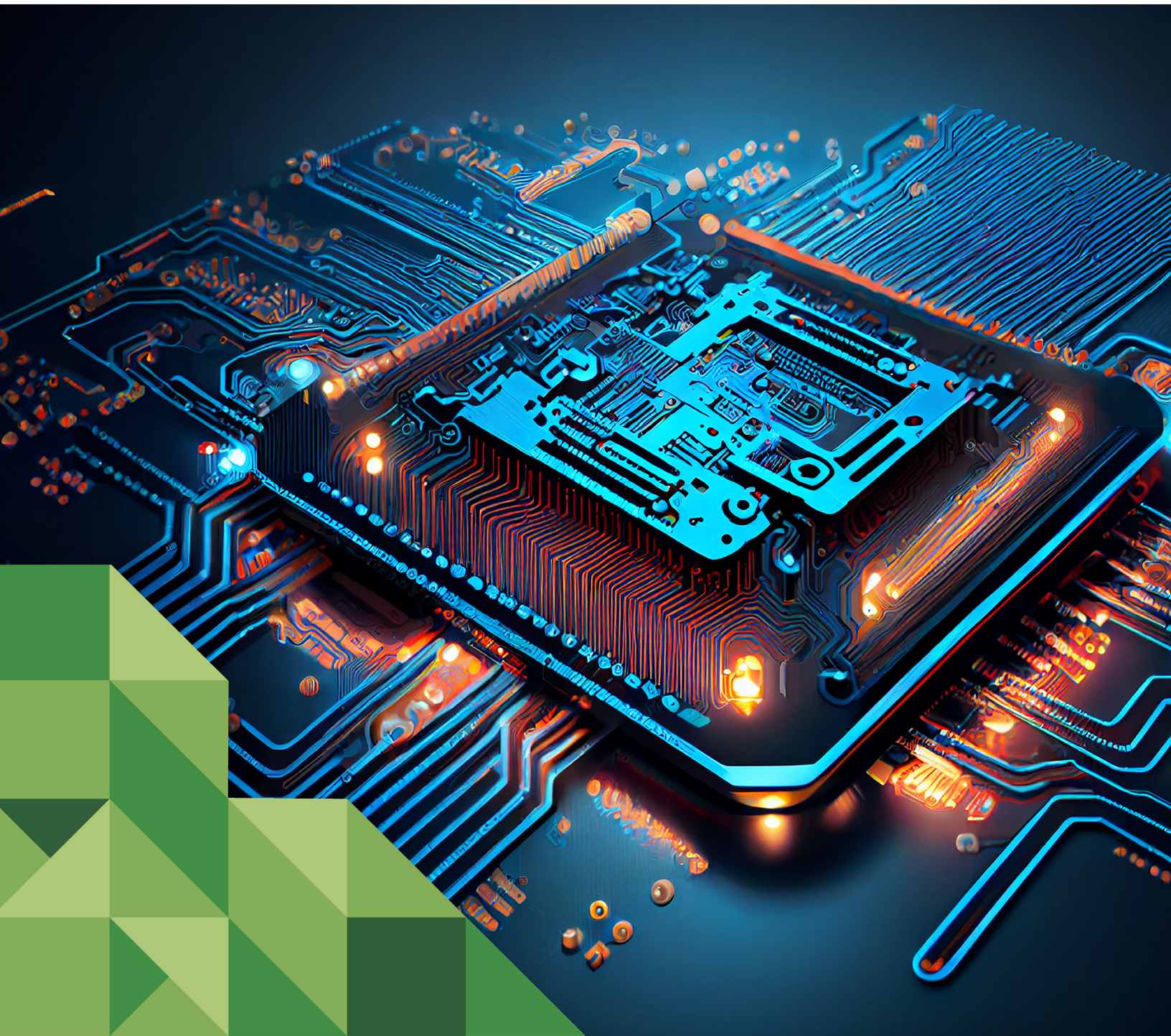


Olli Hatakka & Jarmo Talvivaara

# Kvanttilaskentapalveluiden nykytila, mahdollisuudet ja kehityssennusteet



Julkaisusarja Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisu C: Raportteja, 110

Tekijät Olli Hatakka, Karelia-ammattikorkeakoulu  
Jarmo Talvivaara, Karelia-ammattikorkeakoulu

Taitto Kaisa Varis

© Tekijät ja Karelia-ammattikorkeakoulu



Tämä julkaisu on lisensoitu Creative Commons Nimeä-  
EiMuutoksia 2.0 Kansainvälinen -lisenssillä.

ISBN 978-952-275-391-5

ISSN 2323-6914

Karelia-ammattikorkeakoulu 2023

*KvanttiKarelia -Kvanttilaskentaan perustuvat tulevaisuuden liiketoiminta- ja palvelumahdollisuudet -lump sum selvityshanke 2020-2022*

*Quantum Karelia"-Quantum Computing Services – future technology for business and service applications -lump sum 2020-2022*



Euroopan unioni  
Euroopan sosiaalirahasto

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

# Sisällys

Esipuhe.....	4
Foreword.....	6
1 Johdanto .....	8
1.1 Kvanttitietotekniikan perusta lepää kvanttimekaniikan varassa .....	9
2 Kvanttilaskennan ja -tietotekniikan perusteita .....	12
2.1 Esimerkkejä tunnetuista kvantti-algoritmeista .....	15
3 Kvanttitietokoneet – mistä kyse?.....	17
3.1 Kvanttitekniologia .....	17
3.2 Kvanttitietokoneet .....	17
3.3 Kvanttisisimulaattorit.....	18
3.4 Kvanttitekniologia pähkinänkuoressa .....	18
3.5 Kvanttitietokoneet vs. perinteiset tietokoneet .....	19
4 Kvanttilaskenta – mistä kyse? .....	24
4.1 Kvanttilaskenta vs. perinteinen laskenta .....	24
Kvanttilaskennan mahdollisuuksia tutkimuskäytössä:.....	24
4.2 Kvanttilaskennan sovelluskohteita .....	25
4.3 KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmä.....	28
5 Kvanttitietokoneiden valmistajia, ohjelmointiympäristöjä ja pilvipalveluita .....	30
5.1 Kvanttitietokoneiden ja -laskentapalveluiden valmistajia .....	30
6 Kvanttilaskennassa käytettyjä ohjelmointiympäristöjä ja -kieliä .....	40
7 Pilvipalveluna saatavilla olevia kvanttilaskentapalveluita .....	42
8 Johtopäätökset ja pohdinta.....	44
Liitteet .....	49

# Esipuhe

Karelia-ammattikorkeakoulun koordinoima KvanttiKarelia-hanke on vastannut haasteeseen, jonka ammattikorkeakoulut kohtaavat kehittäessään ICT-opetusta kvanttilaskennan alueella. Tällä hetkellä ei ole olemassa kattavaa tai soveltuvaa materiaalia, joka auttaisi alan kehityksen seuraamisessa ja sovellusalueiden ymmärtämisessä. Lisäksi tarvittavat kehittämisverkostot ovat puuttuneet.

Haasteen ratkaisemiseksi KvanttiKarelia-hanke on perehtynyt erityisesti pilvipalveluina tarjottaviin kvanttilaskentapalveluihin ja niiden mahdollistamiin sovelluksiin. Hankkeen tavoitteena oli myös verkostoitua kansallisten ja kansainvälisten alan asiantuntijoiden, tutkijoiden, alan yritystoiminnan ja muiden kvanttiteknologiaverkostojen kanssa sekä luoda kuvaa suomalaisesta kvanttilaskentatoimialasta ja ekosysteemin edellytyksistä ja mahdollisuuksista myös maakuntien näkökulmasta.

KvanttiKarelia-hanke on myös pyrkinyt lisäämään tietämystä kvanttilaskennasta ja sen sovelluksista. Hankkeen aikana on järjestetty useita webinaareja ja online-tilaisuuksia, joissa on käsitelty kvanttilaskentaa ja sen mahdollisuuksia. Tarkoituksena on ollut pohdita muun muassa ammattikorkeakoulujen mahdollisuuksia tukea koulutusalojen ja eri toimialojen yritysten perustietämyksen, mahdollisuuksien ja osaamisen hankintaa ja kehittämistä kvanttilaskennan ja -teknologian osalta.

KvanttiKarelia-hanke on luonut hyvän pohjan kvanttilaskentapalveluiden mahdollisimman hyvin tapahtuvan ennakoinnin tietämyksen hankkimiseksi ja sen pohjalta tapahtuvan koulutuksen suunnittelemiseksi ja alueen toimijoiden osaamisen vahvistamiseksi.

Kvanttilaskentaa pidetään ratkaisevan tärkeänä teknologiana kaikkialla maailmassa. Tästä osoituksena suunnaton määrä tutkimus- ja kehittämispanostuksia, joita on käynnissä niin Aasiassa, Euroopassa, Amerikassa kuin muullakin, tavoitteena tämän ilmiön mahdollisuuksien ja potentiaalin selvittäminen. Tämä paradigmaattisesti täysin erilainen, klassisesta tietotekniikasta poikkeava laskentamenetelmä, voi muuttaa radikaalisti kykyämme torjua ilmastonmuutosta köyhyyttä ja sairauksia. Samalla se voi kuitenkin tehdä tavanomaisesta salaustekniikasta vanhentunutta, mutta toisaalta mahdollistaa lähes purkamattoman kvanttilaskentaan perustuvan kryptografian. Kvanttilaskenta tarjoaa uusia taloudellisia mahdollisuuksia jo nyt, ja kiihtyvällä tahdilla maailmanlaajuiseen digitaalitalouteen, energiateknologiaan, monimutkaisten ilmiöiden

ymmärtämiseen, tekoälyyn, koneoppimiseen sekä moniin teollisiin ja muihin erityisesti tehokkaasta laskennallisesta optimoinnista ja mallintamisesta hyötyviin aloihin. Kehittyviin teknologioihin liittyvien epävarmuustekijöiden ja nopeasti muuttuvan ja hajanaisen kokonaiskuvan hallitseminen on kuitenkin haasteellista. Erilaisten organisaatioiden, yritysten ja julkisen sektorin päättäjien on vaikea ylläpitää riittävää tietoisuutta ja ymmärrystä ja oikea-aikaista päätöksentekokykyä siitä, milloin ja miten reagoida.

Tämän raportin tavoitteena on tarjota tiivistetty, ajankohtainen ja puolueeton katsaus ja arvio kvanttilaskennan nykytilasta - teknologiasta, sen sovelluksista, orastavan kvanttiteollisuuden tilasta Suomessa ja menestyksekkään kvanttiekosysteemin perustekijöistä. Raportti pyrkii tarjoamaan perustietoa kvanttilaskennasta, sekä luomaan helposti ymmärrettävän kokonaiskuvan muun muassa yritysjohtajille ja muille päättäjille, sekä kaikille muillekin asiasta kiinnostuneille. Tällä raportilla pyrimme vahvistamaan tietoon ja tosiasioihin perustuvaa ymmärrystä tästä ilmiöstä ja siten antamaan eväitä kvanttilaskennan merkityksen ja mahdollisuuksien ymmärtämiseen.

Kvanttilaskenta saattaa olla avain parempaan huomiseen, mutta tässä raportissa pyritään välttämään sekä siihen liittyvää liiallista innostusta että toisaalta myös mahdollisten vaikutusten vähättelyä. KvanttiKarelia hankkeen tavoitteena on ollut myös vähentää kvanttilaskentaan liittyvää yleistä tietämättömyyttä sekä lisätä kvanttilukutaitoa kaikkien aihealueesta kiinnostuneiden henkilöiden, yritysten, päättäjien ja vaikuttajien keskuudessa.

Toivomme että tämä lyhyt raportti antaa perustietoa kvanttilaskennasta ja luo ilmiöstä helpommin lähestyttävämmän ja mahdollisuuksia avaavan kuvan sekä rohkaisee tutustumaan tähän ilmiömaailman avoimin mielin ja uteliaisuudella. Emme pysty ennustamaan milloin kvanttilaskenta muuttuu valtavirtojen teknologiaksi, mutta siihen vaurtuminen kannattaa ja antaa eväitä uusille ideoille ja ajatuksille siitä, miten "minä liityn kvanttilaskentaan ja kvanttilaskenta liittyy meihin".

Joensuussa 1.4.2023

Olli Hatakka ja Jarmo Talvivaara

*KvanttiKarelia - Kvanttilaskentaan perustuvat tulevaisuuden liiketoiminta- ja palvelumahdollisuudet -hanke, Karelia-ammattikorkeakoulu*

# Foreword

Quantum computing is considered a crucial technology all over the world. This is evidenced by the enormous amount of research and development efforts underway in Asia, Europe, America and beyond, aimed at exploring the possibilities and potential of this phenomenon. This paradigmatically completely different method of computing, which is distinct from classical computing, could radically change our ability to combat climate change, poverty and disease. At the same time, however, it can render conventional cryptography obsolete, but on the other hand, it can enable near-uncompressible quantum computing-based cryptography, and offer new economic opportunities, already, and accelerating, for the global digital economy, energy technology, understanding complex phenomena, artificial intelligence, machine learning, and many industrial and other sectors that benefit in particular from efficient computational optimisation and modelling.

However, managing the uncertainties associated with emerging technologies and the rapidly changing and fragmented landscape is a challenge. It is difficult for different organisations, companies and public sector decision-makers to maintain sufficient awareness and understanding and timely decision-making ability on when and how to react.

The aim of this report is to provide a concise, timely and unbiased overview and assessment of the current state of quantum computing - the technology, its applications, the state of the burgeoning quantum industry in Finland, and the foundations of a successful quantum ecosystem. It aims to provide basic information on quantum computing, and to create an easy-to-understand overview for business leaders and other decision-makers, and anyone else interested. With this report, we aim to strengthen the knowledge and fact-based understanding of this phenomenon and thus provide a basis for understanding the importance and potential of quantum computing.

Quantum computing may hold the key to a better tomorrow, but this report seeks to avoid both over-enthusiasm and underplaying its potential impact.

The QuantumCarelia project has also aimed to reduce the general lack of knowledge about quantum computing and to increase quantum literacy among all interested individuals, businesses, policy makers and influencers.

We hope that this short report will provide basic information about quantum computing, create a more accessible and opportunity-opening picture of the phenomenon and encourage people to explore this phenomenal world with an open mind and curiosity. We cannot predict when quantum computing will become a mainstream technology, but being prepared for it will be worthwhile and will spark new ideas and thoughts on how "I relate to quantum computing and quantum computing relates to us".

Joensuu, 1st of April 2023

Olli Hatakka and Jarmo Talvivaara

*Quantum Karelia - Quantum Computing Services – future technology for business and service applications project, Karelia UAS*

# 1 Johdanto

Kvanttilaskenta perustuu kvanttimekaanisten ilmiöiden hyödyntämiseen suurteholaskennallisissa tietyn tyyppisissä tehtävissä (esimerkiksi monimuuttujaiset optimoiniongelmat), joiden laskeminen ns. Klassisen tietotekniikan keinoilla (jopa supertietokoneilla) on vaikeaa, tai mahdotonta. Laskennan ylivoimaisuus tulee ymmärrettäväksi, kun vertaillaan perinteistä binääristä bittipohjaista laskentaa kvanttillaskentaan, joka perustuu niin sanoittuihin **kvanttibitteihin eli kubitteihin**, joiden informaation käsittely- ja laskentakapasiteetti on niiden omintakeisesta (*kvanttimekaanisesta*) luonteestaan johtuen merkittävästi tehokkaampi.

Periaatteessa laskennassa hyödynnetään kvanttien erilaisia tiloja (*aalto- tai hiukkasmuoto*), sekä kvanttien vuorovaikutustiloja, jotka vaikuttavat kvanttien varaustiloihin. Johtuen tästä *kubitti voi olla*, kuten perinteinenkin bitti *arvoltaan 0 tai 1, mutta se voi olla myös kombinaatio näistä molemmista* (superpositio). Tämä ominaisuus tekee kvanttietokoneen laskenta-avaruudesta merkittävästi perinteistä (klassisen tietotekniikan) binääristä laskentaa tehokkaamman. Perinteisessä tietokoneessa bittien binääriarvo määrittää tietokoneen tilan (ja perinteinen tietokone voi olla missä tahansa tilassa, mutta *vain yhdessä tilassa kerrallaan*), kun taas kvanttietokone, voi olla yhtäaikaisesti  $2^N$  -tilassa (jossa  $N = \text{kvanttisysteemin lomittuneiden kubitien määrä}$ ). Eli kun kubitien määrä on yksi, tiloja on kaksi, kun kubitteja 2 tiloja on vastaavasti 4, ja niin edelleen. Tästä on helppo ymmärtää (*tietyntyypisten ongelmien*) laskentatehon eksponentiaalinen kasvu suhteessa klassiseen tietokoneeseen. Kubitien ylläpitäminen tiettyissä tiloissa vaatii kuitenkin omaa erittäin tarkasti kontrolloitua erityistä ympäristöä, että kvantti-ilmiön *koherenssi* voidaan säilyttää ja kohinasta aiheutuvia virheitä pystytään kontrolloimaan ja välttämään nykyistä paremmin.

Nykyisin käytössä olevat kvanttietokoneet ovat niin sanottuja NISQ-teknoogisia laitteita ("Noisy Intermediate-Scale Quantum"). Termi viittaa kvanttietokoneiden nykytilaan. Nykyiset kvanttietokoneet eivät ole siis vielä riittävän "virhevapaita" suurten ongelmien ratkaisemiseen, mutta pystyvät silti jo nyt suorittamaan tietyntyypisiä monimutkaisempia laskutoimituksia, kuin klassiset tietokoneet. Näitä koneita kutsutaan "meluisiksi" tai "kohinaisiksi", koska ne ovat alttiita ympäristöhäiriöiden ja laitteiston puutteellisuuden aiheuttamille virheille. NISQ-teknoogian odotetaan tasoittavan tietä kehittyneemmille kvanttietokoneille tulevaisuudessa.



## 1.1 Kvanttitietotekniikan perusta lepää kvanttimekaniikan varassa

Kvanttimekaniikka (kvanttifysiikka) syntyi 1800-luvun loppupuolelle kuvaamaan ilmiöitä ja lainalaisuuksia, joita havaittiin, mutta ei kyetty selittämään klassisen (newtonilaisen) fysiikan avulla. Einsteinin suppea suhteellisuusteoria osoitti näiden Newtonin mekaniikan lakien pätemättömyyden nopeuksilla, jotka ovat tyhjiössä lähellä valon nopeutta. Näihin aikoihin myös käsitys atomin rakenteesta muuttui radikaalisti. 1800 ja 1900 –lukujen vaihteessa vaikuttaneet fysiikan suurmiehet Max Planck ja Albert Einstein osoittivat aalto-hiukkasdualismin ja kvanttumisen teoreettisen olemassaolon. (*Encyclopedia Britannica 2022*). Tämä ilmiö on juuri se mikä pohjimmiltaan tekee mahdolliseksi teoreettisen kvanttitietokoneen olemassaolon.

Vaikka kvanttimekaniikka ja ydinfysiikka kehittyivät ja niihin perustuvat innovaatiot muuttuivat käytännön sovelluksiksi, niin Kuitenkin vasta vuonna 1980 Paul Benioff esitti Turingin koneen kvanttimekaanisen mallin, joka oli tärkeä askel kvanttitietokoneiden kehittämässä. Tämä malli mahdollisti tietokoneiden laskentakapasiteetin huomattavaan parantamiseen verrattuna perinteisiin tietokoneisiin. (Benioff 1980).

Saman vuoden aikana myös venäläinen matemaatikko Yuri Manin esitteli saman idean hiukan poikkeavalla tavalla. Tämä osoitti, että kvanttitietokoneiden mahdollisuudet olivat todellisia ja että niitä voitiin käyttää monimutkaisten laskutoimitusten suorittamiseen, joita perinteiset tietokoneet eivät voineet käsitellä. Tämä oli merkittävä läpimurto kvanttitietokoneiden kehityksessä.



Kuva 1. Solvay Institute, 5. Solvay-konferenssi lokakuussa 1927, jossa aiheena uusi teoria "kvanttimekaniikka". (Kuva: Sources for the History of Quantum Physics.) Aiheesta lisää: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Solvay-konferenssi>

Muutamaa vuotta myöhemmin 1982 Richard Feynman osoitti, että tarvitaan kvanttietokone simuloimaan kvanttifysikaalisia hiukkassysteemejä. Samoihin aikoihin Yuri Mann ja Paul Benioff hahmottelivat tahoillaan teoreettista kvanttietokonetta. Näistä voidaan katsoa varsinaisen kvanttietokoneen kehittämisen alkaneen.

Lähteet ja lisätiedot:

Encyclopedia Britannica. 2022. B The Editors of Encyclopaedia. "quantum". <https://www.britannica.com/science/quantum>. 27.3.2023.

Benioff, P. 1980. The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *J Stat Phys* 22, 563–591 (1980). <https://doi.org/10.1007/BF01011339>

Feynman, R. 1982. Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*, Vol 21, Nos. 6/7, 1982.

Feynman, R., Benioff, P. 1980. The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *J Stat Phys* 22, 563–591 (1980). <https://doi.org/10.1007/BF01011339>

Manin, Y. I. 1980. "Computable and Non-Computable," Sovetskoe Radio, Moscow.

Manin, Y. I. 2000. Classical computing, quantum computing, and Shor's factoring algorithm *Astérisque*, tome 266 (2000), Séminaire Bourbaki, exp. no 862, p. 375-404)

## 2 Kvanttilaskennan ja -tietotekniikan perusteita

Kvanttitietotekniikka on tietokoneiden ja muiden tietoteknisten laitteiden käyttöä kvantti-ilmiöihin perustuvien järjestelmien rakentamiseen. Tässä joitakin keskeisiä käsitteitä ja kvanttimekaanisia periaatteita:

**Kvanttibitti (kubitti):** Tietokoneen perusyksikkö, joka käyttää kvanttimekaanista ilmiötä, kuten superpositiota ja kvanttien lomittumista, tietojen tallentamiseen ja käsittelyyn. Kubitti on keskeisin kvanttilaskentaan liittyvä yksikkö. Kubitit vastaavat klassisen laskennan bittejä, mutta ovat huomattavasti tehokkaampia, koska niiden avulla voidaan toteuttaa tietyn tyyppisiä laskentatehtäviä, jotka ovat mahdottomia jopa supertietokoneelle. Kubitit voivat olla samanaikaisesti sekä nolliä että ykkösiä (superpositio), mikä mahdollistaa kvanttitietokoneiden rinnakkaisen ja massiivisen laskentatehon verrattuna klassiseen tietotekniikkaan.

**Superpositio:** Kvanttimekaaninen ilmiö, jossa kubitti tai lomittunut kubittijärjestelmä voi olla useissa tiloissa samanaikaisesti. Superpositio on ilmiö, jossa kvanttimekaanisesti käytettävä ominaisuus (esimerkiksi elektronin "virittyneisyys") on aaltomaisessa muodossa (ennen "mittaamista") Havainnoitaessa (siis "mitattaessa") superpositio romahtaa "partikkeliksi" joko arvoksi 0 tai 1. Laskennan aikana kubitti (tai kubittisysteemi) on superpositiossa ja operaation jälkeen se romautetaan mittaamalla ja tulos oikea ratkaisu saadaan tulkitsemalla tämä tulos.

Valitettavasti kaikissa tunnetuissa kvanttikoneissa tuotetut kubitit ovat varsin herkkiä virheille, jotka aiheutuvat "kohinasta" (*noise*), jota ei (ainakaan toistaiseksi) pystytä ilmiöstä täysin eliminoimaan. Puhutaan "fideliteetistä", joka ilmaistaan prosenttilukuna, nykyisten (Transmon) kubitittien fideliteetti on luokkaa 99.9%, (joka tarkoittaa, että noin 1 tuhannesta operaatiosta per kubitti on virheellinen. Virhetodennäköisyys vaikuttaa pieneltä, mutta on helppo ymmärtää, että mikäli kubittisysteemin kokoa kasvatetaan (kubitien määrää lisätään), virheiden määrä kasvaa hyvin nopeasti "kestämättömäksi". Samalla tavalla voidaan kuvata myös kvanttiporttien virheherkkyyttä.

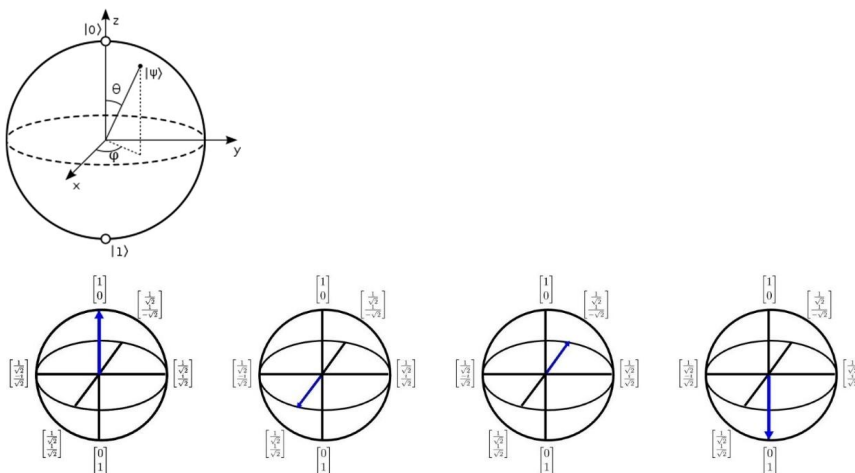
Aalto-yliopiston kvanttimekaniikan professori Mikko Möttönen totesi, kun haastatelimme häntä 17.2.2023:

*” Jos kubittien tarkkuus on sellainen, että yhdessä kvanttiportissa esiintyy yksi virhe tuhannesta, tämä tarkoittaa, että jos ajetaan tuhat porttia eli 1000 loogista operaatiota, virheitä esiintyy karkeasti puolissa ajoissa. Erittäin pitkien laskutoimitusten tekeminen ei siis ole kovin tehokasta, sillä esimerkiksi kymmenentuhannen portin laskutoimituksessa onnistumistodennäköisyys on vain noin 40 kertaa miljoonasta yrityksestä. Tämä tarkoittaa, että onnistumisia tapahtuu erittäin harvoin ja tässä kohtaa alkaa tulla vastaan raja.”*

Tätä taustaa vasten on helppo ymmärtää, miksi puhutaan NISQ-erasta (noisy intermediate-scale quantum era), nykyisistä kvanttietokoneista keskusteltaessa.

Kubitti itsessään on mielenkiintoinen kvanttilaskentaelementti, jota kuvataan tyypillisesti Blochin pallolla, jonka keskellä on kolmiulotteisen koordinaatiston origo. Blochin pallo on geometrinen esitys kaksitasoisen kvanttimekaanisen järjestelmän (qubitin) puhtaasta tila-avaruudesta, joka on nimetty fyysikko Felix Blochin mukaan (Bloch 1946.)

Pallon ”pohjoisnavalla” arvo 0 (Bra-Ket  $|0\rangle$ ) ja ”etelänavalla” arvo 1 (Bra-Ket  $|1\rangle$ ). Pallon ”päiväntasaaja” on 50/50 taso, jolloin (mitattaessa) tulos voi sattumanvaraisesti olla joko 1 tai 0. Lopputulos on saatava ulos merkittävällä todennäköisyydellä, ja koska prosessi on stokastinen, tyypillisesti laskentaa toistetaan riittävän monta kertaa, että riittävän todennäköinen oikea vastaus saadaan esille.



Kuva 2. Blochin pallo. (Bloch 1946).

Lomittuminen (entanglement): Kvanttimekaaninen ilmiö, jossa kaksi tai useampi kvanttibitti ovat sidoksissa toisiinsa niin, että niiden tilat ovat sidoksissa. Lomittumisen avulla kvanttietokone pystyy ratkaisemaan monimutkaisia ongelmia samanaikaisesti. Lomittuminen mahdollistaa useiden kubitien systeemisen kytkeytymisen. Tämä tarkoittaa sitä, että lomittuneena kubitit toimivat yhtenä systeeminä ja ilman lokalisaattorirajoitetta eli systeemin kubitit voivat olla fyysisesti erillään, mutta lomittunut systeemi luonne toteutuu fyysisestä etäisyydestä riippumatta. (Jyväskylän yliopisto)

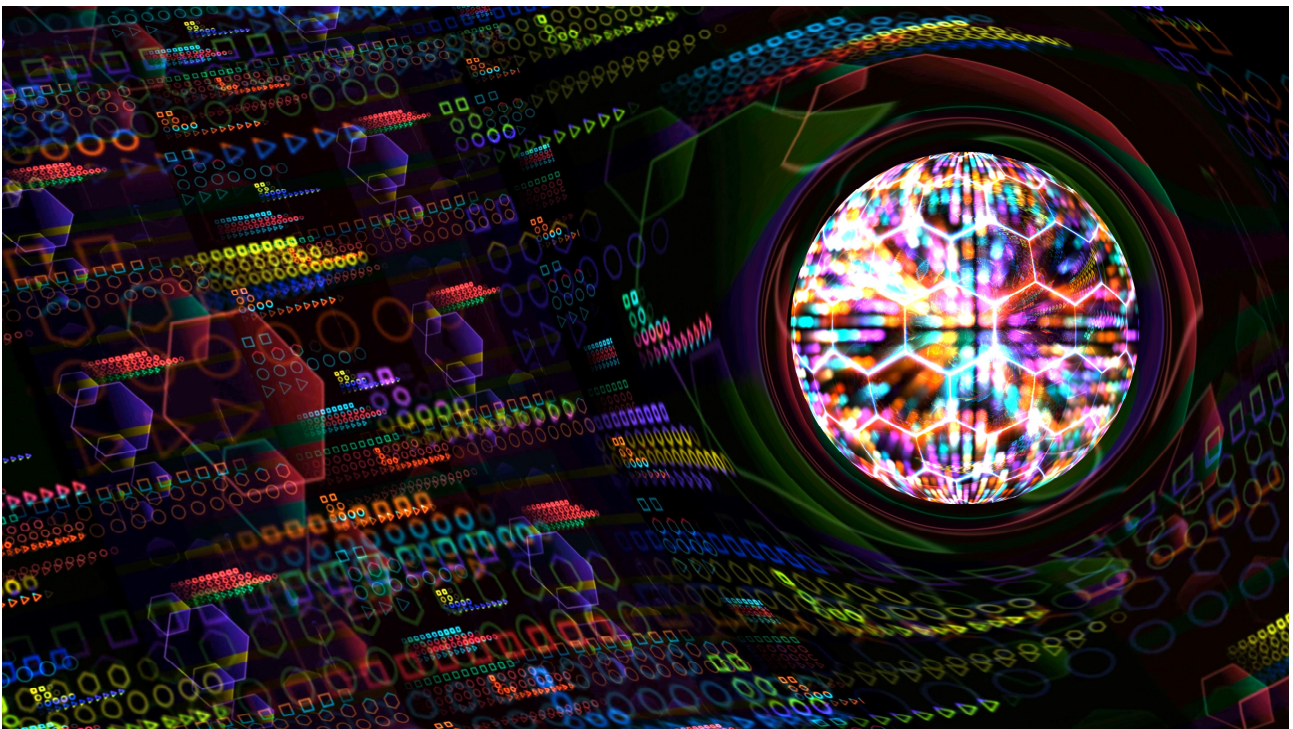
Hyvin paljon yksinkertaistetusti lomittumista voidaan kuvata esimerkiksi seuraavalla tavalla:

Ostamme grillistä kaksi tuotetta, yhden hampurilaisen ja yhden hodarin, jotka on pakattu kumpikin erikseen samanlaisiin, ulkopuolelta tunnistamattomiin suljettuihin pakkauksiin. Toinen paketti viedään Jarmolle Lieksaan ja Toinen Ollille Lehmoon. Meillä on siis kahden grillituotteen "lomittunut" systeemi, joista ennen "mittaamista" (pakettiin katsomista), ei voi tietää kumpi sai kumman tuotteen. Tämän lomittumisen lainalaisuudesta johtuen voimme tietää toisen paketin sisällön vaikka avaisimme vain toisen. Jarmoa kiinnostaa kumman grillituotteen hän sai, mutta ajatteli syödä sen vasta myöhemmin ja olisi iloinen jos tietäisi mitä grilliruokaa hän sai, mutta ei vielä haluaisi avata pakettia. Grillin toimitushistoriasta tiedetään, että vastaavissa tapauksissa virheiden määrä on ollut lähes nolla eli voimme tehdä oletaman, että "fideliteetti" on erittäin hyvä ja edelleen, että jos systeemin yksi paketti saa arvon hampurilainen, toinen paketti tässä "lomittumisessa" saa aina arvon hoderi. Jarmo soittaa Ollille ja kysyy: "joko avasit oman annoksesi? ja mitä siellä mahtoi sinulla olla?" Olli vastaa: "hodari" jolloin automaattisesti tiedetään, että toisessa laatikossa täytyy olla arvo "hampurilainen". Näin systeemin tieto on kummassakin paketissa, vaikka vain toinen niistä "mitataan".

Interferenssi: Interferenssi kvanttibitissä eli qubitissa tapahtuu, kun ulkoiset tekijät tai vuorovaikutus muiden qubitien kanssa vaikuttavat qubitin tilaan. Tämä häiriö voi johtaa koherenssin menetykseen, joka tarkoittaa qubitin kykyä olla useassa tilassa samanaikaisesti. Interferenssin voittamiseksi on kehitetty erilaisia tekniikoita, kuten kvanttivirheenkorjauskoodit, dekoherenssivapaat aliavaruudet ja dynaaminen irrotus. Näillä tekniikoilla pyritään suojaamaan qubitteja ulkoisilta häiriöiltä ja säilyttämään niiden koherenssi pidempiä aikoja. Häiriöt ovat keskeinen ongelma suurten kvanttietokoneiden rakentamisessa, sillä ne rajoittavat niiden qubitien lukumäärää, joita voidaan luotettavasti kytkeä toisiinsa ja käsitellä. Siksi häiriöiden lieventäminen on keskeinen tutkimusalue kvanttilaskennan alalla.

**Kvanttivälimuisti:** Kubittien väliaikainen tallennuspaikka kvanttikoneen laskennassa. Kvanttivälimuistiin tallennetut kubitit voivat olla kytkeytyneitä ja superpositiossa, mikä mahdollistaa massiivisen laskentatehon. Kvanttivälimuisti on useista kubiteista muodostuva tallennuspaikka, jota tarvitaan kvanttilaskennassa. Mitä useampi kubitti meillä on käytössä, sitä laajemmaksi järjestelmän tilojen määrä kasvaa.

**Mittattavuus:** Kvanttimekaaninen ilmiö, jossa kvanttibitin tila on määriteltävissä vain sen todennäköisyysjakauman kautta. Kun kubitti mitataan, sen tila romahtaa yhteen mahdollisista tiloista.



Kuva: Veczeezy.com

## 2.1 Esimerkkejä tunnetuista kvantti-algoritmeista

**Shorin algoritmi:** Kvanttitietokoneen algoritmi, joka kykenee tehokkaasti löytämään tekijöitä suurille kokonaisluvuille. Tämä algoritmi on tärkeä kryptografian kannalta. Shorin algoritmin toiminta edellyttää suurta määrää virheettömiä kubitteja, joten aivan lähitulevaisuudessa se ei edusta uhkaa RSA-salaukselle.

Groverin algoritmi: Kvanttitietokoneen algoritmi, joka nopeuttaa hakemista lajittamattomasta tietokannasta. Tämä algoritmi on tärkeä monien optimointiongelmien ratkaisemisessa. Optimointiin liittyviä sovelluksia on jo kaupallisessa käytössä, esimerkiksi logistiikan, monimutkaisten prosessien ja talouteen liittyvissä monimuuttujaisissa ongelmissa. Tähän tarkoitukseen hyvin soveltuvaksi kvanttikonetyypiksi on osoittautunut ns. Adiabaattinen kvanttikone, joita yksi pisimpään toimineista kvanttikonevalmistajista, D-Wave, tuottaa.

Lähteet:

Bloch. F. 1946. "Nuclear induction". Phys. Rev. 70 (7–8): 460–474.

Jyväskylän yliopisto. Kvanttimekaniikkaa ja suhteellisuusteoriaa yleissivistävästi. Kurssimateriaali. <https://onlinecourses.jyu.fi/course/view.php?id=37&section=1>.

Preskill, J. 2018. Quantum Computing in the NISQ era and beyond- Quantum 2, 79 (2018). <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>

Wikipedia. 2023. Kubitti. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kubitti>

Wikipedia. 2020. Kvanttisuperpositio. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kvanttisuperpositio>



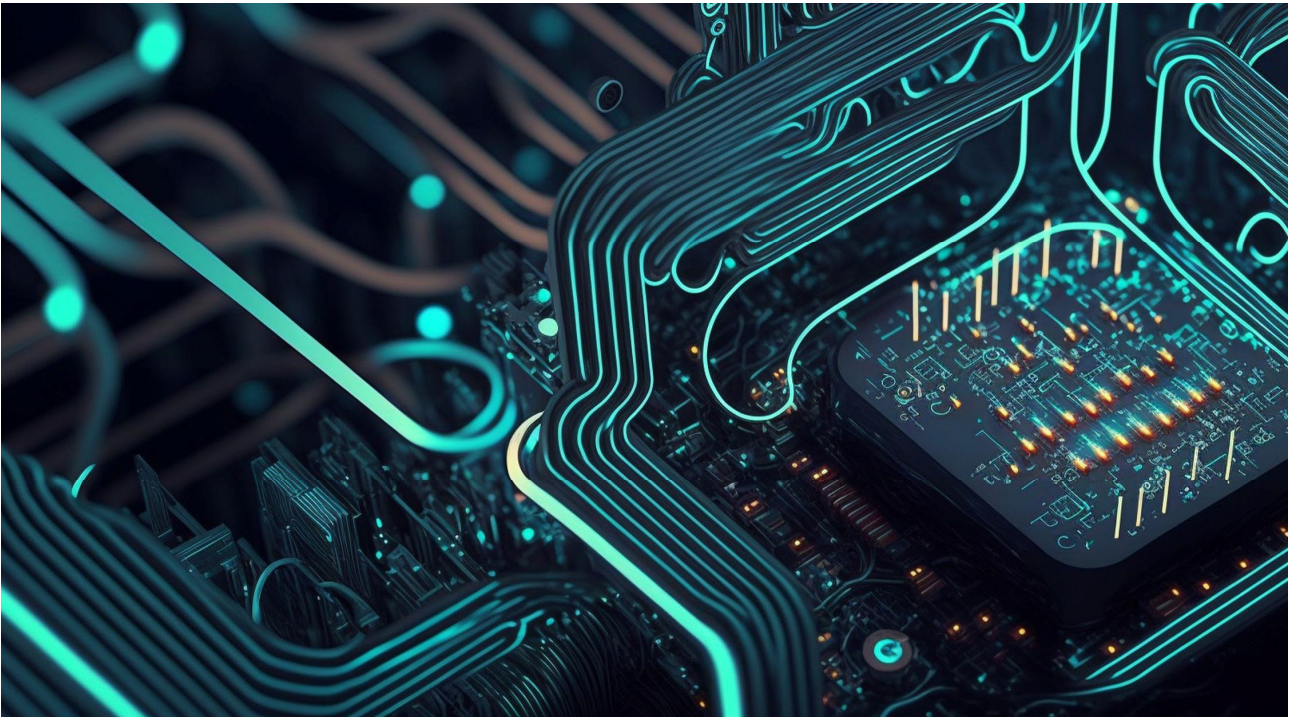
# 3 Kvanttitietokoneet – mistä kyse?

## 3.1 Kvanttitekniologia

Erilaisia teknologioita, jotka hyödyntävät kvanttiefektejä, kutsutaan yhdessä kvanttitekniologiaksi (fysikaaliset vaikutukset subatomisella tasolla). Kvanttipohjaiset järjestelmät hyödyntävät elektronien, fotonien, atomien tai molekyylien ominaisuuksia. Niin sanottua "Kvantti 1.0" -teknologiaa, kuten transistoreja ja lasereita, on käytetty jo vuosia. Seuraavan sukupolven kvanttitekniologioiden, joita kutsutaan usein "Kvantti 2.0:ksi", odotetaan tuottavan uusia tuotteita ja palveluja, joilla voi olla vaikutusta esimerkiksi rahoitus-, puolustus-, ilmailu- ja avaruus-, energia-, televiestintä- ja terveysaloilla. Kvanttivistintä, kvanttianturit ja -metrologia sekä kvanttietokoneet ja -simulaattorit ovat tärkeitä kehitysalueita. Kvanttisimulaattoreiden ja -tietokoneiden luominen ja käyttö sekä niiden sovellukset biologisissa tieteissä ovat olleet tämän tutkimuksen pääaiheita.

## 3.2 Kvanttitietokoneet

Kvanttitietokoneet käyttävät kvanttimekaniikan lomittuneisuutta ja superpositio-ominaisuuksia tietojen tallentamiseen kubitteihin. Tämän ansiosta kvanttietokoneet voivat mallintaa luonnon monimutkaisia kvanttisysteemejä ja suorittaa tehtäviä paljon nopeammin kuin perinteiset tietokoneet. Kvanttitietokoneisiin soveltuvat erityisen hyvin ongelmat, joihin liittyy kertolaskuja, hakuja, optimointia tai simulointia. Universaali kvanttietokone, joka pystyy suorittamaan kaikenlaisia ohjelmia, saatetaan luoda seuraavien 15-30 vuoden aikana, mutta on silti mahdollista, että jotkin ongelmat jäävät kvanttietokoneiden kykyjen ulkopuolelle.



Kuva: Vecteezey.com

### 3.3 Kvanttisimulaattorit

Vaikka vikasietoisia kvanttietokoneita ei todennäköisesti ole saatavilla vielä pitkään aikaan, kvanttisimulaattoreita rakennetaan jo nyt. Kun kvanttietokoneet on toteutettu, ne pystyvät käsittelemään monimutkaisia asioita. Kvanttisimulaattorit ovat hallittavia järjestelmiä, jotka jäljittelevät toisen kvanttisysteemin käyttäytymistä. Ne ovat yksinkertaisempia rakentaa kuin täydelliset kvanttietokoneet.

Ne ovat järjestelmiä, jotka voivat tuottaa superpositiotiloja, vaikka ne eivät aina jäljittelekään todellisten järjestelmien kvanttidynamiikkaa.

### 3.4 Kvanttitekniologia pähkinänkuoressa

- Kvanttimekaniikka = Fysiikan perusteoria, joka kuvaa miten luonnonlait (pl. painovoima) toimivat. Sisältää joukon käsitteitä, jotka tuntuvat oudoilta ihmisaiastien havaittavissa olevassa maailmassa.

- Superpositio = Kvanttitilassa olevat kappaleet käyttäytyvät kuin aallot että kiinteät hiukkaset yhtä aikaa. Niiden tilaa (esim. energia) ei voi määrittellä tarkasti vaan se on todennäköisyysjakauma (superpositio) kaikkia mahdollisia tiloja. Klassisessa tietokoneessa bitit ovat nollija tai ykkösiä, kvanttikoneessa nämä voivat olla yhtä aikaa molempia, eli ne ovat superpositiossa.
- Lomittuminen (entanglement) = Kvanttitilassa olevat kappaleet voivat olla kytkeytyneinä toisiinsa siten, että riippumatta siitä kuinka kaukana ne ovat toisistaan niiden tilat ovat erottamattomasti riippuvaisia toisistaan. "Spooky action at a distance", kuten Albert Einstein kutsui tätä.
- Teleportaatio = Tiedon välittämistä lomittumisen avulla kahden kvanttihiukkasen välillä. Vain tieto siirtyy – ei hiukkaset (eli ihmisten siirtäminen tällä tavalla ei onnistu a la Star Trek).
- Kvanttitietokone eli kvanttikone = Tietokone, joka hyödyntää kvanttimekaniikan erityispiirteitä sellaisten laskutoimitusten tekemiseksi, joka ei olisi mahdollista järjestyksessä ajassa perinteisellä tietokoneella.
- Kubitti eli kvantti bitti (qubit englanniksi) = kubitti on kvanttitilojen superpositio ja pystyy varastoimaan paljon monipuolisemmin tietoa kuin tavallinen bitti. Kvanttitietokoneita vertaillaan monesti kubittimäärän mukaan, koska se kuvastaa kuinka monimutkaisia laskutoimituksia kvanttitietokone pystyy tekemään.
- Kvanttisalaus = teknologia, jonka avulla voidaan viestiä ilman, että muut kuin viestinnän osapuolet pääsevät käsiksi viestin sisältöön. Kvanttisalausavainten avulla salauksen murtaminen on ainakin teoriassa mahdotonta.

(Andersson 2020)

## 3.5 Kvanttitietokoneet vs. perinteiset tietokoneet

CPU:t, GPU:t ja QPU:t ovat kaikki erityyppisiä prosessointiyksiköitä, joita käytetään erityyppisiin laskentatehtäviin. CPU- ja GPU –piirit sekä niiden erityistapaukset liittyvät tietokonejärjestelmissä sovellettuun perinteiseen, ns. klassiseen laskentaan. QPU on kvanttilaskennassa sovelletuista kvanttilaskentayksiköistä käytetty lyhenne.

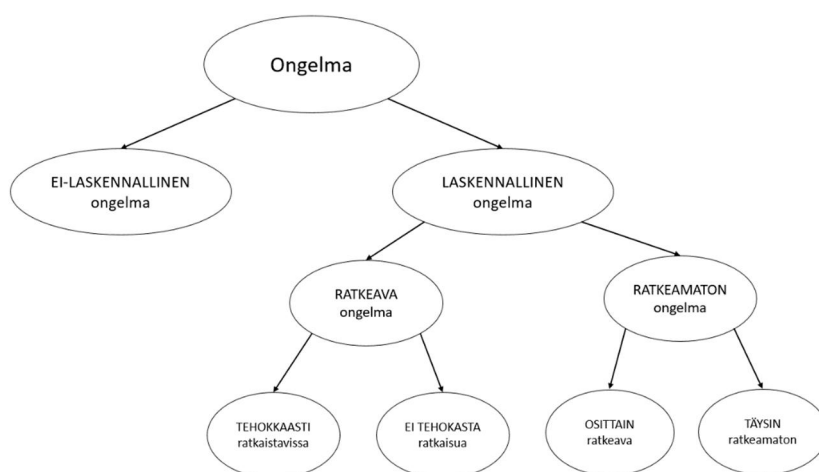
Periaatteita ja keskeisiä eroja CPU-, GPU- ja QPU- prosessointiyksiköiden välillä:

- CPU (Central Processing Unit): CPU on tietokonejärjestelmän ensisijainen prosessointiyksikkö. Se vastaa ohjeiden suorittamisesta sekä aritmeettisten ja loogisten operaatioiden suorittamisesta käsiteltäällä tiedolle. Suorittimet on suunniteltu käsittelemään monenlaisia tehtäviä perustoiminnoista, kuten yhteen- ja

vähennyslasku, monimutkaisempiin tehtäviin, kuten sovellusten ja käyttöjärjestelmien suorittamiseen.

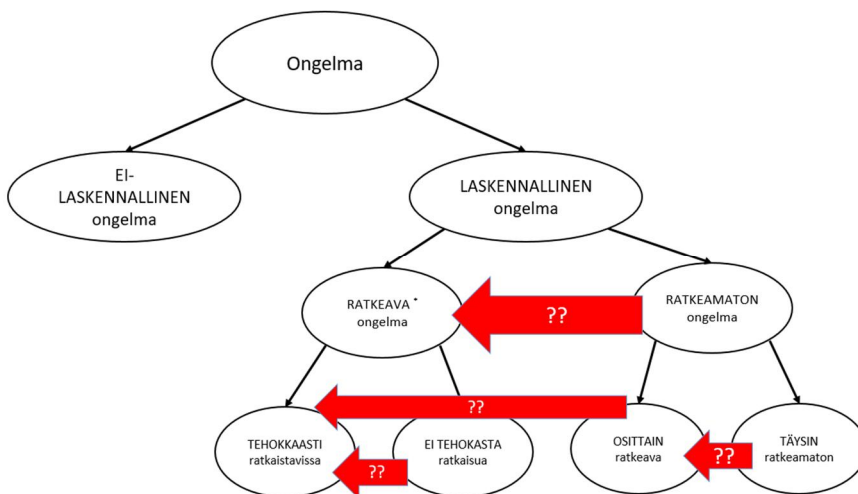
- GPU (Graphics Processing Unit): GPU on erikoistunut prosessointiyksikkö, joka on suunniteltu käsittelemään monimutkaista grafiikkaa ja visuaalisia laskelmia. GPU:ita käytetään yleisesti peleissä, videoeditointissa ja muissa sovelluksissa, jotka vaativat korkean suorituskyvyn grafiikan käsittelyä. Toisin kuin prosessoreissa, joissa on tyypillisesti pieni määrä prosessointiytimiä, GPU:ssa on monia pieniä prosessointiytimiä, jotka voivat toimia rinnakkain laskennan nopeuttamiseksi.
- QPU (Quantum Processing Unit): QPU on eräänlainen prosessointiyksikkö, joka käyttää kvanttimekaniikkaa laskelmien suorittamiseen. Toisin kuin klassiset tietokoneet, jotka käyttävät bittejä edustamaan tietoa, kvanttietokoneet käyttävät kubitteja, jotka voivat esiintyä useissa tiloissa kerralla.

Perinteisillä (klassisilla) tietokoneilla (CPU, GPU-piireillä toteutettava) laskenta pohjaa tietojenkäsittelyn perusperiaatteisiin (mm. Alan Turingin ja Alonso Churchin 1900 –luvulla laaditut teoriat). Tarkemmin tietokoneilla ja niille laadituilla ohjelmilla voidaan tarkastella laskettavuuden mahdollisuuksien mukaan erilaisia ongelmanratkaisuja (jos ongelma laskennallinen ongelma), löytää laskennallisille ongelmille mahdollisesti ratkaisu ja ratkaistaville ongelmille eri teholuokan ratkaisuja (tehokkaasti tai ei-tehokkaasti ratkaistava). Klassiselle tietotekniikalle ja tietojenkäsittelylle ongelmallisia ja jatkuvan tutkimuksen kohteena ovat a) ei-laskennalliset sekä b) erityisesti laskennallisissa ongelmassa ne tapaukset, joihin ei voida löytää ratkaisua (täysin tai osittain ratkeavat) ja c) ratkaisujen mahdollistuessa ne ongelmat, joihin kuitenkin ole tehokasta ratkaisua löydettävissä (ts.ei-tehokkaasti ratkaistavissa).



Kuva 3. Klassisen tietotekniikan laskentaperiaate. (Soveltaen Bridge, D. 2020; Harel, D. 2004; Stanford Encyclopedia of Philosophy 2021)

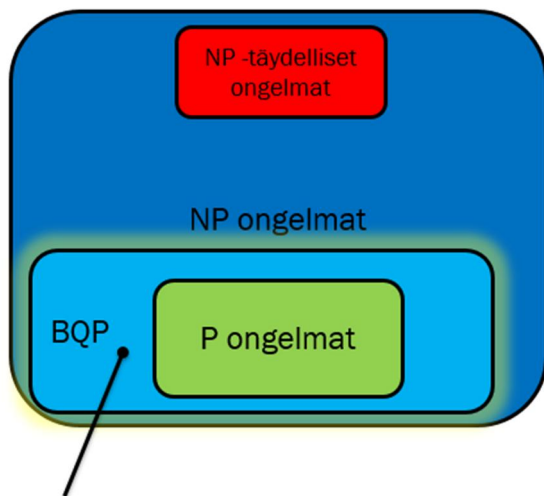
On oletettavaa, että kvanttietokoneet voivat muuttaa tätä viitekehystä, mahdollistaen a) aiempien tehokkaiden ratkaisujen tehostaminen entisestään, b) aiemmin ei-tehokasta ratkaisua sisältävien ongelmien ratkaisun tehokkaasti tai tehokkaammin sekä c) mahdollisesti aiemmin ratkeamattomien ongelmien ratkaisujen mahdollistuminen.



Kuva 4. Kvanttietokoneiden mahdollisuudet. (Soveltaen Bridge, D.; Harel, D. 2004; Stanford Encyclopedia of Philosophy 2021; Fuller, B., Mandelbaum, R. 2022)

On esitetty myös oletuksia, että jopa aiemmin ei-laskennallisia ongelmia voitaisiin siirtää laskennallisten ongelmien "koriin" ja saavuttaa näille ongelmien tehokkaita ratkaisuja. Tämän osalta tutkimus ja teknologinen kehitys on kuitenkin vielä vahvasti vaiheessa. olettaen kuitenkin tulevaisuuden tuottavan merkittäviäkin läpimurtoja aiempaan, vuosikymmenien ajan tietojenkäsittelyn alalla vallitseviin laskennan teorian konsensuksiin verrattuna.

Yksi siirtymä, jonka kvanttilaskennan on ennustettu aiheuttavan, on ns. ongelmien ratkaisemisen tai ratkaisun oikeellisuuden "vaikeuteen". Perinteisten P-, NP- ja NP- täydellisten ongelmien laajenuksena esitetään kvanttietokoneille luokkaa BQP, joka sisältäisi aiemmin vaikeista tai mahdottomista ongelmista ne, jotka olisivat kvanttietokoneilla ratkaistavissa.



BQP (*Bounded-error Quantum Polynomial time*)  
-ongelmat, jotka kvanttikoneilla  
ratkaistavia (esim. *factoring* -> *Shor's algorithm*,  
*discrete logarithm*). Salaukset, koneoppiminen,  
muut sovellusalueet?

Kuva 5. Kvanttitietokoneella ratkaistavissa olevat ongelmat. (Soveltaen Fuller, B., Mandelbaum, R. 2022.

Tässä raportissa ei keskitytä tarkemmin näihin kompleksisuusteoreettisiin näkökulmiin, vaan kvanttilaskennan tehokkuusetuja tarkastellaan yleisemmällä tasolla.

Lähteitä ja lisätietoa:

Andersson, C. 2020. Quantum in Finnish. [https://www.develor.fi/kvanttitekнологia\\_pahkinankuoressa](https://www.develor.fi/kvanttitekнологia_pahkinankuoressa)

Bridge, D. Theory of Computation, Lecture 29: Tractable and Intractable Problems. <http://www.cs.ucc.ie/~dgb/courses/toc/handout29.pdf>

Fuller, B. & Mandelbaum, R. 2022. What Can a Quantum Computer Actually Do?. <https://medium.com/qiskit/what-can-a-quantum-computer-actually-do-4daed0691f6b>

Gunasekar, S., Flanagan, I., d'Angelo, C., Motsi-Omoijade, I. D., Virdee, M., Feijao, C., Porter, S. 2022. Using Quantum Computers and Simulators in the Life Sciences: Current Trends and Future Prospects. Santa Monica, CA: RAND Corporation. [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RRA1899-1.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA1899-1.html)

Harel, D. 2004. *Algorithmics: The Spirit of Computing*. Addison-Wesley.

Hodges. Can quantum computing solve classically unsolvable problems?  
<https://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0512/0512248.pdf>

Intel. 2021. What is a GPU. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/what-is-a-gpu.html>

Rigetti. 2018. The Quantum Processing Unit (QPU). <https://pyquil-docs.rigetti.com/en/1.9/qpu.html>

Stanford Encyclopedia of Philosophy. 2021. Computability and Complexity. <https://plato.stanford.edu/entries/computability/>

Wikipedia. 2022. Central Processing Unit. [https://en.wikipedia.org/wiki/Central\\_processing\\_unit](https://en.wikipedia.org/wiki/Central_processing_unit)

# 4 Kvanttilaskenta – mistä kyse?

## 4.1 Kvanttilaskenta vs. perinteinen laskenta

Kvanttilaskennan mahdollisuuksia tutkimuskäytössä:

- Asiantuntijat ovat yleisesti yhtä mieltä siitä, että pitkällä aikavälillä kvanttisimulaattorit ja -tietokoneet lupaavat esimerkiksi biotieteiden alalla monenlaisia mahdollisuuksia, jotka voivat muuttaa alaa perusteellisesti, vaikka ennusteet ovatkin moninaisia ja eroavat toisistaan.
- Kvanttikemian ja kemiallisten prosessien mallintamisen alat voivat tarjota positiivisia näkymiä.
- Kvanttilaskennan odotetaan parantavan uusien pienimolekyylisten lääkkeiden kehittämisprosessia.
- Tulevaisuuden mahdollisuuksiin kuuluu myös kvanttisimulaattoreiden ja -tietokoneiden käyttö myös biologisten prosessien tutkimisessa.
- Biologisia hyödykkeitä ja lääkkeitä voitaisiin luoda kvanttietokoneiden avulla ainutlaatuisilla ja tehokkaammilla tavoilla.
- Kvanttilaskennan käytön genetiikassa ja genomiikan tutkimuksessa odotetaan edistävän yksilöllistä ja täsmälääketiedettä.

Kvanttilaskennan keskeisiä haasteita:

- Kvanttietokoneiden ja -simulaattoreiden skaalaaminen on välttämätöntä monien tutkimusasetelmien toteuttamiseksi, mikä voi olla vaikeaa.
- Kvanttilaitteistojen on kehityttävä edelleen.
- On luotava yhä enemmän alakohtaisesti räätälöityjä kvanttialgoritmeja.
- Laajempaa ekosysteemiä kehitettäessä ongelmana on sopivien taitojen löytäminen sekä niiden saatavuus.
- Kvanttietokoneiden ja -simulaattoreiden jatkokehittäminen vaatii riittäviä investointeja keskeisiin mahdollistaviin materiaaleihin.
- Nopeasti kehittyvät klassiset tietokoneet "kilpailevat" kvanttietokonekehityksen kanssa.



- Kvanttisimulaattoreita ja -tietokoneita käyttöönotettaessa teollisuudessa, tietyt säännöt ja vaatimustenmukaisuus saattavat muodostua esteeksi tehokkaalle käyttöönotolle.
- Kvanttitietokoneiden ja -simulaattoreiden ekosysteemin kasvattamiseen tähtäävään, eri tieteenalojen ja alojen väliseen yhteistyöhön, liittyy haasteita.
- Käyttötapausten omistajien ja ekosysteemikumppaneiden pitkän aikavälin investointeja vaikeuttaa se, että selkeää ja osoitettua liiketoiminnallista hyötyä ei ole.
- Kvanttisimulaattoreiden ja -tietokoneiden käyttöön voi liittyä eettisiä seurauksia ja luottamuskysymyksiä.





## 4.2 Kvanttilaskennan sovelluskohteita





KvanttiKarelia-hankkeen alussa asetettiin oletus kvanttilaskennan vaikutuksen kohteena erityisesti oleviin mielekkäisiin sovellusalueisiin. Hankkeen aikana erityisesti nämä sovellusalat olivat seurannan kohteena tarkastellessa erilaisia kvanttilaskentateknologioiden, -kehitystoimien, investointien, tutkimusten ja muiden osa-alueiden kehitystä.

Oletuksena oli, että "yleistyessään kvanttilaskenta vaikuttaa lukuisiin eri sovellusalueisiin" ja (oletettavasti) "sitä kautta mm. kaikkiin ammattikorkeakoulujen koulutusaloihin". Tämä kehitys vaikuttaa sekä kvanttilaskentaan liittyvän soveltamisen, mutta myös osaamisen kehittämisen kannalta – niin korkeakoulun itsensä mutta myös eri koulutusalojen työelämän kehittämisen kannalta. Vaikutukset ja osaamisen uudistamisen tarpeet ilmenevät etenkin erilaisten tietojenkäsittelyn sekä tieto- ja viestintätekniisten ratkaisujen kehittymisen kautta, mutta myös erilaisten/uudenlaisten sovellusten tuomien mahdollisuuksien myötä.

Täten vaikutukset voivat liittyä yhtäältä niin teknisiin ympäristöihin ja niiden soveltamiseen, kuin niiden avulla luotaviin uudenslaisiin toimintaprosesseihin, ihmisten ja organisaatioiden toimintaan, kehittämiseen ja johtamiseen sekä uusiin liiketoiminnallisiin uusiin avauksiin.

Tarkasteltavia sovelluskohteita ja selvitystyössä käytettyjä kysymyksiä olivat esimerkiksi:

<p>Sovellusalue</p>	<p>Oletuksia kvanttilaskennan vaikutusten tarkasteluun</p>
<p>Liiketoiminta ja talous</p> 	<p>Onko saavutettavissa esim. monipuolisempia mutta myös nopeampia laskentaoperaatioita ja simulaatioita? Sovelluskohteina esim.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kaupankäynnin liiketoimintatransaktiot,</li> <li>• logistiikan kehittäminen</li> <li>• erilaiset optimointitehtävät,</li> <li>• tiedolla johtaminen.</li> </ul>
<p>Kemia, fysiikka, materiaalitekniikka</p> 	<p>Millaisia kvanttilaskennan edut voisivat olla materiaalien kehityksessä?  Voiko realistista tulevaisuutta olla jopa esim. kvanttilaskentaa hyödyntävät, parviälykkäät, itserakentuvat koneet?</p>
<p>Robottiikka, automaatio ja simulointi</p> 	<p>Millaisia etuja kvanttilaskennalla todennäköisesti on robotiikan, automaation ja simulaation ratkaisuissa?  Millaisia voisivat olla "kvanttiälykkäät" koneet ja automaatio? Millaisia etuja voisivat tuoda nopeat rinnakkaiset vaihtoehtoiset simulaatiomallit (esim. ympäristö, ilmastonmuutos, energiankulutus, optimoinnit)</p>
<p>Kemia, biokemia, farmakologia</p> 	<p>Voisivatko kvanttilaskennalle olla nähtävissä etuja esim. seuraavissa sovelluskohteissa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• proteiinien/DNA -sekvenssien analysointi/mallintaminen,</li> <li>• Kemian tutkimus ja tuotekehitys – nopeutuva kehitysaika,</li> <li>• Farmakologia; uudet lääkkeet, räätälöinti personoidut lääkkeet?</li> </ul>

<p>Lääketiede, sairaanhoito, terveydenhuolto</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epidemioiden leviämisen seuranta ja ennusteet:</li> <li>• Pitkäkestoisten diagnostiikkalaskentaoperaatioiden nopeutus</li> <li>• Edistynyt diagnostinen ja ennustava analytiikka</li> <li>• Potilasjonojen optimoinnin kehittäminen.</li> </ul>
<p>Salaustekniikat</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etenkin vanhojen salausten murtuminen vs. Uudet kvanttivahvat salausmenetelmät.</li> </ul>
<p>Koneoppiminen</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kvanttilaskennalla kiihdytetty ohjattu ja ohjaamaton oppiminen,</li> <li>• Syväoppiminen ja muut keinoälyn ja tietojenkäsittelyn sovellusalueet</li> <li>• Qml; kvanttikoneoppimine</li> <li>• Qbm/quantum boltzmann machine,</li> <li>• Qnn/quantum neural networks - hermoverkot ja niiden sovellutukset</li> <li>• Qgan –verkot</li> <li>• Qsvm/quantum support vector machines,</li> <li>• Optimointi, simulaatiot,</li> <li>• Seuraavan sukupolven älykäs/autonominen automaatio,</li> <li>• Salaustekniikat,</li> <li>• Q-enabled edge computing</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asiantuntijoiden alustavien ennusteiden mukaan kvanttilaskenta luo myös uusia sovellutuksia ja ongelmanratkaisua, joista ei nyt tietoa.</li> </ul>

Kvanttilaskennan sovelluskohteita esitellään ja tarkastellaan tarkemmin hankkeen työpaketin 2 raportissa.

## 4.3 KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmä

KvanttiKarelia-hankkeen työskentelyä tukemaan perustettiin "Round Table" -tyyppinen, mahdollisimman kattava, monialainen asiantuntijaryhmä. Ryhmän tavoitteena oli kvanttilaskennan mahdollisuuksien ja eri sovellusalueiden tarpeiden tunnistaminen.

Ryhmä koostui eri alueiden asiantuntijoista ja se kokoontui noin kerran kuukaudessa tai hiukan harvemmin KvanttiKarelia-hankkeen aikana. Kvanttitekniikka-osaamiseen liittyvien asioiden ympärillä keskusteltiin niin kvanttilaskennan ja -teknologian perusteista, kuin myös erittäin korkean tason ja hyvin uuden, alaan liittyvän, tiedon ja kehityksen viimeisimmistä saavutuksista. Ryhmän keskeinen elementti oli vapaa keskustelu, jota edelsi yleensä yksi tai useampi asiantuntija-alustus, joko Suomesta tai ulkomailta. Hankkeen aikana esityksiä kuultiin Tanskasta, Saksasta, Yhdysvalloista, Englannista, Espanjasta, Italiasta ja Serbiasta. Ryhmässä oli myös kuulijoita eri puolilta maailmaa. Alla alkuperäinen asiantuntijaryhmän kokoonpano 6.10.2020 ja viimeinen varsinainen asiantuntijaryhmän (kirjattu) kokoonpano 2.11.2021, johon liittyi vielä uusia jäseniä

### KvanttiKarelia asiantuntijaryhmä (tilanne 6.10.2020)

#### Jäsenet:

**Tuomo Kauranne** (Toimitusjohtaja, Arbonaut Oy)  
**Satu-Minna Piironen** (Asiantuntija, Business Joensuu Oy)  
**Jyri Pulkkinen** (Toimitusjohtaja, Genre Tech Oy)  
**Ari Koistinen** (Teknologiajohtaja, Genre Tech Oy)  
**Mervi Heikkinen** (Koulutuspäällikkö (ICT-ala), Karelia amk)  
**Ari Hartikainen** (FDF AI Service Manager, Finnish Defense Forces)  
**Juha Koljonen** (Teknologiajohtaja, Palkeet)  
**Ilkka Kukkonen** (Tietohallintopäällikkö, Kuopion kaupunki)  
**Cristina Andersson** (QC-asiantuntija, tietokirjailija, Develor Oy)  
**Pekka Pursula** (Research manager, Microelectronics, VTT)

*Hankkeen toimijat ja asiantuntijaryhmän työskentelyyn osallistuvat lisäksi:*

**Olli Hatakka** (Lehtori, Karelia AMK (projektipäällikkö)  
**Jarmo Talvivaara** (Lehtori, Karelia AMK (projekti-asiantuntija)

Ryhmä voi täydentyä lisäjäsenillä myöhemmin.

## **KvanttiKarelia asiantuntijaryhmä (tilanne 02.11.2021)**

### **Jäsenet:**

**Cristina Andersson** (QC-asiantuntija, tietokirjailija, Develor Oy)  
**Robin Gustafsson** (Asiantuntija, Aalto yliopisto)  
**Nina Granqvist** (Professori, Department of Management Studies, Aalto University School of Business, Aalto yliopisto)  
**Ari Hartikainen** (FDF AI Service Manager, Suomen puolustusvoimat)  
**Mervi Heikkinen** (Koulutuspäällikkö (ICT-ala), Karelia AMK)  
**Teiko Heinosaari** (Asiantuntija, Turun yliopisto)  
**Noora Heiskanen** (Asiantuntija, Aalto yliopisto)  
**Mikael Johansson** (Technology Strategist, Quantum Technologies, CSC - IT Center for Science Ltd)  
**Tuomo Kauranne** (Toimitusjohtaja, Arbonaut Oy)  
**Ari Koistinen** (Asiantuntija, CGI Oy)  
**Juha Koljonen** (Teknologiajohtaja, Palkeet - Valtion talous- ja henkilöstöhallinnon palvelukeskus)  
**Ilkka Kukkonen** (Tietohallintopäällikkö, Kuopion kaupunki)  
**Annakaisa Kultima** (Asiantuntija, Aalto yliopisto)  
**Jani Heikkinen** (Head of Business Development at IQM Quantum Computers)  
**Himadri S Majumdar** (Program Manager, Quantum, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy)  
**Mikko Möttönen** (Professori, Teknillisen fysiikan laitos, Quantum Computing and Devices, Aalto-yliopisto)  
**Ossi Niemimäki** (Principal Developer Algorithms, Disior Oy)  
**Satu-Minna Piironen** (Asiantuntija, Business Joensuu Oy)  
**Laura Piispanen** (Aalto yliopiston tohtorikoulutettava teknillisen fysiikan ja tietojenkäsittelytieteen laitoksilla)  
**Antti Poso** (Professori, Terveystieteiden tiedekunta, Farmasian laitos, UEF and Univ. of Tübingen)  
**Jyri Pulkkinen** (Toimitusjohtaja, Genre Tech Oy)  
**Pekka Pursula** (Research Manager, Microelectronics, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy)

**Tapani Reijonen** (Palvelujohtaja, järjestelmäpalvelut, MEITA Oy)  
**Markku Tukiainen** (Professori, Tietojenkäsittelytieteen laitos, UEF)  
**Jarmo Väisänen** (ICT Manager at Karelia AMK)

*Hankkeen toimijat ja asiantuntijaryhmän työskentelyyn osallistuvat lisäksi:*

**Olli Hatakka** (Lehtori, Karelia AMK (projektipäällikkö)  
**Jarmo Talvivaara** (Lehtori, Karelia AMK (projektiasiantuntija)  
**Mikko Hyttinen** (Lehtori, Karelia AMK (Tulevaisuuden työ ICT-hankkeen yhteyshenkilö ja asiantuntija)

Ryhmä voi täydentyä lisäjäsenillä.

Liitteessä 2 on esitetty hankkeen järjestämät "Round Table"-tapaamiset, niiden ajankohdat, aiheet ja alustusten esittäjät.

# 5 Kvanttitietokoneiden valmistajia, ohjelmointiympäristöjä ja pilvipalveluita

## 5.1 Kvanttitietokoneiden ja –laskentapalveluiden valmistajia

Alla olevaan taulukkoon on koostettu mahdollisimman kattava ja ajantasainen tieto a) kvanttitietokoneita valmistavista ja/tai b) kvanttilaskentapalveluita tarjoavista toimijoista. Tiedot ovat koostettu aikavälillä syksy 2020 – syksy 2022.

Taulukossa esitellään seuraavia tietoja:

1. Valmistaja: kvanttitietokoneita valmistavan tai laskentaa palveluna tarjoavan yrityksen tai muun organisaation nimi (suluissa maa).
2. Kvanttitietokoneiden valmistusta: Onko organisaatiolla itsellään kvanttitietokonelaitteiston valmistusta
  - a. Jos on, suluissa on kuvattuna, mihin teknologisiin ratkaisuihin kvanttitietokone perustuu.
  - b. Jos ei ole, \*\* tarkoittaa lisätietoja, onko suunnitteilla tai minkä valmistajan laitteistoja palveluntarjoaja käyttää.
3. QCaaS - pilvipalvelut : tarjoaako organisaatio pääsyä kvanttitietokoneiden käyttöön tai muuten kvanttilaskentakapasteettia pilvipalveluna (QCaaS, Quantum Computing-as-a-Service).
4. Kehityshistoria:
5. Kubittien lukumäärä ja mahdollinen *fideliteetti*
  - a. Kubittien lukumäärä kuvaa karkealla tasolla sen, miten monimutkaisia operaatioita kyseisellä kvanttikoneella voidaan tehdä.
  - b. Fideliteetti kuvaa tarkkuutta, joilla laskennassa tarvittavia porttioperaatioita voidaan tehdä mahdollisimman virheettömästi (esim. 99.99 %

fideliteetti kuvaa, että laskennassa tapahtuu yksi virhe per 1000 laskentaoperaatiota). Virheet myös kumuloituvat peräkkäisissä porttioperaatioissa.

6. Lisätietoja: mahdollisia tarkennuksia tarjottuihin teknologioihin, verkkopalveluihin tai muuta lisätietoa.

7. Linkkejä: keskeisiä linkkejä teknologioihin liittyen.

Valmistaja	Kvanttitietokoneiden valmistusta, (teknologiat)	Pilvipalvelut QCaaS*	Kehityshistoria (perustettu, kehitystyö / valmistus aloitettu)	Kvanttitietokoneen tai QPU-laskenta-piirien julkaisu	Kubitien lukumäärä sekä mahd. tarkkuus, "fidelity"	Lisätietoja	Linkkejä
1qbit (CAN)	Ei	<a href="#">1qloud</a>	2012			Teknologiakumppanuuksia eri valmistajien ja palvelutarjoajien kanssa (IBM, D-Wave, Fujitsu, Microsoft)	<a href="https://1qbit.com/">https://1qbit.com/</a> <a href="https://1qbit.com/1qloud/">https://1qbit.com/1qloud/</a>
Amazon (US)	Ei**	<a href="#">AWS Braket</a>	Palvelusta tiedotettu 8/2020 (lähde)			Palvelu toteutettu eri valmistajien koneilla: IonQ (trapped ion), OQC (trapped ion), QuEra (neutral atom), Rigetti (superconducting), Xanadu (photonics), D-Wave (annealer) ** Kvanttitietokoneiden rakentamiseen suunnattu teknologiakeskus (lähde)	<a href="https://aws.amazon.com/braket/">https://aws.amazon.com/braket/</a> <a href="https://aws.amazon.com/braket/quantum-computers/">https://aws.amazon.com/braket/quantum-computers/</a>
CQC, Cambridge Quantum Computing	Ei**		2014 (lähde)			Quantum compiler <a href="#">tjiket&gt;</a>	<a href="https://cambridgequantum.com/">https://cambridgequantum.com/</a>

(UK), nyk. Quantinuum						<p>** IBM:n teknologiaa hyödyntäviä ratkaisuja, Quantinuum-yhteistyössä Honeywellin laitteisto.</p> <p>Ilmoitti 6/2021 yhdistymisestä Honeywellin Quantum Solutionsin kanssa, muodostaen 12/2021 uuden organisaation nimeltä "Quantinuum" (<a href="#">lähde</a>)</p>	<a href="https://www.quantinuum.com/">https://www.quantinuum.com/</a>
CSC (FIN)	Ei **	<p>KVASI</p> <p>LUMI (HPC) + HELMI (QPU)</p>	2021-2022 **			<p>myQLM –pohjainen simulaattori</p> <p>** Integroiti VTT:n (IQM:n teknologialla) rakennuttaman HELMI -kvanttietokoneen LUMI-supertietokoneeseen v. 2022 (<a href="#">lähde</a>)</p>	<p><a href="https://research.csc.fi/-/kvasi">https://research.csc.fi/-/kvasi</a></p> <p><a href="https://docs.csc.fi/computing/quantum-computing/helmi/helmi-projects/">https://docs.csc.fi/computing/quantum-computing/helmi/helmi-projects/</a></p>
D-Wave (CAN)	Kyllä (Annealer)	Leap	1999 ( <a href="#">lähde</a> )	2011	128 – 5760 qubits (N/A)	D-Waven laitteistoja käytössä mm. Amazon Braket (AWS)- pilvipalvelussa.	<p><a href="https://www.dwavesys.com/">https://www.dwavesys.com/</a></p> <p><a href="https://www.dwavesys.com/take-leap">https://www.dwavesys.com/take-leap</a></p>



Google (US)	Kyllä (Superconducting)	Quantum AI	2013 (lähde)	2017	20 – 72 qubits (96.9 – 99.9%)	Googlen 53- kubitisella kvanttietokoneella tekemä Quantum Supremacy- saavutus, uutisointi 10/2019 (lähde)	<a href="https://quantumai.google/">https://quantumai.google/</a> <a href="https://quantumai.google/hardware">https://quantumai.google/hardware</a>
Honeywell (US)	Kyllä (Trapped ion)		Tiedote laitteistojulkaisusta 3/2020 (lähde)		10 (99.5 – 99.9959 %)	<p>Ilmoitti 6/2021 yhteistyöstä CQ (Cambridge Quantum) kanssa, muodostaen 12/2021 uuden organisaation nimeltä "Quantinuum" (lähde)</p> <p>Quantinuumin laitteistoja käytössä mm. Microsoftin Azure Quantum -pilvipalvelussa.</p>	<a href="https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum">https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum</a> <a href="https://www.quantinuum.com/">https://www.quantinuum.com/</a> <a href="https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum/quantum-computer">https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum/quantum-computer</a>
IBM (US)	Kyllä (Superconducting)	IBM Quantum	1/2016 (lähde)	2016	1 – 433 (93.21 – 99.96%)	IBM julkaisee ja ylläpitää kattavaa kvanttietotekniikan kehityksen <a href="#">roadmapia</a> .	<a href="https://www.ibm.com/quantum">https://www.ibm.com/quantum</a> <a href="https://quantum-computing.ibm.com/">https://quantum-computing.ibm.com/</a>

Intel (US)	Kyllä (Superconducting)			2017	17 – 49 qubits (N/A)		<a href="https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html">https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html</a>
IonQ (US)	Kyllä (Trapped Ion)	Quantum Cloud	2015 (lähde)	n/a	32 qubits (99.98%)	IonQ:n laitteistoja käytössä mm. Amazon Braket sekä Microsoftin Azure Quantum -pilvipalveluissa.	<a href="https://ionq.com/">https://ionq.com/</a>  <a href="https://ionq.com/quantum-cloud">https://ionq.com/quantum-cloud</a>
IQM (FIN)	Kyllä (Superconducting)				5 qubits, 20 tulossa approx. 2023. (99.9%)	VTT:n toteuttama HELMI- kvanttitietokone on toteutettu IQM:n teknologialla (superconducting). HELMI on integroitu käytettäväksi CSC:n LUMI- super-tietokoneen kanssa.	<a href="https://www.meetiQM.com/">https://www.meetiQM.com/</a>  <a href="https://www.meetiQM.com/articles/press-releases/iqm-unimon-qubit/">https://www.meetiQM.com/articles/press-releases/iqm-unimon-qubit/</a>
Microsoft (US)	Ei	Azure Quantum				Palvelu hyödyntää seuraavien valmistajien teknologioita: Honeywell (Quantinuum), IonQ, Rigetti, Pasqal sekä 1QBit, Toshiba (lähde)	<a href="https://www.microsoft.com/en-us/quantum">https://www.microsoft.com/en-us/quantum</a>  <a href="https://azure.microsoft.com/e">https://azure.microsoft.com/e</a>

							n-us/services/quantum/
Pasqal (FRA)	Kyllä (Neutral atom)		2019 (lähde)		200 qubits (tulossa 350 sekä suunnitella 1000 kubitin laitteita)	Pasqalin laitteistoa käytössä mm. Microsoftin Azure Quantum-pilvipalvelussa (lähde)	<a href="https://www.pasqal.com/">https://www.pasqal.com/</a>
QCI, Quantum Circuits Inc. (US)	Kyllä (Superconducting)						<a href="https://quantumcircuits.com/">https://quantumcircuits.com/</a>
Quantinuum (UK)	Kyllä (Trapped ion)				12-20 qubits (99.7 - 99.8%)		<a href="https://www.quantinuum.com/hardware">https://www.quantinuum.com/hardware</a>
QuEra (US)	Kyllä (Neutral atom)				256 (N/A)		<a href="https://www.quera.com/">https://www.quera.com/</a> <a href="https://www.quera.com/aquila">https://www.quera.com/aquila</a>
QuTech TU Delft (NL)	Kyllä (Semiconductor, spin qubits)			2020	2 – 5 qubits (97 – 99%)		
Rigetti (US)	Kyllä (Superconducting)		2013	2017	8 – 19 qubits (87% - 99.88 %)		<a href="https://www.rigetti.com/">https://www.rigetti.com/</a>
Toshiba (JAP)	Kyllä				N/A	(SBM) Simulated Bifurcation Machine	<a href="https://www.toshiba-sol.co.jp/en">https://www.toshiba-sol.co.jp/en</a>

							/pro/sbm/index.htm
VTT (FIN)	Kyllä ** (Superconducting)		2020 (lähde)		ks. IQM	** IQM:n kanssa yhteistyössä toteutettu kvanttietokone-projekti (lähde)	https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/kvanttitekniologia
Xanadu (CAN)	Kyllä (Photonics)	Strawberry Quantum Cloud	2016 (lähde)	2020	8 – 216 qubits (N/A)		https://www.xanadu.ai/hardware https://www.xanadu.ai/ https://strawberryfields.ai/

\* QaaS = Quantum Computing as a Service (kvanttilaskentapalvelu pilvipalveluna: simulaattori, kvanttietokone tai yhdistelmä)

Osa yllä olevan taulukon mukaisien valmistajien kvanttietokoneiden kehittämisestä löytyy lisätietoja [Ian Hellströmin ylläpitämästä taulukosta](#). Myös Wikipediassa on kattava [listaus](#) erilaisista kvanttiprosessoreista ja niihin liittyvistä tunnusluvuista.

Ylläolevassa taulukossa on valmistajien kohdalla mainittu erilaisia kvanttietokoneiden toteutustapoja. Alla olevista kuvauksista löytyy lisätietoa kustakin toteutustavasta. Kvanttietokoneita voidaan valmistaa myös muillakin tavoilla, mutta kuvauksista löytyy tällä hetkellä kaupallisesti yleisimmät teknologiat.

#### Annealer -tyyppiset kvanttietokoneet

Annealer- tyyppinen kvanttietokone (eng. quantum annealer) kvanttilaskentalaitteisto, joka käyttää kvanttimekaniikkaa optimointiongelmien ratkaisemiseen. Tämän tyyppisiin ongelmiin kuuluu esim. funktion minimi- tai maksimiarvon löytäminen, ja niitä voidaan käyttää useilla aloilla, kuten rahoituksessa, logistiikassa ja koneoppimisessa. Annealerit toimivat koodaamalla optimointiongelman kubittien kvanttiloihin ja käyttämällä sitten kvanttivaihteluita ja kvanttitunnelointia ratkaisuavaruuden tutkimiseen. Sitten kubitit "hehketään" vähitellen tai jäähdytetään, kunnes ne asettuvat optimaalista ratkaisua edustavaan tilaan. Annealer-kvanttietokoneet eroavat muun tyyppisistä

kvanttietokoneista siinä, että ne on suunniteltu erityisesti optimointiongelmiin, eikä niillä ole kykyä suorittaa yleisiä kvanttilaskelmia.

Tunnetuin annealer -tyyppisten kvanttietokoneiden valmistaja on kanadalainen D-Wave.

Lähteitä ja lisätietoja:

- Wikipedia. 2022. Quantum Annealing. [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_annealing](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_annealing)
- D-Wave. 2022. What is Quantum Annealing? [https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c\\_gs\\_2.html](https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_2.html)

Neutral atom

Neutraaliatomipohjainen (eng. neutral atom) kvanttietokone käyttää neutraaleja atomeja kubitteinä. Neutraaleilla atomeilla on useita etuja kubitteina, mm. pitkät koherensiajat, kyky skaalata kubittien lukumäärää sekä mahdollisuudet korkean tarkkuuden kvanttiporttitoimintoihin. Neutraaliatomipohjaisessa kvanttietokoneessa neutraalit atomit ovat loukussa hilassa tai muussa vangitussa rakenteessa ja niiden sisäisiä tiloja käytetään edustamaan kubitteja. Neutraalien atomien välisiä vuorovaikutuksia ohjataan lasersäteillä, mikä mahdollistaa kvanttiporttien toteuttamisen ja kvanttialgoritmien suorittamisen. Neutraaliatomipohjaiset kvanttietokoneet ovat vielä kehitysvaiheessa, mutta niillä on lupaavia mahdollisuuksia laajamittaiseen ja luotettavaan kvanttilaskentaan.

Neutraaliatomipohjaisia kvanttietokoneita valmistavat mm. ranskalainen Pasqal sekä yhdysvaltalainen QuEra.

Lähteitä ja lisätietoja:

- Quera. 2022. Building quantum computers from neutral-atom arrays. <https://www.quera.com/neutral-atom-platform>

Photonics

Fotoniikkaan (eng. photonics) perustuvat kvanttietokoneet ovat kvanttilaskentalaitteisto, jotka käyttävät valoa, erityisesti fotoneja (eng. photons), kubitteina kvanttilaskennan mahdollistamisessa. Fotoniikkaan perustuvalla kvanttilaskennalla nähdään olevan useita etuja, esim. kyky siirtää kvanttietoa pitkiä matkoja ja mahdollisuus korkealaatuisiin kvanttiporttitoimintoihin sekä toimimiseen ilman tarvetta jäähdyttää piirit mataliin lämpötiloihin, käytännössä toimintaan huoneenlämmössä. Fotoniikkaan

perustuvassa kvanttietokoneessa fotoneja manipuloidaan käyttämällä optisia komponentteja, kuten säteenjakajia, vaiheensiirtimiä ja ilmaisimia, mikä mahdollistaa kvanttiporttien toteuttamisen ja kvanttialgoritmien suorittamisen. Fotoniikkaan perustuvia kvanttietokoneita voidaan valmistaa myös integroidulla fotoniikalla, mikä mahdollistaa laitteiston miniatyrisoinnin ja skaalautuvuuden. Fotoniikkaan perustuvat kvanttietokoneet ovat vielä kehitysvaiheessa, mutta niillä on lupaavia mahdollisuuksia laajamittaiseen ja luotettavaan kvanttilaskentaan.

Fotoniikka-pohjaisia kvanttietokoneita valmistaa esim. kanadalainen Xanadu.

Lähteitä ja lisätietoja:

- Xanadu. 2022. Photonics. <https://www.xanadu.ai/photonics/>
- Wikipedia. 2022. Linear Optical Quantum Computing. [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_optical\\_quantum\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_optical_quantum_computing)

Trapped ion

Ioniloukkuihin (eng. trapped ion, ion traps) perustuvat kvanttietokoneet käyttävät ioneja tai varautuneita hiukkasia kubitteina. Ioniloukku- pohjaisella kvanttilaskennalla nähdään olevan useita etuja, joihin kuuluvat mm. lukien pitkät koherenssiajat, kyky skaalata kubitien lukumäärää ja mahdollisuudet korkealaatuisiin kvanttiporttitoimintoihin. Ioniloukkuihin pohjaavissa kvanttietokoneissa ionit vangitaan tyhjiöön käyttämällä sähkömagneettisia kenttiä, ja niiden sisäisiä tiloja käytetään edustamaan kubitteja. Ionien välisiä vuorovaikutuksia ohjataan lasersäteillä, mikä mahdollistaa kvanttiporttien toteuttamisen ja kvanttialgoritmien suorittamisen. Ioniloukku-pohjaisten kvanttietokoneiden nähdään olevan vielä kehitysvaiheessa, mutta niitä on käytetty useiden tärkeiden kvanttialgoritmien esittelyyn, ja niillä on lupaavia mahdollisuuksia laajamittaiseen, luotettavaan kvanttilaskentaan.

Ioniloukkuihin pohjaavia kvanttietokoneita valmistavat mm. yhdysvaltalainen Honeywell (Quantinuum) ja kanadalainen IonQ,

Lähteitä ja lisätietoja:

- IonQ. Glossary. <https://ionq.com/resources/glossary#T-terms>
- Pennylane. 2021. Trapped ion quantum computers . [https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial\\_trapped\\_ions.html](https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_trapped_ions.html)
- Wikipedia. 2022. Trapped ion quantum computer. [https://en.wikipedia.org/wiki/Trapped\\_ion\\_quantum\\_computer](https://en.wikipedia.org/wiki/Trapped_ion_quantum_computer)

## Superconductive

Suprajohtaviin kvanttipiireihin (eng. superconductive quantum circuits) pohjautuvat kvanttietokoneet toimivat suprajohtavilla kvanttipiireillä. Nämä piirit koostuvat suprajohtavista komponenteista, kuten Josephson-liitoksista ja kondensaattoreista, jotka on integroitu kvanttipiireihin. Nämä piirit toimivat kvanttimekaanisilla periaatteilla ja voivat suorittaa kvanttilaskentaoperaatioita. Suprajohtavilla kvanttietokoneilla on useita etuja muihin kvanttietokoneisiin verrattuna. Ne voidaan suunnitella ja valmistaa käytännössä olemassa olevia puolijohteiden valmistustekniikoita, mikä tekee niistä suhteellisen helppoja skaalata suuriin kubittimääriin. Niillä on myös suhteellisen pitkät koherenssiajat, mikä mahdollistaa suhteellisen pitkiä laskelmia. Näistä eduista huolimatta suprajohtavat kvanttietokoneet kohtaavat myös useita haasteita, mukaan lukien yleensä tarve jäähdyttää prosessorit erittäin matalaan lämpötilaan, tarve hallita ja eristää kubitit ympäristöstään sekä tarve korjata laskennan aikana tapahtuvat virheet. Siitä huolimatta ne ovat tällä hetkellä yksi johtavista käytännön kvanttietokoneiden kehittämisalustoista, ja yritykset ja korkeakoulut ympäri maailmaa tutkivat ja kehittävät niitä aktiivisesti. Suprajohtaviin kvanttipiireihin pohjautuvia kvanttietokoneita valmistavat mm. yhdysvaltalaiset Google, IBM, QCI ja Rigetti sekä suomalainen IQM.

### Lähteitä ja lisätietoja:

- IBM Research. 2020. Quantum Computing with Superconducting Circuits. <https://research.ibm.com/publications/quantum-computing-with-superconducting-circuits>
- IQM. 2022. Unimon: A new qubit to boost quantum computers for useful applications. <https://www.meetiqm.com/articles/press-releases/iqm-unimon-qubit/>
- Arute, et al. 2019. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>
- Rigetti. Scalable quantum systems built from the chip up to power practical applications. <https://www.rigetti.com/what-we-build>
- Wikipedia. 2022. Superconducting quantum computing. [https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting\\_quantum\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_quantum_computing)

## 6 Kvanttilaskennassa käytetyt ohjelmointiympäristöt ja -kieliä

Kvanttilaskentaan on tarjolla useita erilaisia tapoja ohjelmien suunnitteluun sekä ohjelmointikieliä ja kehitysympäristöjä ohjelmien toteuttamiseen, testaamiseen ja suorittamiseen. Ohjelmointikielillä toteutetut ohjelmat voidaan testata ja suorittaa joko kvanttietokoneita simuloivilla ohjelmistoratkaisuilla tai oikeilla fyysisillä kvanttietokoneilla. Kvanttietokoneille kirjoitettavien ohjelmien toteuttamiseen tarkoitettuja ohjelmointikieliä voidaan jakaa eri tasoihin, joilla on oma tapansa asioiden kuvaamiseen. Eri kielten ja tasojen välillä eroihin ja soveltamiseen vaikuttaa mm. kielen abstraktiotaso (millä tarkkuustasolla ohjelmissa eri käskyt ja operaatiot kuvataan) ja monimutkaisuus (miten eri tavoilla ohjelmien toiminta voidaan kielellä kuvata).

Myös kvanttilaskennassa ohjelmointikielen valinta riippuu siitä, millä abstraktiotasolla ongelma on tarve ratkaista, millaisia ohjelmakirjastoja käytetty kvanttilaskentaympäristö (esim. on-premises paikallinen ratkaisu tai QCaaS –pilvipalvelu tukee) sekä enenevässä määrin myös siitä millaista ohjelmointimallia ohjelmoija itse suosii.

Kvanttietokoneiden ohjelmointiin käytettävät kielet ovat jaettavissa esim. seuraavien tasojen mukaan.

- Matala taso: kvanttipiirien ja porttioperaatioiden tasolla tapahtuva algoritmien tai ohjelmien toteuttaminen.
  - Piirimallipohjaiset kielet tarjoavat mahdollisuudet toteuttaa ohjelmien toimintaperiaatteet ja tiedonkäsittelyn rakenteet kvanttipiirien tasolla (quantum circuits), Esimerkkejä tällaisista kielistä ovat esim. [cQASM](#) tai [OpenQASM](#).
  - Porttipohjaiset kielet tarjoavat korkeamman tason abstraktion kuin piirimallipohjaiset kielet, koska ne sisältävät kirjaston valmiiksi määritellyistä kvanttiporteista, joita voidaan yhdistellä kvanttipiirien muodostamiseksi. Esimerkkejä tällaisista kirjastoista ovat [Qiskit](#), jonka kehittämisessä etenkin IBM:llä ollut vahva rooli ja Googlen AI Quantum Teamin kehittämä [Cirq](#). Molempia kirjastoja voidaan hyödyntää Python- ohjelmointikieltä käyttämällä.



- Korkea taso: syntaksiltaan perinteisempää ohjelmointia muistuttavat, algoritmi- tai sovellustason kielet:
  - Algoritmitason kielet ovat korkean tason ohjelmointikieliä, jotka mahdollistavat kvanttialgoritmien ilmaisemisen abstraktimmin ja modulaarisemmin. Esimerkkejä tällaisista kielistä ovat esim. [Microsoftin Q#](#) sekä [Silq](#).
  - Sovellustason kielet: Nämä ovat korkeimman tason ohjelmointikieliä, jotka on suunniteltu erityisesti tietyille kvantti-sovelluksille, kuten kvanttikemiassa tai optimointitehtävissä. Esimerkkejä tällaisista kielistä ovat esim. elektro-nirakenteen laskentaa varten suunniteltu [PySCF](#) ja [QAOA](#) (Quantum Approximate Optimization Algorithm).
- Klassinen-quantti- hybridit:
  - Klassisen ja kvanttilaskennan ohjelmoinnin ominaisuuksien ja käytänteiden yhdistelemistä mahdollistavat ratkaisut. Näitä sovelletaan esimerkiksi kvanttikoneoppimista mahdollistavissa kirjastoissa, kuten [TensorFlow Quantum](#) sekä kvanttilaskennassa käytettyä Qiskit:iä ja klassisessa koneoppimisessa sovellettua PyTorch –kirjastoa. Lisätietoja jälkimmäisestä löytyy mm. [Hybrid quantum-classical Neural Networks with PyTorch and Qiskit](#)
  - Myös useampi portti- ja algoritmitason kieli tukee osaltaan classical-quantum- hybridinäkökulmaa, tarjoamalla esim. kvanttilaskentaoperaatioilla rakennettujen ja operoivien kvanttipiirien mittaustuloksien tallentamisen klassisiin bitteihin. Tällöin ohjelmat voivat sisältää lähdekoodissa sekä klassisen että kvanttilaskennan periaatteita soveltavaa logiikkaa.

Esimerkkejä ja linkkejä yleiskäyttöisistä ja suosituiksi kehittyneistä kvanttiohjelmointikielistä, -kehitystyökaluista ja -ympäristöistä:

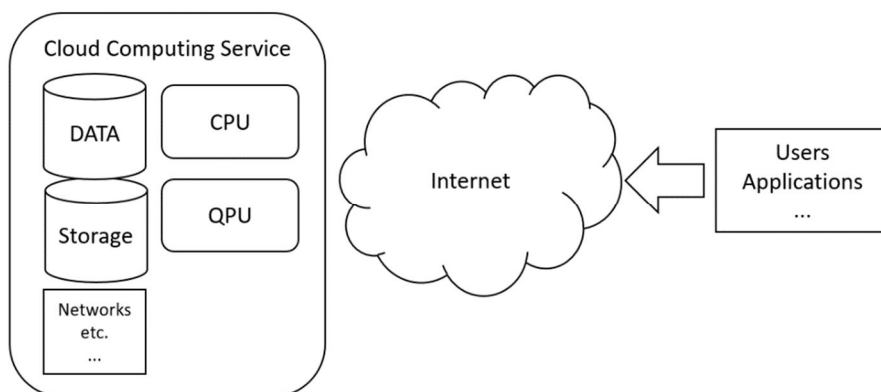
- [AWS Braket SDK](#)
- [Azure Quantum Q# and the Quantum Development Kit](#)
- [Cirq](#)
- [OpenQASM](#)
- [Qiskit](#)
- [Silq](#)

Kvanttiohjelmointiympäristöjä käsitellään tarkemmin hankkeen työpaketin 2 raportissa.

## 7 Pilvipalveluna saatavilla olevia kvanttilaskentapalveluita

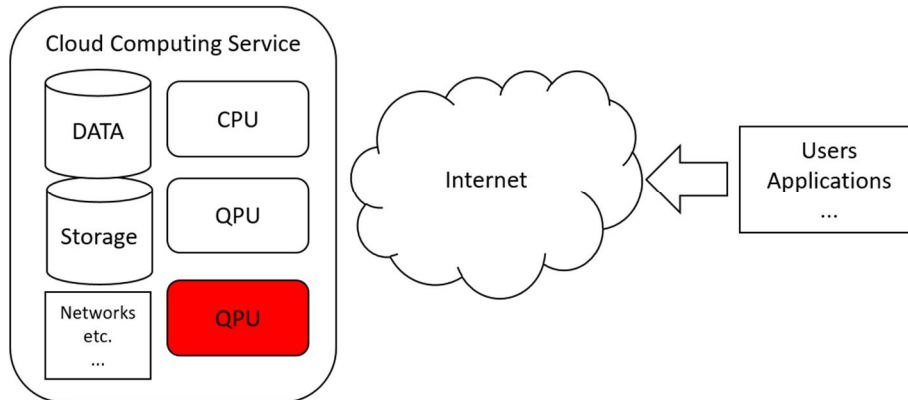
Kuten raportissa edellä monesta eri näkökulmasta tarkasteltu; kvanttilaskenta voi tarjota yrityksille, muille organisaatioille ja yksilöille merkittäviä mahdollisuuksia kehittää ja soveltaa aiempia, usein jo mittavia tietojenkäsittelyn sovelluksia ja niiden tuottamia etuja. Yksittäisenkään kvanttietokoneen tai muun kvanttilaskentakapasiteetin hankkiminen käyttöön omana paikallisena teknisenä ratkaisuna on kuitenkin harvoin kannattava eikä usein tarvittavakaan toimenpide.

Kuten muutakin tietojenkäsittelykapasiteettia (CPU- ja GPU- prosessointikapasiteetti, tiedon tallennusresurssit, verkot, jne.), myös kvanttilaskentaa on saatavilla ns. pilvipalveluina (cloud computing, Infrastructure-as-a-Service). Tällöin tarvittava kapasiteetti hankitaan sopivalta palveluntarjoajalta ilman tarvetta investoida kalliseen tekniikkaan itse - kustannukset perustuvat yleensä palveluiden käytön mukaan hinnoitteluun.



Kuva 6. Pilvipalvelun toimintaperiaate.

Moni merkittävä, klassista tietojenkäsittelykapasiteettia jo aiemmin tarjoava toimija onkin laajentanut tai on laajentamassa palveluntarjontaansa myös kvanttilaskentakyvyksillä.



Kuva 7. Kvanttilaskenta pilvipalvelussa.

Esimerkkejä merkittävistä pilvipalvelun tarjoajista, jotka ovat sisällyttäneet kvanttilaskenta-kapasiteetin tarjoamisen omassa pilvipalvelussaan:

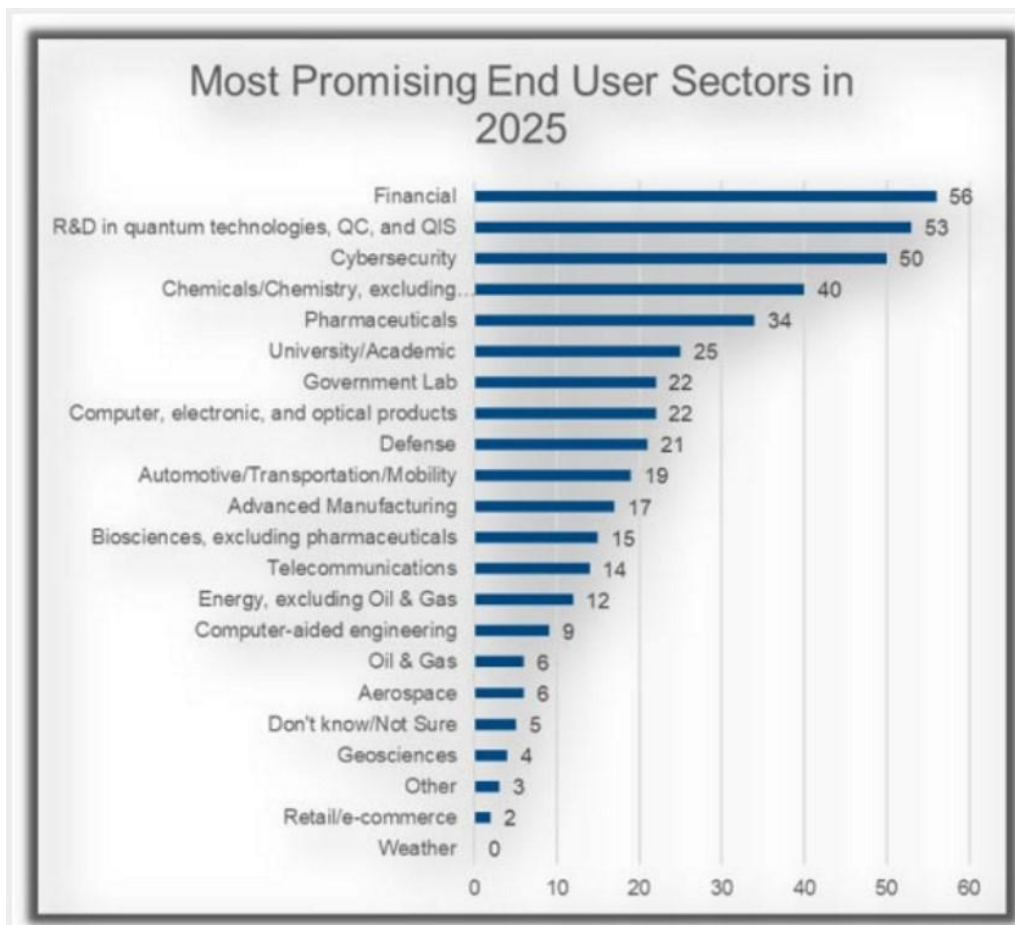
- Amazon Web Services ([AWS Braket](#))
- D-Wave ([Leap](#))
- Google ([Quantum AI](#))
- IBM ([IBM Quantum](#))
- Microsoft Azure ([Azure Quantum](#))

Pilvipalveluina hyödynnettäviä kvanttilaskentapalveluita (ns. Quantum Computing-as-a-Service, QCaaS) esitellään ja tarkastellaan tarkemmin hankkeen työpaketin 2 raportissa.

## 8 Johtopäätökset ja pohdinta

Tässä lyhyessä KvanttiKarelia-hankkeen tuottamassa raportissa esitellään kvanttilaskennan historiaa sekä nykytilaa Suomessa ja muualla. Ala kehittyy huimaa vauhtia, ja tulee varmasti vaikuttamaan lähitulevaisuudessa meihin kaikkiin. Kvanttilaskenta tulee kehittymään ja tuottamaan laskennallisia ratkaisuja moniin sellaisiin ongelmiin, jotka ovat vielä tätä kirjoitettaessa vaikeita tai mahdottomia. Hankkeen yksi merkittävimmistä havainnoista olikin, että tietoa ja osaamista kannattaa ryhtyä kvanttilaskentaan liittyen hankkimaan jo nyt teknologian kypsymissvaiheessa. Ei kannata jäädä odottelemaan, vaan ryhtyä seuraamaan alan kehitystä ja pohtimaan sen merkitystä suhteessa omaan substanssialueeseen.

Yhdysvalloissa toimiva, alan yksi johtavista kvanttilaskennan käytön ja kehityksen tutkimukseen erikoistuneen Hyperion-tutkimuslaitoksen tutkimusjohtaja Bob Sorensen vastasi kysymykseen, ”Milloin kvanttilaskentaa pitäisi ryhtyä seuraamaan?” vertauksella jääkiekossa vaihtopenkillä istuvaan pelaajaan. Hän totesi, että paraskaan pelaaja, ei voi tulla peliin mukaan ”pukukopista”, jos ei ole seurannut peliä aktiivisesti. Peliä kannattaa siis seurata, koska peliin voi joutua mukaan yllättäen ja nopeasti. Sama pätee kvanttilaskentaan, oikeaa aikaa aloittaa siihen perehtymistä ja kehityksen seuraamista on vaikea määritellä, mutta mitään ei menetä, jos ryhtyy seuraamaan ja hankkimaan perustietoa kvanttilaskennan laajoista mahdollisuuksista.



Kuva 8. Top 3 Quantum-sektorit: Bob Sorensenin mukaan Hyperionin tutkimusten perusteella kolme tärkeintä loppukäyttäjäalaa - alat, jotka näkevät kvanttiteknologian lupaavimpana vuoteen 2025 mennessä - ovat rahoituspalvelut, kvanttiteknologiaan, kvanttilaskentaan ja kvantti-informaatiotieteeseen liittyvä T&K sekä kyberturvallisuus. (Hyperion Research 2022)

Kvanttilaskennan avulla voidaan ratkaista joitain ongelmia nopeammin kuin perinteisillä tietokoneilla. Kvanttilaskenta voi ratkaista suuren määrän laskentaa vaativia ongelmia, kuten vaikkapa tekijöinti ja optimointi, nopeammin kuin klassiset tietokoneet. Kvanttilaskentapalvelut ovat palveluita, jotka tarjoavat kvanttilaskennan mahdollisuuksia ja infrastruktuuria. Niiden avulla käyttäjät voivat suorittaa kvanttilaskentaa ja hyödyntää kvanttilaskennan etuja, kuten nopeampia laskentatuloksia. Kvanttilaskentapalvelut tarjoavat mahdollisuuden, kenelle tahansa, tutustua ja kokeilla kvanttilaskentaa käytännössä.

Kvanttilaskennan ja klassisen laskennan yhdistäminen on tärkeää monissa sovelluksissa. Klassinen tietokone voi käyttää apuna kvanttietokonetta ja hyödyntää sen

kvanttialgoritmeilla tuotettuja tuloksia, tehostaen sovellusten kokonaistehokkuutta ja suoritusaikaa. Ensimmäiset merkittävät sovellukset tullaan varmasti näkemään hybriditoteutuksina, jossa kvanttilaskentaa käytetään klassisen tietotekniikan yhteydessä ratkaisemaan nimenomaan sille soveltuvia laskennan pullonkauloja, jotka ovat klassiselle tietotekniikalle, jopa supertietokoneille, vaikeita tai jopa mahdottomia ratkaista. On kuitenkin tärkeää huomata, että kvanttilaskenta ei sovellu kaikkiin laskennan ongelmiin, ja jotkut ongelmat ovat edelleen ratkaistavissa paremmin klassisilla tietokoneilla. Esimerkiksi yksinkertaiset laskutoimitukset ja suoraviivaiset algoritmit voidaan suorittaa nopeammin klassisilla tietokoneilla. Lisäksi kvanttilaskennan toteuttaminen vaatii erityisosaamista ja infrastruktuuria, mikä rajoittaa sen käyttöä laajasti. Kvanttilaskenta tulee tarjoamaan resursseja entistä tehokkaamman laskentatehon aikaansaamiseksi, mutta kokonaisuutena, jossa laskenta jakautuu tarkoituksenmukaisesti klassisen ja kvanttilaskennan kesken.

Tätä kirjoitettaessa kvanttilaskenta on jo osoittanut vahvuutensa, mutta on edelleen voimakkaassa kehitysvaiheessa, johon liittyy vielä huomattava määrä ratkaistavia ja edelleen kehitettäviä asioita. Virhetoleranssia pitää edelleen pystyä nostamaan ja "kohinaa" vähentämään. Kubittien fideliteetti on vielä liian matalalla tasolla, jotta suurella määrällä kubitteja suoritettavat loogiset porttioperaatiot onnistuvat pienemmällä "kohinalla" ja virheettömämmin, kuin nyt. Kehitys on edennyt tässäkin merkittävin askelin, sekä algoritmien virheenkorjaus, että kubittien fideliteetti ovat parantuneet ja tulevat edelleen kehittymään.

Kvanttitietokoneiden kubittimäärä on myös moninkertaistunut KvanttiKarelia-hankkeen aikana. Kun aloitimme 2020 puhuttiin joistakin "kymmenistä kubiteista" ja nyt esimerkiksi IBM on jo esitellyt omassa [tiekartassaan](#) 1121 kubittia käsittävän Condor-kvanttitietokoneen, joka on tarkoitus julkaista vielä loppuvuodesta 2023. IBM on onnistunut pitämään suunnitelmansa mukaisen kehitystahdin aiemmissa kvanttikonejulkaisuissaan, loppuvuodesta 2022 se julkaisi 433-kubittisen Osprey-kvanttitietokoneen, joten yli tuhannen kubitin kvanttitietokoneen julkaisu toteutunee aiotussa aikataulussaan. Tulevina vuosina IBM aikoo julkaista useita tuhansia kubitteja sisältäviä kvanttitietokoneita ja kubittien määrä on tarkoitus skaalata edelleen niin, että vuoden 2026 jälkeen saavutetaan kymmenen tuhannen kubitin raja ja tavoitteena on skaalata kubittien määrää edelleen kohti sataa tuhatta kubittia.

Myös suomalainen kvanttitietokonekehitystyö on ottanut valtavia harppauksia kehitystyössään. Espoon Otaniemessä toimiva [IQM](#) on suomalainen kvanttitietokoneita

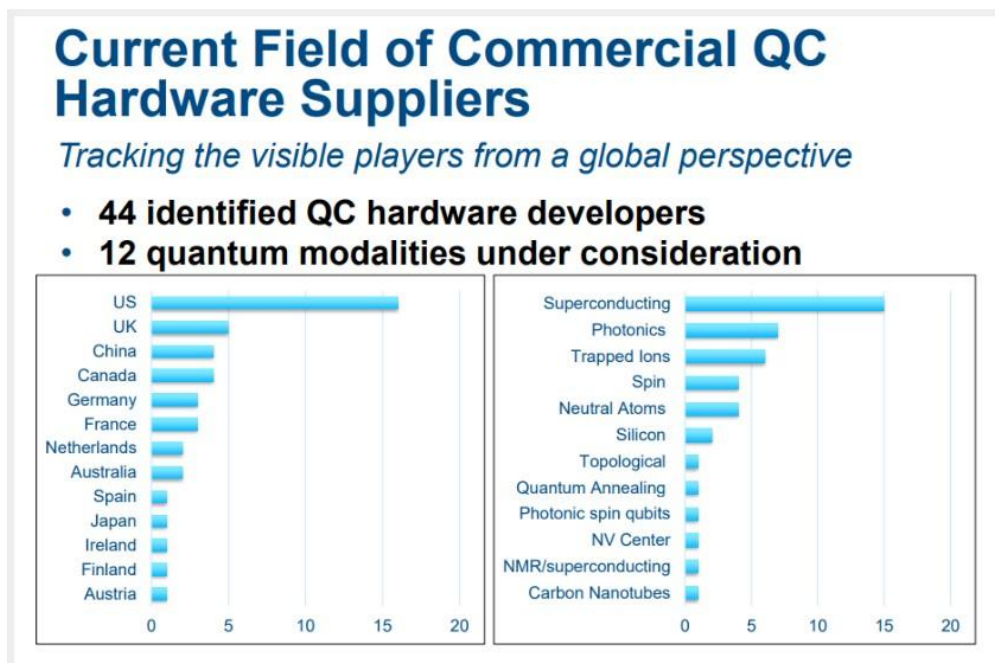
valmistava huipputeknologiayritys, joka on laajentunut nopeasti muutamassa vuodessa Euroopan johtavaksi ja palkituksi kvanttietokonetekniikan kehittäjäksi. Tätä raporttia kirjoitettaessa IQM-yhtiöiden palveluksessa on yli 230 henkilöä ja sillä on toimipisteitä Suomen lisäksi Saksassa, Ranskassa, ja Espanjassa. Huhtikuun 2023 alussa yritys uutisoi laajentavansa toimintaa Kaukoitään ja avaavansa toimiston Singaporeen. Ensimmäinen suomalainen IQM:n valmistama viiden kubitin kvanttietokone "Helmi", toimitettiin VTT:lle vuonna 2021 ja IQM rakentaa myös Suomen ensimmäistä 54 qubitin kvanttietokonetta osana VTT:n kanssa toteutettavaa yhteisinnovaatiohanketta. IQM on myös julkaissut vuoden 2022 lopulla uuden kubitityypin, Unimonin, jonka kohinasietoisuus ja fideliteetti ovat parempia, kuin valtavirtana superjohtavissa kvanttietokoneissa käytetyn Transmon-kubitin vastaavat ominaisuudet.



Kuva 9. IQM:n kvanttietokone. (Kuva: IQM).

Kvanttietokoneita ja niihin liittyviä teknologioita tutkitaan ja kehitetään kovaa vauhtia eri puolilla maailmaa. Tällä hetkellä kehitteillä ja käytössä on useita erilaisia kvanttietokoneteknologioita, voittavaa teknologiaa on mahdotonta vielä "julistaa" ja siitäkin syystä on hyvä seurata eri teknologioiden kehittymistä. Alla olevassa kuvassa näkyy

miten olemassa olevat kvanttietokonevalmistajat ovat maantieteellisesti jakautuneet, ja mitä eri teknologioita ja periaatteita kvanttietokoneet määrällisesti edustavat.



Kuva 9. Quantum Is Global. Valtiot ja yritykset ympäri maailmaa käyttävät rahaa kvanttitutkimukseen ja -teknologiaan. Vaikka Yhdysvallat on edelläkävijä, myös Euroopassa, Kiinassa ja Intiassa on meneillään merkittäviä toimia. (Hyperion Research 2022)

Vaikka kvanttilaskentateknologia ja sen kehittäminen on välttämätön edellytys alan mahdollisuuksien hyödyntämiselle, se ei kuitenkaan ole yksin riittävä. Kvanttilaskennan hyödyntäminen vaatii laajaa, monipuolista ja -alaista osaamista. Tämä tarkoittaa, että riittävä määrä riittävän osaavia toimijoita liittyy mukaan, ryhtyy käyttämään, tutkimaan ja edelleen kehittämään kvanttilaskennan mahdollisuuksia. Tästä niin sanotusta kvanttiekosysteemistä ja sen edellytyksien synnyttämisestä, ylläpitämisestä ja kehittämisestä on herännyt laaja keskustelu ja pohdinta miten toimiva kvanttiekosysteemi voidaan saavuttaa. Palaamme kvanttiekosysteemiin liittyviin seikkoihin seuraavissa raporteissamme, mutta jo nyt voimme todeta, että koulutuksella ja osaamisen siirrolla yleisemminkin on keskeinen rooli. Ala tarvitsee hyvin monenlaista osaamista ja kyvykkyyksiä, joiden tuottaminen täytyy varmistaa riittävän laajasti. Tällä hetkellä pula osaajista on ilmeinen ja kasvava. Tarvitaan merkittävää koulutuspanostusta, jotta kriittinen massa ekosysteemin ylläpitämiseen mahdollistuu. Koulutusta on lisättävä kaikilla tasoilla, mutta erityisesti ammattikorkeakoulujärjestelmä voisi olla keskeisessä roolissa näiden haasteiden ratkaisemisessa



# Liitteet

## Liite 1. Käsitteitä ja terminologiaa

(Heinosen (2021) mukaan: Katsaus kvanttilaskentateknologiaan ja sen sovelluksiin (Neittaanmäki, Ed. 2021). Informaatioteknologian tiedekunnan julkaisuja. Jyväskylän yliopisto)

- Aaltohiukkasdualismi** Kvanttioliolla on tyypillisesti sekä aalto- että hiukkastyypisiä ominaisuuksia. Vaikka järjestelmän kehitys seuraa aaltoyhtälöä, mikä tahansa mittaus palauttaa arvon, joka on johdonmukainen sen kanssa, että kyseessä on hiukkanen. (National Academies of Sciences, Medicine ym. 2019)
- Bitti** Bitti (engl. 'bit') eli binäärinen numero (engl. 'binary digit') on kaksiarvoista logiikkaa käyttävän klassisen tietokoneen tiedon perusosanen.
- Koherenssi** Kun kvanttijärjestelmän tilan voi kuvata kompleksilukujen joukkona, yksi kullekin järjestelmän perustilalle, järjestelmän tilan sanotaan olevan "koherentti". Koherenssi on välttämätön kvantti-ilmiöille kuten kvantti-interferenssille, superpositiolle ja lomittumiselle. Pienet vuorovaikutukset ympäristön kanssa saavat kvanttijärjestelmät hiljalleen dekoheroituvan. Ympäristön vuorovaikutukset tekevät jopa kompleksiset kertoimet probabilistisiksi jokaiselle tilalle. (National Academies of Sciences, Medicine ym. 2019)
- Kubit** Kubit (engl. 'quantum bit') eli kubitti (engl. 'qubit') on kaksiarvoista logiikkaa käyttävän kvanttietokoneen tiedon perusosanen.
- Kutrit** Kutrit (engl. 'quantum trit') eli kutritti (engl. 'qutrit') on kolmiarvoista logiikkaa käyttävän kvanttietokoneen tiedon perusosanen.
- Lomittuminen** Lomittuminen eli kietoutuminen on joidenkin (mutta ei kaikkien) monihiukkassuperpositiotilojen erikoisominaisuus, jossa yhden hiukkasen tilan mittaus romahduttaa muiden hiukkasten tilan, jopa kun hiukkaset ovat kaukana toisistaan ilman mitään havaittavaa keinoa vuorovaikutukseen. Tämä syntyy, kun eri hiukkasten aaltofunktiot eivät ole separoituvissa (matemaattisin termein, kun koko järjestelmän aaltofunktiota ei voi kirjoittaa jokaisen hiukkasen aaltofunktioiden tulona). Tälle ilmiölle ei ole klassista analogiaa. (National Academies of Sciences, Medicine ym. 2019)

Mittaus Kvanttijärjestelmän mittaus fundamentaalisesti muuttaa sitä. Tapauksessa, jossa mittaus tuottaa hyvin määritellyn arvon, järjestelmä jää tilaan, joka vastaa mitattua arvoa. Tätä yleisesti kutsutaan "aaltofunktion romahduttamiseksi". (National Academies of Sciences, Medicine ym. 2019)

Superpositio Kvanttijärjestelmä voi olla kahdessa tai useammassa tilassa samanaikaisesti, mihin viitataan tilojen "superpositiona" tai "superpositiotilana". Sellaisen superpositiotilan aaltofunktiota voidaan kuvailla kontribuovien tilojen lineaarisena kombinaationa, jossa on kompleksiset kertoimet. Nämä kertoimet kuvaavat magnitudia ja kontribuovien tilojen välistä suhteellista vaihetta. (National Academies of Sciences, Medicine ym. 2019)

Tritti Tritti (engl. 'trit') eli ternäärinen numero (engl 'ternary digit') on kolmiarvoista logiikkaa käyttävän klassisen tietokoneen tiedon perusosanen.

## Liite 2. KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijatapaamiset

Ajankohta	Esittäjä	Aihe/kuvaus
26.10.2020 klo 15-17	Olli/Jarmo Asiantuntijaryhmän järjestäytyminen/esittely	4511 3200 6188 KvanttiKarelia -Kvanttilaskentaan perustuvat tulevaisuuden liiketoiminta- ja palvelumahdollisuudet Asiantuntijaryhmän ensimmäinen tapaaminen/tutustuminen
19.11.2020 klo 15-17	Olli/Jarmo Asiantuntijaryhmän järjestäytyminen/esittely	KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmä toinen tapaaminen
17.12.2020 klo 15-17	Olli/Jarmo Asiantuntijaryhmän järjestäytyminen/esittely	KvanttiKarelia asiantuntijaryhmän kolmas tapaaminen toivotamme tervetulleiksi uudet jäsenet KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmään. Tervetuloa mukaan! Rasmus F.A. Lindman (Head of Business Development at IQM Quantum Computers) ja Mikko Möttönen (Professori, Teknillisen fysiikan laitos, Quantum Computing and Devices, Aalto-yliopisto)
21.1.2021 klo 15-17	Dr. Pekka Pursula VTT oy	KvanttiKarelia-asiantuntijaryhmän tapaaminen. Tässä hiukan lisäinfoa tämän päivän tapaamisestamme ☺. Tänään tapaamme (TEAMSissa) klo 15 ja noin klo 15.15 asiantuntijaryhmämme jäsen, Pekka Pursula (Research manager, Microelectronics, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) pitää lyhyen alustuksen. Alustuksen jälkeen käymme keskustelua alustuksen pohjalta. Jatkamme keskustelua ja kerromme hankekuulumisia ja käymme läpi myös "Kvantilla tulevaisuuteen" -webinaarin valmistelutilannetta ja muuta aiheeseen liittyvää. Lisäksi keskustelemme muista tulevista tapahtumista ja otamme käyttöön hankkeen yleiseen ja asiantuntijakeskusteluun ja tiedonvaihtoon avatun TEAMS-ympäristön. Esittelyn jälkeen käymme keskustelua toiveista, ajatuksista ja työskentelytavoista asiantuntijaryhmän kesken.
18.2.2021 klo 15-17	Dr. Mikael Johansson CSC oy	Tänään tapaamme (TEAMSissa) klo 15 ja noin klo 15.15 asiantuntijaryhmämme jäsen, Mikael Johansson (Technology Strategist, Quantum Technologies, CSC - IT Center for Science Ltd) pitää lyhyen alustuksen. Torstain tapaamisessa ajattelin hieman kertoa kvanttialgoritmeistä, löyhästi perustuen tuohon "Kvantilla tulevaisuuteen"-ohjelmassa esiteltyyn. Lyhyempi ja napakampi, ja jotain uuttakin. Ollin kanssa mietimme että tämä voisi toimia pohjana keskustelulle, jossa voisimme pohtia seuraavia: 1. Mitä pitäisi tehdä, jotta kvanttiohjelmistoteollisuus saisi entistä enemmän tulta alleen Suomessa? (Esim. koulutusta eri tasoilla, työpajoja, jotain muuta? Mikä tällä hetkellä on merkittävin este aloittamiselle?) 2. Pitäisikö kvanttiohjelmistokehitykseen panostaa erityisesti? (Hieman provo tässä ryhmässä, ehkä kuitenkin aiheellinen kysymys) 3. Muuta mieleen juolahtavaa.

18.3.2021 klo 15-17	Dr. Anna-Kaisa Kultima, Aalto-yliopisto	<p>Tervetuloa vuoden 2021 kolmanteen tapaamiseen TEAMS-välitteisesti. Aloitamme tuttuun tapaan klo 15. Tapaamisen alustuksen esittää tutkijatohtori Annakaisa Kultima, Medialab/Aalto-yliopisto (postdoc).</p> <p>Alustuksen aiheena on "(Kvantti)pelintekeminen on helppoa ja vaikeaa". Noin 20 minuutin mittaisessa alustuksessaan hän avaa Quantum Games -kurssin filosofiaa ja sitä, miten helppoa on tehdä pelejä - ja kuinka haastavaa on tehdä pelejä. Aikataulutusta emme ole vielä aivan tarkasti määritelleet, mutta hän on lupautunut olemaan paikalla koko tapaamisemme ajan, eli klo 15 – 17, joten myös aiheeseen liittyvälle keskustelulle jää mukavasti aikaa.</p> <p>Samalla pyydän kaikkia katsomaan Mikael Johanssonin ja Tommi Kuttilaisen, hienon CSC:n blogiartikkelin "Kvantilla tulevaisuuteen" -webinaaristamme. Kiitokset Mikaelille ja Tommille tästä hienosta koosteesta. <a href="https://www.csc.fi/-/kvanttiloikan-alussa?fbclid=IwAR0uX0oJYe8oa3NrxEIBQ11JDonrgP-VDbLuCJHjdCwca1qL5gyqIRRIiniQ">https://www.csc.fi/-/kvanttiloikan-alussa?fbclid=IwAR0uX0oJYe8oa3NrxEIBQ11JDonrgP-VDbLuCJHjdCwca1qL5gyqIRRIiniQ</a></p>
22.4.2021 klo 15-17	Ph.D. Himadri S. Majumdar VTT Oy	<p>Toivotamme kaikki ryhmän jäsenet ja muut kutsutut aiheesta kiinnostuneet, vuoden 2021 neljänteen tapaamiseen (TEAMS-välitteisesti Teams-linkki lähetetään erillisessä viestissä).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aloitamme tuttuun tapaan klo 15. Tapaamisen alustuksen (in English) esittää, uusi KvanttiKarelia-asiantuntijaryhmämme jäsen, Ph.D. Himadri S. Majumdar, Program Manager, Quantum at VTT).</li> </ul> <p>Noin 20 minuutin mittaisessa alustuksessaan hän kertoo omasta toimenkuvastaan VTT:n Kvanttiteknologiatutkimus- ja kehitystyössä, sekä avaa meille vasta perustetun InstituteQ:n tavoitteita ja tehtäviä suomalaisen kvanttilaskentaekosysteemin ytimessä. Aloitamme tuttuun tapaan klo 15 ja alustus aloitetaan noin vartin yli eli noin 15.15. Alustuksen jälkeen keskustelemme tästä kiinnostavasta aiheesta. Asiantuntijatapaaminen päättyy noin klo 17.</p> <p>Tapaamisessa käymme läpi 18.5.2021 järjestettävän KvanttiKarelian webinaari II tilannetta, ohjelmaa ja muuta aiheeseen liittyvää. Käymme läpi myös KvanttiKarelia-hankeeseen sekä Kvanttilaskentaan yleisesti liittyviä muita ajankohtaisia asioita. Samalla pyydämme kuuntelemaan Yle-areenan toimittaja Juho-Pekka Rantalan "Mikä maksaa? Kvanttitietokoneet tulevat" toimittaman ajankohtaisohjelman, jossa vierailijat, Mikko Möttönen ja Antti Vasara, keskustelevat siitä miten kvanttitietokoneet tulevat muuttamaan elämäämme ja taloutta? Esitys on kuultavissa Ylen sivuilla ja on nauhoitettu 15.4.2021 <a href="https://areena.yle.fi/audio/1-50779557">https://areena.yle.fi/audio/1-50779557</a></p>
20.5.2021 klo 15-17	Quantum expert Cristina Andersson Develor Oy	<p>Tervetuloa vuoden 2021 viidenteen tapaamiseen TEAMS-välitteisesti. Welcome to the fifth "Round Table" meeting of 2021 through TEAMS.</p> <p>Aloitamme tuttuun tapaan klo 15. Cristina Andersson on lupautunut pitämään tapaamisen alustuksen aiheesta: " Vihreä siirtymä ja kvanttitekhnologia". Esityksessä käydään läpi seuraavia teemoja: *EU:n twin transition strategia, mitä ja miksi *Miten kvanttitekhnologia voi tehostaa vihreään ja digitaaliseen siirtymään pääsyä.</p> <p>Esityksen jälkeen voimme keskustella alustuksen aiheesta yhdessä.</p> <p>We will start as usual at 3 pm Cristina Andersson has promised to give an introduction presentation to the meeting on the</p>

		<p>topic: "Green transition and quantum technology". The presentation will cover the following themes: * The EU twin transition strategy, what and why * How quantum technology can enhance access to green and digital transitions. After the presentation, we can discuss the topic of the introduction presentation together.</p> <p>Meillä on myös ilo kertoa, että hanke on saanut jatkoajan ja se jatkuu toukokuun 2022 loppuun. We are also pleased to announce that the project has been extended and will continue until the end of May 2022.</p> <p>Keskustelemme myös 18.5. järjestetystä "KvanttiKarelia Webinaari 2" -tapahtumasta ja siihen liittyvistä asioista. We will also discuss "Quantum Karelia Webinar 2", organized earlier this week (18th of May), and related issues.</p> <p>Haluamme myös keskustella hankkeen tavoitteisiin liittyvistä raporteista, sekä siitä, miten voisimme yhdessä tuottaa niihin laaja-alaista aineistoa. Samalla käymme keskustelua Teams-järjestelmän aktivoinnista (tai jonkun muun vaihtoehdoisen tavan) kiinnostavan lähdeaineiston keräämistä, organisointia ja hyödyntämistä varten. We would also like to discuss reports related to the objectives of the project, as well as how we could work together to produce comprehensive material on them. At the same time, we are discussing the activation of the Teams system (or some other alternative way) to collect, organize, and utilize interesting source material.</p> <p>Toivomme vilkasta keskustelua ja osallistumista tapaamiseemme. We look forward to a lively discussion and participation in our "Round Table" meeting.</p>
<p>10.6.2021 klo 15-18</p>	<p>Quantum expert Laura Piispanen Aalto-yliopisto</p>	<p>Tervetuloa vuoden 2021 kuudenteen tapaamiseen TEAMS-välitteisesti. Welcome to the sixth "Round Table" meeting of 2021 through TEAMS. Alustuksen on lupautunut pitämään Laura Piispanen aiheesta: "Uusia keinoja kvanttimekaniikasta kommunikointiin?" Laura Piispanen puhuu yhdestä ratkaisuehdotuksesta; peleistä ja interaktiivisesta taiteesta. New means of communicating the Quantum mechanics? Laura Piispanen talks about one proposed solution; games and interactive art.</p> <p>"Laura Piispanen on Aalto yliopiston tohtorikoulutettava teknillisen fysiikan ja tietojenkäsittelytieteen laitoksilla ja tutkimusprojektinsa pyörivät juuri pelikehityksen, taiteen ja kvanttimekaniikan solmukohdassa. Hän esittelee meille näitä projektejaan lyhyesti ja kertoo, mikä näiden potentiaali voisi olla kvanttiteknologiayrityksille ja alan koulutukselle." "Laura Piispanen is a doctoral student at Aalto University's departments of technical physics and computer science, and her research projects revolve around game development, art and quantum mechanics. She briefly introduces us to these projects and what their potential could be for quantum technology companies and as well for the training purposes."</p> <p>Esityksen jälkeen voimme keskustella alustuksen aiheesta yhdessä.</p>

		<p>After the presentation, we can discuss the topic of the introduction presentation together.</p> <p>Keskustelemme myös 18.5. järjestetystä "KvanttiKarelia Webinaari 2" -tapahtumasta ja siihen liittyvistä asioista. We will also discuss "Quantum Karelia Webinar 2", organized earlier this week (18th of May), and related issues.</p>
20.8.2021 klo 15-17	CEO Dr. Tuomo Kauranne Arbonaut Ltd.	<p>KvanttiKarelia asiantuntijaryhmä (7/21). Tervetuloa mukaan taas aloittamaan KvanttiKarelia työskentelyä "round table"-tyyppisesti perjantaina 20.8. klo 14-16. Keskustelemme hankkeen tulevasta toiminnasta ja tavoitteista.</p> <p>Ilokseni voin kertoa, että ryhmämme jäsen Tuomo Kauranne on lupautunut alustamaan lyhyesti (noin 15-20 minuuttia) tämän iltapäivän tapaamisessamme klo 14-16. (Teams-linkki vielä alla jos pääset mukaan). Tuomon alustus alkaa noin vartin yli kaksi. Joten tervetuloa mukaan, jos vain ennätätte 😊!</p> <p>Hän alustaa tänään lyhyesti aihealueesta: "Kvanttimekaniikan ja kvanttifysiikan perusteista sekä kvanttilaskennan yhteydestä."</p> <p>Tuomo Kauranne on Arbonaut Oy:n toimitusjohtaja ja hallituksen puheenjohtaja (Arbonaut on luonnonvara-alan paikkatietoratkaisuja kehittävä joensuulainen yritys. Lisätietoja: <a href="http://www.arbonaut.com">www.arbonaut.com</a>), hän on tehnyt väitöskirjansa sovelletusta matematiikasta, otsikolla: "Introducing massively parallel computers into operational weather forecasting", ja on työskennellyt toistakymmentä vuotta myös LUT:ssa sovelletun matematiikan apulaisprofessorina, dosenttina ja muissa yliopistollisissa tehtävissä. Hänet on myös promovoitu UEF:n kunniatohtoriksi 2014.</p>
24.9.2021 klo 14-16	Professori Nina Granqvist, Aalto-yliopisto	<p>KvanttiKarelia asiantuntijaryhmä (8/21). Tervetuloa mukaan KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "round table"-tyyppisesti perjantaina 24.9.2021 klo 14-16.</p> <p>Alustuksen on lupautunut pitämään professori Nina Granqvist, Aalto-yliopiston "Quantum Computing – from Labs to Markets" tutkimusryhmän johtaja. Tässä hieman taustaa esittäjästä sekä alustuksen aihe:</p> <p>Nina Granqvist Professor of Management Aalto University School of Business</p> <p>Professor Granqvist is specialized in studying how new technologies and ideas move from the margins to the mainstream. She is an expert on technology and market emergence and market disruptions. Through her award-winning research and cross-disciplinary collaboration, she has an extensive understanding of the scientific and market development in nanotechnology, material sciences, solar energy, and food trends. She currently leads an Academy of Finland research project studying the transition of quantum computing from laboratories to markets in real-time. In this talk, she discusses the research project and presents emerging findings from the extensive dataset.</p> <p>The presentation has been promised by Professor Nina Granqvist, Director of the "Quantum Computing - from Labs to Markets" research group at Aalto University.</p>

<p>29.10.2021 klo 14-16</p>	<p>Consultant Consultant Jukka-Pekka Ahonen, Account Manager Raisa Haapala. Jälkimmäisen osan (19.11.) tulevat esittämään Amazon Web Servicen asiantuntijat Principal Solutions Architect ja Quantum Ambassador Jagadeesh Pusapadi and a Senior Specialist Solutions Architect Dr. Fabio Baruffa</p>	<p>Tervetuloa mukaan KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "round table"-tyyppisesti perjantaina 29.10. klo 14-16.</p> <p>Huomenna, perjantaina, on odotettavissa jälleen mainio alustus Amazon Web Serviceltä (AWS). Amazonin asiantuntijat tulevat kertomaan meille AWS:n toimintalogiikasta ja AWS Braketista. Tämä on kahden alustuksen ensimmäinen osa, joka saa jatkoa marraskuun tapaamisessamme (19.11. klo 14-16), jolloin Amazonin kvanttitoimintojen asiantuntijat syventävät ja demoavat (mahdollisuuksien mukaan) Amazonin Quantum Braketin QaaS toimintoja. Huomisen esityksen pitävät meille Suomen Amazon Web Serviceltä asiantuntijat Consultant Jukka-Pekka Ahonen (<a href="https://www.linkedin.com/in/jpahonen/">https://www.linkedin.com/in/jpahonen/</a>) ja Account Manager Raisa Haapala (<a href="https://www.linkedin.com/in/raisahaapala/">https://www.linkedin.com/in/raisahaapala/</a>). Jälkimmäisen osan (19.11.) tulevat esittämään Amazon Web Servicen asiantuntijat Principal Solutions Architect ja Quantum Ambassador Jagadeesh Pusapadi (<a href="https://www.linkedin.com/in/psjaga/">https://www.linkedin.com/in/psjaga/</a>) sekä toinen kvanttiasiantuntija, joka tarkentuu myöhemmin.</p>
<p>29.10.2021 klo 14-16</p>	<p>AWS Solution Architect Jagadeesh Pusapadi from Amazon Web Services, Amazon Web Services, a Senior Specialist Solutions Architect Dr. Fabio Baruffa</p>	<p>KvanttiKarelia asiantuntijaryhmä (10/21) REVISED PROGRAM. Tervetuloa mukaan KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "round table"-tyyppisesti perjantaina 19.11. klo 14-16.</p> <p>Welcome to the meeting of the expert group of the Quantum Karelia project. We will have a "round table" meeting on Friday 19th of November, from 2pm to 4pm.(UTC+2)</p> <p>The presentation has been promised by AWS Solution Architect Jagadeesh Pusapadi from Amazon Web Services. There will be another presenter from AWS in addition to Jagadeesh from Amazon Web Services, a Senior Specialist Solutions Architect Dr. Fabio Baruffa</p> <p>The topic of the presentation and presenters' short bio below. They will have a thorough presentation (appr. 90 minutes) together about the AWS Quantum Braket.</p> <p>Presentation Overview: An introduction to Amazon quantum computing programmes - Amazon Braket, Amazon Quantum Solutions Lab and AWS Center for Quantum Computing. We'll cover Amazon Braket in more detail and demonstrate some of the capabilities. (presentation language: English)</p> <p>Short Presenter Bio:</p> <p>Jags Pusapadi is an AWS Solutions Architect a quantum technologies enthusiast. Jags helps customers build innovative solutions on AWS Cloud by providing architectural guidance. He also helps them to explore the world of quantum computing using Amazon Braket.</p> <p>Dr. Fabio Baruffa is a senior specialist solutions architect at AWS. He designs large-scale customer solutions in the high-performance computing area and helps to accelerate quantum computing adoption using the cloud infrastructure. He has more than 10 years of experience in the HPC industry and academia, working as application engineer at Intel and HPC specialist in the largest supercomputing centers in Europe, mainly the Leibniz Supercomputing Center and the Max-Planck</p>

		Computing and Data Facility in Germany, as well as Cineca in Italy. He holds a PhD in Physics from University of Regensburg for his research in spintronics devices.
17.12.2021 klo 14-16	Quantum expert Cristina Andersson Develor Oy	KvanttiKarelia asiantuntijaryhmä (11/21) REVISED PROGRAM. Tervetuloa mukaan tämän vuoden viimeiseen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "round table"-tyyppisesti perjantaina 17.12. klo 14-16. Alustuksen on lupautunut pitämään asiantuntija, ICT-vaikuttaja ja tietokirjailija Cristina Andersson ja aihe käsittelee juuri julkaistua väliraporttia: "Kuinka Suomi saavuttaa tekoälyvision 2030?" - Tekoäly 4.0 -ohjelman väliraportti kokoaa yhteen ehdotuksia konkreettisista tavoitteista ja toimenpiteistä. Alustusesitys alkaa tällä kertaa poikkeuksellisesti noin klo 15, jonka jälkeen keskustelemme alustuksen herättämistä ajatuksista. Raportti ottaa kantaa myös Kvanttilaskentaan ja kvanttiteknologian merkitykseen osana Suomen teknologista kehityskaarta. Ennen tapaamisen alustusta, klo 14 alkaen; keskustelemme KvanttiKarelia-hankkeen kevätkauden suunnitelmista ja toiminnasta, sekä pohdimme KvanttiKarelian jatkoa. Käymme keskustelua myös ajankohtaisista ja mielenkiintoisista kvanttiteknologiaan liittyvistä asioista.
17.12.2021 klo 14-16	Kvanttiteknologia-asiantuntija ja yrittäjä Topias Uotila.	Tervetuloa mukaan tämän vuoden ensimmäiseen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "round table"-tyyppisesti perjantaina 21.12.2022 klo 14-16. Alustuksen on lupautunut pitämään kvanttiteknologia-asiantuntija ja yrittäjä Topias Uotila. Alustuksessaan hän kertoo vuonna 2020 perustetusta yrityksestään, Unitary Zero Space Oy:stä, joka on teknologiariippumaton kvanttilaskentaan ja kvanttiteknologiaan keskittynyt palveluyhtiö. Yhtiö auttaa asiakkaitaan: 1. kaupallistamaan kvanttiteknologioita konsultoinnin keinoin, 2. rakentamaan kvanttilaskentakyvykkyksiä koulutuksen keinoin, sekä 3. turvaamaan liiketoimintansa kvanttiteknologioiden haasteilta tietoturvaosaamisen keinoin.  Topias Uotila perusti yhtiön 2020 koulutettuaan kvanttilaskentaa 2018 alkaen. Topias on tehnyt uransa lähinnä IT-yhtiöiden johtotehtävissä ja on koulutukseltaan tietotekniikan diplomi-insinööri. Hän osallistuu aktiivisesti niin kansalliseen, kuin kansainväliseen kvanttiekosysteemi-, kvanttilaskenta- ja kvanttiteknologiakeskusteluun.  Esityksen jälkeen keskustelemme alustuksen herättämistä ajatuksista. Tämän jälkeen keskustelemme KvanttiKarelia-hankkeen kevätkauden suunnitelmista ja toiminnasta, sekä pohdimme KvanttiKarelian jatkoa. Käymme keskustelua myös ajankohtaisista ja mielenkiintoisista kvanttilaskentaan ja -teknologiaan liittyvistä asioista.
25.3.2022 klo 14-16	<a href="http://www.hyperionresearch.com">Hyperion Researchin (www.hyperionresearch.com)</a> tutkimusjohtaja ja kvanttilaskennan pääanalytikko <a href="#">Bob Sorensen</a>	Tervetuloa mukaan tämän vuoden kolmanteen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "Roundtable"-tyyppisesti perjantaina 25.3.2022 klo 14-16 (HUOM. päivämäärä). Toivotamme lämpimästi tervetulleiksi mukaan keskustelemaan ja osallistumaan myös BusinessQ-ryhmän jäsenet.  Tämä kolmannen "Roundtable"-tapaamisen alustuksen otsikko on: "Broad Interest in Quantum Computing as a Driver of Commercial Success." Ja sen esittää: Hyperion Researchin (www.hyperionresearch.com) tutkimusjohtaja ja kvanttilaskennan pääanalytikko Bob Sorensen.



		<p>Bob Sorensen on organisaationsa tutkimuksesta vastaava johtaja. Hän johtaa tutkimusta ja konsultointia Yhdysvaltojen, Euroopan ja Aasian ja Tyynenmeren markkinoilla teknisten palvelimien, supertietokoneiden ja kvanttilaskennan aloilla. Bob on myös johtava analyytikko Hyperion Researchin kvanttilaskentaohjelmassa, joka tarkastelee maailmanlaajuisia kvanttilaskennan T&amp;K-trendejä, teknologian kehitystä, teollisuuden dynamiikkaa, QC-loppukäyttäjien näkökulmia ja hallituksen poliittisia aloitteita. Hänen osaamisalueitaan ovat kehittyneiden laskentalaitteistojen, arkkitehtuurien, liitäntöjen, benchmarkingin ja suorituskykyanalyysien analysointi sekä HPC- ja IT-sektorin nousevien ja sitä voimakkaasti muuttavien teknologiatrendien arviointi. Bobilla on sähkötekniikan kandidaatin tutkinto Rochesterin yliopistosta ja tietojenkäsittelytieteen maisterin tutkinto George Washingtonin yliopistosta, ja hän pitää C:stä enemmän kuin Pythonista.</p>
22.4.2022 klo 14-16	<p>Professor Enrique Solano, a distinguished academic, an entrepreneur, and one of the leading physicists in the field of Quantum Technology and Computing</p>	<p>Tervetuloa mukaan tämän vuoden neljänteen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmän tapaamiseen. Tapaamme "Roundtable"-tyyppisesti perjantaina 22.4.2022 klo 14-16. Toivotamme lämpimästi tervetulleiksi mukaan keskustelemaan ja osallistumaan myös BusinessQ-ryhmän jäsenet ja muut osallistujat.</p> <p>The presentation of this meeting: "Quantum Usefulness and NISQ Advantage" will be presented by Professor Enrique Solano, a distinguished academic, an entrepreneur, and one of the leading physicists in the field of Quantum Technology and Computing.</p> <p>The summary: Professor Solano will introduce pedagogically the novel concepts of Quantum Usefulness (QUS) and NISQ Advantage (NISQA) for quantum computing, providing key examples and use cases. Then, he will describe the main features of digital, analog, digital-analog, and digitized-counter-diabatic quantum computing paradigms, as well as the leading quantum computing architectures. Furthermore, he will discuss his vision of how quantum advantage can be reached with NISQ quantum computers in trapped ions, superconducting circuits, neutral atoms, and photonic systems.</p> <p>BIO: Enrique Solano lives in Munich, Germany, where he founded Kipu Quantum, a startup designing quantum computing products for arts, exhibitions, schools, universities, and industry, with the goals of developing quantum aesthetics and quantum usefulness, as well as reaching quantum advantage with current and upcoming quantum computers. As a physicist he has lived and worked in Peru, France, Brazil, Germany, China, and Spain, occupying a variety of leading positions in academic institutions. He is constantly exploring interdisciplinary ideas and initiatives merging arts, science, technology, and entrepreneurship. Apart from his pioneering works in quantum computing and quantum technologies, he develops novel concepts of Quantum Arts, Quantum Brain Networks, and the Quantum Metaverse.</p> <p>After the presentation, we will discuss the ideas raised in the introduction. We will then discuss the plans and activities for the rest of the spring period of the Quantum Karelia project, and also discuss the future of Quantum Karelia. We are also discussing current and interesting issues related to quantum computing and quantum technology.</p>
3.6.2022 klo 14-16	<p>Professor Mikko Möttönen is one of the world's leading</p>	<p>Tervetuloa mukaan tämän vuoden viidenteen ja kevätkauden viimeiseen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmätapaamiseen. Tapaamme "Roundtable"-tyyppisesti perjantaina 3.6.2022 klo 14-16. Toivotamme lämpimästi tervetulleiksi mukaan</p>

	<p>researchers in quantum information and a professor of quantum technology at Aalto University and VTT. Möttönen is also one of the four founders of IQM Quantum Computers (<a href="http://www.meetiqm.com">www.meetiqm.com</a>) and its chief scientist.</p>	<p>keskustelemaan ja osallistumaan myös BusinessQ-ryhmän jäsenet ja muut osallistujat.</p> <p>The presentation of this meeting: "Quantum Computers at IQM" will be presented by Professor Mikko Möttönen, a distinguished academic, an entrepreneur, and one of the leading physicists in the field of Quantum Technology and Computing.</p> <p>The summary: IQM is building the quantum computers of tomorrow – today. IQM is a leading quantum computing hardware company and a key player in Europe's vibrant quantum ecosystem. Their key partners are involved in groundbreaking work to accelerate superconducting quantum circuits and quantum computing. IQM also benefits from access to world-class infrastructure for low-temperature physics, fabrication, and high-performance computing. IQM also has the largest industrial hardware team of world-class quantum experts in Europe with over 640+ scientific publications and over 27000 citations. IQM lives the European values to solve one of the greatest technological challenges globally: building useful quantum computers. As a spinoff of Aalto University and VTT Technical Research Centre of Finland, IQM's core technology builds upon decades of research from the world-renowned Quantum Computing and Devices (QCD) lab. This know-how is combined with the experience of world-renowned quantum computing experts from Bilbao, Munich, Zurich, Delft, and several other locations. Security, trust, and the Nordic heritage give them a unique edge globally. collaboration and innovation.</p> <p>BIO: Mikko Möttönen is one of the world's leading researchers in quantum information and a professor of quantum technology at Aalto University and VTT. He has published more than 120 scientific articles, including four articles in major scientific journals such as Nature and Science. His work has been cited more than 6,000 times. He graduated with a doctorate in technology in 2005 from the Department of Applied Physics at the Helsinki University of Technology - now Aalto University.</p> <p>Möttönen is also one of the four founders of IQM Quantum Computers (<a href="http://www.meetiqm.com">www.meetiqm.com</a>) and its chief scientist. IQM is a Pan-European category leader in quantum computers. IQM quantum computers are designed and built using superconducting quantum processors, enhanced by innovative co-design of software and hardware. In this way, the company delivers a quantum advantage for commercial applications.</p> <p>Mikko Möttönen has distinguished himself in research in both theoretical and experimental quantum physics. Breakthroughs in research have enabled the development of commercial applications utilizing quantum computing.</p>
<p>16.9.2022 klo 14-16</p>	<p>Dr. Mikael Johansson, Quantum Strategist at CSC and one of the leading experts in the field of quantum-accelerated high-performance computing in Finland.</p>	<p>Tervetuloa mukaan tämän vuoden kuudenteen ja syyskauden ensimmäiseen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmätapaamiseen. Tapaamme "Roundtable"-tyyppisesti perjantaina 16.9.2022 klo 14-16. Toivotamme lämpimästi tervetulleiksi mukaan keskustelemaan ja osallistumaan myös BusinessQ-ryhmän jäsenet ja muut osallistujat.</p> <p>The presentation of this meeting: "Integrating the Helmi quantum computer with the LUMI supercomputer" will be presented by Dr. Mikael Johansson, Quantum Strategist at CSC and one of the leading experts in the field of quantum-accelerated high-performance computing in Finland.</p> <p>Summary: CSC is a non-profit state enterprise with special tasks. (<a href="https://www.csc.fi/en/home">https://www.csc.fi/en/home</a>) As part of the national research system, we develop, integrate, and provide high-quality information technology services and ensure that Finland remains at the forefront of development.</p> <p>Our vision for 2030 aims at a better future for all of us, based on digitalization and sustainable development. Our goal is shared, and we are moving towards it with our owners, customers, and partners. Together we build world-class research,</p>

		<p>learning, and innovation environments.</p> <p>CSC is hosting the pan-European leadership class LUMI supercomputer (<a href="https://www.lumi-supercomputer.eu/">https://www.lumi-supercomputer.eu/</a>), the most powerful in Europe, in Kajaani, Finland. Presently, several quantum computing resources are being connected to the LUMI ecosystem. As part of the Finnish Quantum-Computing Infrastructure (FIQCI), access to Helmi, the first Finnish QC, will open up in September. Helmi (<a href="https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/finlands-first-5-qubit-quantum-computer-now-operational">https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/finlands-first-5-qubit-quantum-computer-now-operational</a>), co-developed by IQM and VTT, is located at the VTT Research Center in Espoo, Finland.</p> <p>Here, we will give an overview of integrating high-performance computing and quantum computing, with emphasis on the new opportunities the merging of two very different computing paradigms can provide in the near and medium term.</p> <p>BIO: In his role as Quantum Strategist at CSC, Mikael Johansson oversees CSC's participation in European and global initiatives related to quantum technologies, and in general explores and enables the uptake of quantum technologies in R&amp;D communities. Johansson holds an adjunct professorship in physical chemistry at the University of Helsinki and is vice-director of the Finnish Quantum-Computing Infrastructure.</p>
21.10.2022 klo 12.00-15.00	Amazon Web Servicesin asiantuntija Principal Solutions Architect ja Quantum Ambassador Jagadeesh Pusapadi	<p>Amazon Web Services Quantum Braket, Lontoon yksikkö, järjesti ja tarjosi KvanttiKarelia-hankkeelle kolmen tunnin etä "hands-on"-koulutuksen ja QaaS-palveluiden kokeilutalaisuuden. Asiantuntijakouluttajana toimi AWS Quantum Braket:n pääsovellusarkkitehti Jagedeesh Pusapadi. Tilaisuus oli maksuton KvanttiKarelian kautta osallistuville asiasta kiinnostuneille. Mukana oli sekä noviiseja, että asiantuntijoita. We would like to invite Quantum Karelia roundtable participants for a Quantum Computing Workshop with Amazon Braket on Oct 21st 2022</p> <p>AWS would create separate AWS workshop accounts for everyone, so the participants do not have to create their own accounts or use their own credit card details. During the workshop, we would walk the participants through the workflows for the set-up of the environment and testing of quantum algorithms. After the workshop, participants can continue testing their own ideas for a limited time, before the workshop accounts are automatically closed.</p>
11.10.2022 klo 14-16	IBM Quantum Ambassador at IBM Northern Europe, Teppo Seesto	<p>Tervetuloa mukaan tämän vuoden seitsemänteen ja syyskauden toiseen KvanttiKarelia-hankkeen asiantuntijaryhmätapaamiseen. Tapaamme "Roundtable"-tyyppisesti perjantaina 11.11.2022 klo 14-16. Toivotamme lämpimästi tervetulleiksi mukaan keskustelemaan ja osallistumaan myös BusinessQ-ryhmän jäsenet ja muut osallistujat.</p> <p>The presentation of this meeting: "Status and roadmap of IBM Quantum Computing" will be presented by Teppo Seesto, IBM Quantum Ambassador at IBM Northern Europe. He has been working with new technologies in IT for over 30 years and last 5 years he has been concentrating on quantum computing.</p> <p>Summary: "IBM Quantum leads the world in quantum computing. This nascent technology is widely expected to solve valuable problems that today's most powerful classical supercomputers cannot solve and never will.</p> <p>Our community of clients and partners comprises 210+ Fortune 500 companies, academic institutions, national labs, and startups.</p> <p>With the largest fleet of 20+ of the most powerful quantum systems in the world, we are aiming to turn the world's most</p>

		<p>challenging problems into valuable opportunities." <a href="https://www.ibm.com/quantum">https://www.ibm.com/quantum</a></p> <p>BIO: In his role as, IBM Quantum Ambassador at IBM Northern Europe, Teppo Seesto, has been working actively with quantum computing since 2017. He is the lead of Nordic Quantum Ambassadorial operations. He has been working with several expert positions at IBM over the past 30 years. He has been instrumental in shaping the Finnish IT landscape into what it is today. His breadth of knowledge and experience in all key areas of IT is immense.</p>
<p>3.3.2023 klo 14-16</p>	<p>Cristina Andersson, Non-fiction Author, AI- and Robotics-expert, Develor Oy, Finland. André M. König, The CEO of Global Quantum Intelligence (CQI), The leading Business Intelligence firm in Quantum Tech, USA.</p>	<p>In this first meeting, we will have two presentations by distinguished presenters. The presentations of this meeting are: "Quo Vadis Quantum Computing" will be presented by Cristina Andersson, Non-fiction Author, AI- and Robotics-expert, Develor Oy, Finland.</p> <p>The Second presentation will deal with the topic "How Europe will win the quantum computing technology race", and will be presented by André M. König, The CEO of Global Quantum Intelligence (CQI), The leading Business Intelligence firm in Quantum Tech. They provide trusted data, insights, analysis, and intelligence to users, vendors, governments, investors, and academia globally through the leading experts &amp; technology in the industry.</p> <p>Summary of Cristina's presentation: "Quo Vadis Quantum Computing" In this short presentation Cristina will concentrate on the current status of Finnish Quantum Computing and its significance for the Finnish industry and business. In this talk she will lay out a possible landscape of the Finnish Quantum Realm and how should we prepare ourselves so that we can be a vital part of this emergent megatrend.</p> <p>Cristina's BIO: Non-fiction Author, AI- and Robotics-expert Cristina Andersson, Develor Oy, Finland Cristina is an entrepreneur and management consultant. Cristina has been working with artificial intelligence and robotics since 2011, as an expert in different EU and national organizations as well as with several companies. She is a member of the steering group of the Finnish National Artificial Intelligence 4.0 program led by the Ministry of Employment and the Economy. Cristina is chair of the Green Transition Group of the program, chair of the Artificial Intelligence working group at the Finnish Standards Association, and member of the board of the Federation of Finnish Enterprises in Helsinki. She coordinated the National Program for AI and Robotics in Healthcare for the Ministry of Social Affairs and Health. Cristina is interested in learning more about #quantum #QuantumComputing #EdgeComputing.</p> <p>Summary of André's presentation: "How Europe will win the quantum computing technology race". This talk explores trends across quantum technologies looking at both product &amp; commercial indicators, and comparing them across the USA, China, and the European market. We will discuss the main differences, strengths, and weaknesses - and end with some suggestions on opportunities unique to Europe that put us into a pole position for winning the quantum technology race.</p> <p>André's BIO: André is the publisher of the leading Quantum Tech newsletter, author of a bestselling book on digital transformation, host of Weekly Quantum World Detangled, and frequent speaker on Quantum Tech. He has been featured in the New York Times, Forbes, The Wall Street Journal, Popular Science, live TV, and stages from Las Vegas to Seoul with up to 40,000 in</p>

		<p>the audience.</p> <p>Since 2018 he is the CEO of Interference Advisors, the leading BI provider in Quantum Tech. The Chairman of OneQuantum, the leading Quantum Tech community globally with 35K+ members. And Managing Partner of Entanglement Capital, an investment fund in Quantum Tech.</p> <p>With 25 years of business experience, André has been a strategy and technology consultant to many Fortune 500 CEOs in both Europe and the USA. As well as to owners and operators of mid-sized services and manufacturing firms, often leading co-investments, consolidations, and turnarounds.</p> <p>Prior to his current role, he co-founded 3 startups - spanning Artificial Intelligence, Digital Transformation, NeuroHealth, and SaaS - and mentored hundreds of others through General Assembly, the German Accelerator New York, and other entrepreneurship programs.</p> <p>André studied Quantum Computing at MIT (certificates) and holds an MBA in Economics from the University of Chicago Booth School of Business as well as a Masters in Business from ICN School of Management.</p>
--	--	---