

Kvanttimaailmaa on katsottava syrjäsilmillä

Jukka Pekola, Aalto-yliopiston fysiikan professori, johtaa kvanttiteknologian huippuyksikköä. Se jatkaa uudella kokoonpanolla matalien lämpötilojen kvantti-ilmiöiden ja laitteiden tutkimusta, jolla oli niin ikään huippuyksikön status. Joko voimme odottaa kvanttietokoneita kauppojen hyllyille?

Albert Einstein oli aikoinaan pöyristynyt kvanttimekaniikan luomasta kuvasta, jonka mukaan hiukkasmaailmassa kaikki perustuu todennäköisyyksiin ja sattumaan. Sadassa vuodessa hiukkasen outoja ominaisuuksia on kuitenkin onnistuttu valjastamaan tekniikan käyttöön ja sovellukset ovat jo makroskooppisella tasolla.

– Kvantti-ilmiöiden hyödyntämisessä on oleellista, että pystytään luomaan systeemejä, jotka voidaan eristää ympäröivästä maailmasta, Jukka Pekola selvittää.

– Niiden evoluutio määräytyy kvanttimekaniikan unitarisesta kehitymisestä, jossa ulkopuoliset häiriöt eivät pääse vaikuttamaan. Kvanttimaailman annetaan elää omaa elämäänsä, kunnes katse kohdistetaan suoraan siihen: tehdään mittausta ja luetaan tulos.

Tuloksen lukeminen vastaa kvanttimekaniikan kuuluisaa kööpenhaminalaistulkintaa: tila romahtaa. Se antaa satunnaisia tuloksia sen mukaan, minkälaisessa superpositiossa tai lomittuneessa tilassa systeemi sillä hetkellä on.

Avoimissa kvanttisysteemeissä on aina kuitenkin jonkin verran kytkentää ympäröivään ulkomaailmaan. Se on tärkeää, jotta niitä pystytään kontrolloimaan – tai ylipäätään hyödyntämään. Jos systeemi on totaalaisesti irrallaan muusta maailmasta, siitä ei saada mitään irti.

Kvanttietokone, yksi kvanttiteknologian sovelluksista, jolta odotetaan paljon, voi tuntua äkkiseltään sisäisesti ristiriitaiselta käsitteeltä. Miten

kvanttimaailman satunnaisuudet ja todennäköisyydet sopivat eksakteja tuloksia antavan tietotekniikan käyttöön?

– Jos systeemi on eristetty ympäristöstään, se noudattaa uskollisesti Schrödingerin yhtälöä. Systeemin tila kehittyy täysin deterministisesti. Kun kyse on superpositiosta, tila voi vastata samanaikaisesti ykköstä ja nollaa. Sitten kun systeemin tila luetaan, se on jompi kumpi, joko ykkönen tai nolla. Siinä vaiheessa epämääräisyys katoaa.

Kvanttimaailman kaksijakoista, ehkä jopa jakomielistä luonnetta havainnollistetaan usein Erwin Schrödingerin itsensä kehittämällä ajatuskokeella laatikkoon suljetusta kissasta. Sen kohtalo riippuu siitä, vapauttaako yksittäisen atomiytimen radioaktiivinen hajoaminen laatikkoon myrkyä. Hajoamisen todennäköisyys on kvanttimekaniikan lainalaisuuksien mukaan 50 prosenttia, joten kissa on yhtä aikaa elävä ja kuollut, kunnes laatikko avataan ja eläimen tila todetaan.

Ajatuskoe tulkitaan yleensä juuri näin eli virheellisesti: kissa ei ole yhtä aikaa elävä ja kuollut. Se on makroskooppinen olio, joka ei voi olla superpositiossa – samanaikaisesti sekä elävä että kuollut – siten kuin kvanttimaailman hiukkanen tai kvanttitila, joka voi olla yhtä aikaa sekä ykkönen että nolla.

Yhä pidempiin elinaikoihin

Kvanttiteknologian tutkimuksessa yhtenä keskeisenä tavoitteena on päästä pois hiukkasen ahtaasta elinpiiristä makroskooppisiin ilmiöihin. Siinä suhteessa on tapahtunut huomattavaa edistystä.

– Kvanttiteknologian huippuyksikössä ollaan tekemisissä silmälle nähtävien systeemien kanssa. Esimerkiksi suprajohdilla rakenteilla on läpimittaa kymmeniä tai jopa satoja mikrometrejä. Silti ne ovat riittävän eristettyjä ympäröivästä maailmasta, jotta niiden evoluutio noudattaa Schrödingerin yhtälöä.

Makroskooppisten kvanttisysteemien jäljille päästiin 1980-luvulla. Silloin alettiin ounastella, että sähköiset piirit on mahdollista saada toimimaan kvanttimekaanisesti. Teknisesti ja käytännössä siihen oli kuitenkin hyvin haasteellista päästä.

– Tänä keväänä tulee kuluneeksi 20 vuotta siitä, kun ensimmäinen suprajohdava kvanttibitti eli

kubitti saatiin toteutettua. Tosin sen ”elinaika” oli vain nanosekunnin luokkaa, sen pidempään sitä ei pystytty pitämään erillään ympäröivästä maailmasta.

Sen jälkeen kehitys on ollut huimaa. Nykyisin päästään melkein millisekuntiin eli parannus on yli satatuhatkertainen. Millisekunti eli tuhannesosasekunti on pitkä aika Schrödingerin yhtälölle ja kvanttimaailman ilmiöille.

– Sitten ympäristö alkaa vähitellen tihkua systeemin sisään ja sen aiheuttamat häiriöt toimivat eräänlaisena ”mittarina”, joka romahduttaa tilan.

Kvanttitilan elinajan pidentäminen ei ole mikään itsetarkoitus tai asia, jossa tähdätään yhä uusiin ennätyksiin. Aika on oleellinen tekijä sen suhteen, kuinka paljon operaatioita ehditään tehdä ennen kuin tila katoaa.

– Kun yhteen operaatioon menee aikaa nanosekunti tai allekin, millisekunnissa pystytään tekemään jo varsin paljon. Keskeistä on eliniän ja operaation keston välinen suhde. Sitä pyritään jatkuvasti kasvattamaan.

Tekniikan kehittyessä ja materiaalien optimoinnin parantuessa päästään yhä pidempiin kvanttitalan elinaikoihin, mutta sitten alkavat tulla vastaan toisenlaiset ongelmat. Tarvittavat laitteistot alkavat olla niin monimutkaisia ja myös fyysisesti niin kookkaita, että niiden liittäminen yhteen on hankalaa.

– Kolmiulotteisiin kubitteihin saattaa liittyä jopa senttimetrien kokoluokkaa olevia resonattoreita. Jos sitten halutaan rakentaa järjestelmä, jossa on paljon kubitteja, siitä tulee helposti melko kookas. Esimerkiksi kvanttietokoneita kehitettäessä tarvitaan resursseja muun muassa virheenkorjaamiseen, jolloin tarvittavien kubitien määrä kasvaa suureksi.

Yksi keskeisistä kysymyksistä liittyy energiansiirtoon kvanttitilaympäristöjen välillä: millaisia vuorovaikutuksia siinä esiintyy. Toinen kysymys on, miten termodynamiikka toimii kvanttimaailmassa. Termodynamiikka on isojen systeemien keskimääräisen kehittymisen teoria, joten sen soveltaminen prosessiin, jossa on vain yksittäisiä tapahtumia, on haastavaa.

– Kvanttitilaympäristöjen määrittäminen edellyttää esimerkiksi yksittäisten mikroaaltofotonien mittaamista. Systemi säteilee energiaa foto-

neina ja niiden perusteella saadaan selville, mitä siellä tapahtuu.

Eri alojen yhteistyötä

Kvanttitekniikan huippuyksikössä on mukana Aalto-yliopiston lisäksi Turun yliopisto ja Teknologian tutkimuskeskus VTT. Päävastuu on koordinoivana tahona Aallolla, missä tehdään sekä perus- että soveltavaa tutkimusta. Turusta tulee teoreettista tietotaitoa, VTT on nimensä mukaisesti osa teknistä puolta.

Kvanttitekniikan tutkimus onkin eräänlainen hybridiala, sillä siinä tarvitaan sekä vankkaa teoreettista osaamista että sitä soveltavaa teknistä työtä. Yksi keskeisistä sovellusalueista ovat kvanttisensorit, joiden tutkimusta Otaniemessä on tehty jo pitkään.

– Esimerkiksi squireja eli suprajohtavia kvantti-interferenssilaitteita on meillä kehitetty jo 1960-luvulta lähtien. Niitä on käytetty aivomagnetoetreissa ja muissa äärimmäisen herkissä ilmaisimissa. Nyt ollaan siirtymässä seuraavaan vaiheeseen, jossa niitä voidaan hyödyntää kvantti-koherentteina eli kvanttitalaa ylläpitävinä laitteina.

Kvanttitekniikan tutkimuksessa yksi keskeinen tavoite on kehittää kvanttietokone, joka mullistaisi tietojenkäsittelyn. Siihen on kuitenkin vielä matkaa, mutta kvanttitekniikka on jo hiipinyt sovellusten maailmaan, jopa ihmisten arkeen. Se on tapahtunut yhtä vaihkeisesti kuin monen muunkin tieteellisen ja teknisen läpimurron tapauksessa.

Siinä on yksi syy käsitykseen, että tiede ja tekniikka etenevät yksittäisinä neronleimauksina ja keksintöinä. Esimerkiksi puhelimen keksijänä pidetään Alexander Graham Belliä, mutta ennen kuin hän sai puhetta sähköisesti siirtävän laitteensa toimimaan, asiaa oli tutkittu jo pitkään ja sen kimpussa oli ahertanut lukuisia tutkijoita.

Siksi perustutkimus on tärkeää, vaikka nykypäivänä sen merkitystä ei ymmärretä tarpeeksi laajasti. Sovellukset eivät synny tyhjästä, mutta toisaalta tutkimus ei myöskään voi tähdätä vain tiettyyn lopputulokseen. Vaikka kvanttitekniikan sovelluksia on olemassa jo nyt ja lisää on näköpiirissä, alan tutkimus on vielä suurelta osin perustutkimusta, pohjan luomista nykyisten sovellusten kehittämiseksi ja uusien luomiselle.

– Esimerkiksi kvanttisimulaattoreilla voidaan mallintaa erilaisia systeemeitä, jolloin saadaan tietoa muun muassa lääkkeiden ja muiden kemiallisten yhdisteiden kehittämistä varten. Erityisen merkittäviä ovat kvanttilämpövoimakoneiden kohdalla puolestaan tutkitaan, onko kvantti-ilmiöitä mahdollista käyttää entistä tehokkaampaan energiantuotantoon, Pekola listaa.

– Kvanttitekniologiaa on sekin, että saadaan siirrettyä varauksia yksi kerrallaan. Tällä hetkellä tavoitteena on todellisten kvanttitilojen, superpositioiden ja lomittuneiden tilojen, luominen. Kvanttimetrologia, mittaustekniikka ja -tiede, perustuu jo nyt kvanttitekniologiaan. Se on osa arkea, vaikka suuri yleisö ei sitä edes huomaa.

Kubiteilla numeroita murskaamaan

Osa huippuyksikön tutkimuksesta kohdistuu suprajohtavien järjestelmien lisäksi myös kaksidimensioisiin, hiileen perustuviin materiaaleihin, kuten grafeeniin, sekä optiikkaan liittyviin ilmiöihin. Varsinainen veturi on kuitenkin kvanttietokone ja siihen liittyvät haasteet.

Kvanttietokoneen kehittämiseen kannustaa lupaus huimasti nykyistä paremmasta laskentatehosta. Nykyisillä tietokoneilla datamäärän kasvaessa laskenta-aika pitenee joskus eksponentiaalisesti, mutta kvanttimaailman ilmiöitä hyödyntämällä homma hoituu polynomisessa eli paljon lyhyemmässä ajassa.

– Käytännössä laskenta-aika romahtaa murtoosaan aiemmasta. Siihen päästään itse asiassa jo melko vähäisellä määrällä loogisia kvanttititeitä. Se kuitenkin edellyttää rajoittamista tietäntyyppiin ongelmiin, koska sillä keinoin ei vielä päästä monikäyttöiseen supertietokoneeseen.

”Tietäntyyppisiä ongelmia” ovat esimerkiksi monimutkaisia systeemejä koskevat kiperät kysymykset, joiden ratkaiseminen perinteisin keinoin, klassisilla algoritmeilla, on mahdotonta äärellisessä ajassa. Edessä on kuitenkin vielä monenlaisia esteitä ennen kuin haaveissa oleva tehokas kvanttietokone on todellisuutta.

– Yksi iso ongelma on kvanttsysteemien eristäminen ympäristöstä, mutta siinä on päästy paljon eteenpäin. Tällä hetkellä keskeisimpänä asiana onkin oikeastaan se, että ajatus tarvittavien kvant-

tibittien määrästä on ollut melko naiivi. Niitä tarvitaan selvästi enemmän kuin pelkän loogisen laskennan suorittaminen vaatii. Kvanttibittien välisten hallittujen kytkentöjen määrä kasvaa, jolloin systeemi muuttuu nopeasti hyvin monimutkaiseksi.

Kvantti-ilmiöiden tutkimus ja pyörittäminen laboratoriossa eivät ole enää temppelejä eikä mikään, mutta niiden yhdistäminen toimivaksi kvanttietokoneeksi on kokonaan toinen juttu. Se vaatii valtavia resursseja, mistä kertoo monien yliopistomaailman huippututkijoiden siirtyminen suurten yritysten, kuten Googlen, IBM:n ja Microsoftin, palvelukseen.

– Jos lähdemme yliopistossa kilpailemaan suurimpien kvanttietokoneen kehittäjien kanssa, jäämme ilman muuta jalkoihin. Sen takia pyrimme löytämään omat vahvuusalueemme, joilla olemme jo osoittaneet osaamisemme. Materiaalit ovat ratkaisevassa asemassa. Systeemeissä on aina varauskohinaa, koska periaatteessa kyse on varausten siirtelystä. Silloin on oleellista, millaisille alustoille systeemit rakennetaan.

Kun ollaan tekemisissä kvanttimaailman ilmiöiden kanssa, kaikkien häiriöiden suuruusluokka kasvaa. Karkeasti yleistäen voisi vertailukohdaksi ottaa tiilistä rakennetun seinän, johon törmäilee kaiken aikaa ilmamolekyylejä. Seinä ei ole siitä moksiskaan, mutta jos rakennetaan jotain yksittäisistä molekyyleistä, siihen osuvilla molekyyleillä on valtava vaikutus. Kvanttimaailmassa ei kuitenkaan ole mahdollista päästä eroon ei-toivotuista ilmiöistä, ainakaan kovin helposti.

Tekoäly: uhka vai mahdollisuus

Tietotekniikan kehitykseen liittyy nykyisin oleellisesti myös tekoäly. Onko kvanttietokoneen ja tekoälyn välillä jonkinlaista yhteyttä?

– Viimeisen parin vuoden aikana on esimerkiksi alettu tehdä yhä aktiivisemmin kvanttietokoneen ja tekoälyn välille yritetään luoda yhä vahvempia kytkentöjä, ja Suomessakin on entistä enemmän yhteistyötä meidän fyysikko-kvanttitekniikan ja it-puolen väen välillä.

Se edellyttää Pekolan mukaan kuitenkin sitä, että fyysisiä ja fyysikkaan liittyviä ongelmia saadaan ratkottua. Kunhan siihen päästään, on aika

katsoa, miten uutta tekniikkaa voidaan soveltaa tietojenkäsittelyssä ja it:hen liittyvissä asioissa.

Stephen Hawking oli huolissaan tekoälyn kehittyemisestä niin älykkääksi, että se alkaa kehittää itseään entistä älykkäämmäksi. Kvanttitietokoneiden avulla se voisi periaatteessa olla mahdollista, mutta Pekola ei näe sitä kovin suurena eikä etenään suurimpana uhkana.

– Vakavampana pidän sitä mahdollisuutta, että kvanttiteknologiaa aletaan tarkoituksella sovelta-
maan joillekin vahingollisesti. Tämä on toki kaiken teknologian yleinen ongelma.

Jääkylmät perinteet velvoittavat

Kvanttiteknologian tutkimusyksikkö pohjaa vahvasti aiempina vuosikymmeninä tehtyyn perustutkimukseen. Otaniemessä elää akateemikko Olli V. Lounasmaan, Teknillisen korkeakoulun Kylmälaboratorion perustajan ja pitkäaikaisen johtajan, perintö.

Kvanttiteknologiassa tarvitaan suprajohtavuutta ja siinä ovat nimenomaan alhaiset lämpötilat oleellisen tärkeitä. Kun Lounasmaan laboratorio aloitti toimintansa vuonna 1965, kukaan ei voinut kuvitellakaan, että siellä tehtävän kylmäfysiikan tutkimuksen pohjalta voidaan kehittää makroskooppisia kvanttilaitteita.

– Lähtökohta on meidän kannaltamme ideaalinen, sillä täällä on kerätty vuosikymmenien ajan kokemusta ja osaamista, joka on keskeistä kvanttilmiöiden hallinnan kannalta. Suprajohtavat kvant-

tibitit jäähdytetään aina alle kelvinin lämpötilaan.

Kylmätekniikka on oiva esimerkki siitä, miten puhtaan perustutkimuksen tuloksena päästään sovelluksiin, joilla on myös kaupallista potentiaalia ja merkitystä. Siinä missä alhaisten lämpötilojen saavuttaminen oli aiemmin hyvin hankalaa, nykyisin sadasosakelvinin päähän absoluuttisesta nollapistestä pääseviä ”jääkaappeja” eli kryostaatteja voi ostaa kaupallisilta markkinoilta.

Markkinajohtajana on suomalainen BlueFors Cryogenics, Aalto-yliopistossa tehdyn tutkimuksen pohjalta kaupallisia sovelluksia kehittänyt yritys. Se valmistaa nykyisin merkittävän osan maailman matalan lämpötilan jäädyttimistä.

– Kylmätekniikka onkin ollut varsinainen kultakaivos, kun kvanttitietokoneen ja -teknologian tutkimus on noussut tärkeäksi alaksi eri puolilla maailmaa. Ja tietysti meillä alan konkareilla on pitkäaikainen kokemus tarvittavasta tekniikasta ja termodynamiikasta, joka liittyy sekä makroskooppisiin systeemeihin että pieniin piireihin.

Pekola on ollut alalla vuodesta 1980, mikä antaa oivan perspektiivin tutkimuksen ja tekniikan vuorovaikutukseen sekä perus- ja soveltavan tutkimuksen suhteeseen.

– Olen ollut tosi tyytyväinen siihen, että loppujen lopuksi pitkäjänteisyys on se, mikä vie eteenpäin.

MARKUS HOTAKAINEN

Kirjoittaja on tiedetoimittaja ja tietokirjailija.