

Mekaniikan kvanttimekaniikkaa – kvanttifysiikan ja klassisen maailman rajapinta

Mika A. Sillanpää

Fysiikan maailmankuva koostuu teorioista, joista kukin pätee kun tilanne on erilaisten parametrien suhteen sopiva. Teorioita ovat esimerkiksi klassinen mekaniikka, sähkömagnetismi, termodynamiikka, kvanttimekaniikka ja suhteellisuusteoria. Vaikka teoria voi antaakin pätevyysalueensa ulkopuolella vääriä ennusteita, mikään yleisesti hyväksytyistä teorioista ei ole väärä, vaan kyse on siitä, että fysiikkaa tehdään rakentamalla uutta vanhan kivijalan päälle.

Kohtuullisen hitaasti liikkuvat suurehkot kappaleet lienevät kaikkein arkoimpia fysiikan malliesimerkkejä. Newtonin lait ovat kuvanneet massiivisten kappaleiden liikettä ja vuorovaikutuksia tavattoman menestyksekkäästi ja tarkasti jo yli 300 vuotta. Klassisen mekaniikan intuitiivisilla opeilla lennetään Plutoon saakka. Kaukana arkielämästä, hyvin pienessä mittakaavassa ja pienillä energioilla, puolestaan ilmenee luonnonlakeja, jotka vaikuttavat arkijärjen vastaisilta. Aineen perusrakennepalikoiden, esimerkiksi atomien ja alkeishiukkasten ymmärtämiseksi tarvitaan kvanttifysiikkaa, jonka mukaan aine ja energia koostuu pienistä paketeista, kvanteista. Kvanttifysiikan mukaan aine ja energia voi toisaalta joissain tilanteissa käyttäytyä myös aaltoliikkeen tavoin, jolloin sitä kuvataan aaltofunktiolla, joka sisältää kaiken mahdollisen informaation

systemistä. Näiden mikromaailman lakien tarkka ymmärrys on muun muassa kaiken modernin elektroniikan perusta. Jos alkeishiukkaset ovatkin hyvin suurienergisia, kvanttimekaniikkaan tulee pieniä korjauksia sekä suppeasta suhteellisuusteoriasta että hiukkasfysiikan niin sanotusta standardimallista. Viimeinen ääripää ovat hyvin massiiviset ja hyvin suurienergiset kappaleet, eli käytännössä kosmiset ilmiöt. Näiden kvantitatiiviseen ymmärtämiseen tarvitaan yleistä suhteellisuusteoriaa.

Fyysisen todellisuuden luokittelu muuttamaan kategoriaan johtaa kysymykseen, miltä maailma näyttää ei-kenenkään-maalla kahden teorian pätevyysalueen välimaastossa. Kyse on paljon muustakin kuin semantiikkaa siitä, kuinka suurta kappaletta voidaan pitää neulana, jotta voidaan laskea kuinka monta enkeliä sen päähän mahtuu. Raja-alueilla vallitsee täysin uusi ilmiömaailma, ja mahdollisesti siellä on odottamassa jotain täysin odottamatonta. Seuraavassa keskitytään siihen, mitä tapahtuu arkipäivän maailman ja kvanttifysiikan maailman välimaastossa.

Fysiikan logiikka on raadollisen reduktionistista, eli ilmiö pyritään ymmärtämään paloittelemalla se osiin, ja katsomalla alemmalta tasolta. Koska kaikki aine koostuu atomeista, periaatteessa siis myös arkielä-

män kokoisten eli makroskooppisten kappaleiden tulisi noudattaa kvanttifysiikan erikoisia lakeja, kuten esiintyä superpositiotiloissa, joissa kappale on esimerkiksi yhtäaikaan sekä siellä että täällä. Äärimmäisen esimerkin esitti Erwin Schrödinger 1930-luvulla [1]. Schrödingerin kissaparadoksissa kissa laitetaan suljettuun laatikkoon, jossa se voi päätyä tilanteeseen, jossa se on yhtäaikaan elävä ja kuollut. Vasta mittaus eli laatikon avaaminen ja kissan elotilan toteaminen romahduttaa kissan aaltofunktion jompaankumpaan vaihtoehtoon. Kokemuksesta voimme kuitenkin sanoa, että kvanttimekaniikan ennustamia superpositiotiloja, esimerkiksi eläviä-kuolleita kissoja, ei normaalisti ympärillämme liiemmästi esiinny.

Selitys siihen, miksi emme havaitse superpositioita ympärillämme on ollut fyysikoille vaikea pähkinä purtavaksi, ja varsin hyvä ymmärrys asiasta on kehittynyt vasta 1980-luvulla [2]. Nykyisen tulkinnan mukaan hiukkasen tai kappaleen ympäristö oleellisesti jatkuvasti mittaa kappaleen tilaa, ja näin ollen – valtavan nopeasti tai vähitellen kappaleen koosta riippuen – kvanttimekaanisuuden vuotaminen ympäristöön romahduttaa kappaleen aaltofunktion. Vaikka siis tila olisi alun perin ollut superpositio, lopulta päädytään klassiseen tilaan. Ilmiötä kutsutaan dekoherenssiksi. Romahtamisen aikaskaala riippuu valtavan voimakkaasti kappaleen koosta ja muun muassa lämpötilasta. Kissan kokoisen kappaleen dekoherenssiajalle voidaan tehdä seuraavia karkeitä arvioita. Jos nostetaan kissa pöydälle, ilmamolekyylien lämpöliike romahduttaa kissan aaltofunktion jo ennen kuin ehdit sanoa kissaakaan – noin 10^{-45} sekunnissa. Tällä skaalalla aikaa ei välttämättä ole edes kunnolla olemassa. Melko fundamentaali raja dekoherenssille saadaan, jos eliminoidaan kaikki ympäristö paitsi auringon neutriinosäteily, jonka poistamisen teknologisenä es-

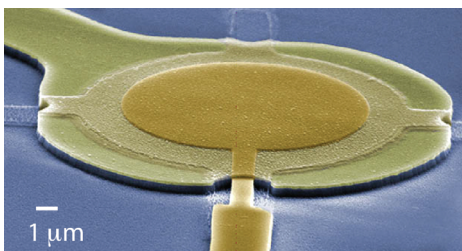
teenä on vaadittava valovuoden paksuinen lyijykerros. Tällöin koherenssiaika on suuruusluokkaa 10^{-13} sekuntia. Vaikka laboratorioissa voidaan joissain optisissa mittauksissa päästä käsiksi hyvin nopeisiin 10^{-15} sekunnin ilmiöihin, mainittu lyhyt aikaskaala, jonka kuluessa valo etenee alle hiuksen paksuuden mittaisen etäisyyden, tekee pelkän mittaamisen mahdottomaksi. Eläviä-kuolleita kissoja emme siis koskaan tule näkemään, mutta pienempien kappaleiden vähemmän eksoottiset superpositiot ovat mahdollisia – itse asiassa todellisuutta.

Tärkeä suuntaus modernissa fysiikassa on ymmärtää ja havaita lähes makroskooppisessa mittakaavassa mahdollisesti ilmenviä kvanttifysiikan mukaisia ilmiöitä. Tässä tutkimuksessa, kuten perustutkimuksessa aina, merkittävin motivaatio on sovittaa maailmankuvaamme uusia tai puuttuvia paloja. Uudesta fysiikasta syntyy kuitenkin usein myös uutta teknologiaa. Tässä tapauksessa sovelluksia on luvassa kvanttimekaanisen tietojenkäsittelyn parissa, mutta ei vielä aivan lähivuosina.

Alussa mainitut hitaasti liikkuvat suu-rehkot kappaleet lienevät kaikkein klassisimpia fysikaalisia systeemeitä. Yllättäen aivan viime vuosina niiden liikkeessä on monimutkaisissa mittauksissa havaittu klassisen fysiikan vastaisia ilmiöitä, eli nimenomaan tässäkin artikkelissa mainittuja Schrödingerin kissan kanssa jossain mielessä analogisia ilmiöitä. Eräs tapa lausua ehto sille, missä tilanteissa kvanttimekaanisia ilmiöitä voi havaita, on että hiukkasen tai kappaleen de Broglie -aallonpituus, joka saadaan jakamalla Plancin vakio kappaleen liikemäärällä, on samaa luokkaa kuin joku merkittävä kokoskaala systeemissä. Käsin kosketeltaville kappaleille nämä skaalat ovat poskettomia, mutta mikrometrieni kokoluokan suuruisille mikro- ja nanomekaanisille värähtelijöille tämä mittaskaala on

saavutettavissa erittäin matalissa lämpötiloissa lähellä absoluuttista nollapistettä noin -273° lämpötilassa.

Liikkuvan kappaleen, eli käytännössä mikromekaanisen värähtelijän, kvanttimekaanisia ominaisuuksia tavoiteltiin kokeellisesti vuosikymmeniä. Työ muodostui tutkimusryhmien väliseksikilpajuoksuksi, jossa jahdattiin Graalin maljaa eli mekaanisen systeemin kvanttimekaanista perustilaa. Perustila saavutettiin ensi kerran vuonna 2010 [3]. Tämä työ, joka tehtiin professori Andrew Clelandin johtamassa tutkimusryhmässä University of California Santa Barbaran yliopistossa, valittiin Science-lehdessä vuoden tieteelliseksi läpimurroksi. Työssä käytettiin mikromekaanista värähtelijää, joka oli teknologialtaan ja ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen kuin muun muassa matkapuhelimissa suodattimina käytettävät pietsosähköiset ohutkalvot. Samassa työssä havaittiin myös ensi kertaa merkejä epäklassisista liikeiloista mikromekaanisessa värähtelijässä. Tämän jälkeen kvanttimekaanisen perustilan tai epäklassisia ilmiöitä ovat havainneet useat eri tutkimusryhmät hieman erilaisissa kokeellisissa toteutuksissa [4–8].



Kuva 1. Aalto-yliopiston mikromekaaninen rumpuresonaattori. Elektronimikroskooppikuvassa näkyy 15 mikrometrin läpimittainen ohut alumiinikalvo, joka värähtelee noin 50 nanometrin päässä toisesta metallikalvosta, joka on kvartsisirun päällä. Rumpu on kytketty suprajohtavaan mikroaaltotaajuiseen sähkömagneettiseen ontelovärähtelijään.

Aalto-yliopistossa teknillisen fysiikan laitoksella tehdyissä mittauksissa on käytetty kuvan 1 näköistä suprajohtavasta alumiinikalvosta valmistettua mikrorumpua, joka värähtelee korkealla noin 10 MHz ultraäänitaajuudella. Kyseessä on siis aivan samanlainen äänivärähtely kuin musiikissa käytettävissä rumpusoittimissa, tosin eri kokoskaalassa. Mittauksia varten rummun viereen samalle noin 5 mm kokoiselle kvartsisirulle on valmistettu litografiamenetelmällä suprajohtava mikroaaltoresonaattori. Kun nämä kaksi värähtelijää kytketään toisiinsa, ne alkavat vaihtaa kvantteja, mikä mahdollistaa rummun mekaanisen värähtelyn kontrolloinnin mikroaaltosignaaleilla. Kokeet tehdään laimennusjäähdyttimessä noin 10 milli-Kelvinin lämpötilassa, jolloin mekaaninen värähtely on kohtuullisen lähellä kvanttimekaanista perustilaa.

Aalto-yliopiston mittauksissa osoitettiin äskettäin ensimmäistä kertaa, kuinka mekaaninen värähtelyliike voidaan saattaa niin sanottuun puristettuun kvanttitilaan [8]. Ajatus massiivisen kappaleen puristusta kvanttitalasta kehiteltiin jo 1970-luvun lopulla potentiaalisena tapana parantaa mekaanisiin värähtelijöihin perustuvien gravitaatioantennien herkkyyttä [9, 10]. Missä tahansa värähtelevässä systeemissä on perustilassakin nollapistevärähtelyjä, eli kvanttimekaniikassa mikään ei ole aivan paikallaan. Nollapistevärähtelyiden aikaansaama kohina on herkässä mittausteknologiassa joskus merkittävä ongelma. Tämä pätee kuitenkin vain keskimääräisessä mielessä, mikä yleensä ilmaistaan Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen muodossa, eli että esimerkiksi hiukkasella ei ole yhtäaikaan hyvin määriteltyä paikkaa ja liikemäärää. Kvanttimekaniikkaa voi kuitenkin huijata, jos sen tekee niin nopeasti, ettei Heisenberg näe. Nollapistevärähtelyistä voi nimittäin päästä eroon jaksottaisesti, jolloin ko-

hina voi olla hetkittäin mielivaltaisen pientä. Aalto-yliopiston värähtelevän rumpukalvon puristettu kvanttityla voidaan siis tulkitella tilanteena, jossa on hetkittäin hiljaisempaa kuin hiljaisuus.

Tulevaisuudessa mekaanisten systeemi-
en kvanttimekaniikkaa pyritään ymmärtämään yhä suuremmissä kokoskaaloissa. Kaikkein eriskummallisissa kvanttimekaniikan ennuste on lomittuminen. Kaksi hiukasta tai kappaletta voi päätyä lomittuneeseen kvanttitylaan, jossa ne jakavat toistensa ominaisuuksia. Kappaleet voivat olla periaatteessa hyvinkin kaukana toisistaan. Erityisesti toisen niistä mittaaminen näyttää vaikuttavan toisen ominaisuuksiin ilman aikaviivettä, ikään kuin ne edelleen vuorovaikuttaisivat. Einstein kritisoi voimakkaasti tällaista ilmiötä fyysisen todellisuuden vastaisena [11], mutta sittemmin

useissa kokeissa on osoitettu [12, 13], että Einstein oli väärässä ja kvanttimekaniikka oikeassa. Lomittumisen havaitseminen liikkuvien kappaleiden välillä on eräs lähivuosien merkittävistä tavoitteista kvanttimekaniikan perustutkimuksessa.

Muun muassa Roger Penrose on ehdottanut [14], että mahdollisesti on olemassa fundamentaali raja sille, kuinka suuret kappaleet voivat olla kvanttimekaanisia. Tämä voisi johtua siitä, että gravitaatio romahduttaa makroskooppisen kappaleen aaltofunktion. Teoreettiset mallit muun muassa kvanttigravitaatiosta johtuvista korjauksista kvanttimekaniikan perusyhtälöihin ovat vielä melko hataralla pohjalla, mutta on alettu huomata, että kvanttimekaaniset mekaaniset systeemit voivat olla loistavia testisysteemejä tällaisten hyvin fundamentaalien ilmiöiden kokeelliselle tutkimiselle [15, 16].

Viitteet

- [1] Schrödinger, E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften* 23, 807 (1935).
- [2] Zurek, W. H. Environmentinduced superselection rules. *Phys. Rev. D* 26, 1862–1880 (1982).
- [3] O’Connell, A. D. et al. Quantum ground state and singlephonon control of a mechanical resonator. *Nature* 464, 697–703 (2010).
- [4] Teufel, J. D. et al. Sideband cooling of micro-mechanical motion to the quantum ground state. *Nature* 475, 359–363 (2011).
- [5] Chan, J. et al. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state. *Nature* 478, 89–92 (2011).
- [6] Safavi-Naeini, A. H. et al. Observation of quantum motion of a nanomechanical resonator. *Phys. Rev. Lett.* 108, 033602 (2012).
- [7] Palomaki, T. A., Teufel, J. D., Simmonds, R. W. & Lehnert, K. W. Entangling mechanical motion with microwave fields. *Science* 342, 710–713 (2013).
- [8] Pirkkalainen, J.-M., Damskägg, E., Brandt, M., Massel, F. & Sillanpää, M. A. Squeezing of quantum noise of motion in a micromechanical resonator. *Phys. Rev. Lett.* 115, 243601 (2015).
- [9] Hollenhorst, J. N. Quantum limits on resonant-mass gravitationalradiation detectors. *Phys. Rev. D* 19, 1669–1679 (1979).
- [10] Grishchuk, L. P. & Sazhin, M. V. Squeezed quantum states of a harmonic oscillator in the problem of gravitational wave detection. *Sov. Phys. JETP* 57, 1128–1135 (1983).
- [11] Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. Can quantummechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).
- [12] Aspect, A., Dalibard, J. & Roger, G. Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804 (1982).
- [13] Hensen, B. et al. Loopholefree bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature* 526, 682–686 (2015).
- [14] Penrose, R. On gravity’s role in quantum state reduction. *General Relativity and Gravitation* 28, 581–600.
- [15] Pikovski, I., Vanner, M. R., Aspelmeyer, M., Kim, M. S. & Brukner, C. Probing Planck-scale physics with quantum optics. *Nature Physics* 8, 393–397 (2012).
- [16] Bahrami, M., Paternostro, M., Bassi, A. & Ulbricht, H. Proposal for a noninterferometric test of collapse models in optomechanical systems. *Phys. Rev. Lett.* 112, 210404 (2014).