinen atomi hajonnut. Jos atomi kuitenkin hajoaa, sen hajoamistuote laukaisee mekanismin, joka särkee kuolettavan myrkkypullon. Silloin kissapolo heittää henkensä. Mutta emme tiedä, onko atomi hajonnut vai ei ennen kuin avaamme laatikon ja katsomme, onko kissa kuollut vai elävä. Sitä ennen atomi on kvanttimekaniikan mukaan epämääräisessä tilassa. Sen aaltofunktio sisältää niin hajoamisen kuin hajoamattomuudenkin mahdollisuuden.

Mutta eikö tuolloin Schrödingerin kissa ole myös epämääräisessä tilassa, puoliksi elävä ja puoliksi kuollut, niin kauan kunnes avaamme laatikon ja katsomme? On kuin tajunta aktiivisesti koko ajan loisi todellisuutta, kuin koko makroskooppinen maailma odottaisi epämääräisessä tilassa

piispa Berkeleyn haamua.

Mutta tosiasiaassa suurten, moniatomisten kappaleiden kvanttitila on hellittämättömän muutoksen kohteena. Ihmisen, rautatangon tai vaikkapa Schrödingerin kissan kvanttimekaaninen tila on kaikkien sen sisältämien osasten pikkuruisten todennäköisyysaaltojen summa.

Siinä triljoonat ja taas triljoonat aallot sammuttavat tai vahvistavat toisiaan. Mutta jokaisen ilmamolekyylin kosketus, jokainen atomitörmäys, jokainen Auringosta virtaavan neutriinin hipaisu muuttaa jotakin osa-aalloista. Siksi myös suuren kappaleen suuri todennäköisyysaalto, liki luvuttomien osa-aaltojen summa, muuttuu lakkaamatta. Jotta se pysyisi samana, sen osa-aaltojen täytyisi jatkuvasti värähdellä samalla, alussa määrättyllä tavalla. Mutta vuorovaikutusten vuoksi se ei ole mahdollista. Eri aaltojen nousut ja laskut ajautuvat epätahtisiksi kuin kelvottomien kellojen käynti. Tätä ilmiötä kutsutaan koherenssin menetykseksi eli dekoherenssiksi.

Kissan kvanttiaalto on kuin suuren rummun rytmikäs kumina, joka syntyy kokonaisen rumpaliarmeijan yhtäaikaisista iskuista. Mutta nämä rumpalit ovat kuuroja. Kun ulkomaailma niitä kerran potkaisee, ne menettävät tahtinsa eivätkä sitä enää osaa korjata oikeaksi. Pian alkuperäisestä rytmistä ei ole jäljellä muistoakaan. Sen on korvannut rumpalijoukon kakofoninen, musiikiton pärinä.

### Dekoherenssi, epämääräisyyden tuhoaja


Dekoherenssin vuoksi makroskooppinen kappale kiirehtii silmänräpäyksessä kvanttitilasta toiseen. Sekunnin aikana ihminen, rautatanko tai Schrödingerin kissa lepattaa myriadeissa eri tiloissa kuin lamppua kiertävä yöperhonen. Jos Schrödingerin kissa siis on elossa, se ei kvanttimielessä olekaan yksikäsitteisessä tilassa. "Elävä" tai "kuollut" on suuren kokoskaalan efektiivinen kuvaus, eikä ole yhtä yksittäistä mikroskooppista atomien järjestystä, joka vastaisi tilaa elävä tai kuollut. Ne ovat määreitä, jotka voidaan liittää triljooniin erilaisiin kissan kvanttitilojen kokonaisuuksiin. Mutta ihmisten tai kissojen maailmassa "elävä" ja "kuollut" ovat luonnollisesti osuvia ja hyviä kuvauksia. Niillä on meille merkitystä, koska elävät henkilöt hyvin harvoin muuttuvat spontaanisti kuolleiksi, eivätkä kuolleet nouse sijoiltaan takaisin elävien kirjoihin.

Silloin kun näin sanotaan tapahtuneen, puhutaan jo ihmeestä, jonka varaan voi perustaa kokonaisen uskonnon. Kokemuksen valossa efektiivinen kuvauksemme, kun se puhuu elävistä ja kuolleista, tavoittaa siis ihmisen jonkin oleellisen piirteen, mutta kvanttitasolla emme pystyisi sanomaan, mihin me silloin viittaamme.

Kuvitellaanpa, että Schrödingerin kissa on suljettu laatikkoonsa ja että radioaktiivisen atomin hajoamisen takia kissa on nyt epämääräisessä tilassa elävä ja kuollut. Mitä tämä itse asiassa tarkoittaa? Osaan kissan kvanttitiloista voimme selkeästi liittää määreen "elävä", osaan "kuollut", mutta loput liki luvuttomat tilat ovat epämääräisiä. Kun atomi on hajonnut, kissa on jossakin näistä epämääräisistä tiloista. Mutta se ei millään voi pysyä samassa tilassa. Kissan ympäristö tönnii jatkuvasti sen atomeita. Laatikossa on ilmaa, sen seinämät ovat vuorovaikutuksessa kissan kanssa, luonnon oma radioaktiivisuus ei jätä kissaa rauhaan, ja pitääpä kissapolon hengittääkin säilyttääkseen edes jonkin elämän merkin epämääräisessä tilassaan.


Näin Schrödingerin kissan muodostavien luvuttomien todennäköisyysaaltojen alkuperäinen suhde alkaa vääristyä. Elävä osa kyllä pysyy elävänä ja kuollut kuolleena, mutta kumpainenkin kiirehtii alati uuteen kvanttitilaan kuin vainun saanut vihikoira. Tämä kaikki tapahtuu sekunnin murto-osissa. Kissan aaltofunktio ikään kuin levittäytyy kaikkiin eläviin tiloihin ja kaikkiin kuolleisiin tiloihin. Sen sijaan että se pysyisi siististi alkuperäisessä, matemaattisen täsmällisesti määritellyssä tilassa elävä ja kuollut, versio 1.01, sen aaltofunktio sisältää hetken kuluttua kaikki mahdolliset elävät ja kuolleet tilat.

Tämä kaikki kuulostaa pahalta. Aivan kuin epämääräisessä tilassa ei jo olisi ollut tarpeeksi kestämistä, nyt meidän tulee vielä totutella ajatukseen, että kvanttikissa ei edes ole pysyvää olento. Mutta lopussa seisoo sittenkin kiitos: elävät aallot summautuvat keskimääräisessä mielessä suureksi eläväksi aalloksi, ja kuolleet aallot summautuvat suureksi kuolleeksi aalloksi. Mutta koska elävä ei muutu kuolleeksi eikä kuollut eläväksi, epämääräisiä tiloja kuvaavien aaltojen keskiarvo on




suurella tarkkuudella nolla. Elävällä ja kuolleella ei ole keskenään interferenssiä, kuten kvanttimekaniikan kielellä sanoisimme. Vuorovaikutukset, joiden ansiosta kissan aaltofunktio lähti vaeltelemaan kaikkien mahdollisten tilojen lävitse, johtavat siis siihen, että käytännössä epämääräiset tilat katoavat tyystin. Jokaiseen havaintoonhan kuluu aina aikaa, ja sen vuoksi havainnot ovat aikakeskiarvoja. Tämän vuoksi kissa näyttää silmänräpäyksessä lipuvan tilaan, jossa se on tietyllä todennäköisyydellä kuollut ja tietyllä todennäköisyydellä elävä, samaan tapaan kuin jossakin klassisen fysiikan tilastollisessa teoriassa.


### Nopeakin se on




Enää emme tarvitse ulkoista tietoisuutta romauttamaan kissan epämääräistä elämäntilannetta. Kissa on joko kuollut tai elävä, katsomme sitä tai emme. Jos tiedämme laatikossa olevan radioaktiivisen aineen hyvin myrkylliseksi, kissa on suurella todennäköisyydellä kuollut jo aikoja ennen kuin avaaamme kannen.



Väitteet, joiden mukaan epämääräinen maailma tulee olevaiseksi vain kun se havaitaan, paljastuvat dekoherenssin kirkaassa valossa valjuiksi ja vääriksi. Se pyyhkäisee kerralla syrjään spekulatiot tietoisuuden välttämättömyydestä havainnossa.




Eikä tämä kaikki ole vain pelkkää teoreettista haihattelua. Vuonna 1996 joukko ranskalaisia tutkijoita nimittäin onnistui näkemään dekoherenssin kehittymisen laboratoriossa. Tämä tapahtui uusien kokeellisten menetelmien ansiosta, joiden avulla yksittäisten kvanttien käsittely on mahdollista. Näin tutkijat pystyivät vaihtelevaan "Schrödingerin kissan" kokoa ja mittaamaan, mitä tapahtui kun muutamasta kvantista koostuva "kissa" kasvatettiin suuremmaksi eli lähemmäs makroskooppista tilaa. Tällöin "kissatilan" nähtiin dekoherenssin odotusten mukaisesti kehittyvän nopeasti epämääräisestä kvantti-tilasta klassiseksi tilaksi. Dekoherenssi ja siitä seuraava epämääräisen tilan katoaminen on luonnossa erittäin nopeaa. Kvanttifysikot Erich Joos ja Dieter Zeh ovat arvioineet, että kymmenen mikrometrin suuruisen tomuhiukkaseen dekoherenssi tapahtuu lähes käsittämättömällä vauhdilla, sekunnin triljoonasosan triljoonasosassa. Siinä on desimaalipiikun jälkeen jo niin monta nollaa ettei olisi väliksi, vaikka yksi triljoonasosa puuttuisikin. Tämän salamaakin nopeamman muutoksen saavat yksinkertaisesti aikaan ilmamolekyylien törmäykset tomuhiukkaseen.




Kvanttifysiikan todennäköisyyslunnetta ei dekoherenssikaan muuta miksikään. Emme edelleenkään voi tietää muuta kuin että kissa on kuollut tai elävä tietyllä todennäköisyydellä. Mutta kvanttifysiikan paradoksien kenties järjenvastaisin piirre, makroskooppisten kappaleiden mahdollisuus oleskella epämääräisessä tilassa, puoliksi kuolleina ja puoliksi elävinä eräänlaisessa purgatoriossa odottamassa ulkoisen havainnon tuomaa vapautusta, poistuu – efektiivisesti.


### Efektiivinen elämysmaailma




Koko klassinen maailmamme on siis vain efektiivinen. On kuin kuvaisimme ulkomaailmaa aikavalotuksella. Katunäkymää seuraava kamera, jonka suljin pysyy tarpeeksi kauan auki, menettää jalankulkijoiden terävät piirteet. Autot venyvät suttuisiksi pötkäleiksi, ja jos valotusaika on tavattoman pitkä, sekä ihmiset että autot katoavat kuvasta kokonaan. Vain hienoinen huntu jykävien, liikkumattomien talolaivojen edessä paljastaa enää niiden olemassaolon. Taivaalla risteilevät pilvet maalaavat taivaankannen tasavärisiksi, ja lopulta, valotusajan pidentyessä vuorokausien mittaiseksi, yön ja päivän erokin hukkuu ikuisen aamuhämärään.




Tämä on emergenssiä, joka kuitenkin ei ole millään tavoin ristiriidassa puhtaan reduktionismin kanssa. On ilmeistä, että myös ihmisen havaintomaailma perustuu efektiiviseen kuvailuun. Me emme näe alkeishiukkasia tai edes molekyylejä, sillä siihen aistimme ovat liian karkeat. Neuronien liipaisunopeuksien ja hermosignaalien pulssinleveyksien vuoksi emme kykene mieltämään muutamaa millisekuntia nopeampia tapahtumia. Elinympäristömme hahmottuu meille kokomme ja sisäisen biokemiamme vuoksi alirakenteensa ajallisina ja avaruudellisina (mahdollisesti painotettuina) keskiarvoina.



Selvää onkin, ettei esimerkiksi punaisen näkeminen ole yksittäinen, täysin hetkellinen tapahtuma. Tietoiseksi tuleminen



kestää aina jonkin aikaa, tyypillisesti satakunta millisekuntia. Sinä aikana hermosignaali, joka kulkee parikymmentä metriä sekunnissa, voisi edetä aivot päästä päähän moneen kertaan. Siksi ei kenties olekaan yllättävää, että elämysmaailmamme tuntuu niin erilaiselta verrattuna hermosignaalien sähkökemialliseen maailmaan. Karkeistuksen ja siitä johtuvan informaation katoamisen vuoksi todellisuutemme poikkeaa sen viime kädessä määrittämien perusolioiden todellisuudesta, aivan kuten hydrodynamiikka on tyystin erilaista verrattuna molekyylien ja atomien maailmaan, tai klassinen fysiikka erilaista kvanttifysiikkaan verrattuna.



*Kirjoittaja on teoreettisen fysiikan dosentti Helsingin yliopiston Teoreettisen fysiikan laitoksella. Häneltä ilmestyy tänä syksynä kirja "Olemisen porteilla" (WSOY 1998). Kirjassa käsitellään laajemmin tätä emergenssiä ja reduktionismia fysiikan näkökulmasta ja selvittää kvanttifysiikan ja tietoisuuden ongelmia.*

[kari.enqvist@rock.helsinki.fi](mailto:kari.enqvist@rock.helsinki.fi)

