

KVANTTITIEKONEET VIHDOINKIN LYÖNEET LÄPI

Mikko Möttönen,

Kvanttiteknologian professori, Aalto-yliopisto ja VTT

Kvanttitietokoneyritys IQM:n perustaja

Kun ensimmäinen suprajohtavista sähköpiireistä valmistettu kvanttibitti eli kubitti demonstroitiin Japanissa vuonna 1999 [1], siitä nousi valtava innostus kvanttilaskennan ja kvanttitietokoneiden rakentamiseen. Nyt maailmalla on jo näytetty, että kvanttitietokone voi suorittaa tietynlaisia laskutoimituksia nopeammin kuin nopeimmat supertietokoneet [2,3]. Suomessa rakennetaan jopa kaupallisia kvanttitietokoneita, joista ensimmäinen on jo valmis ja toiminnassa Teknologian tutkimuskeskus VTT:n tiloissa Espoon Otaniemessä. Kvanttikoneista yritetään puristaa irti hyötyä miljardisijoitusten turvin.

KVANTTIHERRUUS

Kvanttiherruus ja käytännön kvanttihyöty ovat eri asia. Tarkasti ottaen kvanttiherruus tarkoittaa sitä, että kvanttitietokone ratkaisee sellaisen ongelman, joka on mahdoton klassiselle tietokoneelle, eli ongelman, joka skaalautuu polynomisesti kvanttitietokoneella mutta ylipolynomisesti klassisella tietokoneella ongelman koon suhteen. Ongelman ei kuitenkaan tarvitse olla mitenkään hyödyllinen.

Käytännössä kvanttiherruudeksi on kutsuttu jo ensimmäisenä Googlen näyttämää satunnaisten mutta hyvin määriteltyjen kvanttiloogisten piirien suoritusta [2]. Tosin Googlen käyttämän 53 kubittisen prosessorin toimintaa pystyy simuloimaan myös normaalilla supertietokoneella — paljon hitaammin kuin, mitä kvanttitietokoneella kestää oikean ratkaisun saavuttamiseen.

Kokeessa oli myös se ongelma, että kvanttitietokoneen antamasta vastauksesta ei voitu päätellä, että oliko se oikein vai väärin. Arvioiden

mukaan se oli oikein vain noin kerran tuhannesta yrittäjästä. Tällainen kvanttiherruus on siis käytännön laskennan kannalta todellakin hyödytön, mutta kuitenkin oiva osoitus siitä, että kvanttilogiikkaa voidaan jo käytännössä suorittaa siten, että se on klassisen tietokoneen suorituskyvyn rajamailla.

MILJARDIN DOLLARIN KYSYMYS

Googlen ja myöhemmin Kiinassa toistettua [3] kvanttiherruutta tärkeämpää on saada kvanttitietokoneista irti käytännön hyötyä yhteiskunnan hyvinvoinnin edistämiseksi. Tällaista hyötyä on povattu muun muassa kemiallisten yhdisteiden simuloinnista [4], koneoppimisen nopeuttamisesta [5] ja optimointiongelmien ratkaisusta [6]. Vielä kuitenkaan ei tunneta algoritmia, minkä suorittaminen kvanttitietokoneilla olisi mahdollista.

Miljardin dollarin kysymys on, kuinka muutama sadan kubitin kvanttitietokoneella, joka

keskimäärin tekee vähintään yhden virheen tuhannesta, saadaan hyötyä jossain käytännön sovelluksessa. Jos osaat vastata aukottomasti tähän kysymykseen ja pelaat korttisi oikein, olet pian miljardi dollaria rikkaampi.

Mihin tämä väite perustuu? Maailmalla on jo valtioiden puolesta allokoitu yli 20 miljardia varoja kvanttitekologian kehitykseen. Viime

vuonna nähtiin ensimmäinen kvanttietokoneita valmistavan yrityksen pörssiin listautuminen. IonQ:n pörssi-arvo oli yli miljardi dollaria. Tänä vuonna yli miljardin listautumista yrittää Rigetti Quantum Computing, joka on Kalifornialainen startup. Yksikään yritys ei kuitenkaan vielä ole varma, miten kvanttihyötyä saadaan irti. Jos näin olisi, yrityksen arvo pomppaisi miljardeja.

KVANTTILASKENNASSA alustetaan, mitataan, ja operoidaan kvanttimekaanisia kaksitasosysteemejä. Yhden tällaisen *kubitin* tila-avaruus on kaksiulotteinen kompleksikertoiminen Hilbertin avaruus \mathcal{H} , jonka virittävät kubitin laskennalliset tilat $|0\rangle$ ja $|1\rangle$. Kubitin yleinen tila on $|\Psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$, jossa kompleksikertoimille pätee $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$.

Tila-avaruus n :lle kubitille saadaan Kroneckerin tulona yksittäisten kubittien tila-avaruuksista $\mathcal{H}_n = \mathcal{H}^{\otimes n}$, ja yleinen n :n kubitin tila voidaan kirjoittaa muotoon $|\Psi_n\rangle = \sum_{k=0}^{2^n-1} c_k |k_1, k_2, \dots, k_n\rangle$, jossa k_m on luvun k binääriesityksen m :s bitti, $|k_1, k_2, \dots, k_n\rangle = |k_1\rangle \otimes |k_2\rangle \otimes \dots \otimes |k_n\rangle$ ja $\sum_{k=0}^{2^n-1} |c_k|^2 = 1$. Tästä näemme, että yhden kubitin tilan taltioiminen klassisen tietokoneen muistiin vaatisi vain kaksi liukulukua, mutta muistin tarve kasvaa eksponentiaalisesti kubittien määrän kasvaessa. Huomaa, että yllä summassa k :n yli on 2^n termiä. Itseasiassa juuri 53 kubitin kohdalla menee klassisten supertietokoneiden muistin raja, eli kun kubittimäärä kasvaa siitä, ei koko kvanttitilaa voida taltioida enää klassisen tietokoneen muistiin.

Kvanttilaskennassa kaikki kubitit on ensin alustettava johonkin tilaan, esim. tilaan $|0\rangle$. Tämän jälkeen suoritetaan loogisia operaatioita yleensä yksittäisille kubiteille ja kubittipareille. Nämä operaatiot ovat unitaarisia operaattoreita Hilbertin avaruudessa, koska kvanttimekaniikassa tilojen dynamiikan generaattori on hermiittinen Hamiltonin operaattori. Loogisten operaatioiden jälkeen kubitteja mitataan ja prosessi aloitetaan alustuksesta ja tätä toistetaan, kunnes on saatu haluttu vastaus.

Kvanttietokoneen kyky ratkaista joitakin laskennallisia ongelmia nopeammin kuin klassiseen logiikkaan perustuva tietokone on se, että klassisen tietokoneen loogisia operaatioita voidaan kuvata permutaatioilla ainakin laajennetussa laskenta-avaruudessa. Permutaatiot ovat taas unitaaristen operaattoreiden alijoukko. Unitaarisia operaattoreita on todella paljon enemmän kuin permutaatioita. Kvanttietokoneella voidaan siis laskea paljon suuremmalla määrällä erilaisia loogisia operaatioita jolloin voidaan ottaa oikopolkua suhteessa klassisiin operaatioihin. Tämä periaate on ollut tiedossa jo vuosikymmeniä, mutta vieläkin laskennallista nopeutusta ei ole demonstroitu käytännön hyötyä tuovissa ongelmissa.

Eräs teoreettisen kvanttilaskennan ongelma on siis uusien algoritmien ja ratkaisutapojen löytäminen. Toinen on hyödylliseksi havaittujen unitaaristen operaattoreiden pilkkominen yhden ja kahden kubitin operaattoreihin. Ensimmäisiä koskeksiani kvanttilaskentaan oli jälkimmäisen ongelman pohdinta. Käytimme Juha Vartiaisen kanssa **Timo Eirolan** opettamia matriisihajotelmia ja saimme ne kirjoitettua kubittiopeaatioiden avulla. Kirjoitimme näistä töistä vuonna 2004 kaksi julkaisua [7,8]. Ilokseni huomasin, että viime vuonna julkaisut saivat 60 viittausta—enemmän kuin minään muuna vuonna aikaisemmin. Tämä kielii kvanttiohjelmistojen kehittäjien määrän suuresta kasvusta. Hyvä näin, koska uusia tapoja käyttää lähitulevaisuuden kvanttietokoneita hyödyksi tarvitaan pikaisesti.

SUPRAJOHTAVAT KUBITIT: Kuten klassisiakin tietokoneita, kvanttietokoneita voidaan rakentaa monenlaisista eri fysikaalisista järjestelmistä. Tällaisia ovat muun muassa optiset fotonit, typpivakanssit timantissa, loukuttetut ionit, lasereilla vangitut atomit ja kvanttipisteet sekä donoriatomit piissä. Suomessa on kuitenkin suurin osaamiskeskittymä suprajohtaviin sähköpiireihin perustuvissa kubiteissa, jotka näyttävät tällä hetkellä yhdeltä lupaavimmista alustoista rakentaa hyödyllinen kvanttietokone. Suprajohtavat kubitit perustuvat piisirun päälle kasvatettuihin suprajohtaviin ohutkalvoihin. Ne kuvioidaan litografisesti siten, että niihin saadaan halutut sähkömagneettisen ominaisuudet. Sirun päälle voidaan muun muassa rakentaa joidenkin mikrometrien levyisiä siirtolinjoja, joissa mikroaaltosäteily kulkee lähes häviöittä. Jos siirtolinjoja päätetään, saadaan mikroaaltoresonaattoreita, joihin syntyy seisovia aaltoja.

Kubitin sydän on Josephsonin liitos, jossa kaksi suprajohtetta liittyy toisiinsa eristeen läpi. Liitoksen erikoinen ominaisuus on se, että tasajännite sen yli saa virran kasvamaan, kunnes se saavuttaa maksiminsa, niin kutsutun kriittisen virran, ja alkaa tämän jälkeen pienentymään. Tämän äärellisen kriittisen virran vuoksi liitos näyttäytyy epälineaarisenä induktanssina. Mitä suurempi virta, sitä suurempi induktiivinen vaste. Siis tällaisen liitoksen liittäminen resonaattoriin saa resonanssitaajuuden tippumaan virran kasvaessa.

Kubittien tapauksessa liitoksen epälinearisuus on niin suuri, että jopa yksi mikroaaltofotoni tiputtaa sähköpiirin resonanssitaajuutta niin paljon, että toinen fotoni ei voi enää mennä sinne sisälle samalla taajuudella. Kubitista saadaan käyttöön vain kaksi energian alinta tilaa, jos sitä ajetaan vain taajuudella, joka vastaa niiden välistä transitoenergiaa. Suprajohtavan kubitin tilat nolla ja yksi ovat siis fysikaalisesti tiloja, joissa kubitin resonaattorissa on nolla tai yksi fotonia.

Fotonit eivät elä ikuisesti koska ne voivat esimerkiksi joko karata kubitista samaa reittiä, kun ne ovat tulleetkin, eli ajolinjaa pitkin, tai absorboitua kubitin läheisyydessä sijaiseviin materiaaleihin. Yleensä jälkimmäinen prosessi on hallitseva ja siksi vähähäviöisten suprajohtavien ja eristävien materiaalien ja näiden rajapintojen kehitys on äärimmäisen arvokasta kvanttietokoneiden kehityksen kannalta. Hiljattain löydettiin [9] tässä kontekstissa uusi materiaali, tantaali, joka oikein prosessoituna johtaa huomattavasti pienempiin häviöihin ja näin pienempään määrään virheitä laskennassa.

Yhtäältä kubitit tulee eristää mahdollisimman hyvin ulkomaailmasta laskuvirheiden välttämiseksi, mutta toisaalta niitä pitää ohjata ulkoisesti kvanttiloogisten operaatioiden toteuttamiseksi. Tämä voi aluksi kuulostaa ristiriidalta. Miksi kubitin tila ei sotkeudu sitä ajavan pulssin kanssa? Itseasiassa se sotkeutuu ja jokaisesta kubitin ajosta koituu laskentavirheitä. Pystyimme hiljattain löytämään teoreettisesti optimaalisen ajavan pulssin tilan, joka tuottaa mahdollisimman vähän tällaisia virheitä [10]. Tulos on kvanttietokoneiden kannalta hyvä, sillä keskimääräinen virheiden määrä on kääntäen verrannollinen ajavan pulssin energiaan. Kymmenellä tuhannella ajavan pulssin fotonilla voidaan saada aikaan alle 0,01%:n virhe kvanttioperaatioihin.

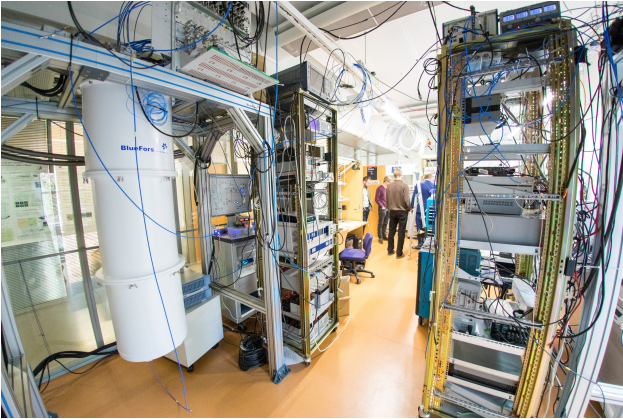
SUOMEN KVANTTITEOLLISUUDEN SYNTY

Suomessa on pitkät perinteet kylmäfysiikan saralla lähtien Kylmälaboratorion perustamisesta 1965. Jo 70-luvulla Suomessa rakennettiin suprajohtavia piirejä, jotka ovat hyvin herkkiä

magneettikentän antureita, SQUID:ejä. Sittemmin näistä antureista on yhtäältä rakennettu aivokuvantamislaitteita, mutta toisaalta myös suprajohtavia kubitteja.

Itse opin kylmäfysiikan ja suprajohtavien piirien toimintaa **Jukka Pekolan** ryhmässä Tek-

nillisessä korkeakoulussa. Saatuani akatemia-tutkijan apurahan vuonna 2010, Jukka sanoi, että olisi perustettava oma laboratorio. Aiemmin **Risto Niemisen** avustamana olin perustanut hänen johtamaansa Laskennallisten nanotieteiden huippuyksikköön oman Kvanttilaskennan ja -laitteiden tutkimusryhmän, joka muutti Micronovaan laboratorion raakileen viereen.



Kvanttilaskennan ja -laitteiden laboratorio vuonna 2017. Kuva: Aalto-yliopisto/ Mikko Raskinen

Tuohon aikaan **Pertti Hakonen** ja **Mika Siljanpää** olivat jo omissa ryhmissään mitanneet suprajohtavia kubitteja, mutta tuntui siltä, että kukaan ei halunnut leimautua kvanttietokoneiden kehittäjäksi. Fysiikan ilmiöiden tutkimusta pidettiin yleisesti tässä yhteisössä arvokkaampana.

Vuosien kuluessa opimme ryhmässäni rakentamaan melko hyviä suprajohtavia piirejä ja viimein päätin hakea vuoden 2017 Tulevaisuuden tekijät -haussa apurahaa kvanttietokoneen rakentamiseen aloittamiseen yhdessä muiden Kvanttitekniikan huippuyksikön ryhmänjohtajien kanssa. Apuraha myönnettiin, mistä saimme valtavan nosteen, joka johti nopeasti kvanttietokoneyritys IQM:n perustamiseen vuonna 2018 ja Suomen historian suurimman siemenrahoituksen turvaamiseen yritykselle. Muita perustajia ovat tuolloin tutkimusryhmäs-

säni tutkijoina toimineet **Kuan Yen Tan** ja **Jan Goetz** sekä Orionilla työskennellyt **Juha Vartiainen**. Apuraha ei toki ollut ainoa syy IQM:n onnistumiseen vaan siitä kuuluu kiitos Aallon ja VTT:n kannustavalle tutkimus- ja innovaatioympäristölle ja lukuisille muille tahoille.

Koska perustimme IQM:n tavoitteena rakentaa hyödyllinen kvanttietokone, kasvatimme yritystä nopeasti ja nyt siellä työskentelee noin 150 henkilöä. Itseasiassa yrityksellä on nyt enemmän kvanttitohtoreita töissä kuin Rigetillä. Lisäksi IQM on rakentanut Keilaniemeen mitattavan kvanttietokoneiden testauslaitoksen ja Mankkaalle kvanttisirujen valmistuslaitoksen. Tytäryhtiöitä on Saksassa, Espanjassa ja Ranskassa.

IQM:n jälkeen Suomeen on myös syntynyt kvanttiohjelmistoalan yrityksiä Quantastica, Algorithmiq ja Quanscient, joista jälkimmäisen perustajiin loikkasi tutkimusryhmästäni **Valtteri Lahtinen**. Toivottavasti näemme vielä useita uusia yrityksiä tulevaisuudessa.

Ei pidä unohtaa yrityksiä, jotka toimivat alihankkijoina kvanttietokoneiden tai niiden komponenttien ja ohjelmistojen kehittäjille. Näistä on tunnetuin presidentin kansainvälistymispalkinnon pokannut Bluefors. Yrityksen pe-



IQM:n kvanttiprosessorien valmistuslaitos Mankkaalla. Kuva: IQM.

rustivat vuonna 2008 **Rob Blaauwgeers** ja **Pieter Vorseman** Kylmälaboratoriossa kehittämiensä jäädyttimien avuin. Toissa vuonna Bluefors tahkosi 17 miljoonaa euroa voittoa.

YHDESSÄ ETEENPÄIN

Jäädyttelin kesäkuun iltana 2020 Turun Kakkerrassa saunan terassilla ja sain viestin **Antti Vasaralta**. Hallitus oli myöntänyt VTT:lle 20,7 miljoonaa euroa kvanttietokoneen hankintaan. Tämä oli uskomaton uutinen, jollaista vastaavaa en ole eläissäni nähnyt. Kerrankin päättäjät **Mika Lintilän** johdolla osuivat naulankantaan.

Avoimen tarjouskilpailun jälkeen IQM valikoitui VTT:n innovaatiokumppaniksi rakentamaan tätä kvanttietokonetta. Mukaan pienellä osuudella tuli myös Aalto-yliopisto, Sveitsin valtiollinen teknillinen korkeakoulu Zürichissä, ja Jülichin tutkimuslaitos. Itse pysyttelin hankintaprosessista täysin erossa, sillä olinhan VTT:n tutkimusprofessori ja IQM:n perustaja.

Projektin nimeksi tuli Suomalainen kvanttietokone ja siinä IQM rakentaa tiiviisti VTT:n kanssa yhteistyössä viiden, 20 ja 50 kubitin kvanttietokoneet. Viiden kubitin kvanttietokone on jo valmis ja tällä hetkellä VTT:n tutkijoilla koekäytössä ennen kuin sen käyttö todennäköisesti myöhemmin tänä vuonna avataan muille. Koska aikataulu on tiukka, seuraava kone on jo valmisteilla. Sen pitäisi valmistua noin vuoden päästä.

On ollut mahtavaa seurata kvanttietokoneiden rakentamista, ja sitä kuinka se on saanut eri tahot kasvamaan yhdessä. Erityisesti VTT:llä on tapahtunut valtava muutos tutkimushenkilöstössä, johon on palkattu lukuisia uusia kvanttiteknologian asiantuntijoita **Tauno Vähä-Heikkilän** ja **Pekka Pursulan** vetämään Mikroelektronikan alueeseen. Erilaisten ryhmien johtajiin lukeutuvat **Joonas Govenius**, **Janne Lehtinen**,

Sanna Arpiainen, **Ville Kotovirta**, **Visa Vesterinen** ja tutkimusprofessori **Mika Prunnila**.

Suomalainen kvanttietokone on myös innoittanut VTT:n, Aalto-yliopiston ja CSC – Tieteen tietotekniikan keskuksen perustamaan nyt Suomen Akatemian tiekartalla olevan Suomen kvanttilaskenta infrastruktuurin. Tämän kautta on tarkoitus tarjota sekä akateemisille että yrityskäyttäjille kvanttilaskentapalveluita ja kun aika on kypsä, CSC voi pitää yllä myös kvanttietokoneita samaan tapaan kuin se pyörittää nyt supertietokoneita.

SUOMALAINEN KVANTTITIEKONE IMEE MYÖS KANSAINVÄLISIÄ YHTEISTYÖPROJEKTEJA

Pekka Manninen ja **Mikael Johansson** CSC:l-tä ovat junailleet myös pohjoismaista yhteistyötä, jossa CSC:n ylläpitämää Euroopan tehokkaimpaan supertietokoneeseen Lumiin ei vain yhdistetä Suomalaista kvanttietokonetta, mutta myös Ruotsissa rakenteilla oleva Wallenbergin säätiön rahoittama kone.

Pian tarvitaan myös Suomalainen kvanttietokone, joka on fyysisesti hyvin nopealla linkillä kiinni Lumissa. Tällaiseen koneeseen tulisi yli sata kubittia, jolloin kvanttiherruus saavutettaisiin vaivatta ja Lumin kiihdyttimenä kvanttihyöty voisi olla lähellä.

Suomalainen kvanttietokone on myös nostanut Suomen profiilia Eurooppalaisessa tutkimusympäristössä. Tästä hyvänä esimerkkinä on EU:n Kvanttiteknologian lippulaivahanke, jonka ensimmäiset projektit ovat nyt loppusuoralla ja uusi kahdeksan vuoden alustava hakemus on tehty. Suomesta oli suprajohdaviin kvanttietokoneisiin keskittyvässä konsortiossa mukana jopa viisi osapuolta. Tämä antaa loistavat puitteet Suomen tutkijoille hyötyä alan kehityksestä Euroopassa.

KVANTTITIETOKONE EI SYRJÄYTÄ MUUTA KVANTTITUTKIMUSTA

Kvanttitutkimus ei ole yhtä kuin kvanttitietokone. On entistä tärkeämpää tutkia myös kvanttimekaniikan perusilmiöitä ja etsiä tunnettuja kvantti-ilmiöitä uusista systeemeistä. Myös kvanttitieteiden muut sovellukset kuten kvanttianturit ja -viestintä tarvitsevat huomattavia lisäpanostuksia. Näyttää siis siltä, että kvanttiala kasvaa kokonaisuudessaan. Tämä ei ole nollasummapeliä.

Suomessa asiat ovat edenneet hyvin kvanttitutkijoiden yhteisön rakentamisessa. Viime vuonna Aalto-yliopisto, VTT ja Helsingin yliopisto perustivat kansallisen kvantti-instituutin InstituteQ:n. Siinä on jo mukana kymmeniä tutkimusryhmiä ja tarkoitus on laajentaa instituuttia kattamaan koko maan kynnelle kykenevät ryhmät.

Instituutin toiminta ei pyöri vain kvanttitietokoneen ympärillä eikä edes suprajohtavien piirien tai kokeellisen fysiikan ympärillä, vaan mukana on ryhmiä kauppatieteistä kvanttifilosofiaan. On tärkeää saada eri alojen asiantuntijat samojen pöytien ääreen, jotta näemme met-sän puilta—ratkaisut ongelmien sijaan.

JALAT MAASSA JA PÄÄ PILVISSÄ

”Hyvin menee, mutta menköön”, oli entisellä laitoksemme johtajalla **Matti Kaivolalla** tapana sanoa, kun onnistuimme isosti esimerkiksi Nature-julkaisun kanssa. Ja kaikesta päätellen olemme Suomessa onnistuneet hienosti kasvatamaan kvanttiekosysteemiä. Olemme jopa onnistuneet myymään Saksaan 30 miljoonalla eurolla kvanttitietokoneen. Voin siis väittää, että ainakin Suomessa kvanttitietokoneet ja -teknologia yleisesti ovat lyöneet läpi.

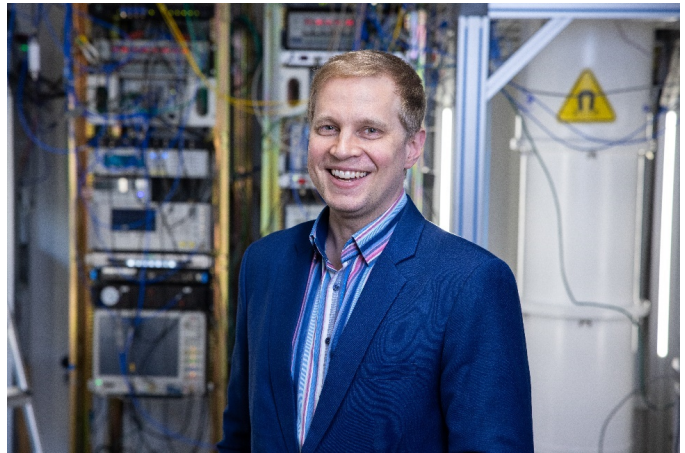
Näissä onnistumisissa on ollut erittäin tärkeässä asemassa unelmointi ja rohkeus lähteä toteuttamaan niitä. Mutta vaarana on, että sorrumme

epärealistisiin lupauksiin, joita on nyt monelta taholta ilmassa. Ei pidä luvata jotain vain sen takia, että joku toinenkin on luvannut vaan luottaa realistiseen arviointikykyyn. Vain siten voimme kehittää kvanttitietokoneita myös pitkällä aikajänteellä ja valjastaa niitä hyvinvoinnin veturiksi.

Viitteet

- [1] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai, *Coherent Control of Macroscopic Quantum States in a Single-Cooper-Pair Box*, Nature **398**, 786 (1999).
- [2] F. Arute et al., *Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor*, Nature **574**, 505 (2019).
- [3] H.-S. Zhong, et al. *Quantum Computational Advantage Using Photons*, Science **370**, 1460 (2020).
- [4] S. McArdle, S. Endo, A. Aspuru-Guzik, S. C. Benjamin, and X. Yuan, *Quantum Computational Chemistry*, Rev. Mod. Phys. **92**, 015003 (2020).
- [5] V. Dunjko and H. J. Briegel, *Machine Learning & Artificial Intelligence in the Quantum Domain: A Review of Recent Progress*, Rep. Prog. Phys. **81**, 074001 (2018).
- [6] E. Farhi, J. Goldstone, and S. Gutmann, *A Quantum Approximate Optimization Algorithm*, ArXiv:1411.4028 [Quant-Ph] (2014).
- [7] J. J. Vartiainen, M. Möttönen, and M. M. Salomaa, *Efficient Decomposition of Quantum Gates*, Phys. Rev. Lett. **92**, 177902 (2004).
- [8] M. Möttönen, J. J. Vartiainen, V. Bergholm, and M. M. Salomaa, *Quantum Circuits for General Multiqubit Gates*, Phys. Rev. Lett. **93**, 130502 (2004).
- [9] I. Carusotto, A. A. Houck, A. J. Kollár, P. Roushan, D. I. Schuster, and J. Simon, *Photonic Materials in Circuit Quantum Electrodynamics*, Nat. Phys. **16**, 268 (2020).
- [10] J. Ikonen, J. Salmilehto, and M. Möttönen, *Energy-Efficient Quantum Computing*, Npj Quantum Inf **3**, 1 (2017)

Kirjoittaja *Mikko Möttönen valmistui diplomi-insinööriksi Teknisestä korkeakoulusta syyskuussa 2002 ja tohtoriksi tammikuussa 2005. Hän on toiminut vuodesta 2019 lähtien Aalto-yliopiston ja VTT:n kvanttiteknologian yhteisprofessorina. Lisäksi vuodesta 2007 hän on ollut Kvanttilaskennan ja -laitteiden tutkimusryhmän johtaja Aalto-yliopistossa ja englanninkielisen tekniikan kandidaattiohjelman johtaja sekä sen kvanttiteknologian pääaineen vastuuprofessori. Hänen tutkimusryhmänsä on osa Suomen Akatemian kvanttiteknologian huippuyksikköä QTF. Möttönen on myös maantieteellisen neuvottelukunnan jäsen ja kansallisen kvantti-instituutin InstituteQ:n ohjausryhmän varajäsen.*



Mikko Möttönen Kvanttilaskennan ja -laitteiden laboratoriossa.

Kuva: Aalto-yliopisto/Mikko Raskinen

Möttönen on lisäksi yksi IQM Finland Oy:n neljästä perustajasta ja sen päätiedemies. IQM on johtava eurooppalainen kvanttietokoneyritys, joka keskittyy suprajohtaviin kvanttiprosessoreihin, joita tehostetaan innovatiivisella ohjelmistojen ja laitteiden yhteissuunnittelulla. Näin yritys tavoittelee kvanttihyötyä kaupallisiin sovelluksiin. Yritys on hankkinut yli 70 miljoonaa euroa rahoitusta ja 150 työntekijää. Lisäksi Möttönen on kvanttiohjelmistoyritys Quanscientin neuvonantaja.

Urallaan Möttönen on julkaissut yli 130 tieteellistä artikkelia, mukaan lukien neljä artikkelia merkittävissä tiedelehdissä Nature ja Science. Hänen töihinsä on viitattu yli 7000 kertaa. Hän on ohjannut 16 väitöskirjaa, 25 diplomityötä tai pro gradu -tutkielmaa, 28 erikoistyötä ja 31 kandityötä.

Möttönen on palkittu vuonna 2020 Nokia-säätiön tunnustuspalkinnolla ja Väisälän säätiön tiedepalkinnolla. Vuonna 2021 Business Finland, Teknologiateollisuus ja Spinverse valitsivat hänet vuoden innovaatioprofessoriksi ja vuonna 2022 Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu nimesi hänet kunniatohtoriksi.

Mikko Möttönen m. +358451066884, email: mikko.mottonen@aalto.fi

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/mikko-m%C3%B6tt%C3%B6nen-477b691/>

Twitter: @mpmotton
