

NRO 1/2022

**FYSIIKAN JA MATEMATIIKAN AIKAKAUSLEHTI
TIDSKRIFT FÖR FYSIK OCH MATEMATIK**

IGM **ARKHIMIDES**

SUOMALAINEN KVANTTITIETOKONE

INSTITUTEQ — THE FINNISH QUANTUM INSTITUTE

ISEE: TULEVAISUUSAJATTELUA LUKIOLAISILLE

ARKHIMEDES 1/2022

Julkaisijaseurat

Suomen Fyysikkoseura ry:
<https://www.fyysikkoseura.fi>
 Fysikersamfundet i Finland rf:
<https://www.physics.helsinki.fi/~fysif/>
 Suomen matemaattinen yhdistys ry:
<https://www.matemaattinenyhdistys.fi/>

Valtuuskunta - Delegation

Suomen Fyysikkoseura ry: Kimmo Kainulainen,
 Emilia Kilpua ja Jukka Pekola.
 Fysikersamfundet i Finland rf: Tomas Linden (vpj.)
 Suomen matemaattinen yhdistys ry:
 Mats Gyllenberg (pj.), Matti Lassas.

Toimituskunta - Redaktion

KIMMO TUOMINEN, (HY), PÄÄTOIMITTAJA
SYLVESTER ERIKSSON-BIQUE, (OY)
EMILIA KILPUA, (HY)
PEKKA KOSKINEN, (JY)
KATJA LAURI, (HY)
KAI NORDLUND, (HY)
NEEA PALOJÄRVI, (HY)

Yhteystiedot

toimitus@arkhimes.fi

KANSI: Havainnekuva IQM:n rakenteilla olevasta kvanttietokoneesta (kuva: IQM)

PÄÄKIRJOITUS

MATRIISIMEKANIIKAN UUSI AALTO..... 3

UUTISIA

UUSIA TIETEEN HUIPPUYKSIKÖITÄ..... 4

ARTIKKELIT

ILTA AVARUUSNOBELISTIEN SEURASSA..... 8

KVANTTITUOTOKONEET VIHDOINKIN LYÖNEET LÄPI..... 11

INSTITUTEQ - THE FINNISH QUANTUM INSTITUTE 18

KVANTTILASKENTAA LUKIOLAISILLE...28

KORONA JA EPÄTIETOISUUS33

KOLUMNI

AKATEMIAN JALKAVÄKI 35

PÄÄKIRJOITUS

MATRIISIMEKANIIKAN UUSI AALTO

Kimmo Tuominen

Maailman ensimmäinen yleiskäyttöinen täysin elektroninen tietokone, ENIAC, otettiin käyttöön noin 77 vuotta sitten. Kehityksen kaari nykyisiin tietokoneisiin ja älylaitteisiin on ollut hämmästyttävä. Kvanttitietokoneiden ja kvanttitekniologian läpimurron kynnyksillä voidaan kysyä, miltä niiden seurauksena syntyvä kehityksen kaari näyttää. Kehityksen yksityiskohtaisten tulosten tai aikataulun arvioiminen on vaikeaa.

Kuten monien muidenkin yhteiskunnallisesti merkittävien kysymysten kohdalla, myös kvanttilaskennassa uhat ja mahdollisuudet ruokkivat maailmanlaajuisista kilpavarustelua. Viime vuosina on kirkastunut, että myös Suomen on syytä olla mukana tässä kehityksessä.

Tässä Arkhimedeksen numerossa saamme lukea tarkemmin investoinneista kvanttitekniologiaan ja erityisesti suomalaisen kvanttietokoneen kehityksestä. Toisessa laajassa artikkelissa valotetaan suomalaisen kvanttitehteen keskittymän, Institute-Q:n taustaa ja tavoitteita.

Eräs tärkeä näkökulma kvanttitekniologian kehityksessä liittyy koulutukseen. Tämä on tunnustettu laajasti ja erityisesti keskiössä on tarve kvanttitekniologian asiantuntijoiden koulutuksessa. Miten korkea-

koulujen kvanttifysiikan opetussuunnitelmaa pitäisi muuttaa vastaamaan tähän tarpeeseen, vai tarvitaanko kokonaan erillisiä kvanttitekniikoiden koulutusohjelmia tai kouluja? Vai tulisiko opetussuunnitelmia laajentaa sisältämään enemmän tieteenhistoriaa ja prosessiajattelua, jotta oppisimme aiemmista läpimurroista ja voisimme ymmärtää kvanttitekniologian kokonaisvaltaisia mahdollisuuksia laajemmin kuin yksittäisten sovellusten tasolla.

Eräs konkreettinen oppimisen kysymys on, miten kvanttitekniologian kehitys ja siihen liittyvän koulutuksen tarve näyttäytyy lukiolaisille. Tässäkin yhteydessä on kvanttitekniologian kehitys nähtävä laajemmassa kontekstissa. Yhdessä tämän numeron artikkeleista kerrotaan hankkeesta, jossa lukiolaiset haastettiin projisioimaan erilaisia tulevaisuusvisioita. Kvanttitekniologia esiintyi tässä yhtenä mahdollisena tekijänä, ja tarjosi mm. mahdollisuuden tutkia, millaista nykyisen opetussuunnitelman ylittävää kvanttiedettä lukiolaisille pystyisi opettamaan.

Miten kvanttitekniologia näkyy sinun opetuksessasi ja tutkimuksessasi — nyt tai vuosikymmenen kuluessa?

UUSIA TIETEEN HUIPPUYKSIKÖITÄ

Suomen Akatemia valitsi vuosille 2022-2029 yksitoista uutta tutkimuksen huippuyksikköä. Seuraavassa esitellään lyhyesti näistä neljä: Professori Eero Saksmanin (HY) johtama Satunnaisuuden ja rakenteiden huippuyksikkö, Professori Hanna Vehkamäen (HY) johtama VILMA (Virtuaalinen laboratorio ilmakehän molekyyli-tason reaktioille ja faasimuutoksille), Professori Johanna Ivaskan (UTU) johtama Solumekaniikka biologisten esteiden toiminnassa -huippuyksikkö sekä Kvarkkiaineen tutkimuksen huippuyksikkö, jota johtaa professori Tuomas Lappi (JY). Arkhimedeksen tulevissa numeroissa näiden yksiköiden tieteellisiä tavoitteita ja tuloksia esitellään pidemmin ja yksityiskohtaisemmin. Myös muut kuin tässä esitellyt yksiköt ovat tervetulleita esittäytymään Arkhimedeksen lukijoille niin halutessaan.

SATUNNAISUUS JA RAKENTEET

Monet ajankohtaiset, keskenään hyvinkin erilaiset matematiikan ja sen sovellusten ongelmat sisältävät olennaisena osana satunnaisuutta ja johtavat yllättävän samankaltaisiin satunnaisia rakenteita koskeviin kysymyksiin. Satunnaisten rakenteiden geometria on usein fraktaalinen eli toistuva. Tällaisia rakenteita esiintyy erityisesti tilastollisessa fysiikassa ja kvanttikenttäteoriassa, esimerkkeinä magnetisaatio ja kvantti-gravitaatio.

Satunnaisuuden ja rakenteiden huippuyksikkö tutkii tällaisia ilmiöitä. Yksikön tavoitteena on erityisesti ymmärtää satunnaisten rakenteiden analyttisiä ja geometrisia

ominaisuuksia. Tutkimus vaatii useamman matematiikan alan asiantuntemusta, joten huippuyksikkö kokoaa yhteen joukon uuden sukupolven johtavia matemaatikkoja näiden ongelmien selvittämiseksi.

Satunnaiset rakenteet esiintyvät yllättävällä tavalla myös lukuteoriassa, kuten alkulukujen jonon rakenteessa. Kuuluisa matemaatikko Paul Erdős totesi: "God may not play dice with the universe, but something strange is going on with the prime numbers". Huippuyksikössä tutkitaan esimerkiksi multiplikatiivisten funktioiden ja Riemannin zetafunktion satunnaista luonnetta.

Huippuyksikkö kehittää myös uusia analyttisiä ja geometrisia menetelmiä, joiden

tavoitteena on ymmärtää esimerkiksi miten makroskooppiset luonnonlait seuraavat mikroskooppisista. Huippuyksikkö tekee myös suoraan sovelluksiin tähtäävää tutkimusta kehittämällä korkeaulotteista tilastotiedettä, satunnaisia algoritmeja ja niiden geometrista ymmärtämistä laskennallisia sovelluksia ja koneoppimista varten.

Satunnaisten rakenteiden ymmärrystä käytetään muun muassa mallintamaan veden virtausta kalliossa, jonka sovelluskohteena on geoterminen energiantuotanto. Toinen sovelluskohde on ilmakehän aerosolien kondensaatiomallien ennustettavuus ja sitä kautta ilmastomuutoksen ennakoimisessa käytetyt mallit.

Satunnaisuuden ja rakenteiden huippuyksikköä johtaa professori Eero Saksman. Huippuyksikkö koostuu tutkimusryhmistä Helsingin yliopiston lisäksi Aalto-yliopistossa, Jyväskylän yliopistossa ja Turun yliopistossa.

VILMA - VIRTUAALINEN LABORATORIO ILMAKEHÄN MOLEKYYLITASON REAKTIOILLE JA FAASIMUUTOKSILLE

Ilmastomuutos ja ilman saasteet ovat aikamme suurimmat ympäristöongelmat, ja molemmat ovat seurausta päästöistä, joita ilmakehään päätyy ihmisen toiminnan seurauksena. Näiden ongelmien keskiössä on toistaiseksi huonosti ymmärretty kaasujen muuntuminen nestemäiseksi tai kiinteäksi aineeksi radikaalireaktioissa ja molekyyliklusterien muodostuksessa. Ilmakehän olosuhteissa näihin aerosolien muodost-

tumisprosesseihin osallistuu valtava määrä pääasiassa orgaanisia yhdisteitä, joista monien mallintaminen ja mittaaminen yksittäinkin on hyvin vaikeaa. Huippuyksikön tutkimuksessa keskeisenä haasteena onkin sekä lyhytikäisten tai epästabiliinien molekyylien ja molekyyliklusterien mittaamisen vaikeus että kaasumaisten prekursorien ja hiukkasia muodostavien molekyylien kemiallinen monimutkaisuus.

VILMAssa yhdistämme ilmakehän- ja tietojenkäsittelytieteen menetelmiä rakentaaksemme virtuaalisen laboratorion ilmakehän aerosolien muodostumiselle. Virtuaalinen laboratorio yhdistää kymmeniä eri mittalaitteita, data-analyysityökaluja ja eri tasoisia skaalojen malleja itseään korjaavaksi ja vuorovaikutteiseksi työkalupakiksi. Tekoälyyn perustuva lähestymistapamme mahdollistaa ilmakehän hapetusreaktioiden ja noen muodostumisen mallintamisen, jolloin voimme ennustaa tiivistymiskykyisimpien yhdisteiden muodostumista erilaisissa ilmakehän olosuhteissa. Kehitämme laskennallisesti kevyitä menetelmiä ilmakehän monikomponenttisten molekyyliklusterien stabiilisuuden mallintamiseksi, sekä massaspektrometriin perustuvia kokeellisia menetelmiä klusterien havaitsemiseksi ja mittausten epävarmuuksien pienentämiseksi erityisesti halkaisijaltaan 1-50 nm klustereille. Uudet mallimme, joiden ennustuskyky vahvistetaan kehittämällämme koejärjestelyillä, mahdollistavat pääasiassa orgaanisista aineista koostuvien nanometriänsä koko luokan klusterien muodostumis- ja kasvunopeuksien ja niiden virherajojen ennustamisen erilaisissa ilmakehän olosuhteissa. Mallien ennustuskyky vahvistetaan kehittämällämme koejärjestelyillä, Tällainen malli on edellytys esteettöisemmän ajan ilmakehän tarkalle rekonstruktioille, jota puolestaan vaaditaan luotettaviin ilmanlaadun ja ilmaston ennusteisiin. Uusilla data-analyysimenetelmillä saadaan myös aiemmin

tuotetustaasta mittausaineistostadatasta lisää tietoa ilmakehän aerosoleista. Yleisemmällä tasolla kehittämämme menetelmät viitoittavat tietä kombinatoristen ongelmien ratkaisulle muissakin tutkimuskohteissa, joissa kemiallisia komponentteja on valtava määrä, esimerkiksi biologisissa systeemeissä tai energian tuotannossa.

VILMAN 10 partneria erikoisaloineen ovat: Hanna Vehkamäki (johtaja, laskennallinen aerosolifysiikka, Helsingin yliopisto), Theo Kurtén (varajohtaja, laskennallinen ilmakemia, Helsingin yliopisto), Arkke Eskola (kokeellinen reaktiokinetiikka, Helsingin yliopisto), Juha Kangasluoma (kokeellinen ilmakehätiede, Helsingin yliopisto), Kari Lehtinen (aerosolidynamiikka ja käänteismallinnus, Itä-Suomen yliopisto), Kai Puolamäki (tekoäly, Helsingin yliopisto), Patrick Rinke (koneoppiminen materiaalitieteessä, Aalto -yliopisto), Matti Rissanen (vapaiden radikaalinen hapettumiskemia, Tampereen yliopisto & Helsingin yliopisto), Siegfried Schobesberger (kemiallinen ionisaatio-massaspektrometria, Itä-Suomen yliopisto) ja Mikko Sipilä (massaspektrometrian laitekehitys, Helsingin yliopisto).

SOLUMEKANIikka BIOLOGISTEN ESTEIDEN TOIMINNASSA -HUIPPUYKSIKKÖ

Fysiikassa pintojen tärkeys on hyvin tiedossa; mitä pienempiin skaaloihin edetään, sitä enemmän tutkittavasta materiaalista on pelkkää pintaa. Biologiassa pintojen rooli on tätäkin kiehtovampi, koska pinnat ovat läsnä kaikkialla. Elämämme perustuukin pitkälti siihen, että meitä suojelee laaja joukko erikoistuneita biologi-

sia solukerrosten muodostamia biologisia esteitä. Veri-aivoeste säätelee monien aineiden pääsyä verenkierrosta aivoihin. Silmiemme pinnassa oleva molekyyli-pinnoite suojaa silmiämme kuivumiselta. Ihomme suojelee meitä patogeenien ohella auringolta ja kuivumiselta, toisaalta se mahdollistaa paikallisten tulehduslääkkeiden pääsyn kohteeseensa. Veri- ja imusuonten seinämissä erikoistuneet solut muodostavat esteen verenkiertoon kulkeutuneiden syöpäsolujen leviämiseksi muihin kudoksiin, mutta sallivat valkosolujen kulkeutumisen kudoksiin. Keuhkot suojelevat elimistöä ulkoisia uhkia vastaan, mutta sallivat hapen kulkeutumisen verenkiertoon – tosin sitä, kuinka happi pääsee keuhkoista verenkiertoon ei vielä kukaan ymmärrä.

Biologiset esteet ja niiden häiriötön toiminta ylläpitävät terveyttämme. Tämä on ikävällä tavalla tiedostettu myös edellisten kahden vuoden aikana, kun SARS-CoV-2 –virus on hyökännyt erityisesti keuhkojen biologisen esteen kimppeen tavoilla, jotka ovat monelta osin edelleen tuntemattomia. Vastaavasti myös muiden biologisten esteiden toiminnan fysikaaliset periaatteet ja biologia sekä säätelymekanismit tunnetaan äärimmäisen huonosti. Ongelman ydin on näiden monimutkaisten esteiden moniskaalainen rakenne ja toiminnallisuus, jolloin niiden ymmärtämiseen tarvitaan tietoa sekä molekyyli-tason vuorovaikutuksista että eri solutyypin keskinäisistä vuorovaikutuksista, jotka ovat sekä biokemiallisia että fysikaalisia. Harvalla tutkimusryhmällä on riittävää monitieteellistä osaamista tutkia moniskaalaisia biologisia prosesseja yksittäisistä atomeista organismeihin. Tämän haasteen edessä Solumekaniikka biologisten esteiden toiminnassa –huippuyksikön (<https://barrierforce.utu.fi/>) tavoitteena on tutkia sitä, miten biologisten esteiden kudokset ovat rakentuneet, kuinka elimistö ylläpitää niitä, ja erityisesti miten fysikaalisten voimien ja bio-

kemiallisten signaalien integrointi toimii molekyylitasolta kudostasolle. Molekyylitason tieto estekudosten toiminnasta on ensiaskel hoitoihin, jotka kohdentuvat sairauksien syihin eivätkä seurauksiin.

Huippuyksikön toiminnassa ovat mukana Turun yliopistosta Johanna Ivaskan tutkimusryhmä (Cell Adhesion and Cancer) sekä Helsingin yliopistosta Sara Wickströmin (Stem Cells and Tissue Architecture), Pipsa Saharisen (Translational Vascular Biology), Pekka Lappalaisen (Actin-based Molecular Machines) ja Ilpo Vattulaisen (Biological Physics and Soft Matter) tutkimusryhmät. Keskeinen osa huippuyksikön toimintaa on fysiikkaa edustava laskennallisen biofysiikan toiminta, joka kehittää mm. koneoppimiseen perustuvaa data-analytiikkaa ja luo moniskaalaisia simulaatiomalleja biologisten estekudosten toimintaperiaatteiden ymmärtämiseksi. Yksi keskeisimmistä fysiikan vahvuuksista on edistää uusien tutkimusmenetelmien kehitystä, luoden kiehtovia mahdollisuuksia johdattaa tiedettä uusiin suuntiin.

Huippuyksikön tavoitteena on kehittää yleisesti metodologiaa ja teknologioita, ja niitä hyödyntäen selvittää monitieteellisen tutkimuksen kautta, kuinka biologisten esteiden peittämiseen liittyviä sairauksia voidaan hoitaa ja jopa ehkäistä toimintahäiriöitä korjaamalla.

KVARKKIINEEN TUTKIMUKSEN HUIPPUYKSIKKÖ

Jyväskylän yliopiston Kvarkkiaineen tutkimuksen huippuyksikkö on yksi lokakuussa 2021 julkistetuista uusista Suomen Akatemian tutkimuksen huippuyksiköistä. Lukuisten yritysten jälkeen tämä on ensimmäinen kerta, kun hiuk-

kasfysiikan ala on edustettuna huippuyksikköohjelmassa. Akatemian päätös on siten merkittävä tunnustus koko suomalaiselle hiukkasfysiikalle, ja etenkin CERNissä tehtävälle tutkimustyölle.

Huippuyksikön tutkimuskohteena ovat vahvat vuorovaikutukset kvarkkien ja gluonien eli tavallisen aineen pienimpien rakenneosien välillä. Kyseessä on siis yksi luonnon neljästä tunnetusta perusvuorovaikutuksesta, painovoiman, sähkömagnetismin ja heikon vuorovaikutuksen lisäksi. Vahvoja vuorovaikutuksia kuvaava kvanttiväriodynamiikan teoria (QCD) on tunnettu ja perustuu pohjimmiltaan yksinkertaiseen symmetriaan. Kokeellisesti havaittavien ilmiöiden ymmärtäminen suoraan teoriasta lähtien on kuitenkin haastavaa. Kvarkkiaineen tutkimuksen huippuyksikön tavoitteena on ymmärtää, kuinka kvarkkien ja gluonien ominaisuudet tulevat havaittaviksi suurienergisissä hiukkastörmäyskokeissa. Huippuyksikkö pyrkii erityisesti ymmärtämään, kuinka ja milloin aine muuttuu kvarkkigluoniplasmaksi kutsuttuun olomuotoon, jossa kvarkit ja gluonit eivät ole sidottuina suuremmiksi hiukkasiksi.

Huippuyksikkö koostuu kolmesta teoreettisesta ja kahdesta kokeellisesta tutkimusryhmästä. Teoriaryhmien tutkimus liikkuu QCD:n teorian ja kokeellisten tulosten välisellä laajalla alueella, liittyen sekä CERNin LHC-kiihdyttimellä että lähivuosina Yhdysvaltoihin rakennettavalla elektroni-ioni-kiihdyttimellä (EIC) tehtävään tutkimukseen. Kokeelliset tutkimusryhmät ovat jäsenenä lähes kahdensadan tutkimuslaitoksen muodostamassa kansainvälisessä ALICE-kollaboraatiossa, joka operoi yhtä LHC:n suurista koeasemista. Eräs huippuyksikön vahvuuksista onkin hiukkasfysiikan alalla poikkeuksellisen läheinen yhteys teoreettisten ja kokeellisten ryhmien välillä.

ILTA AVARUUSNOBELISTIEN SEURASSA

Tommi Tenkanen

Kuluneen vuosikymmenen aikana yhä useampi Nobelin fysiikan palkinnosta on jaettu avaruutta ja koko maailmankaikkeutta tutkivien tähtitieteen ja kosmologian alojen tutkijoille. Palkituiksi ovat tulleet mm. kosmologi James Peebles, *Interstellar*-menestyselokuvan tieteestä tunnettu ja gravitaatioaaltoista nobelinsa pokannut Kip Thorne, sekä maailmankaikkeuden kiihtyvän laajenemisen yhtenä kolmesta tutkijasta havainnut Adam Riess.

Nobelit jaetaan muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta Tukholmassa, mutta perinteisesti Suomen Fyysikkoseura on kutsunut tuoreet nobelistit vierailulle myös Suomeen. Kutsun ovat viime vuosina vastaanottaneet mm. vuoden 2016 nobelistit **Duncan Haldane** ja **Michael Kosterlitz**, sekä vuoden 2017 nobelisti **Rainer Weiss**. Vierailuun on tyypillisesti kuulunut kaikille avoin yleisöluento, ja tapahtumat ovatkin olleet yksi seuran näkyvimpiä tapoja vaikuttaa suuren yleisön suuntaan.

Vuosi 2020 muutti tämänkin perinteen. Maaliskuussa koronaviruspandemia pysäytti maailman ja perui suunniteltuja vierailuja ja matkoja yksi toisensa perään. Myös suunnitellut nobelistivierailut peruuntuivat.

Nobelisteja juhlistaakseen ja fyysikaalisia tieteitä edistääkseen seura päätti kuitenkin edelleen pyrkiä tuomaan nobelistit Suomeen – tällä kertaa virtuaalisesti.

MUSTISTA AUKOISTA NOBELIN PALKINNON MERKITYKSEEN

Uuden vuosikymmenen alkajaisiksi nobelisteja päätettiin juhlistaa perinteisten luentojen sijaan videopalvelu *Youtubessa* julkaistulla neliosaisella *A Night with the Space Nobelists* -sarjalla. Aikavälillä marraskuu 2020 – huhtikuu 2021 toteutettu ja toukokuussa 2021 julkaistu sarja koostuu kolmen avaruustutkija-nobelistin haastattelusta sekä jaksosta, jossa suomalaiset avaruustutkijat keskustelevat Nobelin palkinnosta ja sen merkityksestä suomeksi. Sarja on allekirjoittaneen käsikirjoittama ja juontama.

Koska sarjan kohderyhmäksi otettiin suuri yleisö, ei haastatteluiden seuraaminen vaadi erityisiä ennakkotietoja fysiikasta tai kosmologiasta. Avaruus valikoitui sarjan teemaksi paitsi aiheen kasvavan merkityksen myös edellisten vuosien Nobelin palkintojen perusteella: vuonna 2019 nobelit jaettiin Aurinkokunnan ulkpuo-

listen eksoplaneettojen löytämisestä ja kosmologiasta, vuonna 2020 mustista aukoista.

Sarjan avausjaksossa nähtiin yksi kaikkein tuoreimmista fysiikan nobelisteista, **Reinhard Genzel**, joka palkittiin vuonna 2020 “supermassiivisen kompaktin objektin löytämisestä galaksimme keskustasta”, siis käytännössä Linnunradan supermassiivisen mustan aukon olemassaolon todistamisesta. Genzel jakoi palkinnon kollegansa **Andrea Ghez**in sekä mustia aukkoja tutkineen teoreetikko **Roger Penros**in kanssa. Tällä hetkellä Genzel toimii Max Planckin Maapallon ulkopuolisen fysiikan instituutin apulaisjohtajana ja Ludwig Maximilian -yliopiston professorina.

Haastattelussa Genzel kertoi paitsi palkintoon johtaneesta työstään, myös tähtitieteen tutkimusedellytyksistä Euroopassa. Keskustelussa

ehdittiin käsitellä myös mustien aukkojen syntytapoja sekä eksoottisempia aiheita kuten hypoteettisia madonreikiä.

Sarjan toisessa jaksossa nähtiin tähtitieteilijä **Didier Queloz**, joka toimii astrofysiikan professorina Cambridgen yliopistossa ja fellow'na Trinity Collegessa. Hänelle myönnettiin vuoden 2019 Nobelin fysiikan palkinto yhdessä ohjaajansa **Michel Mayor**in kanssa ensimmäisen Auringon kaltaista tähteä kiertävän eksoplaneetan löytämisestä. Jaksossa Queloz kertoi eksoplaneetoista ja paljasti, ettei usko avaruudesta löytyvän "Planeetta B:tä". Maa on Quelozin mukaan ainoa kotimme nyt ja tulevaisuudessa.

Kolmannessa jaksossa kosmologi **Adam Riess** tarjosi kokeneemman nobelistin näkemyksen palkinnon merkitykseen. Riess toimii professorina Johns Hopkinsin yliopistossa ja Yhdysval-



tain Space Telescope Science -instituutissa. Vuonna 2011 nobelilla palkittu tutkija on ehtinyt uransa aikana nähdä, kuinka maailman kuuluisimman palkinnon vastaanottaminen muuttaa kanssaihmiesten suhtautumista ja tarjoaa nobelistille odottamattomia mahdollisuuksia. Palkintonsa Riess sai yhdessä **Brian Schmidtin** ja **Saul Perlmutterin** kanssa maailmankaikeuden kiihtyvän laajenemisen havaitsemisesta. Valtaosa jakson sisällöstä koskettikin itse tutkimusaihetta.

Sarjan neljäs jakso toteutettiin kolmesta ensimmäisestä poiketen. Päätösjaksossa tähtitieteilijät **Maarit Käpylä** ja **Peter Johansson** keskustelivat studiossa Nobelin palkinnon merkityksestä ja huippututkimuksen edellytyksistä. Käpylä toimii professorina Aalto-yliopistossa ja tutkimusryhmän johtajana saksalaisessa Max Planck-instituutissa, Johansson professorina Helsingin yliopistossa.

Päätösjaksossa kuultiin myös vierailijoiden puheenvuoroja. Yliopistotutkija **Venus Keus** Helsingin yliopistosta kertoi lapsuudestaan Iranissa ja kuvaili, mitä Nobelin palkinto hänelle merkitsee. Toisessa puheenvuorossa *Kuinka voiteaan Nobelin palkinto* -tietokirjastaan tunnettu italialainen yhteiskuntatieteilijä **Massimiano Bucchi** kertoi palkinnon historiasta ja antoi tilastotietoa menneistä voittajista. Selvästi useimmin palkinto on jaettu miespuolisille tutkijoille. Palkinnon sukupuolittunutta historiaa ja esikuvien roolia pohdittiinkin vierailijapu-

heenvuorojen jälkeen myös studiovieraiden kanssa.

TUOTANTO TAPAHTUI YHTEISTYÖSSÄ

Sarjan tuotannossa pidettiin alusta lähtien tärkeänä, että nimenomaan suuri yleisö löytää videoiden äärelle ja ymmärtää niiden sisällön. Tämä vaikutti sekä sarjan esitysfoorumin (*Youtube*) että haastattelukysymysten valintaan. Osa kysymyksistä kerättiin suoraan yleisöltä seuran nettisivujen kautta. Lisäksi sarjan kaikki jaksot tekstitettiin suomeksi ja englanniksi, ja sarjaa mainostettiin seuran jäsenten sekä kattavan sosiaalisen median kampanjan lisäksi erityisesti nuorille.

Sarjan suunnittelun ja tuotannon parissa toimivat ennen kaikkea seuran puheenjohtajana toiminut **Emilia Kilpua** sekä allekirjoittanut. Sarjan suunnitteluun saatiin alusta alkaen tukea myös Aalto-yliopiston ja Helsingin yliopiston viestinnästä. Myös Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry sekä LUMA-keskus Suomi -verkosto osallistuivat sarjaan liittyvään viestintään, ja Aalto-yliopiston elokuvastudiolta löytyi sopiva paikka sarjan kuvauksille ja jälkituotannolle. Tapahtuma oli osa *Tutkitun tiedon teemavuoden* ohjelmaa, ja sen tuotannon rahoittivat Magnus Ehrnroothin säätiö ja Suomen Tiedeseura.

Tulevat vuodet näyttävät, milloin ja missä muodossa suomalaiset saavat nauttia nobelistien seurasta. Varmaa on, että tavalla tai toisella yleisöluentojen tai haastatteluiden perinnettä kannattaa jatkaa.

Kirjoittaja *Tommi Tenkanen on teoreettisen fysiikan dosentti, joka toimii tällä hetkellä tutkimusrahoituksen asiantuntijana Aalto-yliopistossa. Aiemmin Tenkanen on toiminut tutkijana Suomessa, Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa. Hän on kirjoittanut kaksi tietokirjaa ja lukuisia yleistajuisia artikkeleita kosmologiasta. A Night with the Space Nobelists -sarjan jaksot löytyvät Youtubesta sekä osoitteesta <https://www.fyysikkoseura.fi/language/fi/night-with-space-nobelists-fi/>.*

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 kvanttilogiikka 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 kvanttiteknonologian 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 mikrometriä 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 transiitioenergiaa. 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.

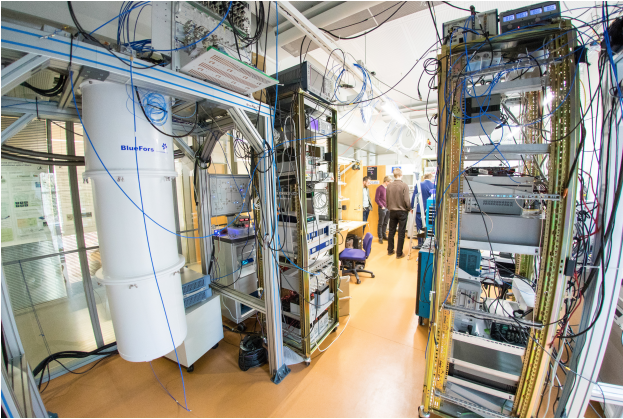
SUOMEN KVANTTITEOLLISUUDEN SYNTY

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 rakentamisen aloittamiseen yhdessä muiden Kvanttiteknologian 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 Rigelillä. 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 Vorseleman** Kylmälaboratoriossa kehittämiensä jäähdyttimien avuin. Toissa vuonna Bluefors tahkosi 17 miljoonaa euroa voittoa.

YHDESSÄ ETEENPÄIN

Jäähdyttelin 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 ylläpitämään 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 Kvanttitekniikan lippulaivanhanke, 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.

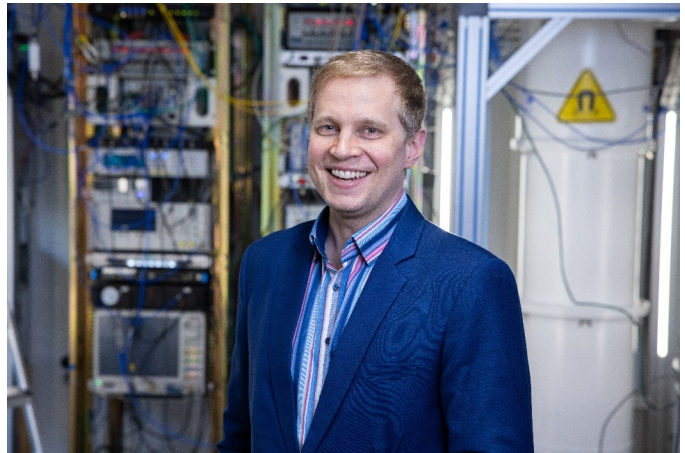
Näissä onnistumisissa on ollut erittäin tärkeässä asemassa unelmointi ja rohkeus lähteä toteuttamaan niitä. Mutta vaarana on, että sorrumme

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 kvanttitietokoneyritys, joka keskittyy suprajohdaviin 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 kuniaatohtoriksi.

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

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

Twitter: @mpmotton

INSTITUTEQ

THE FINNISH NATIONAL QUANTUM INSTITUTE

Minna Günes

InstituteQ and Quantum Technology Finland, Aalto University

Himadri Majumdar

InstituteQ and BusinessQ, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.

Paolo Muratore-Ginanneschi

InstituteQ and Department of Mathematics and Statistics, University of Helsinki

Jukka Pekola

InstituteQ and Quantum Technology Finland, Aalto University

INTRODUCTION: QUANTUM SCIENCE AND TECHNOLOGY LANDSCAPE

The discovery of Quantum Mechanics is now about one hundred years old [1-4]. Although the interpretation of Quantum Mechanics, meaning the ontology underlying the postulates, still remains object of investigation and controversy see e.g. [5,6], the application of the mathematical formalism stemming from the postulates has not only permitted enormous advances in the understanding of Nature at molecular atomic and sub-atomic scales but has also triggered technological innovations that invest almost every sector of every day life. Quantum Mechanics made possible in the middle of last century the invention of the transistor, an event which may well epitomize what it is now commonly called the “first Quantum revolution”. Microchips, broad-band internet and satellite navigation are tangible examples of the overwhelming societal and commercial impacts of the first quantum revolution. On their turn, these technologies have also paved the way for nanomanipulation protocols permitting control and application of previously untouched and fragile

quantum phenomena [7]. Effects like superposition, in which particles seem to assume multiple states until they are observed, and entanglement, in which the properties of a multi-partite quantum system are tied together in a manner independent of the spatial separation of individual components, are now set to offer the potential for completely new technical solutions. A “second Quantum revolution” [8] is thus now underway. On the horizon is the possibility to fulfill the vision [9-12] of realizing Fault-Tolerant Large Scale Quantum computers (FT-LSQ) permitting to execute certain computational tasks exponentially (e.g. quantum Fourier transform and prime factorization using Shor’s algorithm [13]) or polynomially (e.g. search in unsorted databases based on Grover’s [14]) faster than on high performance classical computers (HPC): the so-called Quantum computational advantage. Very recent milestone experiments well illustrate the reasons for outlooks’ relative optimism [15,16]. In the fall 2019 Google released the “Sycamore” [17] a quantum circuit consisting of 53 qubits and 20 cycles of unitary operations to demonstrate the experimental feasibility of a noisy sampling task. Just a few

months later, a team led by Jian-Wei Pan (潘建伟) at the University of Science and Technology of China (USTC 中国科学技术大学) presented an experimental implementation of boson sampling with 50-70 detected photons by a device called “Jiuzhang” (九章) [18]. Boson sampling is a protocol proposed by Aaronson and Arkhipov [19] to use non classical light to generate quantum computational advantage. In September 2021, a second team also led by Jian-Wei Pan announced [20] that a 66-qubit two-dimensional superconducting quantum processor, called “Zuchongzhi (祖冲之) 2.1” is able to perform sampling tasks with a classical computational cost about 6 orders of magnitude and 5000 times higher than that of the hardest tasks on Google’s Sycamore. Many experts interpret these results as indicating that quantum computing technologies are reaching the performance levels required for near-term applications of Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ) type [21]. In NISQ quantum gates’ noise limits the size of quantum circuits that can be executed reliably. Up-to-date expert surveys [22-25] identify quantum simulation, quantum linear algebra for AI and machine learning, quantum optimization as archetypical problems that NISQ devices may help tackling with direct industrial impacts respectively in the pharmaceuticals, chemicals, automotive, and finance sectors. The NISQ stage of quantum computing is meant to be an intermediate step towards LS-FTQ [26]. Indeed, the achievement of quantum computational advantage will not consist of one-off experimental demonstration [20]. Rather, the aforementioned experiments are part of long-term competition between the development of new classical simulation algorithms (see e.g. [27]) and quantum devices. Even in the eyes of skeptical observers such

competition is inherently triggering “major advances in human ability to simulate quantum physics and quantum chemistry” [28].

The benefit of introducing quantum hardware is only realised if accompanied by the development of new quantum algorithms. Information processing quantum and classical is thus set to play an essential role in the unfolding of the second quantum revolution. Shor’s algorithm [13] by enabling exponential speedup of integer factorization poses a vital threat to the security of current public key cryptography. Although estimates vary on when a quantum computer powerful enough to realize this threat will be built [16], reports of many governmental agencies (see e.g. [29-31]) call for an accelerated transition to quantum resistant algorithms actively developed by ongoing research in post quantum cryptography (PQC).

Advances in material nano-manipulation also open new avenues to exploit the natural sensitivity to environment of quantum mechanical superposition states to device new generations of high accuracy sensors (see e.g. [32]). These techniques promise immensely important developments in fields as diverse as brain imaging and particle detection [23,33].

In order to sustain and accelerate the rapid advance of fundamental and applied research of quantum technologies, governments around the world have during the 10th of this century announced massive investments. Among leading public players [34], China has announced about \$15 billion in funding as part of the 14. 5-year plan (2016-20), the European Union \$ 7.2 billion summing the funding prominently coming from the EU-Quantum flagship research and innovation initiative started in 2018 [35] (about 14% of total) and from the German [36], French [37] and Dutch [38] national plans (res-

pectively about 42%, 28% and 12% of the total investment).

As of 2021 US, UK, India and Japan governments have also announced funding directly devoted to Quantum technology of the order or slightly above \$ 1 billion.

Corporate investments are also surging [34]. Google has publicly committed to attain quantum advantage with an investment of several billions dollars guided by roadmap aiming at the realization of a FT-LSC by 2029 [16]. IBM's roadmap [26] aims at delivering FT-LSC by 2030. On schedule, at the beginning of 2022, IBM announced breaking the 100-qubit barrier with the release of the Eagle processor [39]. Besides Google [40] and IBM [39], major corporations such as Alibaba [41], Amazon [42], and Microsoft [43] have also already launched quantum-computing cloud services [15]. Investments are not limited to big corporate. In 2021 alone, announced investments in quantum-computing start-ups have surpassed \$ 1.7 billion, more than double the amount raised in 2020. The overall estimated value at stake for quantum-computing players is nearly \$ 80 billion [34].

INSTITUTEQ AT THE CENTER OF THE QUANTUM TECHNOLOGY LANDSCAPE IN FINLAND

Finland has taken major steps to promote Quantum technologies via the establishment in 2018 of the national Centre of Excellence (CoE) in research **Quantum Technology Finland (QTF)** [44] with a yearly operational volume of C12 million for 8 years (2018-2025) and, in June 2020 via a C20, 7 million acquisition grant from the Government to VTT to pursue a quantum computer. In November 2021, VTT

then announced the entry into operation of **Finland's first 5-qubit quantum computer** [45].

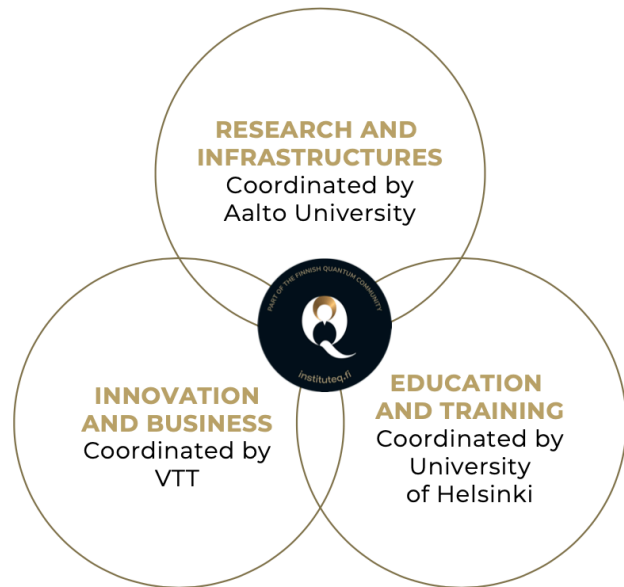
In order to coordinate national efforts by teaming up more broadly the existing expertise and resources, on March 31st 2021, the key players in quantum technologies - Aalto University, University of Helsinki and VTT Technical Research Centre of Finland (VTT) signed an agreement to collaborate on quantum science and technology, under the umbrella of **InstituteQ: The Finnish Quantum Institute** [46]. So far, close to 50 groups have joined the collaboration representing the versatile QT relevant expertise in theoretical, experimental, and applied physics, chemistry, computational science, mathematics, materials science and technology, nanoscience and nanotechnology, electrical engineering and electronics, neuroscience, economics, education and philosophy. The creation of the Institute has following general objectives:

- ▶ To enable the partners to develop, coordinate and carry out internationally highest-level research in quantum science and technology.
- ▶ To provide the best possible education for future workforce in this field, both in graduate and industrial programs. To achieve this goal the institute will serve as platform for coordinating national training programs (Ph.D. & M.Sc.).
- ▶ To drive innovation and leverage the national ecosystem building in quantum technology.
- ▶ To foster the development of relevant national infrastructures in quantum technology.

The need to team up resources and expertise across a wide spectrum in a collaborative center to pursue goals akin to those of InstituteQ is also demonstrated by similar initiatives across the EU. To only mention few examples from countries of size comparable to Finland, the **Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ)** [47] unites quantum physicists of University of Vienna, the Vienna University of Technology, the Austrian Academy of Sciences, and the Institute of Science and Technology Austria in order to set new impulses for research and teaching in Quantum Science and Technology. **The Quantum Delta NL** [38] consists of five major quantum hubs (Amsterdam, Delft, Eindhoven, Leiden, and Twente) and several universities and research centres to work together on the frontier of quantum technology. In Denmark, the Department of Physics and Astronomy at Aarhus University, Department of Physics at the Technical University of Denmark, and the Niels Bohr Institute at Copenhagen University initiated in January 2020 the **Danish Quantum Community** [48] with the aim of uniting all national stakeholders to advance the development of quantum technologies. Nevertheless, the fall 2020 report [49] of the Danish Industriens Fond – KPMG emphasizes the need of further enhancing coherence among Danish quantum technology players. The case for a national Quantum institute is also there clear.

STRUCTURE OF INSTITUTEQ

InstituteQ is a “*virtual organization*” whose structure reflects the Institute’s mission. The collaboration is led by *Leadership Committee* comprising of rectors of the university partners and the CEOs of the other partners. The Leadership Committee appoints a *Steering Group* supervising and steering the collaboration with-



Areas of operation of InstituteQ. The collaboration is supervised by the InstituteQ Steering Group and Leadership Committee with members from all the participating institutions. Each area is coordinated by one of the partner organisation and developed by a working group.

hin InstituteQ. The development of the activities is led by an *Acting Director*, appointed from among the senior academic personnel of the coordinating partner. InstituteQ implements three main operation lines, one in research and infrastructures (*ResQ*), one in education and training (*EduQ*) and one in business and innovation (*BusinessQ*). The operations lines have appointed *Operations Leads* and *Working groups* in charge of coordinating and implementing the objectives of the institute. All personnel engaged in the collaboration are in an employment relationship with their host organization, and with double affiliation to InstituteQ by discretion of each party. Administration and services for the institute are produced by the partners subscribing the agreement. For the time being, the operations are in the preparation stage, and they will be ramped up, contingent

upon funding confirmations by external sources as well as any commitments by the partner organizations. The main motivation of the collaboration is to set in motion coordinated development of the field and leverage longer-term resourcing of this field in Finland. Active members can best contribute by joining the working groups.

RESQ SUSTAINS RESEARCH

For decades research groups in Finland have pursued theoretical, computational, and experimental activities which altogether constitute an exceptionally strong and globally unique patrimony in quantum science and technology. For instance, Finland's long and successful research tradition in low temperature physics, sensor and cryogenic technologies is worldwide recognized.

The mission of the ResQ working group is to coordinate and foster top-level cross-disciplinary research. In fact, the emerging needs of quantum technologies now require to encompass a very broad spectrum of fields ranging from quantum machine learning and algorithms to philosophy and mathematical logic and from quantum materials to neuroscience and biomedical engineering [50]. An enormous potential for innovative research stems from building synergies between groups affiliated to InstituteQ which are also part of Finnish centres of excellence such as the aforementioned QTF, **the Finnish CoE of Inverse Modelling and Imaging** (2018-25) [51] whose focus areas are non-linear partial differential equations, geometry, and uncertainty quantification, and the very recently established **Finnish CoE in Randomness and Structures** (FiRST) (2022-29) [52] whose research themes are at the crossroads between probabilistic methods, quantum and conformal field theory, geometric and harmonic

analysis, partial differential equations and analytic number theory.

Achieving international scientific success in a small country such as Finland requires utilizing efficiently available resources for the benefit of the community and collaborating with best partners around the world. Taking maximum advantage of funding opportunities and in particular those offered by the European Quantum Flagship plays an essential role. During 2014-2020 EU programs funded projects with Finland based coordinators got about 3% percent of all funding for quantum-relevant projects against a 2% of the general funding share obtained by Finland [49]. Whereas these data already witness the strength of Finland based research in Quantum related fields in comparison with other fields, they also indicate the existence of margin of improvement. Countries such as Denmark, Switzerland and Austria in the same time span respectively obtained 8%, 6% and 5% of the EU quantum funding share. One of the goals of ResQ is thus to enable enhanced research partnering in European Quantum Flagship calls.

Efficient use of intellectual resources concretely means ensuring the conditions to retain top scientists coming from the Finnish ecosystem and to attract talents from abroad at all research position levels. To this goal, InstituteQ is collaborating with other Quantum Science and Technology centres in the international landscape (for instance the Swedish **Wallenberg Centre for Quantum Technology - WACQT** [53]) and with companies to build a strong post-doc fellowship program, for example. The realization of the program is subject to European funding, for which the community recently submitted a proposal. Another envisioned initiative is the creation of

InstituteQ Chairs of Excellence to recruit outstanding researchers to develop new research directions, or to reinforce existing research themes. Other plans to sustain international collaborations include high profile visitor program and series of scientific events that serve the needs of the community.

An important part of the mission of ResQ is to foster the development and promotion of the Finnish research infrastructures in the area of quantum technology. A prominent example of such infrastructures is **OtaNano** [54], that is an open access research infrastructure jointly operated by Aalto University and VTT. It provides advanced fabrication, measurement and characterization tools for academic and commercial users working on quantum technologies. Building the new **Finnish Quantum Computing Infrastructure** (FiQCI) is expected to gain significant leverage from the use of OtaNano. The ResQ efforts focus on influencing the development of important infrastructures, as well as ensuring access to critical tools and hardware platforms. The community shall also look for models to enable efficient use of fabrication lines and sharing of know-how within the community.

EDUQ DEVELOPS EDUCATION, TRAINING AND OUTREACH

Current estimates [55] predict an exponential growth in job creation in the field of Quantum Science and Technology with a projection of more than half a million new jobs around 2040. The expected exponential growth poses multifarious challenges to education in Quantum Science and Technology. Many stakeholders and companies have already reported significant difficulty in recruiting a workforce with education and skills adapted to fill job market demands. The phenomenon, referred to as

“Quantum bottleneck”, has been highlighted even in general interest newspapers [56, 57]. Quantum related jobs require both a quantum-aware and quantum proficient workforce with education degrees starting from Bachelor level. Furthermore, Quantum Science and Technology is a broad, interdisciplinary field spanning a wide range of scientific areas. The recognition of these facts is motivating several Universities across the EU to join forces to establish common M.Sc. and Ph.D. programs in the field. Notable examples are the **Cluster of Excellence Munich Center for Quantum Science and Technology** [58] formed by Technical University Munich (TUM) and Ludwig-Maximilians University Munich (LMU) which offers among other initiatives M.Sc., Ph.D. and post-doc programs; the **Quantum Master Barcelona** [59] which is embedded in **Quantum-Cat** [60] a Quantum Technology hub formed by the community of universities, companies and research institutes of Catalonia with aims analog to InstituteQ.

EduQ working group has the mission of coordinating efforts to educate the new generation of quantum scientists and engineers and to develop quantum literacy for the general public and policy makers. The first concrete achievement in this direction is the agreement on “*Cooperation on quantum technology education in the Helsinki metropolitan area*” signed by the Aalto University and the University of Helsinki. The agreement is in place since September 1st 2021 and allows undergraduate and graduate students of the covenanting institutions to freely choose among quantum technology relevant studies organized by the same institutions. The agreement is expected to serve as an incubator of national doctoral (Ph.D.) and master’s (M.Sc.) training programs. The establishment of national programs will put the

Finnish learning ecosystem in the position to compete with the educational offer emerging across the EU such as the aforementioned examples in Bayern and Catalonia. This is necessary to develop efficient educational study paths and contents that respond to the needs of the growing quantum sector. Also, it allows partners within InstituteQ to successfully respond to European funding opportunities supporting education in quantum science and technology.

InstituteQ's vision of national training programs is that students attached to the degree programs of their home universities have the multitude of national M.Sc. and Ph.D. studies easily available under the InstituteQ umbrella. The educational content is produced and developed in national collaboration with participating organizations. Development of knowledge and skills adapted to advance the careers of students interested in working not only in academia but also in industry and in government positions, is vital for the swift advancement of the field. To this goal InstituteQ will seek for opportunities of extended industry collaboration and to offer opportunities to internships and secondments as well as other forms of career development.

In order to overcome physical distances of students and lecturers, EduQ plans to devote significant efforts to favor the development of online courses and activities for both M.Sc. and Ph.D. students. In particular, the EduQ working group is already participating to the **QTEdu Open Master** [61] a pilot project of the European Quantum Flagship aiming to give students from all across Europe access to courses, internships, and even remotely supervised Master's thesis projects. Learning requires also networking and socialization of students. The

plan is to integrate traditional formats such as summer conference and school with innovative digital formats such as an annual quantum game hackathon which EduQ would organize in collaboration with companies. Qplaylearn [62], the official outreach project of InstituteQ provides another example of digital innovation for educational purposes. **QPlayLearn** is an online platform containing multimedia resources for learning about quantum science and technologies in a playful way. The scope is to provide a tool of multilevel education to everyone, regardless of their age and background. While working for realizing the activities outlined above, EduQ team is also conscious [63] that reshaping degree programs offers a great opportunity to create more equitable and inclusive learning environments in disciplines that historically lacked in diversity. It is therefore paramount to cultivate a friendly and supportive learning environment for students which regards diversity as a richness. These considerations also inspire all EduQ outreach activities, such as the quantum exhibitions which includes workshops for school kids. A good example is the currently ongoing **Photonic Trail** [64] that is currently open in Kaarina. The aim is to open the exhibition in the Helsinki region around mid-April.

BUSINESSQ FOSTERS INNOVATION AND BUSINESS

Finnish quantum science and technology research has already brought about several academic spin-offs and even international success stories. The business idea that in 2008 led to the foundation of Bluefors [65], for example, emerged from the task of upgrading dilution refrigerator systems at the Low Temperature Laboratory of the then Helsinki University of Technology, for which one of the later founders

of the company had been hired around 2005. BlueFors quickly established itself as a market leader in the field of cryogen-free ultra-low temperature systems, running today operations with over 250 employees and an annual revenue of approximately €100 million.

In view of the growing international competition, broadening the impact of quantum technology in industry and business in Finland requires building a coherent ecosystem that makes it attractive for companies to work with, instead of contacting several separate university groups. The third objective of InstituteQ is thus to provide a forum for companies and industries interested in development, innovation and commercialization of new products and services related to quantum technology.

To this goal, **BusinessQ** operates as an independent collective within the framework of InstituteQ and with no financial or legal commitments. Its operations are based on a Memorandum of Understanding signed by the first members in August 2021. This is to make the membership as easy as possible to attract the wider business and other stakeholder community. The vision of BusinessQ defined jointly by the participating companies, is that Finland implements quantum technology in businesses by 2030. The collaboration thrives for renewal of Finnish industries through quantum technology. The goal is to make Finland quantum-ready and quantum-safe. A growing number of members have joined BusinessQ, including the aforementioned Bluefors, the European multinational information technology service and consulting company Atos [66], IBM, OP-bank [67] and a growing number of startups. Among the latter ones is Algorithmiq [68] whose business idea is the development of qubit architecture agnostic variational quantum algorithms, which industry

experts consider as the most promising avenue for practical applications on NISQ devices [24, 23]. Another example of recent startup members of BusinessQ is IQM [69], a Finnish hardware company building superconducting quantum computers. Both of them are recent spinouts from the InstituteQ research community. In many ways the emergence and success of such companies exemplifies the objectives of InstituteQ to facilitate fundamental scientific findings in quantum science and technology and to apply them for the development of new commercial opportunities through the creation of an open and diverse human ecosystem.

References

- [1] W. Heisenberg, "Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.," *Zeitschrift für Physik*, vol. 33, pp. 879–893, dec 1925.
- [2] E. Schrödinger, "Quantisierung als Eigenwertproblem: Erste Mitteilung," *Annalen der Physik*, vol. 384, no. 4, pp. 361–376, 1926.
- [3] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, vol. 27 of *International series of monographs on physics*. Oxford University Press, 4 ed., 1981.
- [4] J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. (English translation "The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics" Princeton University Press 1955)*. Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften, Springer Science + Business Media, 2nd ed., 1981.
- [5] P. Busch, P. J. Lahti, and P. Mittelstaedt, *The Quantum Theory of Measurement*. Lecture Notes in Physics Monographs, Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [6] G. Ghirardi, *Sneaking a Look at God's Cards: Unraveling the Mysteries of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, 2007.
- [7] S. Haroche and J.-M. Raimond, *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities, and Photons*. Oxford Graduate Texts, 2006.
- [8] J. P. Dowling and G. J. Milburn, "Quantum technology: the second quantum revolution," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 361, pp. 1655–1674, jun 2003.
- [9] P. Benioff, "The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines," *Journal of Statistical Physics*, vol. 22, pp. 563–591, may 1980.
- [10] R. P. Feynman, "Simulating physics with computers," *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, pp. 467–488, June 1982.

- [11] D. Deutsch, “Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer,” *Proceedings of the Royal Society London A*, vol. 400, pp. 97–117, jul 1985.
- [12] D. P. DiVincenzo, “The Physical Implementation of Quantum Computation,” *Fortschritte der Physik*, vol. 48, pp. 771–783, 2000.
- [13] P. W. Shor, “Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer,” *SIAM Journal on Computing*, vol. 26, pp. 1484–1509, oct 1997.
- [14] L. K. Grover, “Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack,” *Physical Review Letters*, vol. 79, pp. 325–328, jul 1997.
- [15] M. Biondi, A. Heid, N. Henke, N. Mohr, L. Pautasso, I. Ostojic, L. Wester, and R. Zemme, “Quantum computing use cases are getting real—what you need to know,” *McKinsey Insights*, 2021.
- [16] D. Shaw, “Quantum Hardware Outlook 2022,” tech. rep., Fact Based Insight, 2022.
- [17] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. G. S. L. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, A. Ho, M. Hoffmann, T. Huang, T. S. Humble, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostritsa, D. Land-huis, M. Lindmark, E. Lucero, D. Lyakh, S. Mandra, J. R. McClean, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, K. Michielsen, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Os-tby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, E. G. Rieffel, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis, “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” *Nature*, vol. 574, pp. 505–510, oct 2019.
- [18] H.-S. Zhong, H. Wang, Y.-H. Deng, M.-C. Chen, L.-C. Peng, Y.-H. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu, P. Hu, X.-Y. Yang, W.-J. Zhang, H. Li, Y. Li, X. Jiang, L. Gan, G. Yang, L. You, Z. Wang, L. Li, N.-L. Liu, C.-Y. Lu, and J.-W. Pan, “Report: Quantum computational advantage using photons,” *Science*, vol. 370, pp. 1460–1463, Dec. 2020.
- [19] S. Aaronson and A. Arkhipov, “The computational complexity of linear optics,” in *Proceedings of the 43rd annual ACM symposium on Theory of computing - STOC 2011*, pp. 333–342, ACM Press, 2011.
- [20] Q. Zhu, S. Cao, F. Chen, M.-C. Chen, X. Chen, T.-H. Chung, H. Deng, Y. Du, D. Fan, M. Gong, C. Guo, C. Guo, S. Guo, L. Han, L. Hong, H.-L. Huang, Y.-H. Huo, L. Li, N. Li, S. Li, Y. Li, F. Liang, C. Lin, J. Lin, H. Qian, D. Qiao, H. Rong, H. Su, L. Sun, L. Wang, S. Wang, D. Wu, Y. Wu, Y. Xu, K. Yan, W. Yang, Y. Yang, Y. Ye, J. Yin, C. Ying, J. Yu, C. Zha, C. Zhang, H. Zhang, K. Zhang, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zhao, L. Zhou, C.-Y. Lu, C.-Z. Peng, X. Zhu, and J.-W. Pan, “Quantum Computational Advantage via 60-Qubit 24-Cycle Random Circuit Sampling,” *eprint arXiv:2109.03494*, Sept. 2021.
- [21] J. Preskill, “Quantum Computing in the NISQ era and beyond,” *Quantum*, vol. 2, p. 79, aug 2018.
- [22] E. Gibney, “Quantum gold rush: the private funding pouring into quantum start-ups,” *Nature*, vol. 574, pp. 22–24, oct 2019.
- [23] P. Forteza, J.-P. Herteman, and I. Kerenidis, “Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas,” *Mission confiée e par le Premier Ministre Edouard Philippe*, 2020.
- [24] M. Biondi, A. Heid, N. Henke, N. Mohr, L. Pautasso, I. Ostojic, L. Wester, and R. Zemme, “Quantum computing: An emerging ecosystem and industry use cases,” 2021.
- [25] D. Shaw, “Quantum Software Outlook 2022,” tech. rep., Fact Based Insight, Jan. 2022.
- [26] J. Gambetta, “IBM’s roadmap for scaling quantum technology,” *IBM Research Blog*, 2020.
- [27] C. Huang, F. Zhang, M. Newman, J. Cai, X. Gao, Z. Tian, J. Wu, H. Xu, H. Yu, B. Yuan, M. Szegedy, Y. Shi, and J. Chen, “Classical Simulation of Quantum Supremacy Circuits,” *eprint arXiv:2005.06787*, May 2020.
- [28] G. Kalai, “The Argument against Quantum Computers, the Quantum Laws of Nature, and Google’s Supremacy Claims,” *eprint arXiv:2008.05188*, Aug. 2020.
- [29] L. Chen, S. Jordan, Y.-K. Liu, D. Moody, R. Peralta, R. Perlmutter, and D. Smith-Tone, “Report on Post-Quantum Cryptography,” tech. rep., National Institute of Standards and Technology (NIST), 2016.
- [30] M. Campagna, O. Dagdelen, J. Ding, J. K. Fernick, N. Gisin, D. Hayford, T. Jennewein, N. Lu’tkenhaus, M. Mosca, B. Neill, M. Pecun, R. Perlmutter, G. Ribordy, J. M. Schanck, D. Stebila, N. Walenta, W. Whyte, and Z. Zhang, “Quantum Safe Cryptography and Security An introduction, benefits, enablers and challenges,” tech. rep., ETSI (European Telecommunications Standards Institute) white paper, 2015.
- [31] M. Lucamarini, A. Shields, R. Alléaume, C. Chunnillall, I. P. Degiovanni, M. Gramegna, A. Hasekioglu, B. Huttner, R. Kumar, A. Lord, N. Lu’tkenhaus, V. Makarov, V. Martin, A. Mink, M. Peev, M. Sasaki, A. Sinclair, T. Spiller, M. Ward, C. White, and Z. Yuan, “Implementation Security of Quantum Cryptography Introduction, challenges, solutions,” tech. rep., ETSI (European Telecommunications Standards Institute) white paper, 2018.
- [32] Q. Zhuang, J. Preskill, and L. Jiang, “Distributed quantum sensing enhanced by continuous-variable error correction,” *New Journal of Physics*, vol. 22, p. 022001, feb 2020.
- [33] High-Level Steering Committee, “Quantum Technologies-Flagship Final Report,” tech. rep., European Commission, 2017.
- [34] McKinsey & Company, “The Quantum Technology Monitor,” tech. rep., McKinsey Featured Insights, Sept. 2021.
- [35] European Commission, “Quantum Flagship.” <https://qt.eu/>, 2018.
- [36] B. Deutschland, “Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt: Rahmenprogramm der Bundesregierung.” web: <https://www.quantentechnologien.de/>, 2021.
- [37] <https://www.gouvernement.fr/en/quantum-plan>.
- [38] <https://quantumdelta.nl/>.
- [39] IBM Corporation, “IBM Quantum.” <https://www.ibm.com/quantum-computing/>.
- [40] Google Incorporation, “Quantum AI Lab.” <https://quantumai.google/>, 2015.

- [41] Alibaba Group Holding Limited, “Damo Academy.” <https://damo.alibaba.com/labs/quantum>.
- [42] Amazon.com Incorporation, “Quantum Solutions Lab.” <https://aws.amazon.com/quantum-solutions-lab/>.
- [43] Microsoft Corporation, “Microsoft Quantum.” <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/quantum-computing/>.
- [44] <https://qtf.fi/>.
- [45] VTT press release, “Finland’s first 5-qubit quantum computer is now operational.” <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/building-finlands-first-quantum-computer-underway-and-schedule-vtt>, <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/finlands-first-5-qubit-quantum-computer-now-operational>, 2021.
- [46] <https://instituteq.fi/>.
- [47] <https://vcq.quantum.at/>.
- [48] <https://quantum.dtu.dk/dk-quantum-community>.
- [49] Industriens Fond – KPMG tech. rep., Quantum technology in Denmark, 2020.
- [50] <https://instituteq.fi/about/#participating-groups>.
- [51] <https://www2.helsinki.fi/en/researchgroups/centre-of-excellence-of-invers>
- [52] <https://www.helsinki.fi/en/projects/first>.
- [53] <https://www.chalmers.se/en/centres/wacqt/>.
- [54] <http://www.otanano.fi/>.
- [55] A. Venegas-Gomez, “The Quantum Ecosystem and Its Future Workforce,” *PhotonicsViews*, vol. 17, pp. 34–38, nov 2020.
- [56] C. Metz, “The Next Tech Talent Shortage: Quantum Computing Researchers,” *The New York Times*, Oct. 2018.
- [57] M. Piesing, “‘How can we compete with Google?’: the battle to train quantum coders,” *The Guardian*, Jan. 2020.
- [58] <https://www.mcqst.de/>.
- [59] <https://quantummasterbarcelona.eu/>.
- [60] <https://quantum-cat.cat/>.
- [61] <https://qtom.qtedu.eu/>.
- [62] <https://qplaylearn.com/>.
- [63] A. Asfaw, A. Blais, K. R. Brown, J. Candelaria, C. Cantwell, L. D. Carr, J. Combes, D. M. Debroy, J. M. Donohue, S. E. Economou, E. Edwards, M. F. J. Fox, S. M. Girvin, A. Ho, H. M. Hurst, Z. Jacob, B. R. Johnson, E. Johnston-Halperin, R. Joynt, E. Kapit, J. Klein-Seetharaman, M. Laforest, H. J. Lewandowski, T. W. Lynn, C. R. H. McRae, C. Merzbacher, S. Michalakis, P. Narang, W. D. Oliver, J. Palsberg, D. P. Pappas, M. G. Raymer, D. J. Reilly, M. Saffman, T. A. Searles, J. H. Shapiro, and C. Singh, “Building a Quantum Engineering Undergraduate Program,” *eprint arXiv:2108.01311*, Aug. 2021.
- [64] <https://kaarina.fi/fi/tapahtumat/photonic-trail>. [65] <https://bluefors.com/>.
- [66] <https://atos.net/>.
- [67] <https://www.op.fi/>.
- [68] <https://algorithmiq.fi/>.
- [69] <https://www.meetiqm.com/>.

KVANTTILASKENTAA LUKIOLAISILLE

Elina Palmgren, *Helsingin yliopisto*

Tapio Rasa, *Helsingin yliopisto*

Antti Laherto *Helsingin yliopisto*

Suuren yleisön keskuudessa kvanttifysiikka on tunnettu pahamaineisen vaikeana mutta myös uteliaisuutta herättävänä fysiikan osa-alueena. Kynnyskysymyksenä aiheeseen tutustumiselle lienee sen vaatima matematiikka: Jotta aihepiiriin pääsee kaivautumaan pintaa syvemmälle, sen ilmiöitä pitää tottua käsittelemään matematiikan keinoin – ja tarvitta-vaan matematiikkaan pääsee kiinni yleensä vasta korkeakouluopinnoissa. Lukiotasolla kvant-
tifysiikkaa käsitellään kvalitatiivisesti, mutta aihepiirin käsittelyssä päästään hädin tuskin raapaisemaan sata vuotta sitten kehitettyjä teorioita. Sama tilanne vaikuttaa olevan monen muunkin maan fysiikan toisen asteen koulutuksessa (Stadermann et al., 2019).

Uusimassa lukion opetussuunnitelmassa (LOPS, 2019) fysiikan viimeinen valtakunnal-linen opintojakso nostaa aiempaa voimak-
kaammin esiin kvanttifysiikan teknologiset so-
vellukset sekä kvanttirakenteet. Opetussuunni-
telman tulkinta on tietenkin opettajien, koulujen
ja oppikirjojen tekijöiden käsissä, mutta uusi
muotoilu antaa aiempaa enemmän mahdolli-
suuksia sisällyttää lukio-opetukseen myös edis-
tyneempiä kvanttifysiikan teemoja.

Kvanttifysiikan aihepiiriä voidaan lukiotasolla lähestyä esimerkiksi tietotekniikan ja kvantti-
laskennan kautta. Toteutimme opetuskokeilun,
joka hyödynsi tätä lähtökohtaa ja esitteli lukiolaisille kvanttifysiikan peruskäsitteitä sekä kva-
litatiivisella että kvantitatiivisella tasolla. Tässä
jutussa kerromme opetuskokeilusta ja sen taust-
toista sekä käymme läpi kokeilusta saatuja tu-
loksia ja niiden mahdollista hyödyntämistä
kvanttifysiikan opetuksessa.

KVANTTILASKENTA: TULEVAISUUDEN ALA

Opetuskokeilu toteutettiin Erasmus+ -projektin ”I SEE” yhteydessä. Projektin tarkoituksena ei sinänsä ollut tarkastella kvanttifysiikan opetus-
ta, vaan tutkia mahdollisuuksia yhdistää ns. tule-
vaisuusajattelun taitojen opetusta luonnontie-
teiden opetukseen lukiotasolla. Tulevaisuusajat-
telun taidot ovat kykyä ennakoida, rakentaa ja
arvioida mahdollisia, toivottavia ja todennäköi-
siä tulevaisuusskenaarioita (ks. esim. Levrini et
al., 2021). Tulevaisuusajattelussa on tärkeää
osata suhtautua epävarmuuteen, kyseenalaistaa
oletuksia ja tunnistaa vaikutusmahdollisuuksia.
Viime aikoina tällaisten taitojen merkitys on
havaittu laajasti eri koulutusasteilla: tulevai-
suusajattelun taidot näkyvät esimerkiksi
uusimmissa lukion opetussuunnitelman perus-
teissa (LOPS, 2019) ja Helsingin yliopiston
juuri alkaneessa opetussuunnitelmatyössä.

I SEE -kurssien konteksteiksi valittiin luonnontieteellisiä aihepiirejä, jotka ovat tulevaisuuden kannalta relevantteja sekä tieteellis-teknologisesti että yhteiskunnallisesti. Opetuskokeilujen aihepiireiksi valikoituneet teemat olivat ilmastomuutos, hiilensidonta, tekoäly ja kvanttilaskenta.

Kvanttilaskenta sopii tulevaisuusteemaisen kurssin aiheeksi erinomaisesti, koska se tarjoaa potentiaalisesti mahdollisuuksia globaalien ongelmien ratkaisemiseen, mutta saattaa synnyttää myös uhkakuvia. Näin ollen se tarjoaa runsaasti tilaisuuksia niin tieteellisten, teknologisten kuin sosiaalistenkin näkökulmien pohdintaan. Lisäksi se on omiaan herättämään opiskelijoiden mielenkiinnon. Erityisen kutkuttavan aihepiirin kvanttilaskennasta tekee se, ettemme tunne sen täyttä potentiaalia; vasta aika näyttää, mihin kaikkeen se voi yltyä.

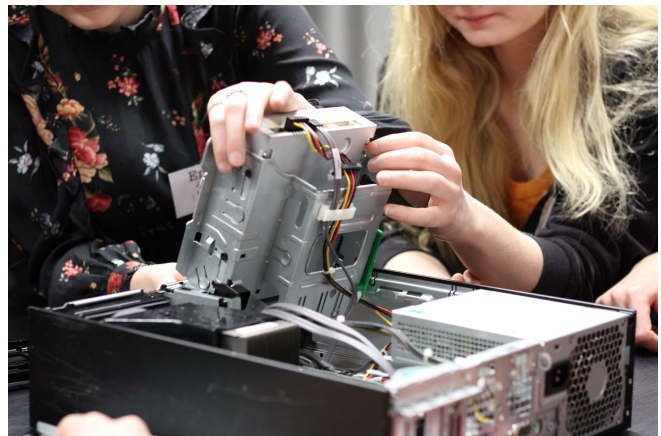
OPETUSKOKEILU

Kvanttilaskentakurssi toteutettiin projektin yhteydessä kahdesti Suomessa ja kerran Italiassa. Keskitymme tässä kirjoituksessa pääasiassa ensimmäiseen suomalaiseen opetuskokeiluun keväältä 2018. Tällöin kurssi pidettiin kahden viikonlopun ja yhden illan mittaisena Helsingin yliopiston Tiedekulmassa. Kurssia mainostettiin opettajien kautta lukiolaisille, joista valittiin ilmoittautumisjärjestyksessä 10 nais- ja 12 miesopiskelijaa. Opiskelijoiden iät vaihtelivat 16 ja 19 vuoden välillä ja mukana oli osallistujia kaikilta kolmelta lukion vuosiluokalta sekä yksi yhdeksäsluokkalainen.

Kurssin sisältö yhdisteli kvanttifysiikka- ja tulevaisuusnäkökulmia. Kurssilla keskusteltiin tietotekniikan kehityksestä ja ennustamisen haasteista, opiskeltiin luovan ja systeemisen ajattelun taitoja ja harjoiteltiin erilaisia skenaariorakentamisen tapoja. Kurssin punaisena

lankana toimivat opiskelijoiden ryhmätyöt, joita he työstivät läpi kurssin ja joissa heitä pyydettiin kehittelemään tietotekniikkaan tai kvanttilaskentaan pohjaava ratkaisunsa johonkin globaaliin ongelmaan. Näin kurssin aikana syntyi joukko tulevaisuusskenaarioita, jotka esiteltiin juhlavassa loppuseminaarissa: opiskelijat eläytyivät 2040-luvulle ja kertoivat tarinan siitä, kuinka olivat itsekin osallistuneet globaalin haasteen ratkaisuun kvanttilaskennan avulla.

Itse kvanttilaskentaa lähestyttiin kurssilla klassisen laskennan kautta. Aiheeseen perehtymisen alkoi historiallisella katsauksella tietokoneiden ja laskentateknologian kehitykseen. Tätä kautta opiskelijoille esiteltiin myös perusajatus informaation esittämisestä binäärilukujen avulla. Lisäksi opiskelijat tutustuivat tavallisten



pyöritietokoneiden komponentteihin ja tietokoneen toimintalogiikan peruskäsitteisiin, kuten loogisiin portteihin ja yksinkertaisiin algoritmeihin.

Klassiseen laskentaan ja tietokoneiden historialliseen kehitykseen perehdyttiin ensimmäisenä kurssiviikonloppuna. Osalle opiskelijoista aiheet olivat ennalta tuttuja, mutta läheskään kaikki eivät olleet ennen esimerkiksi nähneet, miltä tietokone näyttää sisältä.

Toisena kurssiviikonloppuna opiskelijat pääsivät tutustumaan kvanttimekaniikan logiikkaan,

jota havainnollistettiin yksinkertaisen kaksitasosysteemin¹ avulla. Samassa yhteydessä opiskelijat johdateltiin huomaamaan, että kaksitasosysteemi sopii hyvin edellisenä viikonloppuna esitellyn binäärisen informaation esitykseksi. Koska kyseessä kuitenkin on kvanttifysiikka, oman lisämausteensa esitykseen toivat superpositio ja todennäköisyystulkinta, jotka selitettiin käsitteinä opiskelijoille.

Opiskelijoiden kanssa keskusteltiin kvanttiteokoneiden mahdollisista sovelluksista, ja klassisen ja kvanttilaskennan eroavaisuuksia pohdittiin erityisesti laskentatehon kannalta. Kvanttiohjelmointiin tutustuttiin yksinkertaisimpien kvanttiporttien ja -algoritmien kautta (monimutkaisimpana esimerkkinä Deutschin algoritmi) ja opiskelijat pääsivät kokeilemaan kvantti-algoritmin rakentamista IBM Quantumilla (quantum-computing.ibm.com).

OPETUSKOKEILU

Kurssin jälkeen kaikki opiskelijat haastateltiin. Osana haastatteluja opiskelijoita pyydettiin ratkaisemaan kvalitatiivinen kvanttifysiikan tehtävä, joka oli sovellettu oppikirjasta McIntyre et al. (2012, s. 19–20). Tehtävässä pyydettiin opiskelijoita päättämään mittaustodennäköisyyksiä kahdessa eri tilanteessa: tehtävän ensimmäisessä osassa tarkastellaan superpositiossa olevaa kaksitasotilaa ja toisessa osassa kahden eri hiukkaslajin sekatilaa. Lopuksi opiskelijoilta kysyttiin, mitä eroja tilanteissa heidän mielestään oli. Tehtävä sisälsi kaikki kurssin oleelliset kvanttimekaaniset käsitteet (tila, mittaustodennäköisyys, romahtaminen, superpositio) ja sen avulla haluttiin testata, kuinka hyvin opiskelijat olivat ymmärtäneet ne.

Näiden haastattelujen pohjalta yleiskuvaksi jäi, että kvanttiaihepiirin osaaminen vaihteli opiskelijoiden välillä voimakkaasti. Osalle tehtävä vaikutti olevan hyvin helppo, mutta osa ei tahtonut saada ajatuksesta kiinni. Vaikutelma oli, että osa opiskelijoista olisi tarvinnut enemmän aikaa asioiden sulatteluun. Toisaalta myös opiskelijoiden lähtötasot vaihtelivat paljon sekä fyysikassa, matematiikassa että tietotekniikassa, koska mukana oli opiskelijoita eri vuosiluokilta ja erilaisista lukioista. Yleisesti ottaen lukion toisen ja kolmannen vuoden opiskelijat pärjäsivät haastattelukysymyksessä keskimääräistä paremmin.

Haastatteluissa huomattiin myös, että opiskelijoiden oli vaikeaa yhdistää kvanttiasioita ja tulevaisuusteemoja, vaikka siltaa näiden välille yritettiin kurssilla rakentaakin. Epäilemme tämän johtuvan ainakin osittain siitä, että kvanttilaskennan käytännön sovellukset ovat edelleen tulevaisuuden skenaarioita, eikä kurssilla siksi voitu puhua sovelluksista muuten kuin teoreettisella tasolla. Osittain tästä syystä “I SEE”-projektin italialaiset partnerit päättivät omalla kurssillaan korvata Deutschin algoritmin käsittelyn kvanttiteleportaatiolla. He ovat analysoineen teleportaatioaktiiviteettia tuoreessa artikkelissaan Satanassi et al. (2021)

TEKNOLOGISIA UTOPIOITA JA DYSTOPIOITA

Haastatteluaineistojen tarkempi analyysi (Rasa et al., 2022) paljasti, että opiskelijat kokivat erityisesti tulevaisuusteeman pohtimisen antoisana ja reflektoivatkin tulevaisuusajattelunsa muutuneen kurssin myötä. Haastattelujen mukaan opiskelijoiden ajatukset tulevaisuudesta muutuivat kahtalaisesti: yhtäältä tulevaisuus nähtiin

¹ Ensi alkuun käsiteltiin kuvitteellisia kvanttilioita, joiden voitiin mitattaessa havaita olevan väriltään joko punaisia tai sinisiä ja muodoiltaan joko kolmioita tai neliötä. Kun peruslogiikka oli tullut opiskelijoille tutuksi, väri ja muoto korvattiin elektronin spinin komponenteilla.

epävarmempana ja arvaamattomampana, mutta toisaalta myös myönteisempänä. Sama ilmiö havaittiin opiskelijoiden ajatuksissa teknologisesta kehityksestä ja sen vaikutuksesta joko yleisesti tai kvanttilaskennan tapauksessa. Opiskelijat käyttivätkin ilmaisuja kuten “mitä vain voi tapahtua”, “pitää oppia ajattelemaan luovasti” tai “tiedän vielä vähemmän kuin ennen mitä tulevaisuudessa tapahtuu”. Toiset opiskelijat kertoivat, että “aiemmin ei tajunnut, että maailma edelleen muuttuu ja että kaikkea ei vielä tiedetä”. Moderni fysiikka haasteellisudessaan tarjosikin kurssilaisille näköalan tieteellisen tiedon horisonttiin.

Tämä tulevaisuuden avoimuuden tarkastelu on pedagogisesti kiinnostava ilmiö. Tulevaisuutta käsittelevä kasvatus, samoin kuin kvanttifysiikka, vaatii niin opettajalta kuin opiskelijaltakin heittäytymistä epävarmalle alueelle, mikä voidaan kokea positiivisestikin. Osa opiskelijoista esimerkiksi liitti tulevaisuuden epävarmuuteen mahdollisuuden toimijuudelle: jos kaikkea ei tiedetä, niin silloin omasta osaamisesta voi olla hyötyä. Samoin jos tulevaisuus ei ole ennalta määrätty, asioihin voi vaikuttaa. Opiskelijat painottivat kuitenkin, etteivät kokeneet voivansa vaikuttaa maailmaan yksinään: kurssi olikin lisännyt toiveikkuutta osoittamalla, että muutkin ikätoverit pohtivat suuria kysymyksiä esimerkiksi kestävyysaasteista.

Kuten aiemmin mainittiin, kvanttilaskennan liittäminen yleisiin tulevaisuuspohdintoihin oli osalle opiskelijoista haastavaa. Vaikka jotkut opiskelijat näkivät kvanttilaskennan mahdollisuuksien ja riskien kautta (“joko edistää tai pahentaa asioita, ei voi tietää”) ja osa taas analogioiden avulla (“tulevaisuus on vähän niin kuin kvanttipiiri, pitää ajatella eri tavalla”), toiset opiskelijat kokivat tulevaisuusajatteluun ja kvanttilaskentaan liittyvät kurssiaktiviteetit lii-

an erillisinä. Kvanttilaskenta onkin haastava konteksti yhteiskunnallisesti relevantille tiedeopetukselle abstraktiutensa ja verrattain vähäisen tuttuutensa vuoksi. Osa opiskelijoista tuntui kuitenkin hahmottavan jatkumon tieteellisen osaamisen, teknologisten sovelluksien ja niiden yhteiskunnallisten vaikutusten välillä.

MITÄ KOKEILUSTA JÄI KÄTEEN?

Kokemustemme perusteella kvanttifysiikan kvantitatiivinen käsittely lukiotasolla on mahdollista ja antoisaa. On kuitenkin hyvä huomata, että opetuskokeilussamme opiskelijajoukko oli hyvin valikoitunut, eivätkä kokemuksemme välttämättä yleisty koskemaan kaikkia fysiikkaa pidemmälle opiskelevia lukiolaisia. Uskomme kuitenkin, että kvanttifysiikan ja -laskennan keskeisimpien käsitteiden kuten superposition ja mittaustodennäköisyyden oppiminen kvalitatiivisella tai semi-kvantitatiivisella tasolla on kaikkien lukiolaisten ulottuvissa. Kvanttifysiikan tuominen tiiviimmin osaksi lukion fysiikan opetusta vaatisi kuitenkin todennäköisesti opettajien täydennyskoulutusta, koska teemat ovat monilta osin täysin uusia fysiikan aineenopettajille: harva opettaja on opintojensa aikana ehtinyt tutustua esimerkiksi kvanttilaskentaan. Lisäksi kvanttifysiikan oppimista ja opettamista olisi tärkeää tutkia lisää, jotta löydettäisiin parhaat keinot tehdä vaikea aihepiiri helpommin lähestyttäväksi opiskelijoille.

Opetuskokeilumme toisen kohteen, tulevaisuusajattelun taitojen, hyödyntäminen lukion luonnontiedeopetuksessa vaatii niin ikään lisätutkimusta. Tähän mennessä voidaan varmuudella sanoa, että tulevaisuusajattelun taitojen integroiminen luonnontiedeopetukseen onnistuu ainakin tiettyjen teemojen (esimerkiksi ilmastomuutoksen) kohdalla erinomaisesti ja että ne voivat tarjota opiskelijoille voimaannuttavia toimijuuden kokemuksia maailmassa, josta on

tullut entistä arvaamattomampi. Tätä tutkimusta jatketaan ”Fedora”-projektissa (fedora-project.eu).

Kaikkien “I SEE” -kurssien opetusmateriaalit ovat vapaasti ladattavissa projektin verkkosivuilta (iseeproject.eu).

Haluamme kiittää kaikkia “I SEE” -projektin partnereita, opetuskokeilun suunnitteluun ja datan analysointiin osallistuneita sekä ennen kaikkea kurssille osallistuneita opiskelijoita!

Lähteet

Levrini, O., Tasquier, G., Barelli, E., Laherto, A., Palmgren, E., Branchetti, L., & Wilson, C. (2021). *Recognition and operationalization of Future-Scaffolding Skills: Results from an empirical study of a teaching-*

learning module on climate change and futures thinking. Science Education, 105(2), 281–308.

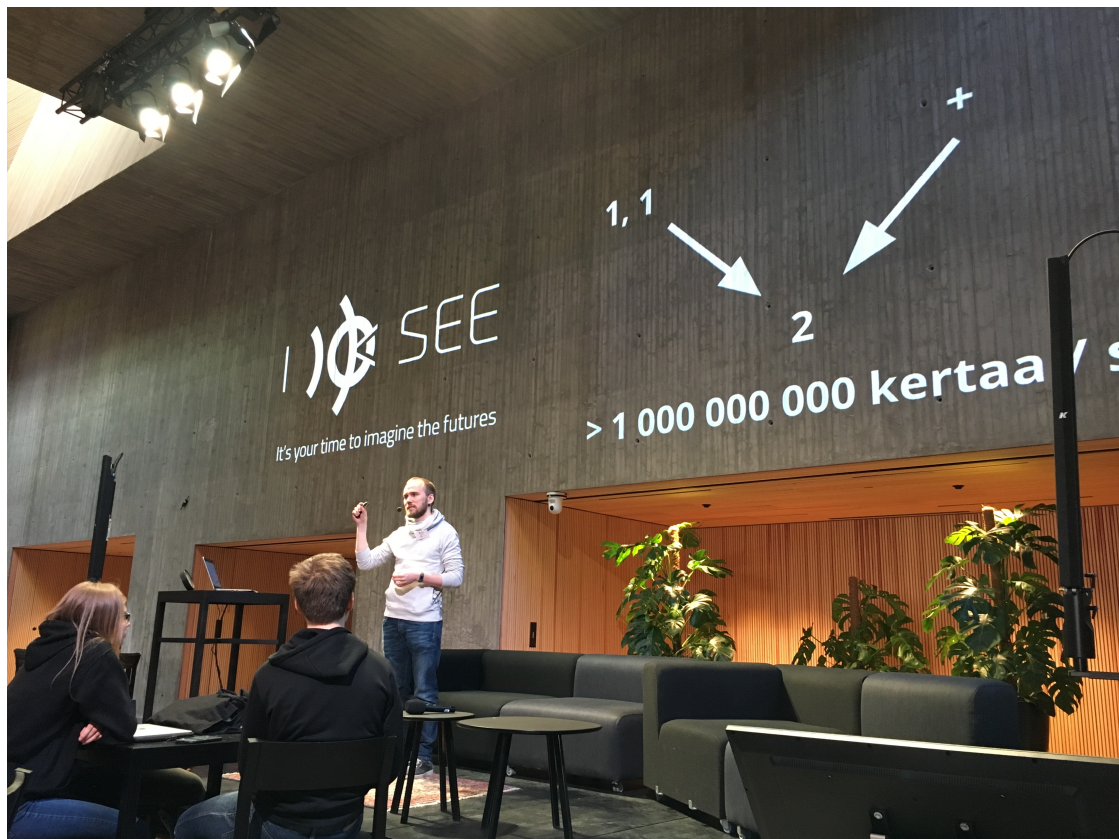
McIntyre, D. H., Manogue, C. A., & Tate, J. (2012). *Quantum mechanics: A paradigms approach.* Boston: Pearson.

Opetushallitus 2019. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019. Helsinki.

Rasa, T., Palmgren, E., & Laherto, A. *Futurising science education: students’ experiences from a course on futures thinking and quantum computing.* Instr. Sci. (2022).

Satanassi, S., Ercolessi, E., & Levrini, O. (2022). *Designing and implementing materials on quantum computing for secondary school students: The case of teleportation.* Physical review physics education research, 18(1).

Stadermann, H. K. E., van den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). *Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic.* Physical review physics education research, 15(1).





KORONA JA EPÄTIETOISUUS

Petri Laarne

Olisin voinut aloittaa tilastotieteen ainejärjestön opintovastaavana parempaankin aikaan. Alkuvuodesta 2021 Helsingin yliopisto oli jälleen lähes täydellisessä etäopetuksessa, ja sivuaineopiskelijana yhteyteni tilastolaisiin oli muutenkin rajoittunut.

Koronaan on koko ajan liittynyt epä tietoisuus: miten tauti leviää, miten sitä hoidetaan, miten tilanne ja rajoitukset kehittyvät? Opiskelijalle epä tietoisuus on näkynyt tapahtumien perumisina ja muuttuvina järjestelyinä. Opettajalle opiskelijat ovat olleet mustia ruutuja Zoomissa – ja sama koski nyt minua. Ilman oikeita kohtaamisia oli mahdotonta tietää, mitä opiskelijoille todella kuuluu.

KYSELYIDEN TULOKSIA

Tuntosarvet eivät siis toimineet kunnolla, mutta muodollista palautetta oli mahdollista saada. Matikan ja tilaston järjestöt ovat jo vuosia keränneet keväisin palautetta opiskelijoilta. Yleensä opetuksen arvosana 1–5-asteikolla on ollut reilun nelosen tuntumassa.

Keväällä 2021 arvosana oli 3,5, mutta peräti kolme neljästä kertoi hyvinvointinsa kärsineen. Opinnot itsessään sujuivat ja vastaajat jakautuivat kahtia: osa suosi itsenäistä opiskelua muutenkin, toinen osa taas kärsi matalan kynnyksen tuen puutteesta. Kumpaakin joukkoa yhdisti motivaatiopula ja yksi-toikkoisuus, kun edes kirjastoon ei päässyt.

Toistimme kyselyn joulukuun alussa ja saimme selvästi parempaa palautetta. Kampuksen avau-

tuminen ja hybridimalli olivat siis parantaneet tilannetta. Etäluentojen käytännöt olivat hioutuneet ja yllättävän harva kaipasi luentosalissa istumista. Hälytysmerkkejä oli kuitenkin luetta- vissa.

HUOLI MAISTERIOPISKELIJOISTA

Arvosanoissa näkyi selvä laskeva trendi opintojen vaiheen mukaan. Maisteriopiskelijoiden antamat arvosanat hajaantuivat selvästi enemmän kuin tyytyväisten fuksien, ja sama koski myös koettua työmäärää. Avovastauksissa näkyi epä- tietoisuus opintojen suunnittelusta ja tutkielmis- ta.

Helsingin maisteriohjelma on hyvin vapaamuotoinen, joten keskustelu linjan HOPS-ohjaajan kanssa on tärkeää. Ohjauskäytäntöjen uudistus ja etäopetus vaikuttavat johtaneen siihen, etteivät kaikki tienneet keneltä apua saa. Vaikka tiesivätkin, sähköpostien vastausaika saattoi olla monta päivää.

Tunnistin tilanteen itsekin korona-ajan maisteriopiskelijana. Fukseista poiketen tunsin yliopiston tavat ja HOPS-ohjaajanikin vastasi aina ripeästi, mutta gradu- sekä tulevan väitösohjaajan etsiminen sähköpostitse oli raskasta. Nopeat kysymykset ja tutustuminen olisivat hoituneet

paljon helpommin, jos olisin vain voinut väijyä luentosalin ovella.

Korona aiheutti siis ongelmia kahdella rintamalla: uusia opiskelijoita piti auttaa opinnoissaan alkuun, vanhempia vuorostaan erikoistumaan ja osaksi akateemista yhteisöä. En voi tässä asiassa olla neutraali, mutta minusta jälkimmäinen tavoite on ollut liian vähän esillä. Fuksien loikka itsenäisyyteen on valtava, mutta pienemmän samanlaisen tekevät myös opintojaan lopettelevat.

YLIOPISTO EI OLE SEINIÄ

Opetusmenetelmien kokema luova tuho on mielestäni ollut hyväksi. Etäopetuksen työkalut auttavat myös kampusten välillä hyppijöitä, töiden ohella opiskelevia tai itsenäisesti yleistenttiin lukevia. Varsinkin massakursseilla niitä siis kannattaa hyödyntää.

Etäluennon ongelma on paradoksaalisesti sen tehokkuus. Pois jäävät kuulumisten vaihdot ja lounaat luennon ympärillä. Luennoijallakin tuntuu olevan korkeampi kynnyksen rupertella aiheen vierestä. Itse en tutustunut etäluennoilla yhteenkään uuteen ihmiseen, mutta syksyn hybridimallissa heti useampaan. Verkostoituminen olisi tärkeä osa ammatti-identiteetin kehittymistä.

Syvempiä opintoja en siksi siirtäisi verkkoon.

Ainejärjestöjen erityinen panos on ajanhukka kampuksella. Tällä tarkoitan sitä, että niiden piirissä törmää samanhenkisten ihmisten projekteihin ja vähän kaikkiin kursseihin – toisin sanottuna pääsee soveltamaan oppimaansa. Olen debatoinut – nimenomaan debatoinut – matikasta hyvin monta tuntia opiskelijahuone Survomon liitutaalulla.

Järjestöille tilojen ja tapahtumien sulku on ollut raskasta, ja se on näkynyt suoraan uusien jäsenten määrässä. Toipumiseen voikin mennä vuosia. Totta kai harrastusten ja bileiden kautta löydetään ylipäänsä ystäviä ja puolisoita, mutta sen puute onkin kokonaan oma tarinansa.

Toimitiloista säästettäessä käytetään usein ilmaisua ”ei laiteta rahaa seiniin”. Tätä voisi hieman mukailta kuvaamaan sitä, mitä yliopisto opiskelijoille – ja kaiketi tutkijoillekin – on. Yliopisto ei nimittäin ole seiniä, vaan tilaa seinien välissä. Tärkeimmät hetket eivät tapahdu luentosaleissa vaan käytävillä ja muissa tiloissa, niin suunnatuissa kuin satunnaisissa törmäyksissä. Muistetaan se, kun rakennetaan uutta toimintatapaa.

Kohdataan taas kampuksella!

Kirjoittaja *Petri Laarne toimi Moodi ry:n opintovastaavana vuonna 2021 ja aloitti väitöskirjatutkijana Helsingin yliopistossa tammikuussa 2022. Aiemmin hän on kirjoittanut Nollakohta-matematiikkablogia.*

AKATEMIAN JALKAVÄKI: MITÄ EKSASKAALAN SUPERTIETOKONEET TUOVAT ILMASTOMAL- LINNUKSEEN?

Tuuli Miinalainen,

väitöskirjatutkija ilmastomallinnuksen parissa, ja siinä sivussa yhdenvertaisuus-aktiivi

Olli-Pekka Tikkasalo,

post doc-tutkija Luonnonvarakeskuksessa

Elina Palmgren,

didaktisen fysiikan väitöskirjatutkija ja toisinaan myös wannabe-ilmastotutkija

Teknologiayhtiö Nvidia julkisti viime syksynä tiedon aikomuksestaan taistella ilmastonmuutosta vastaan uuden supertietokoneen voimin [1]. Tarkoituksena on luoda digitaalinen maapallon kaksoismalli, jolla voisi mallintaa ilmastonmuutoksen vaikutuksia paljon tarkemmin kuin nykyisillä ilmastomalleilla. Vastaavanlaisia hankkeita on vireillä muuallakin, kuten esimerkiksi Euroopan Unionin Destination Earth [2], Horizon2020-hanke Next-GEMS [3], tai yhdysvaltalainen Energy Exascale Earth System Model (E3SM) [4]. Osa näistä hankkeista hyödyntää eksaskaalan tai esi-eksaskaalan supertietokoneita.

Eksaskaalan ja esi-eksaskaalan supertietokoneet ovat uudemman sukupolven laskentakoneita, jotka pystyvät parhaimmillaan laskemaan 10^{18} liukulukuoperaatiota sekunnissa [5]. Ero on siis tuhatkertainen nykyisiin petaskaalan koneeseen, joilla voi laskea 10^{15} liukulukuoperaatiota sekunnissa. Esimerkiksi EU:n uusi supertietokone Lumi, joka sijoitettiin Kajaaniin, on esi-eksaskaalan kone. Sen laskentateho on 550 petaflopia, eli n. $0,5 \cdot 10^{18}$ liukulukuoperaatiota sekunnissa.

Max Planck -instituutin professori Bjorn Stevens totesi seminaariesityksessään [6], että eksaskaalan laskentakoneet vievät ilmastomallin-

nusta merkittävästi eteenpäin. Esimerkiksi pilvien mallintaminen tarkentuu huomattavasti, koska pystysuuntainen energiansiirto voidaan kuvata realistisemmin. Nykyisissä ilmastomalleissa nimittäin on ongelmana se, että ilmakehää mallintavan hilan resoluutio on usein liian karkea, ja tämän vuoksi moni ilmakehän prosessi on mallissa kuvattu karkeistaen.

Stevensillä oli esityksessään kaksi tärkeää viestiä. Ensinnäkin hän näki ultrasuuren ilmastomallit huimana mahdollisuutena ilmastonmuutoksen tutkimukselle: Tehokkaiden koneiden ansiosta pystymme yhä varmemmin sanomaan, mitkä luonnonkatastrofit ovat suoraa seu-

rausta ilmaston lämpenemisestä, ja mitkä taas normaalia, satunnaista vaihtelua ilmastossa. Pystyisimme mallintamaan esimerkiksi hurrikaanien dynamiikkaa ja esiintymistiheyttä entistä tarkemmin. Tällainen tieto voisi auttaa tulevaisuudessa infrastruktuurien suunnittelussa, ja osaisimme paremmin varautua ilmastokriisin etenemiseen.

Kuitenkin Stevensin tärkein sanoma oli, että tämä lisääntyvä tieto itsessään ei *hidasta* ilmaston lämpenemistä. Vaikka kuinka käyttäisimme kuluvan vuosikymmenen hurjan tarkkojen ilmastomallien rakentamiseen, ei malleista saata-va tietämyksen syventäminen lohduta, mikäli ilmastokriisi etenee nykyisellä tahdilla.

Viimeiset vuosikymmenet ovat osoittaneet, että laskentatehon hurja kasvu ja ilmastotutkijoiden hätähuudot eivät ole kääntäneet hiilidioksidipäästöjen määrää tarvittavalle lasku-uralle. On myös aiheellista pohtia, mikä on tarkempien ilmastomallitulosten hyöty suhteessa vallitsevaan rahoitustilanteeseen. Nykytilanteessa esimerkiksi yhteiskuntatieteet saavat huomattavasti vähemmän [Neean kommentti: Vähemmän verrattuna mihin?] ilmastomuutoksen tutkimiseen tarkoitettua rahaa, kuten viime vuoden Acatiimissä kirjoitettiin [7].

Eksaskaalan mallien ja ennennäkemättömän suuren laskentakapasiteetin myötä herää myös kysymys siitä, missä vaiheessa ilmastomallintajat joutuvat pohtimaan oman työnsä hiilijalanjälkeä, ja millaiseen mallinnustyöhön kannattaa käyttää laskentaresursseja ja -energiaa [8]. Voisiko ajatella, että ilmakehätieteilijöillä olisi jopa korostettu rooli huomioida työnsä ilmastovaikutukset? Meillä Suomessa suurteholaskenta on onneksi melko vähäpäästöistä, sillä suurimman palveluntarjoaja Tieteen Tietotekniikkakeskuk-

sen (CSC:n) supertietokoneet pyörivät uusiutuvalla energialla ja niiden hukkalämpö ohjataan kaukolämpöverkkoon. Toisaalta tulevaisuudessa energian- ja sähkötehon runsaan tarjonnan ei voi olettaa jatkuvan nykyisen kaltaisena, ja konealien jäähdytykseen käytettävää energiaa saatetaankin tarvita jossain muualla kriittisimmässä toiminnoissa. Meistä mallinnustyötä tekevistä jokainen voi pohtia omaa resurssienkäyttöään ja pyrkiä resurssiviisauteen. Laskentaresursseja voi säästää esimerkiksi erilaisilla numeerisilla ratkaisuilla, jotka pienentävät laskenta-aikaa, ja huolehtimalla, että mallien sisäänäyötöparametrit on varmasti kirjattu oikein. Ennen kaikkea on tärkeää suunnitella tarkasti, mitkä simulaatiot on tarpeen toteuttaa suurteholaskentaympäristössä tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi.

Viitteet

- [1] Blogs Nvidia. (2021). NVIDIA to Build Earth-2 Supercomputer to See Our Future <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/11/12/earth-2-supercomputer/>
- [2] Euroopan Komissio. (2022) Destination Earth - projektin kotisivu. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>
- [3] NextGEMS-hankkeen kotisivut <https://nextgems-h2020.eu/>
- [4] Energy Exascale Earth System Model-hankkeen kotisivut <https://e3sm.org/>
- [5] PRACE YouTube-sivusto. (2021). From Petascale to Exascale Computing. <https://www.youtube.com/watch?v=RNqbCj16QmU>
- [6] SC Conference Series -Youtube sivusto. (2020). SC20 Keynote: Climate Science in the Age of Exascale with Professor Bjorn Stevens. https://www.youtube.com/watch?v=0LROF_k6vLo
- [7] Kaskinen, Hannu. (2021). Yhteiskuntatieteet Sivuosassa. *Acatiimi : Professoriliiton, Tieteentekijöiden liiton ja Yliopistonlehtorien liiton lehti*, (2), 16-19. https://acatiimi.fi/wp-content/uploads/2021/12/acatiimi_2_2021.pdf
- [8] Loft, R. (2020). Earth System Modeling Must Become More Energy Efficient. *Eos* (Washington, D.C.), (101). <https://doi.org/10.1029/2020EO147051> <https://eos.org/opinions/earth-system-modeling-must-become-more-energy-efficient>



OPETTAJIEN NÄKEMYKSIÄ PERUSOPETUKSEN PÄÄTTÖARVIOINTI- TIUUDISTUKSESTA SELVITETÄÄN TUTKIMUKSESSA

Oppilasarvioinnin uudistus on herättänyt paljon keskustelua. Opettajien, rehtorien ja opetustoimen johdon näkemyksiä uudistuksesta selvitetään nyt ensi kertaa PARVI-hankkeessa. Hankkeen toteuttavat Jyväskylän yliopiston Koulutuksen tutkimuslaitos ja Helsingin yliopiston kasvatustieteiden osasto, ja hankkeen rahoittaa opetus- ja kulttuuriministeriö. Tutkimuksen kohteena olevat oppiaineet ovat äidinkieli ja kirjallisuus, matematiikka, A-englanti, fysiikka ja historia. Jos saat kutsun osallistua tutkimukseen, käytäthän tämän mahdollisuuden kommentoida arviointiuudistusta ja siten vaikuttaa arvioinnin kehittämiseen.

Oppilaan oppimisen ja osaamisen arvioinnin kansallista ohjeistusta on uudistettu oppilaiden yhdenvertaisuuden lisäämiseksi. Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden uudistettu arviointiluku (luku 6) on ollut käytössä syksystä 2020, ja eri oppiaineille laaditut päättöarvioinnin uudet kriteerit arvosanoille 5, 7, 8 ja 9 astuivat voimaan syksyllä 2021.

Tutkimuksessa selvitetään, miten opettajat ovat kokeneet ja ottaneet käyttöön uudistetut arvioinnin periaatteet ja kriteerit. Lisäksi tarkastellaan oppiaineittain, miten kriteerejä on hyödynnetty ja miten käyttökelpoisiksi ne koetaan. Näkemyksiä uudistuksista kerätään kyselyillä ja haastatteluilla.

Jotta opettajien näkemyksiä saadaan kartoitettua mahdollisimman kattavasti, poimitaan vastaajat kyselyyn otannalla. Otokseen kuuluvilla opettajilla on ainutlaatuinen mahdollisuus antaa anonymia, perusteellista palautetta, jonka avulla arviointikäytänteitä ja arviointikriteereitä voidaan kehittää. Jos siis saat kutsun osallistua tutkimukseen, käytä mahdollisuuttasi vaikuttaa!

Lisätietoa: ktl.jyu.fi/fi/hankkeet/parvi

Yhteystiedot:

Hankkeen sähköposti: arviointiuudistus@jyu.fi

Juhani Rautopuro, tutkimusprofessori (hankkeen projektipäällikkö), juhani.rautopuro@jyu.fi

Raili Hilden, apulaisprofessori, raili.hilden@helsinki.fi