

Kvanttilaskenta:

Käytännön matkaopas tulevaisuuteen

beyond the obvious

Kvanttilaskenta: Käytännön matkaopas tulevaisuuteen

Esipuhe	4
0/ Miksi tämä opas?	5
Kysymykset miten ja miksi	6
Tiedon haasteissa luoviminen	6
Kolme aikajännettä	9
1/ Miksi minun pitäisi välittää kvanttilaskennasta?	10
Mitä jos voisit ratkaista aiemmin mahdottomilta vaikuttaneita ongelmia?	11
Mitä jos voisit ratkaista monimutkaisen ongelman tuhat kertaa nopeammin?	11
Mitä jos voisit saada parempia ratkaisuja haastaviin ongelmiin? ..	12
Mitä jos voisit ratkaista ongelmia tuhat kertaa pienemmällä energiankulutuksella?	12
Mitä jos toimialasi muuttuu mullistavalla tavalla?	13
Käsityskykymme ylittävät ratkaisut	13
2/ Mitä on kvanttilaskenta?	15
Kolme kvanttiteknologiaa	16
Kvanttilaskennan monimuotoinen kenttä	17
3/ Millaisia ongelmia kvanttilaskennalla voi ratkaista?	23
Miksi kvanttietokoneet ovat tehokkaita?	24
Millaiset ongelmat sopivat kvanttietokoneille?	26
Kvanttiedun ja nopeuden ymmärtäminen	29
Mitkä ovat lupaavimmat sovellukset?	32
Nykyiset rajoitukset ja tulevaisuuden mahdollisuudet	37
4/ Milloin kvanttilaskenta on valmis käyttöön? ..	38
Miten voimme mitata valmiutta?	39
Yleisnäkyvä kvanttilaskennan kehitykseen	40
Kvanttilaskenta nyt	42
Lähiajan kehitys	43
Keskipitkän aikavälin tulevaisuus	47
Pitkän aikavälin tulevaisuus	50
Yhteenveto – milloin se on valmis?	51

5/ Mitkä toimialat ovat kypsiä kvanttimurrokselle? ... 52

Miten ennakointi voi auttaa tunnistamaan kvanttimahdollisuuksia?	53
Rahoituspalvelujen kehitys kolmella kvanttiaikajänteellä	54
Lääkealan kehitys kolmella kvanttiaikajänteellä	60
Tulevien siirtymien katalysointi	65

6/ Miten kvanttilaskenta voi luoda valoisamman tulevaisuuden?..... 68

Monimutkaisten haasteiden ratkaiseminen	69
Maa- ja ilmailun laajuisiin haasteisiin vastaaminen	70
Tuntemattomista haasteista tulevaisuuden ratkaisuihin	72

7/ Miten voimme varautua kvanttilaskennan riskeihin? 74

Kvanttilaskenta turvallisuushkana	75
Miten voimme rakentaa kvanttiturvallisen tulevaisuuden?	77
Yhteiskunnalliset ja geopolittiset vaikutukset	79
Tarve toimia nopeasti ja yhteistyössä.....	79

8/ Mikä on paras kvanttistrategia yritykselleni?.. 81

Miten voit arvioida kvanttilaskennan merkitystä yrityksellesi?	82
Mikä strategia sopii yrityksellesi?	83
Joustavan ja tulevaisuuteen suuntautuneen lähestymistavan säilyttäminen	86

9/ Miten pääsen alkuun? 88

Herätä uteliaisuus ja lisää ymmärrystä.....	89
Kvanttilaskenta on joukkuelaji	89
Ulkoisten verkostojen rakentaminen	91
Käytännön kokemuksen hankkiminen	92
Tutkimuslähtöinen lähestymistapa	93
Organisaation tulevaisuuskestävyyden rakentaminen	95
Loppuviitteet	96
Kiitokset	98
Viitteet ja kirjallisuus.....	100
Kirjoittajat	104

10/ Milloin on paras aika aloittaa?..... 105

Esipuhe

Viime vuosina olemme saaneet hämmästellä teknologian nopeaa kehitystä monilla eri aloilla. Kvanttilaskenta erottuu joukosta poikkeuksellisen suurella muutospotentialillaan. Sen uskotaan mullistavan monia aloja ja määrittelevän laskentatehon rajat kokonaan uudelleen. Kun lähestymme kvanttiaikaa, yritysjohtajien, poliittisten päättäjien ja innovaattoreiden on tärkeää ymmärtää sen syvälliset vaikutukset.

Tämä opas selventää kvanttilaskennan monimutkaista maailmaa. Siinä selitetään perusteet, tarkastellaan teknologian nykytilaa ja tarjotaan organisaatioille etenemissuunnitelma kohti tulevaisuutta, jossa kvanttilaskentaa aletaan hyödyntää käytännössä.

Uskon vahvasti, että kvanttilaskennan vaikutus tulee olemaan valtava. Sen avulla voidaan ratkaista monimutkaisia ongelmia ja optimoida järjestelmiä poikkeuksellisen tehokkaasti. Mahdollisia käyttökohteita on niin rahoitusala, lääketieteellisyudessa, energia-alalla kuin valmistavassa teollisuudessaakin, ja tulevat läpimurrot voivat muuttaa maailmaamme.

Kvanttitulevaisuuteen valmistautuminen on välttämätöntä kilpailukyvyyn säilyttämiseksi. Tämä opas tarjoaa arvokasta tietoa strategisista näkökohdista, mahdollisista sovelluksista ja käytännön toimista, joihin ryhtymällä organisaatiot voivat tavoitella paikkaa teknologisen vallankumouksen etulinjasta.

Aiemmat teknologian kehitysloikat ovat opettaneet, että alkuvaiheessa on tärkeää olla sekä innostunut että pragmaattinen. Vaikka kvanttilaskennan koko potentiaali siintää vasta kaukana horisontissa, oikea aika oppia ja valmistautua on nyt. Kartuttamalla tietoa, solmimalla kumppanuuksia ja investoimalla kvanttivalmiisiin strategioihin organisaatiot voivat hyödyntää kvanttilaskennan voimaa sen kehittyessä edelleen.

Tämä opas on ensimmäinen askel kohti kvanttivalmiutta. Se antaa sinulle tiedot ja välineet, joiden avulla pystyt tekemään tietoon perustuvia päätöksiä, kehittämään tehokkaita kvanttistrategioita ja selviytymään tulevista haasteista ja mahdollisuuksista. Aloita valmistautuminen tulevaisuuteen, jossa mahdottomasta tulee mahdollista.

Antti Vasara

Toimitusjohtaja, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

0/ Miksi tämä opas?

Oppaan tarkoitus on saada sinut pohtimaan, mikä merkitys kvanttilaskennalla voisi olla yrityksellesi ja miten organisaatiosi kannattaisi valmistautua kvantti-aikaan. Se tarjoaa käytännönläheisen katsauksen kvanttilaskennan mahdollisuuksiin ja haasteisiin liiketoiminnan näkökulmasta. Kvanttifysiikan teorioiden selittämisen sijasta oppaassa keskitytään siihen, miten voit valmistella yrityksesi tulevaisuuteen, jossa kvanttilaskenta on arkipäivää.

Lukemalla tämän oppaan saat tietoa siitä, mitkä toimialat kvanttilaskenta todennäköisimmin mullistaa ja mitä kilpailuetuja se voi tarjota. Opas tarjoaa käytännön työkaluja oman toimialasi analysointiin ja strategian suunnitteluun sekä auttaa ymmärtämään kehittyvää teknologiaa. Lisäksi opas auttaa tulkitsemaan kvanttiteknologian kehitystä käsitteleviä media-artikkeleita ja uutisia, joita julkaistaan kiihtyvällä tahdilla. Kirja voi toimia myös kvanttilaskennan sanansaattajana organisaatiossasi.

Tämän oppaan pyrkimyksenä on auttaa sinua ymmärtämään kvanttilaskennan narratiivia – toisaalta näkemään liiallisen hehkutuksen läpi ja toisaalta välttämään pessimismin, jota kvanttietokoneisiin liittyvät haasteet voivat ruokkia. Lukemisen jälkeen pystyt muodostamaan tasapainoisen ja jäsennellyn käsityksen kvanttilaskennan mahdollisuuksista ja haasteista. Se antaa sinulle valmiudet tehdä tietoon perustuvia strategisia päätöksiä nopeasti kehittyvällä alalla.

- ✓ **Tunnista kvanttilaskennan liiketoimintavaikutukset**
- ✓ **Opi tulkitsemaan kvanttilaskentaan liittyviä uutisia**
- ✓ **Tee tietoon perustuvia päätöksiä**

Kysymykset miten ja miksi

Tässä oppaassa esitellään kymmenen kysymystä, jotka selventävät kvanttilaskennan keskeisiä näkökohtia eri sidosryhmille. Tavoitteenamme on antaa laajalle yleisölle perusymmärrys siitä, MIKSI kvanttilaskennan edistysaskeleista on tärkeää pysyä ajan tasalla ja MITEN alan kehitys voi vaikuttaa tulevaisuuden liiketoimintaan monilla eri aloilla. Lisäksi kirja antaa sinulle työkaluja hahmottaa MILLOIN kvanttilaskenta voi tuoda liiketoimintahyötyä, vaikka emme annakaan täsmällisiä aika-arvioita. Valitsimme ja muotoilimme kysymykset perustuen keskusteluihin ja haastatteluihin sellaisten yritysten kanssa, jotka ovat juuri aloittaneet kvanttilaskentaan tutustumisen.

Opas on jäsennetty siten, että jokainen luku alkaa lyhyellä vastauksella esitettyyn kysymykseen, minkä jälkeen vastausta käsitellään tarkemmin. Kirjan luvuista muodostuu yhtenäinen kertomus, mutta jokainen luku on suunniteltu myös toimimaan itsenäisenä kokonaisuutena. Voit siis syventyä sinua kiinnostaviin kysymyksiin myös ilman, että sinun tarvitsee lukea koko kirjaa.

Tiedon haasteissa luoviminen

Kvanttilaskennan kehitystä voi olla vaikea ymmärtää alan ulkopuolelta. Teknologian kehittyessä painopiste on siirtynyt viime aikoina fyysikoista insinööreihin ja ohjelmistosuunnittelijoihin, mutta kvanttilaskennan toimialatapahtumat eivät vielä juurikaan ole suunnattu käyttäjille, ja esitykset vilisevät tieteellisiä ja teknisiä termejä niin tiuhaan, että alan ulkopuolinen tipahtaa helposti kyydistä. Tämä kirja on luotu helpottamaan oppimisprosessia ja tarjoamaan laajalle yleisölle selkeän johdannon kvanttilaskentaan.

” Tämä on vasta lähtökohta; kehityksen myötä tarve ymmärtää kvanttilaskennan mahdollisuuksia ja uhkia hyödyntäjien näkökulmasta tutkimuksen ja yhteisen tiedonhankinnan avulla kasvaa.”

Maaria Nuutinen, VTT

Etsimme vastauksia kirjan kysymyksiin haastatteleamalla asiantuntijoita, tutkijalla monipuolisesti erilaisia kirjallisuuslähteitä ja tieteellisiä julkaisuja. Oman tiedonkeruumme lisäksi teimme yhteistyötä eri alojen yritysten kanssa FutureQ-hankkeessa¹, jossa hyödynsimme eri ennakointimenetelmiä tunnistamaan kvanttilaskennan potentiaalisia mahdollisuuksia ja uhkia. Lisäksi laadimme yhdessä yritysten kanssa kvanttilaskennan skenaarioita, joiden tavoitteena oli ymmärtää kehityksen lukuisia epävarmuustekijöitä ja vaihtoehtoisia tulevaisuuksia. Hankkeessa tuotetut aineistot helpottivat tunnistamaan aiheita, joihin halusimme syvempää ymmärrystä. Tarvittavaa lisäymmärrystä keräsimme osallistumalla alan tapahtumiin ja käymällä syventäviä keskusteluja kvanttilaskennan tutkijoiden kanssa. Matkan varrella huomasimme, että jokaisella viestijällä on omat motiivinsa, tyylinsä ja näkökulmansa.

Liikkeenjohdon konsulttiyritykset keskittyvät tunnistamaan käyttötapauksia² ja antavat usein vaikutelman, että kvanttisovellukset ovat aivan nurkan takana³. Kvanttitekniologiaa kehittävät yritykset ja kvanttilaskentaohjelmistoja suunnittelevat startupit korostavat läpimurtoja ja julkaisevat kunnianhimoisia teknologisia etenemissuunnitelmia, jotta sijoittajien ja hyödyntäjien kiinnostus kasvaisi. Osana tätä viestintää eri toimijat lanseeraavat uusia termejä⁴, mikä tekee alan kehityksen seuraamisesta entistä haastavampaa. Akateeminen tutkimus ja tieteelliset artikkelit keskittyvät puolestaan pääosin hyvin spesifeihin kvanttitekniologian ja -algoritmien teknisiin yksityiskohtiin, mikä tekee kokonaiskuvan hahmottamisesta vaikeaa. Lisäksi tutkijat ovat usein hyvin varovaisia keskustellessaan kvanttilaskennan edistymisestä ja sen tuomista mahdollisista eduista.

Kootessamme aineistoa kirjan kysymyksiä ja vastauksia varten, pyrimme ymmärtää kunkin viestijän tavoitteita ja näkökulmia, jotta voisimme tunnistaa niin mahdollisen liiallisen hehkutuksen kuin ylivarovaisen pessimismin. Emme kuitenkaan väitä tietävämmme paremmin, vaan mielestämme on ensiarvoisen tärkeää kyetä ymmärtämään ja arvioimaan tekijöitä, jotka vaikuttavat näihin hyvin erilaisiin arvioihin. Jotta kirja olisi selkeä kokonaisuus, valitsimme tavoitteeksi luoda lukijalle realistisen näkemyksen kvanttilaskennan kehityksestä. Koska on vielä epävarmaa, milloin kvanttietokoneet ovat valmiita ratkaisemaan laajamittaisia käytännön ongelmia ja mitkä voisivat olla parhaita käyttötapauksia, tavoitteemme on auttaa tunnistamaan tekijöitä, jotka vaikuttavat teknologian kehitykseen, mahdollisiin sovelluksiin ja laajempiin yhteiskunnallisiin vaikutuksiin.

Realismin lisäksi haluamme haastaa lukijaa näkemään kauemmas tulevaisuuteen, aikaan, jolloin kvanttilaskenta voi ratkaista joitakin ihmiskunnan merkittävimpiä haasteita. Generatiivisen tekoälyn viimeaikainen kehitys, joka yllätti kokeneimmatkin tekoälyasiantuntijat nopealla harppauksellaan, on hyvä muistutus siitä, miten nopeasti mullistava teknologia voi edetä. Juuri tästä syystä kvanttilaskennan edistymistä on tärkeää seurata, vaikka läpimurto vaikuttaisikin kaukaiselta. Pitämällä silmät auki voimme paremmin ennakoita tulevia mahdollisuuksia ja haasteita.

Oppaan lukujen kysymykset ja taulukkoon 1 kerätyt uskomukset ja myytit perustuvat tutkimuksemme aikana tehtyihin havaintoihin. Taulukko tarjoaa tiivistetyn katsauksen näihin uskomuksiin. Voit käyttää sitä myös apuna tehdessäsi valintaa, mihin kirjan osiin haluat tutustua ensin.

Taulukko 1. Yleisiä uskomuksia ja myyttejä kvanttilaskennasta.

Uskomus	Todellisuus	Lue lisää
Kvanttitietokoneet ovat kaukaista tulevaisuutta.	Ei pidä paikkaansa! Tutkijat ja yritykset ympäri maailman käyttävät kvanttitietokoneita jo nyt todellisten ongelmien ratkaisemiseen.	Luku 4
Kvanttitietokoneet ovat jo nopeampia kuin perinteiset tietokoneet.	Toistaiseksi yksikään kvantti-sovellus ei ole vielä osoittautunut parhaita klassisia menetelmiä nopeammaksi käytännön sovelluksissa.	Luku 4
Nopeus on kvanttitietokoneiden ainoa etu.	Kvanttitietokoneet voivat myös antaa tarkempia tuloksia ja vähentää energiankulutusta.	Luvut 1 ja 3
Jos yritykseni ei tarvitse supertietokoneita, emme tarvitse myöskään kvanttitietokoneita.	Ei pidä paikkaansa! Kvanttitietokoneet on suunniteltu eri tarkoituksiin kuin (klassiset) supertietokoneet. Ne eivät korvaa niitä vaan täydentävät niitä.	Luku 2
Kvanttitietokone arvioi kaikki yhdistelmät kerralla (rinnakkain).	Ei oikeastaan. Vastaus edellyttää kvanttimekaniikan perusymmärrystä, jota tämä kirja ei käsittele. Voit kuitenkin aloittaa tutustumismatkasi tästä.	Luku 2, Lisätietoa
Kubittien määrän kasvattaminen parantaa aina suorituskykyä.	Itse asiassa kubittien määrän lisääminen ilman niiden laadun parantamista voi johtaa huonompaan suorituskykyyn (kohinan lisääntymiseen).	Luvut 2 ja 4
Kvanttitietokoneet ratkaisevat kaikenlaiset ongelmat nopeammin.	Kvanttilaskennalla odotetaan saatavan etua vain tietyissä ongelmissa, joiden ratkaisemisesta kvantti-algoritmit suoriutuvat klassisia menetelmiä paremmin.	Luku 3
Kvanttitietokoneet ratkaisevat ongelmat eksponentiaalisesti nopeammin.	Nopeushyöty vaihtelee ongelmatyypin mukaan; tietyissä tapauksissa parannukset voivat olla eksponentiaalisia.	Luku 3
Klassisista algoritmeista tulee merkityksellisiä, kun kvanttilaskenta kehittyy.	Klassiset algoritmit kehittyvät edelleen, jolloin niiden ero kvantti-algoritmeihin pienenee. Ne ovat edelleen tärkeitä laskentavälineitä monissa käyttötapauksissa.	Luku 3
Kvanttilaskenta on valmis laajamittaiseen käyttöön.	Teknologia on vielä alkuvaiheessa (NISQ-aikakausi), ja useimmat sovellukset ovat vasta teoreettisia tai kokeellisia.	Luku 4
Kvanttilaskenta ei vaikuta toimialaani.	Oletko varma? Optimointi ja koneoppiminen – kvanttilaskennan keskeiset vahvuudet – ovat tärkeässä osassa useimmilla teollisuudenaloilla, joten vaikutukset ovat väistämättömät.	Luku 5
Jonain päivänä meillä on kvanttitietokoneet taskuissamme.	Kukaan ei tiedä tulevaisuutta, mutta kvanttitieteiden huima muutospotentiali saa pohtimaan, miten se voisi muokata tulevaisuuden maailmaa.	Luku 6
Kvanttitietokoneet pystyvät murtamaan kaikki nykyiset salaukset.	Shorin algoritmi on uhka nykyiselle salaukselle, mutta kvanttitietokoneiden, jotka pystyvät suorittamaan sen tehokkaasti, odotetaan olevan vielä vuosien päässä. Valmistautuminen on kuitenkin aloitettava nyt.	Luvut 4 ja 7
Kvanttiturvallinen salaus on murtamaton.	Tällä hetkellä tiedossa ei ole tapoja murtaa kvanttiturvallista salausta, mutta kehityksen edetessä sen haavoittumattomuutta ei voida taata.	Luku 7
Jokainen yritys tarvitsee kvantti-strategian.	Vaikka jokaisen yrityksen olisi hyvä ymmärtää kvanttilaskennan mahdollisuudet ja uhat, oma strategia on välttämätön vain tietyillä toimialoilla tai tietyissä käyttötapauksissa.	Luku 8
En voi tutkia kvanttilaskennan hyödyntämistä, koska en tiedä siitä tarpeeksi.	Sinun ei tarvitse olla fyysikko – jo ymmärryksen lisääminen, yhteistyö ja pienet kokeilut voivat avata kvanttilaskennan mahdollisuudet yrityksellesi.	Luku 9
Kvanttilaskentaa voivat hyödyntää vain suuret yritykset.	Pilvipalveluiden kautta kvanttilaskenta on helposti saatavilla kaikenlaisille yrityksille ja jopa kiinnostuneille yksityishenkilöille.	Luku 9

Kolme aikajännettä

Vaikka emme voi vastata täsmällisesti kysymykseen ”milloin” – eli milloin jokin asia tapahtuu ja tulee mahdolliseksi – autamme lukijaa ymmärtämään kvanttilaskennan kehitystä käyttämällä kolmea aikajännettä koko kirjan ajan:

Lyhyt aikaväli: kilpailu sellaisten kvanttietokoneiden kehittämisestä, joilla voidaan ratkaista todellisia liiketoimintaongelmia.

Keskipitkä aikaväli: kasvavien liiketoimintahyötyjen aikakausi – kvanttilaskennalla ratkaistaan haasteita, jotka ovat mahdottomia klassisille tietokoneille¹.

Pitkä aikaväli: laajan kaupallisen käyttöönoton aikakausi – tulevaisuus, jossa teknologiset haasteet ovat pitkälti ratkaistu ja kvanttietokoneet ja niitä ympäröivät ohjelmistot toimivat saumattomasti mahdollistaen asioita, jotka ovat vielä toistaiseksi mahdottomia.

Aktiivinen osallistuminen kvanttilaskennan kehittämiseen on olennaisen tärkeää, jotta voidaan tunnistaa oikeat hetket toimenpiteille ja investoinneille. Näiden kolmen aikajänteen ymmärtäminen antaa mahdollisuuden hallita tehokkaasti tätä mullistavaa teknologiaa ja valmistautua sen seurauksiin.

“Nopeasti kehittyvä kvanttilaskenta avaa uusia mahdollisuuksia, joissa edelläkävijät erottuvat muokkaamalla markkinoita ennustamisen sijaan. Esimerkiksi materiaalitieteessä tullaan näkemään valtavia edistysaskeleita, jotka nopeuttavat tuotteiden markkinoille pääsyä ja haastavat yrityksiä rakentamaan tulevaisuutta aktiivisesti.”

Jussi Hyvärinen, Metsä Group

¹ Kun kvanttilaskennan asiantuntijat puhuvat klassisista tietokoneista ja laskennasta, he tarkoittavat niillä perinteisiä tietokoneita ja laskentamenetelmiä, joita käytämme arjessa ja liiketoiminnassa.

1/ Miksi minun pitäisi välittää kvanttilaskennasta?

Entä jos toimialasi seuraava suuri mullistus tulee teknologiasta, jota tuskin ymmärrät?

Kvanttilaskenta on poikkeuksellisen monimutkainen teknologia, joka eroaa perusteellisesti aiemmista tietojenkäsittelymenetelmistä. Sen avulla voidaan ratkaista ongelmia, jotka ovat liian monimutkaisia tai laskennallisesti raskaita klassisille tietokoneille. Kvanttilaskennan hyödyntämisen haasteena on se, että sen periaatteiden ja toimintamekanismien ymmärtäminen vaatii merkittävää perehtymistä. Jo pelkkä perusteiden hallitseminen voi kuitenkin avata ovia uudenlaisten mahdollisuuksien ymmärtämiseen.

Vaikka kvanttilaskenta saattaa vaikuttaa kaukaiselta tulevaisuuden teknologialta, yritysten on syytä valmistautua mahdollisiin murroksiin, joita kvanttilaskennan kehityksen odotetaan tuovan tullessaan. Kvanttilaskennalla tiedetään olevan useita lupaavia sovelluskohteita, jotka ulottuvat materiaalien suunnittelusta lääkekehityksen nopeutumiseen ja toimitusketjujen optimointiin. Kyse ei kuitenkaan ole vain merkittävästä laskentatehon kasvusta: kyse on täysin uudeltaisesta tavasta laskea. Sen uskotaan haastavan tieteen ja teknologian rajoja ja mahdollistavan uusia innovaatioita, jotka luovat uusia markkinoita ja liiketoimintamahdollisuuksia.

Kvanttilaskennan ymmärtäminen ei tarkoita, että sinun on muututtava teknologiaguruksi. Riittää, että tunnistat sen luomat mahdollisuudet, valmistaudut sen mahdollisesti aiheuttamaan murrokseen ja valmistelet yrityksesi menestymään alkavalla kvanttiaikakaudella. Pohdi aluksi seuraavia kysymyksiä:

- ✓ **Mitä jos voisit ratkaista aiemmin mahdottomilta vaikuttaneita ongelmia?**
- ✓ **Mitä jos voisit ratkaista monimutkaisen ongelman tuhat kertaa nopeammin?**
- ✓ **Mitä jos voisit löytää parempia ratkaisuja haastaviin ongelmiin?**
- ✓ **Mitä jos pystyisit ratkaisemaan ongelmia tuhat kertaa pienemmällä energiankulutuksella?**
- ✓ **Mitä jos toimialasi muuttuu mullistavalla tavalla?**
- ✓ **Mitä jos voisit luoda ratkaisuja, joita on tällä hetkellä vaikea edes kuvitella?**

Ensimmäinen luku on optimistinen, ja siinä kuvitellaan tulevaisuutta, jossa suuret tekniset haasteet on ratkaistu ja kvanttilaskenta muovaa sekä liiketoimintaa että yhteiskuntaa.

Mitä jos voisit ratkaista aiemmin mahdottomilta vaikuttaneita ongelmia?

Kvanttitietokoneet eroavat perustavanlaatuisesti klassisista tietokoneista. Ne hyödyntävät kvanttimekaniikan ilmiöitä, joiden ansiosta ne voivat löytää tehokkaita ratkaisuja ongelmiin, jotka ovat liian monimutkaisia jopa tehokkaimmille super-tietokoneille. Esimerkiksi kvanttisysteemien simulointi tarjoaa eksponentiaalisen edun verrattuna klassisiin menetelmiin. Klassisilla tietokoneilla on vaikeaa simuloida molekyylien, atomien tai materiaalien käyttäytymistä, koska järjestelmien koon kasvaessa monimutkaisuus kasvaa eksponentiaalisesti. Kvanttitietokoneet voivat kuitenkin käsitellä tällaisia luonnostaan kvanttimekaanisia ilmiöitä tehokkaammin, mikä tarjoaa mahdollisuuden läpimurtoihin lääketutkimuksessa, materiaalitieteessä ja kemiantekniikassa. Mullistavan simulointikyvyn ansiosta tutkijat voisivat löytää uusia lääkkeitä tai materiaaleja murto-osassa nykyisestä ajasta. Tämän kaltaiset käytännön innovaatiot voivat mullistaa teollisuudenaloja ja synnyttää täysin uusia markkinoita, mikä tekee kvanttilaskennasta tulevaisuuden keksintöjen ja innovaatioiden keskeisen veturin.

Mitä jos voisit ratkaista monimutkaisen ongelman tuhat kertaa nopeammin?

Tiettyjen tehtävien merkittävän nopeuttamisen lisäksi kvanttilaskennasta voi olla iloa myös aloilla, joilla jo maltillisemmilla parannuksilla voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä. Vaikka jokin ongelma ei olisi täysin mahdoton klassisille tietokoneille, sen nopeampi ratkaiseminen voisi vaikuttaa mullistavasti. Kuvittele, että kvanttitietokone ratkaisee muutamassa minuutissa ongelman, johon klassisella tietokoneella menee koko päivä. Pohdi sitten, mitä seurauksia olisi, jos kilpailijoillasi olisi käytettävissään tällaista teknologiaa mutta sinulla ei. Mitä tämä tarkoittaisi yrityksellesi?

Vaikka tehokkuuden parannus olisi pienempi, sen vaikutus liiketoimintaasi voisi silti olla merkittävä. Jo pienikin etumatka esimerkiksi toimitusketjun optimoinnissa tai taloudellisissa riskilaskelmissa voi olla ratkaiseva. Kun markkinoilla tapahtuu jotain yllättävää, kilpailijasi voisi tarttua tilaisuuteen ennen kuin ehdit reagoida. Tämä voisi asettaa yrityksesi huomattavan epäedulliseen asemaan, ellei itsekkin hyödynnä kvanttilaskennan tarjoamia mahdollisuuksia. Toimitusketjujen ja investointisalkkujen optimointiin liittyvät läpimurrot ovat vain sovel-lusmahdollisuuksien jäävuoren huippu.

Mitä jos voisit saada parempia ratkaisuja haastaviin ongelmiin?

Vaikka nopeus nostetaan usein esiin kvanttilaskennan tärkeimpänä etuna, sen kyky tuottaa laadukkaampia ratkaisuja on aivan yhtä tärkeä. Esimerkiksi optimointiongelmissa yritykset kohtaavat usein valtavan määrän mahdollisuuksia, jolloin klassisissa menetelmissä tyydytään yleensä ”riittävän hyviin” ratkaisuihin. Nämä ”paikallisiksi minimeiksi” kutsutut ratkaisut eivät välttämättä ole kuitenkaan optimaalisia. Kvanttilaskennalla tällaisia monimutkaisia ongelmia voidaan lähestyä entistä tehokkaammin ja löytää merkittävästi parempia ratkaisuja, jotka voisivat jäädä huomaamatta jopa parhaimmilla klassisilla menetelmillä. Vaikka kvanttietokoneen käyttö veisi enemmän aikaa, ratkaisun parempi laatu voisi oikeuttaa ylimääräisen ajan ja vaivan.

Mitä jos voisit ratkaista ongelmia tuhat kertaa pienemmällä energiankulutuksella?

Kvanttilaskennasta voi olla merkittävää hyötyä myös kestäväen kehityksen näkökulmasta. Kvanttietokoneet voivat hieman yllättäen olla huomattavan energiatehokkaita, vaikka ne toimivat lähellä absoluuttista nollaa olevissa lämpötiloissa. Joissakin tehtävissä kvanttilaskennan ensisijainen etu voikin olla huomattava energiansäästö, vaikka klassiset tietokoneet olisivat tasaväkisiä muissa suoritusmittareissa.

Toiminnallisen tehokkuuden lisäksi uskotaan, että tulevaisuuden kvanttietokoneet erottuvat edukseen myös suunnittelunsa osalta. Toisin kuin supertietokoneet, jotka perustuvat tuhansiin siruihin, tulevaisuuden kvanttietokoneiden odotetaan vaativan paljon vähemmän komponentteja. Tämä voi vähentää resurssien kulutusta valmistuksen aikana: raaka-aineita, vettä ja energiaa tarvitaan vähemmän, ja samalla syntyy vähemmän päästöjä ja jätettä kuin supertietokoneen komponenttien valmistuksessa. Näiden tekijöiden ansiosta kvanttilaskenta ei ole vain teknologinen läpimurto, vaan se voi myös edesauttaa vihreämpien ja kestävämpien ratkaisujen kehittämistä.

Mitä jos toimialasi muuttuu mullistavalla tavalla?

Kvanttilaskenta saattaa vaikuttaa tulevaisuuden teknologialta, mutta nyt tekemäsi päätökset voivat ratkaista, kukoistaako yrityksesi kvanttitulevaisuudessa vai jääkö se kehityksen kelkasta.

Vaikka keskusteluissa kvanttilaskennan mahdollisuuksista esiin nousevat usein tietyt toimialat, mikään ala ei välttämättä säästy kvanttilaskennan mullistavalta vaikutukselta. Kvanttitekniikan edistysaskeleet tulevat heijastumaan kaikkien yritysten liiketoimintaympäristöön.

Tietojenkäsittely on jokaisen toimialan ytimessä – aina toimitusketjujen optimoinnista hinnoittelustrategioiden määrittämiseen ja riskilaskelmiin. Kvanttilaskenta voi mullistaa tavan, jolla teollisuusyritykset hallitsevat ja käyttävät dataa, ja tehdä mahdottomasta mahdollista aina toiminnan suunnittelusta tuotekehitykseen.

Lisäksi kvanttilaskennan ja tekoälyn lähentyminen voi johtaa todella mullistaviin muutoksiin. Vaikka tähän liittyy vielä paljon epävarmuutta, näiden kahden teknologian yhdistäminen voi parantaa tietojen analysoinnin, ennakoivan mallintamisen ja päätöksentekoprosessien nopeutta, tarkkuutta ja kykyä kaikilla aloilla.

Optimoimalla liiketoiminnan monimutkaisia ydintehtäviä kvanttitekniologia voi parantaa tehokkuutta ja innovointia uudella tavalla ja tarjota kilpailuedun varhaisille omaksujille. Kvanttilaskennan mahdollistamat operatiiviset muutokset logistiikasta tutkimukseen ja kehitykseen muovaavat kilpailutilannetta, jolloin yritysten on joko pyrittävä hyötymään murroksesta tai sopeuduttava sen vaikutuksiin.

Käsityskykymme ylittävät ratkaisut

Nykyisten ongelmien ratkaisemisen lisäksi tietojenkäsittelyn uusi aikakausi voi tuoda esiin mahdollisuuksia, joita emme osaa vielä edes kuvitella. Yksi kvanttilaskennan tärkeimmistä lupauksista on sen syvälinen kyky simuloida kvanttisysteemejä. Tämä ei rajoitu vain tunnetun käsittelemiseen vaan kattaa myös tuntemattomien asioiden tutkimisen, kuten materiaalitieteen, kemian ja jopa maailmankaikkeuden peruslakien kvanttimysteerien tutkimisen. Kvanttitutkimus muistuttaa matkaa tuntemattomille vesille, joilla jokainen aalto ja väre paljastaa uusia ymmärryksen kerroksia ja jokainen löytö sisältää mahdollisuuden mullistaviin läpimurtoihin.

Tällaisen tutkimuksen mahdollisuudet ovat rajattomat. Kvanttisysteemien simulointi voi edistää molekyylien rakenteiden ja vuorovaikutusten syvempää ymmärtämistä ja nopeuttaa kehitystä materiaalitieteissä, kemiassa ja lääketieteellisyydessä. Kvanttilaskennan mahdollisuudet ulottuvat kuitenkin myös kauas näiden alojen ulkopuolelle. Kaikki teollisuudenalat, jotka ovat riippuvaisia fyysisistä materiaaleista ja tuotantoprosesseista, voivat mahdollisesti hyötyä innovaatioista, joilla on ennennäkemättömiä ominaisuuksia. Lisäksi nämä läpimurrot voivat paitsi tehostaa nykyisiä toimialoja myös muovata ne uudelleenlaisiksi tai jopa synnyttää kokonaan uusia markkinoita.

Kvanttilaskenta on myös potentiaalinen väline kvantti-ilmiöiden tutkimiseen, mikä voisi avata uusia tiedon ulottuvuuksia. Uudenlainen ymmärrys voisi antaa pontta tieteellisten ja teknologisten innovaatioiden uusille aalloille ja viedä ihmiskunnan sellaisille alueille, joita voimme tuskin edes kuvitella nykyään.

2/ Mitä on kvanttilaskenta?

Kvanttilaskenta ei ole tehokkaampi versio klassisesta laskennasta, vaan se on täysin erilainen tapa lähestyä matemaattisia ongelmia.

Monet ihmiset kuvittelevat, että kvanttietokoneet ovat vain nopeampia versioita nykyisistä tietokoneista – tai että jos yritys ei käytä supertietokoneita, se ei tarvitse myöskään kvanttietokoneita. Todellisuudessa kvanttietokoneissa ei ole kyse vain nopeudesta, vaan täysin erilaisesta tavasta ratkaista ongelmia. Klassiset tietokoneet käsittelevät tietoa ykkösinä ja nollina, kun taas kvanttietokoneet käyttävät kubitteja, jotka voivat olla samanaikaisesti useammassa kuin yhdessä tilassa. Tämä mahdollistaa ratkaisujen löytämisen monimutkaisiin haasteisiin, joihin klassisilla tietokoneilla ei päästä käsiksi.

Kvanttilaskentaa ei ole suunniteltu korvaamaan perinteisiä koneita vaan ratkaisemaan ongelmia, joiden ratkaiseminen on ollut tähän asti vaikeaa tai mahdotonta. Yritykset tulevatkin käyttämään usein hybridilähestymistapaa, jossa hyödynnetään sekä klassisten että kvanttisysteemien vahvuuksia. Jopa yritykset, jotka eivät nykyään käytä supertietokoneita, voivat hyötyä kvanttiteknologian ainutlaatuisista mahdollisuuksista. Tutustuminen kvanttilaskentaan nyt auttaa sinua pysymään tämän uuden teknologian aallonharjalla alalla, joka muovaa liiketoiminnan tulevaisuutta.

- ✓ **Kvanttietokoneet eivät ole vain nopeampia – ne ovat erilaisia**
- ✓ **Kvanttilaskenta on yksi kvanttiteknologian muoto**
- ✓ **Kvanttietokoneiden eri paradigmat soveltuvat eri käyttötarkoituksiin**
- ✓ **Voittava kubittiteknologia ei ole vielä selvillä**
- ✓ **Sekä kubittien lukumäärällä että laadulla on väliä**

Tässä luvussa luodaan yleiskatsaus kvanttilaskennan perusteisiin ja tarjotaan perustiedot tästä mullistavasta teknologiasta.

Kolme kvanttiteknologiaa

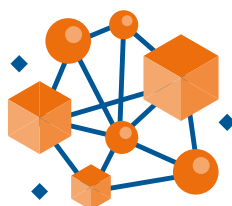
Kvanttitekniikat hyödyntävät kvanttimekaniikan periaatteita. Kvanttimekaniikka on fysiikan osa-alue, joka tutkii maailmankaikkeuden pienimpien hiukkasten outoa ja usein tavanomaisen ajattelun vastaista käyttäytymistä. Kvanttitekniikat voidaan jakaa kolmeen pääalueeseen: laskentaan (*quantum computing*), viestintään (*quantum communications*) ja anturiratkaisuihin (*quantum sensing*) (katso Kuva 1). Kullakin näistä alueista hyödynnetään atomia pienempien hiukkasten käyttäytymistä, mikä mahdollistaa klassisten järjestelmien rajoitusten ohittamisen. Vaikka tässä kirjassa keskitytäänkin kvanttilaskentaan, kvanttimaa-ilmassa näiden kvanttitekniikoiden välinen vuorovaikutus voi johtaa uusiin innovaatioihin ja mahdollisuuksiin, jotka ylittävät nykyisen ymmärryksemme.



KVANTTI-LASKENTA

(Quantum computing)

Laskentatekniikka, joka hyödyntää kvanttimekaniikkaa ja jonka suorituskyky päihittää klassisten tietokoneiden kyvyt (tietyissä sovelluksissa)



KVANTTI- VIESTINTÄ

(Quantum communications)

Hyödyntää lomittumista ja teleportaatiota mahdollistaen erittäin turvalliset viestintäkanavat



KVANTTIAANTURI-RATKAISUT

(Quantum sensing)

Hyödyntää kvanttisysteemien luontaista herkkyyttä ulkoisille vaikutuksille mahdollistaen ennen näkemättömän tarkat mittaukset ja tunnistukset

Kuva 1. Kolme kvanttitekniikan pääaluetta.

Kvanttilaskennan monimuotoinen kenttä

Kvanttilaskentaan liittyvä viestintä voi vaikuttaa sekavalta, sillä kehitteillä on monenlaisia kvanttilaskentajärjestelmiä ja eri toimijat esittävät toistuvia väitteitä mullistavista läpimurroista. Kvanttilaskennan perusparadigmojen ja kilpailuvien kubittiteknologioiden (nk. modaliteettien) ymmärtäminen on olennaisen tärkeää, jotta voidaan erottaa liiallinen hehkutus aidoista edistysaskeleista.

Kvanttilaskennan paradigmat

Paradigmat edustavat perustavanlaatuisesti erilaisia lähestymistapoja kvanttilaskentaan. Kullakin niistä on omat ainutlaatuiset etunsa ja haasteensa. Taulukko 2 tarjoaa tiiviin yleiskatsauksen eri paradigmoista. Näiden paradigmojen ymmärtäminen on olennaisen tärkeää, kun halutaan hahmottaa kvanttilaskentateknologian laajempaa kokonaisuutta ja sen kehitysvaiheita. Esimerkiksi kvanttiannelointi (*quantum annealing*) eroaa olennaisesti universaaleista kvanttietokoneista; se on erinomainen ratkaisemaan tietynlaisia optimointiongelmia, jotka voidaan muotoilla tietyllä tavalla⁵. Tutustumalla näihin paradigmoihin saamme selkeämmän kuvan sekä mahdollisuuksista että esteistä, joita vielä on kvanttilaskennan potentiaalin hyödyntämisen tiellä.

Taulukko 2. Kvanttilaskennan eri paradigmat.⁶

KLASSISET TIETOKONEET		ANALOGISET KVANTTITIETOKONEET		UNIVERSAALIT PORTTIPOHJAISET KVANTTITIETOKONEET	
Kvantti-inspiroitu klassinen laskenta	Kvantti-emulaattorit	Kvantti-annelointi	Kvantti-simulaattorit	Kohinainen kvanttilaskenta (NISQ)(NISQ)	Vika-sietoinen kvanttilaskenta (FTQC)
Kvanttimekaniikasta lainattujen ideoiden hyödyntämistä klassisten algoritmien suunnittelussa klassisilla tietokoneilla	Klassisilla tietokoneilla ajettavat ohjelmat, jotka on suunniteltu jäljittelemään kvanttietokoneita. Laitteistot vaihtelevat yksinkertaisista kannettavista tietokoneista klassisiin supertietokoneisiin	Erikoistuneet kvanttietokoneet, jotka on räätälöity ratkaisemaan tietynlaisia ongelmia	Kvanttijärjestelmä, joka on suunniteltu simuloimaan tiettyjä kvantti-ilmiöitä jäljittelemällä monimutkaisempien kvanttijärjestelmien käyttäytymistä	Varhaisen vaiheen kvanttietokoneet, joissa on rajallinen määrä virheille alttiita kubitteja, mikä rajoittaa niiden laskentatarkkuutta	Kvanttilaskennan lopullinen tavoite. Näillä järjestelmillä pystytään ratkaisemaan laskennallisia ongelmia, jotka ovat toistaiseksi ratkaisemattomia.
Yritykset voivat hyödyntää joitakin kvanttilaskennan etuja ilman, että ne joutuvat odottamaan kvanttietokoneiden kehittymistä	Emulaattorit auttavat testaamaan ja parantamaan kvantti-algoritmeja, mutta klassisen laskentatehon rajoitusten vuoksi ne eivät pysty täysin jäljittelemään kvanttietokoneita	Soveltuvat optimoinnin, koneoppimisen ja logistiikan haasteisiin (funktion globaalin minimin selvittämiseen)	Tutkijat ja teollisuudenalat, kuten materiaalitiede, käyttävät tarkasti rajatun kvantti-käyttämisen simulointiin, mutta ei sovellu yleiseen laskentaan.	Hyödyllisiä kvantti-algoritmien tutkimisessa ja sovellusten kehittämisessä. Eivät vielä siinä mittakaavassa, että niillä voitaisiin ratkaista tehokkaasti useimpia reaali maailman liiketoimintaongelmia	Ratkaisevat monenlaisia ongelmia huomattavasti nopeammin kuin perinteiset tietokoneet.

Kilpailevat kubittiteknologiat

Universaalin kvanttietokoneen kehittäminen on johtanut kovaan kilpailuun eri kubittiteknologioiden (modaliteettien) välillä. Kullakin on oma ainutlaatuinen lähestymistapansa kvanttiperiaatteiden hyödyntämiseen. Suprajohtavat kubitit hallitsevat tällä hetkellä otsikoita ja keräävät merkittävimmät investoinnit. Moni vähemmän tunnetuista ja kypsymättömistä menetelmistä voi kuitenkin vielä nousta merkittävään osaan kilpailussa vallitsevasta teknologiasta (*dominant design*). Taulukko 3 vertaa muutamien tällä hetkellä kehitteillä olevien merkittävien lähestymistapojen kypsyytasoja. Kullakin kilpailevalla kubittiteknologialla on omat etunsa, haasteensa ja tekniset erityispiirteensä, mikä heijastelee kvanttilaskennan monitahoista luonnetta. Vallitsevaksi teknologiaksi voi nousta jokin olemassa olevista vaihtoehdoista tai kokonaan toisenlainen ratkaisu, jota ei ole vielä keksitty.

Taulukko 3. Esimerkkejä kubittiteknologioista.

Kubitti-teknologiat	Kypsyys	Fyysisiä kubitteja	Toimittajat	Vahvuudet	Haasteet
Suprajohtava	Kypsin, laajalti käytössä kvanttilaskennan tutkimuksessa ja teollisuudessa	1 121 (IBM Condor, 2023)	IBM, Rigetti, Amazon, Google, IQM	Verrattain helppo skaalata (etene-missuunnitelmia jopa 1 miljoonaan) Nopeat kvanttiportit Merkittävää rahoitusta ja edistysas-keleita tutkimustyössä	Vaatii kryogeenisen jäädytyksen lähes abso-luuttiseen nolapisteeseen Altis dekoherenssille ja kohinalle Kytkeytyvyysraja 2D:ssä
Piipohjainen	Kehittymässä, mahdollisuus hyö-dyntää olemassa olevaa puolijoh-deinfrastruktuuria	12 (Intel Tunnel Falls, 2023)	Intel, SemiCon	Hyödyntää olemassa olevia piival-mistustekniikoita Mahdollisuus suureen skaalautu-vuuteen	Erittäin alhaiset kubittimäärät Pitkien koherenssiaikojen saavuttaminen on haastavaa Vaatii kryogeenisiä lämpötiloja
Tyypivakans-sikeskukset (NV-keskukset)	Kypsä kvanttiantu-reissa, kehitymäs-sä kvanttilasken-nassa	5 (Quantum Brilliance)	Quantum Dia-mond Technolo-gies, Element Six	Toimii huoneenlämmössä Erittäin vakaat kubitit Pitkät koherenssiajat	Skaalaaminen on haastavaa Käytetään ensisijaisesti anturisovelluksissa laajamittaisen laskennan sijasta
Topologinen	Kokeellinen, vielä tutkimusvaiheessa, ei kaupallisesti saatavilla	0	Microsoft	Teoriassa erittäin vikasietoinen Voisi mahdollistaa vikasietoisen kvanttilaskennan	Kokeiluun toteutuksen ja testaamatta suuressa mittakaavassa Ei vielä toimivaa laajamittaista järjestelmää
Neutraalit (kyl-mät) atomit	Kehitteillä, lupaava skaalautuvuus, kokeiluvaiheessa	1 225 (Atom computing, 2023)	Pasqal, QuEra, Atom Computing	Erittäin skaalautuva, monia kubitteja voidaan pakata pieneen tilaan Pitkät koherenssiajat, koska vuo-rovaikutus ympäristön kanssa on heikkoa	Vaatii monimutkaista jäädytystä ja tarkkaa laserohjausta Suuren mittakaavan kaupallisen käytön kehittäminen on vielä alkuvaiheessa
Ioniloukku	Kypsä teknologia, jota käytetään eri-laisissa kvanttitut-kimushankkeissa	56 (Quanti-num, 2024)	Quantinum, IonQ, Alpine Qu-antum Technolo-gies (AQT)	Alhainen virhetodennäköisyys Pitkät koherenssiajat Kubittien tarkka ohjaus	Hitaammat porttitoiminnot verrattuna muihin modaliteetteihin Skaalautuvuus on haaste ioniloukun moni-mutkaisien rakenteiden vuoksi
Fotonit	Kehittymässä, tutkimusvaiheessa, lupaavaa kehitystä kvanttiaviestinnän alalla	215 tilaa GBS (Xanadu, 2023)	PsiQuantum, Quandela, Xanadu	Huoneenlämpötilatoiminnot Minimaalinen dekoherenssi pitkällä etäisyyksillä Soveltuu erityisesti kvanttiaviestintä- ja verkkosovelluksiin	Fotonihäviöstä aiheutuva kohina Kahden fotonin vuorovaikutus (joita portit edellyttävät) on vaikea toteuttaa Rajallinen skaalautuvuus

Kubittien määrästä niiden laatuun

Kvanttilaskennassa on kuljettu pitkä kehitystaipale sen jälkeen, kun teknologia esiteltiin lähes kolme vuosikymmentä sitten. Viime vuosina kehitystä ovat vauhdittaneet merkittävästi tutkimuksen edistyminen ja kasvaneet investoinnit. Vaikka edistystä on tapahtunut monella rintamalla, markkinoinnissa ja julkisessa keskustelussa on keskitytty pääasiassa laitteiden kehittymiseen ja erityisesti fyysisten kubittien lukumäärään, joka on yksinkertainen mutta harhaanjohtava mittari kvanttietokoneen todellisille kyvyille.

Vuonna 2024 tapahtui kuitenkin muutos. Johtavat yritykset ovat alkaneet siirtyä ”kubitkilpajuoksusta” monitahoisempaan kilpailuun, jossa huomioidaan monia teknisiä tekijöitä. Jotta voisimme todella ymmärtää kvanttilaskennan tilaa, keskustelu onkin laajennettava kubiteista muihin kriittisiin tekijöihin, kuten järjestelmän vakauteen, luotettavuuteen ja skaalautuvuuteen. Ne määrittävät viime kädessä kvanttietokoneen käyttökelpoisuuden todellisessa maailmassa.

Kubittien lukumäärän lisäksi kubittien laatu on yhtä merkittävä, ellei jopa merkittävämpi tekijä. Tätä mitataan fideliteetillä, joka kertoo todennäköisyyden sille, onnistuuko yksi porttitoiminto kubitilla ilman virhettäⁱⁱ. Kun fideliteetti, toimintatarkkuus, paranee teknologisen kehityksen ansiosta, järjestelmillä voidaan suorittaa yhä useampia porttitoimintoja peräkkäin kohtuullisella onnistumisprosentilla ja kvanttietokone pystyy ratkaisemaan yhä monimutkaisempia ongelmia. Tällä hetkellä parhaiden tietokoneiden fideliteetti on noin 99,9 prosenttia, mikä mahdollistaa 2 000–3 000 porttitoimintoa. Joidenkin etenemissuunnitelmien mukaan⁷ tämä luku voi nousta 10 000 porttitoimintoon vuoteen 2027 mennessä. Tutkijat uskovat, että sopivalla NISQⁱⁱⁱ-algoritmeilla (jota ei vielä tunneta) voitaisiin saavuttaa etu 10 000 porttitoiminnolla tietyssä rajatussa ongelmassa⁸.

Virheenkorjaus on olennaisen tärkeää kvanttietokoneiden tarkkuuden parantamiseksi.

Ohjelmistotekniikoiden avulla tehtävä virheenkorjaus on keskeinen keino parantaa kvanttietokoneiden fideliteettiä. Virheenkorjauksessa useita fyysisiä kubitteja yhdistetään yhdeksi loogiseksi kubitiksi (katso tietoruutu), jolloin ylimääräisiä kubitteja voidaan käyttää virheiden havaitsemaan ja korjaamiseen kohinaisissa järjestelmissä. Tämä nopeuttaa loogisen kubitin fideliteetin parantamista mutta vaatii enemmän fyysisiä kubitteja. Kun riittävän korkealaatuisia fyysisiä kubitteja on miljoonia, niistä voidaan luoda satoja tai tuhansia riittävän korkealaatuisia loogisia kubitteja. Näiden kubittien avulla voidaan lopulta suorittaa vikasietoisia kvantti-algoritmeja, joiden on teoriassa osoitettu päihittävän klassisen laskennan. Tämän jälkeen riippuu yksinkertaisesti algoritmin ja ongelman ominaisuuksista, kuinka monta virhekorjattua kubitteja edun saaminen edellyttää.

ii Fideliteetin käänteisluku on virhetodennäköisyys eli todennäköisyys, että kvanttioperaatio (kuten portti) tuottaa virheellisen tuloksen. Matemaattisesti fideliteetti = 100 % - virhetodennäköisyys

iii NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) eli sillä viitataan termiin kohinainen kvanttilaskenta

Fideliteetin parantaminen on olennainen askel kohti *vikasietoista kvanttilaskenta*, jota käsitellään tarkemmin luvussa 4.

MIKÄ ON LOOGINEN KUBITTI?

Looginen kubitti on vakaa kvanttitiedon yksikkö, joka on muodostettu yhdistelmällä useita fyysisiä kubitteja virheilta suojautumiseksi. Fyysiset kubitit ovat alttiita häiriöille ja virheille, mikä tekee niistä yksinään epäluotettavia. Loogiset kubitit voivat havaita ja korjata pääosan näistä virheistä kvanttivirheenkorjauksella, mikä mahdollistaa luotettavimmat kvanttilaskelmat.

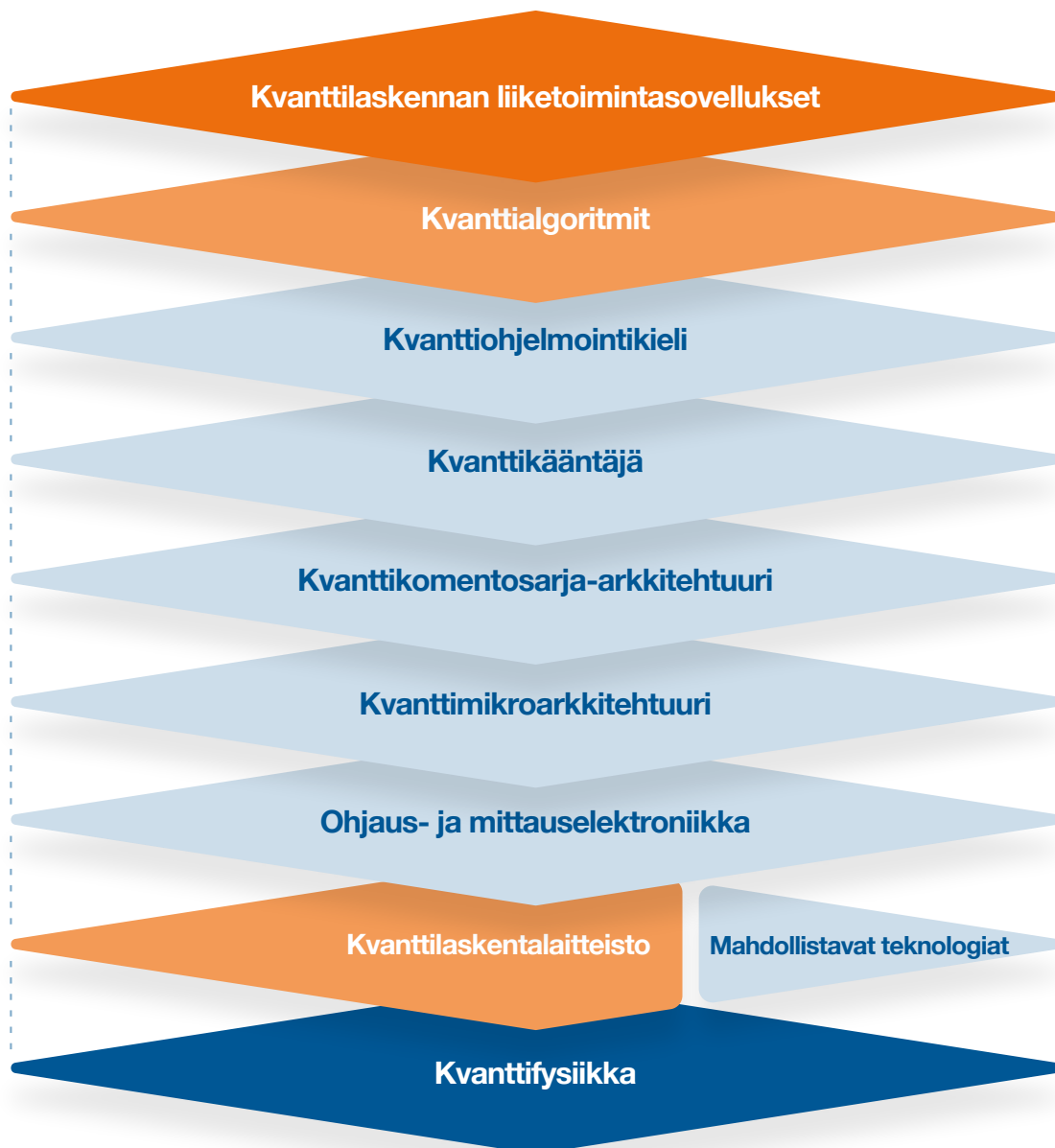
On tärkeää huomata, että loogiset kubitit eivät ole matemaattisesti täydellisiä tai virheettömiä. Käytännössä loogisissa kubitteissa voi edelleen olla virheitä, mutta ne ovat paljon vakaampia kuin fyysiset kubitit. Sovelluksen mukaan loogisiin kubitteihin asetetaan erilaisia laatuvaatimuksia:

- Korkean tarkkuuden tehtävissä (esim. kryptografia tai laajamittaiset simulaatiot) tarvitaan loogisia kubitteja, joissa virhetaso on hyvin alhainen ja redundanssi suuri.
- Vähemmän tarkkuutta vaativissa tehtävissä (esim. tietyn tyyppiset optimoinnit) voidaan sietää suurempia virhetasoja, jolloin virheenkorjaukseen tarvitaan vähemmän fyysisiä kubitteja.

Muut kvanttiteknologiapinon kerrokset

Vaikka suuri osa kvanttilaskentaan liittyvästä keskustelusta on keskittynyt laitteistokehitykseen, huomio on nyt siirtymässä kvanttipinon ylempiin kerroksiin. Tämä siirtymä heijastelee sen tosiasian tunnustamista, että kvanttilaskennan käyttökelpoisuus tosielämässä edellyttää laitteiston kehittämisen lisäksi myös muita edistysaskeleita.

Kvanttiteknologiapino havainnollistaa hierarkkista rakennetta, joka alkaa kvanttifysiikan perusteista ja ulottuu laitteiston ja väliohjelmiston kautta aina algoritmeihin asti. Kvanttiteknologiapinon huipulla ovat kvanttilaskennan liike-toimintasovellukset, joihin tässä kirjassa keskitytään. Kuva 2 esittelee nämä kvanttilaskennan teknologiapinon eri kerrokset.



Kuva 2. Kvanttiteknologiapino⁹.

Kun kvanttilaitteistot kehittyvät ja ymmärryksemme kvanttialgoritmeista ja mahdollisista sovelluksista kasvaa, kvanttilaskennan mahdollisuudet laajenevat entisestään. Kyseessä on dynaaminen ja kehittyvä ala, joka tulee avaamaan uusia laskentakapasiteetin ulottuvuuksia. Mullistavan potentiaalin hyödyntäminen vaatii kuitenkin yhteisiä ponnisteluja korkeakouluissa, teollisuudessa ja politiikassa.¹⁰

Sillan rakentaminen tulevaisuuteen hybridikvanttilaskennalla

Hybridikvanttilaskenta on keskeinen kehityssuunta, joka yhdistää nykyiset valmiudet ja tulevaisuuden mahdollisuudet. Se on lähestymistapa, jossa klassiset ja kvanttietokoneet ratkaisevat yhdessä laskennallisia ongelmia. Menetelmän lähtökohtana on, että kvanttietokoneita ei ole suunniteltu korvaamaan klassisia järjestelmiä vaan täydentämään niitä. Tällöin on viisasta hyödyntää molempien teknologioiden vahvuuksia.

Hybridikvanttilaskennassa klassinen tietokone huolehtii esimerkiksi tietojen valmistelusta, algoritmien optimoinnista ja tulosten tulkinnasta. Kvanttisuoritin (QPU) suorittaa puolestaan kvanttilaskutoimitukset. Tehtävien jakamisen ansiosta järjestelmä pystyy ratkaisemaan monimutkaisia ongelmia tehokkaammin. Klassinen tietokone voi suoriutua erinomaisesti esimerkiksi suurten tietokokonaisuuksien ja yleiskäyttöisten tehtävien käsittelystä, kun taas QPU keskittyy erikoistuneisiin toimintoihin, kuten kvanttitilojen tutkimiseen tai monimutkaiseen optimointiin.

Tämä lähestymistapa on erityisen tärkeä nykyisille NISQ-laitteille (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*), joiden kubittimäärä, koherenssiaika ja fideliteetti ovat rajalliset. Siirtämällä tietyt tehtävät klassisille tietokoneille hybridikvanttilaskennassa voidaan hyödyntää NISQ-laitteiden ainutlaatuisia ominaisuuksia ja samalla minimoida niiden heikkoudet. Hybridiarkkitehtureissa erityyppisiä kvanttietokoneita ja klassisia resursseja voidaan yhdistellä joustavasti, jolloin ratkaisut voidaan räätälöidä ongelmakohtaisesti.

Hybridikvanttilaskenta tarjoaa useita konkreettisia etuja:

Parempi suorituskyky: yhdistämällä klassisia ja kvanttiresursseja hybridijärjestelmät voivat nopeuttaa tiettyjen laskennallisten haasteiden ratkaisemista ja saada tuloksia nopeammin kuin pelkät klassiset menetelmät.

Parempi tarkkuus: kvanttilaskennan ja klassisen laskennan yhdistäminen mahdollistaa tarkemmat hybridialgoritmit ongelmanratkaisussa, erityisesti optimointi- ja koneoppimistehtävissä.

Suurempi joustavuus: hybridijärjestelmien avulla organisaatiot voivat hyödyntää laitteistojen ja algoritmien parasta yhdistelmää omiin erityistarpeisiinsa, mikä mahdollistaa käytännön sovellukset myös NISQ-aikana.

Kvanttilaskennan kehittyessä hybridikvanttilaskennalla on tärkeä rooli siltana kvanttiteknologian nykytilanteesta sen tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Hybridiratkaisuja hyödyntämällä yritykset voivat saavuttaa konkreettisia hyötyjä lähitulevaisuudessa ja samalla luoda pohjan tulevien vuosien mullistaville läpimurroille.

3/ Millaisia ongelmia kvanttilaskennalla voi ratkaista?

Kvanttilaskennalla pyritään ratkaisemaan mullistavalla tavalla ongelmia, jotka ovat klassisille tietokoneille liian monimutkaisia. Nykylaitteiden rajoitusten vuoksi kvanttietokoneet soveltuvat toistaiseksi hyvin vain rajatun ongelmajoukon ratkaisemiseen. Ne toimivat parhaiten ongelmissa, joilla on tietynlaisia ominaisuuksia: suuri monimutkaisuus, pieni tai keskisuuri syötekoko sekä (piilossa oleva) rakenne, jota kvantti-algoritmit voivat hyödyntää. Muutamia esimerkkejä ovat suurten lukujen jakaminen tekijöihin (jota käytetään salauksessa), koneoppimisen tehostaminen, monimutkaisten optimointihaasteiden ratkaiseminen ja kvanttisysteemien, kuten molekyylien tai materiaalien, simulointi.

Kvanttinopeus on keskeinen mittari arvioitaessa kvanttilaskennan tehoa verrattuna klassiseen laskentaan. Lupaavimmilla kvantti-sovelluksilla on eksponentiaalinen nopeus todellisten, reaali maailmassa ilmenevien haasteiden ratkaisemiseen. On kuitenkin tärkeää huomata, että käytännön kvanttietu (*quantum advantage*) – jossa kvanttietokone päihittää selvästi parhaat klassiset tietokoneet reaali maailman sovelluksissa – on edelleen toteutumista odottava, teoreettinen käsite. Kun kvanttietokoneet kehittyvät, läpimurtoja on odotettavissa erityisesti kryptografiassa, optimoinnissa ja kvanttisysteemien simuloinnissa. Näillä aloilla klassisten tietokoneiden rajat tulevat vastaan monimutkaisuuden hallinnassa tai kvantti-ilmiöihin liittyvien haasteiden ratkaisemisessa.

- ✓ **Kvanttilaskennan soveltamisen edellytykset ja rajoitteet**
- ✓ **Kvanttinopeus ja muut kvanttietokoneiden edut**
- ✓ **Kvanttietokoneiden lupaavimmat sovelluskohteet**

Tässä luvussa keskitymme kvanttilaskennan nykytilanteeseen. Kun luvuissa 1, 5 ja 6 tarkastellaan teknologian tulevaisuuden lupauksia ja mahdollisia vaikutuksia, tässä luvussa pidetään jalat maassa. Tarkastelemme, millä aloilla kvanttilaskennan potentiaali on tällä hetkellä suurin ja mitkä esteet on voitettava, ennen kuin tämä potentiaali voidaan täysin hyödyntää. Tasapainoinen lähestymistapa pyrkii tarjoamaan selkeän kuvan nykyisestä tilanteesta ja tuomaan esiin sekä innostavat mahdollisuudet että edessä odottavat keskeiset haasteet.

Miksi kvanttietokoneet ovat tehokkaita?

Kvanttimekaniikka perustuu periaatteille, jotka uhmaavat klassisen fysiikan selityksiä. Kvanttietokoneiden ainutlaatuinen teho kumpuaa juuri näistä periaatteista. Klassiset tietokoneet perustuvat binääriseen tiedon prosessointiin, jossa bitti on aina joko 0 tai 1. Tämä rajoittaa näiden järjestelmien kykyä käsitellä tietyntyyppisiä monimutkaisia ongelmia. Kvanttietokoneet sen sijaan perustuvat kubitteihin. Kubitit voivat sisältää sekä 0:n että 1:n samanaikaisesti, minkä ansiosta kvanttietokoneet voivat käsitellä valtavaa määrää mahdollisia ratkaisuja kerralla. Tämä kyky muokata kubittien tilaa ja siten suorittaa useita laskutoimituksia rinnakkain tekee niistä erityisen tehokkaita optimoinnin ja sa-lauksen kaltaisissa tehtävissä.

Kvanttietokoneet erottuvat edukseen myös hyödyntämällä kubittien välisiä monimutkaisia yhteyksiä. Näiden yhteyksien ansiosta tieto kulkee tavoilla, jotka ovat mahdottomia klassisissa järjestelmissä, mikä nopeuttaa ongelmanratkaisua huomattavasti. Lisäksi kvantti-algoritmit hyödyntävät erityisiä tekniikoita, joilla laskutoimituksia voidaan ohjata tehokkaammin oikeisiin lopputuloksiin. Tämä antaa niille huomattavan edun klassisiin algoritmeihin verrattuna tarkkarajaisissa haasteissa, kuten molekyylien simuloinnissa tai laajamittaisen optimointiongelmiin ratkaisemisessa.

Kaikista poikkeuksellisista ominaisuuksistaan huolimatta kvanttietokoneiden – erityisesti vikasetoisten kvanttietokoneiden – pääasiallinen arvo perustuu siihen, että ne ovat klassisia järjestelmiä suorituskykyisempiä todellisten ongelmien ratkaisemisessa. Toimiva vikasetoinen kvanttietokone, jolla on tehtävään sopivat ominaisuudet, tarjoaa merkittäviä etuja useilla keskeisillä osa-alueilla. Näitä ovat muun muassa seuraavat:

Nopeus: ratkaisee laskentatehtävän paljon nopeammin kuin nykyiset menetelmät

Tarkkuus: löytää tarkemman ratkaisun kuin nykyiset menetelmät

Skaalautuvuus: ratkaisee ongelman suuremmissa mittakaavassa kuin nykyisillä menetelmillä on mahdollista.

KVANTTILASKENNAN PERUSTEET

Superpositio (Superposition)

Kubitit eroaa klassisesta bitistä, joka voi olla vain joko 0 tai 1. Kubitit voivat sen sijaan olla tilassa, joka on molempien yhdistelmä vaihtelevalla todennäköisyydellä. Tämä ominaisuus, jota kutsutaan superpositioksi, antaa kubitteille niiden poikkeuksellisen laskentatehon.

Lomittuminen (Entanglement)

Kun kubitit ovat lomittuneet, yhden kubitin toiminta vaikuttaa välittömästi toisen kubitin tilaan, vaikka ne olisivat kaukana toisistaan. Tietojenkäsittelyssä lomittuminen tarjoaa resurssin, jota ei ole saatavilla klassisessa tietojenkäsittelyssä. Monet kvanttialgoritmit käyttävät lomittumista useiden laskutoimitusten suorittamiseen samanaikaisesti. Lomittumisen ansiosta kvanttietokoneet voivat käsitellä useita kubitteja yhdellä operaatiolla sen sijaan, että kutakin kubitteja käsiteltäisiin erikseen.

Kvantti-interferenssi (Interference)

Kvantti-interferenssi ilmenee, kun eri kvanttitilojen amplitudit ja vaiheet yhdistyvät tavalla, joka voi joko vahvistaa tai kumota tiettyjä tuloksia. Interferenssit ohjaavat laskentaa kohti oikeita ratkaisuja lisäämällä haluttujen tulosten todennäköisyyttä (vahvistamalla rakentavia ja tukahduttamalla virheellisiä laskentapolkuja). Mahdollisuus hyödyntää vahvistavaa ja kumoavaa interferenssiä tuottaa lyhyemmät laskentapolut.

Unitaarisuus (Unitarity)

Unitaarisuus on kvanttimekaniikan perusperiaate ja kvanttiteorian matemaattisen kehyksen perusta. Unitaarinen operaatio säilyttää kaikkien mahdollisten lopputulosten yhteenlasketun todennäköisyyden ja varmistaa, että todennäköisyyksien summa on aina 1. Tämä on ratkaisevan tärkeää, sillä se tarkoittaa, että tietoa ei menetetä laskentaprosessin aikana.

Lineaarisuus (Linearity)

Kvanttietokoneet suoriutuvat luonnostaan hyvin lineaarisista operaatioista (lineaarisuuden erikoistapaus, jota kutsutaan unitaarisuudeksi), koska kvanttimekaniikka on luonnostaan lineaarista. Lineaarisuus mahdollistaa sen, että tilavektorissa voi olla samanaikaisesti useita versioita todellisuudesta. Samalla se merkitsee sitä, että versioiden välillä ei ole vuorovaikutusta ja että koskaan ei havaita enempää kuin yksi versio. Tämä on avain kvanttirinnakkaisuuteen.

Rinnakkaisuus (Parallelism)

Kvanttirinnakkaisuus mahdollistaa valtavan määrän rinnakkaisia operaatioita, mikä on keskeinen ero klassiseen tietojenkäsittelyyn ja laskentaan. Klassisessa laskennassa rinnakkaisuus kasvaa suhteessa järjestelmän kokoon, kun taas kvanttirinnakkaisuus kasvaa eksponentiaalisesti. Kvanttilaskennassa hyödynnetään rinnakkaisuutta ja suoritetaan laskutoimituksia tilojen superpositiossa hyvin erityisellä ja ainutlaatuisella tavalla. Toisin kuin klassiset (pii- ja elektroniikkapohjaiset) laskentajärjestelmät, joissa tuhannet ytimet suoritavat tehtäviä sarjassa, kvanttilaskentaydin on luonnostaan rinnakkainen laskentayksikkö: laskutoimitukset voidaan suorittaa rinnakkain kvanttitilojen superpositioon vaikuttaviin unitaarioperaatioihin perustuen.

Mittaaminen (Measurement)

Kvanttietokoneen laskenta päättyy mittaukseen, joka valitsee yhden perustiloista kvanttilaan koodattujen todennäköisyyksien perusteella. Onnistuneessa kvanttialgoritmissa tämä prosessi tuottaa oikean tuloksen suurella todennäköisyydellä.

Millaiset ongelmat sopivat kvanttietokoneille?

Sellaisten ongelmien tunnistaminen, joissa kvanttilaskennasta on hyötyä, voi olla haastavaa – etenkin maallikon näkökulmasta. Tietyt yhteiset piirteet voivat kuitenkin auttaa selvittämään näiden ongelmien luonnetta ja helpottaa niiden hahmottamista.

Pitkällä aikavälillä kvanttietokoneiden odotetaan ratkovan monimutkaisia laskennallisia haasteita, joiden ratkaisemisessa klassisilla tietokoneilla on merkittäviä vaikeuksia tai joita ne eivät pysty lainkaan ratkaisemaan. Ne soveltuvat erityisen hyvin ongelmiin, joiden ratkaiseminen perinteisillä tietokoneilla on luonnostaan vaikeaa tai tehotonta. Jopa tämän luokan sisällä on kuitenkin epävarmaa, missä ongelmissa kvanttietu todella voidaan saavuttaa, sillä jotkin näistä ongelmista saattavat osoittautua haasteellisiksi myös kvanttietokoneille.

I Syötetyn tiedon koko rajoittaa lähitulevaisuuden sovelluksia.

Yksi merkittävä lähitulevaisuuden rajoitus on syötetyn tiedon koko. Nykyisillä kvanttietokoneilla ei voida vielä käsitellä suuria tietomääriä, joten niiden käsittelemien ongelmien on oltava suhteellisen pieniä, jotta ne ”mahtuvat” järjestelmän kapasiteettiin. Siksi kvanttietokoneet ovat lähitulevaisuudessa tehokkaimpia vaativissa laskentatehtävissä, joissa käsitellään pieniä datamääriä – eli tehtävissä, jotka vaativat huomattavaa laskentatehoa, mutta joihin ei liity massiivisia tietokokonaisuuksia syötteenä tai tulosteena.

Yksi syy kvanttilaskennan eksponentiaaliseen potentiaaliin piilee sen kyvyssä hyödyntää tiettyjen ongelmien rakennetta, mihin klassiset tietokoneet eivät pysty tehokkaasti. Valitettavasti tämä ”rakenteen tarve” on rajoittanut kvanttilaskennan suurimmat mahdollisuudet tiettyihin matematiikan erityisalueisiin. Tämä on perussy siihen, miksi kvantti-algoritmitutkimuksen suurimmat saavutukset on nähty kryptografian alalla. Tällaisten piilorakenteiden löytäminen muista käytännön ongelmista on edelleen merkittävä avoin ongelma.

Teoreettisella saavutettavuudella tarkoitetaan ongelman soveltuvuutta kvanttilaskentaan sen perusteella, miten se voidaan matemaattisesti kuvata, mallintaa ja perustella. Etua voidaan saada selkeän matemaattisen rakenteen ongelmissa, joissa tunnettuja kvantti-algoritmeja tai alkeisoperaatiota (primitiivejä) voidaan soveltaa tehokkaasti. Ihannetapauksessa ongelman muotoilussa voidaan nostaa esiin malleja tai rakenteita, joita kvanttietokoneet voivat hyödyntää, kuten datan symmetrioita (katso myös tietoruutu), tai hyvin määriteltäviä matemaattisia sääntöjä. Ilman tällaisia ominaisuuksia kvantti-algoritmien kehittäminen tai niiden mahdollisen paremmuuden osoittaminen verrattuna klassisiin lähestymistapoihin on haastavaa, mikä rajoittaa ongelman soveltuvuutta kvanttilaskentaan.

SYMMETRIAN HYÖDYNTÄMINEN KVANTTITEHOKKUUDEN PARANTAMISESSA

Symmetrialla on ratkaiseva merkitys kvanttilaskennan tehostamisessa. Monissa kvanttisysteemeissä, erityisesti kvanttikemian kaltaisilla aloilla, ilmenee symmetriaa, kuten translaatio-, rotaatio- tai heijastussymmetriaa. Näiden symmetrioiden ansiosta kvanttisysteemejä voidaan kuvata käyttämällä pienempää määrää muuttujia, mikä yksinkertaistaa laskentaa huomattavasti. Esimerkiksi järjestelmä, jossa on rotaatiosymmetriaa, edellyttää vain yhden ainutlaatuisen orientaation analysointia kaikkien mahdollisten orientaatioiden analysoinnin sijasta, mikä pienentää huomattavasti laskennallista ponnistusta.

Kvanttitietoteoriassa hyödynnetään näitä symmetrioita muuntamalla ongelmat paikallisesta kubittitason kuvauksesta globaaliin, symmetriaan perustuvaan kehykseen. Tämä kompakti esitys minimoi tallennus- ja prosessointivaatimukset, jolloin kvanttilgoritmit toimivat tehokkaammin. Lisäksi symmetriatietoinen kvanttikoneoppiminen tarjoaa lupaavan tutkimusväylän, joka yhdistää kvanttilaskennan vahvuudet ja datan luontaiset symmetriat nopeampien ja tehokkaampien oppimismallien kehittämiseksi. Tämä tekee symmetriasta tehokkaan välineen kvanttilaskennan monimutkaisten haasteiden ratkaisemiseen.

Yhteenvedon voidaan todeta, että ongelma sopii kvanttilaskentaan, kun sillä on seuraavanlaisia ominaisuuksia:

Suuri laskennallinen monimutkaisuus – ongelmat (eivät kuitenkaan kaikki), jotka skaalautuvat eksponentiaalisesti klassisilla tietokoneilla.

Syötteiden koko – nykyisten kvanttitietokoneiden kubittien määrä ja laatu rajoittavat toistaiseksi merkittävästi syötteiden kokoa.

Ongelman rakenne – ongelmat, joilla on hyvin määritelty, usein toistuva tai jaksoittainen rakenne.

Teoreettinen saavutettavuus – ongelmat, jotka voidaan mallintaa matemaattisesti ja joista voidaan tehdä päätelmiä.

Mitä sitten ovat ne todelliset ongelmat, joita kvanttitietokoneet voivat ratkaista? Taulukko 4 sisältää esimerkkejä sovelluksista, joissa kvanttilaskennan odotetaan tarjoavan suurimman hyödyn¹¹.

Taulukko 4. Kvanttilaskennan esimerkkisovelluksia.

Ongelman tyyppi	Tavoite	Miksi kvanttietokoneet sopivat tähän	Esimerkki-sovelluksia
Optimointiongelmat, joiden monimutkaisuus kasvaa eksponentiaalisesti	Parhaan ratkaisun löytäminen ongelmaan, jossa tarvittavat laskentaresurssit kasvavat eksponentiaalisesti syötteen koon kasvassa	Kvanttietokoneet voivat käsitellä useita tiloja samanaikaisesti	Toimitusketjun optimointi, reittisuunnittelu
Optimointi epävarmoissa olosuhteissa	Järjestelmien optimointi, kun tiedot ovat epätäydellisiä tai epävarmoja	Kvanttietokoneet pystyvät käsittelemään tehokkaasti todennäköisyyspohjaista tietoa	Riskianalyysi, ennakoiva mallintaminen, liikenteen reititys
Hakuongelmat	Ennalta määritettyjä kriteerejä vastaavan kohteen tai kokonaisuuden löytäminen rakenteellisista ja rakenteettomista tietokokonaisuuksista	Groverin algoritmi nopeuttaa rakenteettoman datan hakua neliöllisesti	Hakuoimintointi, tiedonlouhinta
Tekijöihin jakaminen ja kryptografia	Tekijöihin jakamiseen ja diskreetteihin logaritmeihin liittyvät tehtävät ovat monien salausjärjestelmien perusta	Kvanttialgoritmit, kuten Shorin algoritmi, voivat jakaa suuria lukuja tekijöihin eksponentiaalisesti nopeammin	Salauksen murtaaminen (RSA)
Kvanttijärjestelmien simulointi	Ongelmat, joihin liittyy luontaisesti kvanttimekaanisia prosesseja, kuten molekyyliarakenteiden, kemiallisten reaktioiden tai materiaalitieteen simulointi	Perushaasteena on, että jokainen simulaatioon lisätty kvanttimekaaninen hiukkanen kaksinkertaistaa tarvittavat klassiset laskentaresurssit, jolloin resurssitarve kasvaa eksponentiaalisesti. Kvanttietokoneet soveltuvat ainutlaatuisella tavalla simuloimaan kvanttisysteemejä paljon suuremmassa mittakaavassa kuin klassiset järjestelmät.	Lääketutkimus, materiaalitiede, kemian tutkimus
Koneoppiminen	Tekoälymallien kouluttaminen suurilla tietokoneisuuksilla tai oppimisalgoritmien optimointi	Kvanttialgoritmit voivat mahdollisesti nopeuttaa opetusprosesseja ja auttaa käsittelemään suuria tietokokonaisuuksia	Kvanttiavusteinen koneoppiminen, hahmontunnistus, data-analytiikka
Lineaaristen järjestelmien ratkaiseminen	Ratkaisujen etsiminen lineaarisiin yhtälöryhmiin	Kvanttialgoritmit, kuten HHL (Harrow, Hassidim, Lloyd), voivat ratkaista tietyt lineaarisia järjestelmiä eksponentiaalisesti nopeammin, mutta nopeutumiseen liittyy useita sudenkuoppia, jotka rajoittavat käytännön soveltamista	Fysiikan simulaatiot, rahoitusmallinnus

Kvanttiedun ja nopeuden ymmärtäminen

Kvanttietu (*quantum advantage*)^{iv} tarkoittaa tilannetta, jossa kvanttietokone päihittää klassiset tietokoneet. Perinteisesti se on määritelty tilanteeksi, jossa kvanttilaitteiston ja -ohjelmiston yhdistelmä ratkaisee ongelman nopeammin kuin luokkansa paras klassinen ratkaisu. Tällainen nopeus etu tekisi klassisista laskentamenetelmistä huomattavasti vaihtoehtoisempaa tiettyjen laajamittaisten ongelmien ratkaisemiseen.

Kvanttilaskennan nopeus etu ilmaisee, kuinka paljon nopeammin kvanttietokone pystyy ratkaisemaan ongelman verrattuna luokkansa parhaimpiin klassisiin tietokoneisiin.

Kvanttietua voidaan pitää pitkälti kyllä/ei-kysymyksenä. Sen sijaan kvanttilaskennan nopeus etu on olennaisen tärkeä käsite, kun pyritään ymmärtämään, kuinka paljon nopeampia kvanttietokoneiden odotetaan olevan. Ongelman mukaan kvanttietokoneet tarjoavat eritasoisen nopeusedun verrattuna klassisiin tietokoneisiin. Nopeusedut voidaan jakaa kahteen pääryhmään: polynomisiin ja eksponentiaalisiin nopeus etuihin. Ne edustavat eri tasoja, joilla kvanttietokoneet vähentävät tiettyjen tehtävien ratkaisemisessa tarvittavien vaiheiden lukumäärää verrattuna niiden klassisiin vastineisiin.

Ekspontiaalinen nopeus etu tekee mahdottomasta mahdollisen

Kvanttilaskennan kruununjalokivinä pidetään algoritmeja, joilla saavutetaan eksponentiaalinen nopeus etu, kuten Shorin algoritmilla tekijöihin jakamisessa. Tällainen nopeus antaa kvanttietokoneille mahdollisuuden ratkaista ongelmia, jotka on aiemmin katsottu mahdottomiksi klassisille järjestelmille.

Kuvittele esimerkiksi¹², että kvanttietokone ratkaisee ongelman ajassa T , kun klassisella tietokoneella siihen kuluu aikaa 2^T (tai mikä tahansa muu T :n eksponentiaalisesti kasvava funktio). Tästä erosta tulee uskomattoman suuri jopa maltillisen kokoisilla syötteillä, kuten $T=100$. Klassinen tietokone tarvitsisi ratkaisemiseen tähtitieteelliset 2^{100} aikayksikköä – eli suunnilleen tämän verran:

1 267 600 000 000 000 000 000 000 000 000 000

Valtava ero osoittaa, miksi tällaisten ongelmien ratkaiseminen klassisilla järjestelmillä voi olla mahdotonta. Käytännön sovelluksissa tällaisten algoritmien hyödyntäminen on kuitenkin vasta pitkän aikavälin tavoite. Nykyiset kvanttietokoneet eivät ole riittävän tehokkaita ja tarkkoja, jotta tällaisia eksponentiaalisia nopeus etuja voitaisiin saavuttaa.

^{iv} Myös käsitteitä kvanttihyöty (quantum utility) ja kvanttiylivoima (quantum supremacy) käytetään hieman eri painotuksilla.

Käytännön hyötyjä polynomisesta nopeusedusta?

Polynomisella nopeusedulla tarkoitetaan tilannetta, jossa kvanttietokone ratkaisee ongelman ajassa T , kun taas klassiselta tietokoneelta siihen kuluu T^2 , T^k tai muu T :n polynomifunktio. Esimerkiksi kvanttietokone saattaa suorittaa tehtävän 1 000 askeleessa, kun taas klassisen tietokone tarvitsee $1\,000^2 = 1\,000\,000$ askelta. *Groverin algoritmi* (yhden kohde-elementin löytäminen N elementistä rakenteettomasta datasta) on tunnetuin tähän luokkaan kuuluva algoritmi. Vaikka polynominen nopeus ei ole yhtä dramaattinen kuin eksponentiaalinen nopeus, sillä voidaan saavuttaa merkittäviä parannuksia erityisesti tietyissä liiketoiminnallisissa ja tieteellisissä sovelluksissa.

Polynomisen ja eksponentiaalisten nopeusedun lisäksi olemassa on *superpolynomisten nopeusujen* luokka, joka sijoittuu näiden kahden välille, mutta jota varten tunnetaan vielä suhteellisen vähän algoritmeja. Lisäksi on olemassa *tuntemattoman nopeusedun* luokka, johon kuuluvat heuristiikkapohjaiset algoritmit. Nämä algoritmit ovat erityisen tärkeitä lähitulevaisuuden kvanttietokoneita (NISQ-laitteita) ajatellen, ja niiden toivotaan tuottavan käytännön hyötyä jopa ilman muodollisia nopeustakuita (katso heuristisia algoritmeja käsittelevä tietolaatikko sivulla 46).

Nopeusetu teoriassa ja käytännössä

Nopeuslupaukset voivat kuulostaa aluksi hämmästyttäviltä. Keskusteluissa puhutaan kuitenkin lähes aina *teoreettisesta* nopeutumisesta, joka voi poiketa huomattavasti *käytännön* nopeutumisesta.

Teoreettisella nopeusedulla tarkoitetaan kvanttialgoritmien tarjoamaa ihan teellistä, ennustettua suorituskvyyvyn parantumista täydellisissä olosuhteissa.

Käytännön nopeusedulla tarkoitetaan todellista suorituskvyyvyn parannusta, joka havaitaan suoritettaessa kvanttialgoritmi todellisella kvanttietokoneella.

Käytännön nopeusedussa otetaan huomioon kvanttilaskennan monet reaali maailman rajoitukset, kuten laitteistorajoitukset, kohina ja virhetasot, jotka estävät meitä saavuttamasta täyttä teoreettista nopeusetua – ainakin lähitulevaisuudessa. Siinä huomioidaan myös tietojen lataamiseen liittyvät viiveet, kuten aika, joka tarvitaan syötetietojen koodaamiseen kvanttitilaan, ja virheenkorjaustekniikoiden viemä aika. Tämän vuoksi käytännön nopeuslisäys on usein paljon teoreettisia ennusteita pienempi tai pienissä ongelmissa jopa olematon.

Teoreettinen nopeusetu kertoo kvanttilaskennan *tulevista mahdollisuuksista*, kun taas käytännön nopeusetu heijastelee sen nykyisten rajoitusten ja mahdollisuuksien *todellisuutta*.

Toinen haaste kvanttinopeusedun saavuttamisessa on, että etua koskevat väitteet kannustavat usein kehittäjiä pohtimaan uudelleen klassisia algoritmeja. Tämä on johtanut läpimurtoihin klassisessa tietojenkäsittelyssä, jolloin aiemmin äärimmäisen vaikeasti ratkaistavina pidettyihin ongelmiin on löydetty paljon nopeampia klassisia ratkaisuja¹³ ja väite kvanttiedusta on vanhentunut nopeasti.

Vaikka klassisen laitteiston kehitys seuraa melko ennustettavaa rataa, klassisten algoritmien innovaatiotahtia on paljon vaikeampi ennakoida. Edistysaskeleet vaikeuttavat usein kvantti- ja klassisten lähestymistapojen suoraa vertailua, mikä korostaa kilpailutilanteen edelleen kehittyvää luonnetta.

Kvanttivyöty ja muut edut

Kvanttiedun osoittaminen reaali maailman sovelluksissa (mitattuna kvanttinopeusena) on osoittautunut erittäin haastavaksi. Tämän seurauksena jotkin yritykset ovat siirtäneet keskustelun muihin aiheisiin tai ottaneet käyttöön uusia termejä. Esimerkiksi IBM on lanseerannut käsitteen kvanttivyöty (*quantum utility*)¹⁴ joka tarkoittaa, että kvanttietokoneet tarjoavat luotettavia ja tarkkoja ratkaisuja ongelmiin, joihin klassisen laskennan raakaa laskentatehoa hyödyntävät menetelmät eivät kykene. IBM:n mukaan kvanttivyöty tarkoittaa sitä, että kvanttietokoneet voivat nyt ratkaista laajamittaisia ongelmia, jotka aiemmin voitiin käsitellä vain ongelmakohtaisilla klassisilla approksimaatiomenetelmillä. Tätä pidetään merkittävänä virstanpylväänä, sillä se tekee kvanttietokoneista arvokkaan työkalun tieteelliseen tutkimukseen. Se ei kuitenkaan tarkoita, että nopeus etu oli saavutettavissa verrattuna kaikkiin tunnettuihin klassisiin menetelmiin.

Kvanttiedun käsite on myös kehittynyt kattamaan monitahoisempia tulkintoja, jotka sisältävät uusia kiinnostavia ulottuvuuksia:

Laadullinen etu – Nopeuden lisäksi kvanttilaskennalla voidaan saavuttaa laadullisia etuja eli tuottaa laadullisesti parempia tuloksia kuin klassisilla järjestelmillä. Esimerkiksi koneoppimisessa kvanttijärjestelmät saattavat tarvita vähemmän koulutusdataa tai tuottaa tarkempia ennustemalleja. Tällaisia laadullisia tuloksia voidaan pitää todellisena kvanttietuna kuitenkin vain, jos niitä ei voida saavuttaa klassisilla algoritmeilla.

Energiaetu – Toinen tärkeä näkökohta on kvanttilaskennan mahdollinen energiatehokkuus. Kvanttijärjestelmät voivat vähentää merkittävästi energiankulutusta verrattuna klassisiin järjestelmiin. Tämä on jatkossa yhä tärkeämpää, sillä tietojenkäsittelyn maailmanlaajuinen energiankulutus kaksinkertaistuu n. 3,4 kuukauden välein, joten organisaatioiden on löydettävä keinoja asettaa kestävyys etusijalle.

Joidenkin väitteiden mukaan kvanttietokoneet voisivat tarjota jopa kolmen kertaluokan energiasäästön. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun super-tietokone voi tarvita noin 10 MW:n tehon tehtävän suorittamiseen, kvanttieto-

kone, jolla on sama laskentakapasiteetti, voisi suorittaa saman tehtävän vain 10 kW:lla. Nämä väitteet on kuitenkin kyseenalaistettu, ja ne ovat edelleen spekulatiivisia. Kvanttilaskennan tulevien energiantarpeiden tarkka ennustaminen on vaikeaa erityisesti siksi, että tulevaisuuden kvanttilaitteistojen luonne on vielä tuntematon¹⁵. Vaikka energiansäästömahdollisuudet kuulostavat lupaavilta, ne vaativat huolellista tapauskohtaista tarkastelua. Vain näin voimme erottaa todelliset edut spekulatioista.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kvanttiedun käsite ja siihen liittyvä ajattelu kehittyvät jatkuvasti. Uudet tulkinnat antavat kattavamman käsityksen siitä, millaista arvoa kvanttilaskenta voi tarjota, vaikkei suoranaista nopeusetua saavutettaisikaan. Vaikka tämä laajempi näkökulma saattaa lisätä monimutkaisuutta, se yhdistää kvanttilaskennan edistymisen paremmin käytännön liiketoiminnan ja yhteiskunnan tarpeisiin.

Mitkä ovat lupaavimmat sovellukset?

Lupaavimpien kvantti-sovellusten odotetaan hyödyntävän kvanttilaskennan aitouslaatuisia vahvuuksia ja ratkaisevan haasteita, joita klassisilla järjestelmillä ei pystytä ratkomaan. Tässä osiossa tarkastelemme keskeisiä sovelluskategorioita ja arvioimme niiden potentiaalia syventymättä liikaa kvanttialgoritmeihin – eli ”salaperäisiin resepteihin”, jotka tekevät nämä sovellukset mahdollisiksi.

Kvanttijärjestelmien simulointi

Kvanttisimulaatioissa mallinnetaan erityisesti kvanttisysteemejä, kuten molekyyliä, atomeja tai hiukkasia, joissa kvanttimekaaniset ominaisuudet ovat keskeisiä. Kvanttitietokoneet soveltuvat erityisen hyvin näihin tehtäviin, koska ne voivat suoraan mallintaa kvanttilojoja kubittien avulla ja hyödyntää superposition, lomittumisen ja interferenssin periaatteita. Tämä kyky on ratkaisevan tärkeä kvanttikemiassa, materiaalitieteessä ja molekyyllifysiikassa, joissa kvantti-ilmiöt ovat hallitsevia ja klassiset menetelmät eivät riitä niiden tarkkaan mallintamiseen.

Kvanttikemiassa on pohjimmiltaan kyse atomien ja molekyylien välisen kvanttitaso- vuorovaikutuksen ymmärtämisestä. Siinä lasketaan ominaisuuksia, kuten molekyylien perus- ja viritystiloja, reaktiopolkuja ja energiatasoja. Nämä laskelmat ovat ratkaisevan tärkeitä kaikissa sovelluksissa, joissa tarkat molekyylien vuorovaikutukset ja energiakonfiguraatiot ovat olennaisia, kuten katalyysissä ja kemiallisissa reaktioissa. Kvanttitietokoneet simuloivat näitä vuorovaikutuksia perustasolla, ja niiden sovellukset ulottuvat laajasti monille teollisuudenaloille.

Materiaalitieteessä (kvanttijärjestelmissä) kvanttilaskentaa hyödynnetään uusien, tiettyjä ominaisuuksia omaavien materiaalien löytämisessä ja suunnittelussa, kuten paremman lujuuden, sähkönjohtavuuden tai energianvarastointikyvyn saavuttamiseksi. Kvanttitietokoneet simuloivat kiinteän olomuodon järjestelmiä, molekyyllirakenteita ja kiderakenteita tavoitteenaan optimoida

atomien järjestäytymistä haluttujen materiaalien ominaisuuksien aikaansaamiseksi. Mahdollisia sovelluskohteita ovat esimerkiksi energia-, elektroniikka-, ilmailu- ja avaruusteollisuus, joissa ominaisuuksiltaan ainutlaatuisilla materiaaleilla voi olla mullistava vaikutuksia. Toisin kuin kvanttikemia, joka keskittyy yksittäisiin molekyyliin tai reaktioihin, materiaalitieteessä mallinnetaan usein suurten mittakaavojen ominaisuuksia ja rakenteita.

Lääkekehitys on kvanttikemian erityissovellus, jossa keskitytään biologisiin molekyyliin, kuten proteiineihin, entsyymeihin ja lääkeyhdisteisiin. Lääkekehityksessä kvanttietokoneet auttavat ennustamaan, miten lääkemolekyylit ovat vuorovaikutuksessa biologisten kohteiden kanssa atomitasolla. Tämä auttaa ymmärtämään molekyylien sitoutumiskykyä, reaktiivisuutta ja lääkeaineen vaikutusmekanismeja elimistössä, mikä voi tehostaa kehitystyötä ja vähentää tarvetta perinteiselle yritykseen ja erehdykseen perustuvalla etenemisellä. Vaikka lääkekehityksessä hyödynnetään kvanttikemian periaatteita, lääkkeiden kehittämiseen liittyy ainutlaatuisia näkökohtia, kuten biologinen yhteensopivuus ja myrkyllisyys, jotka erottavat sen laajemmasta kemiallisten reaktioiden tutkimuksesta.

Kryptografia

Kryptografia on yksi niistä aloista, joilla kvanttilaskenta lupaa merkittävimpiä teoreettisia nopeusetuja, erityisesti Shorin algoritmin kaltaisilla algoritmeilla. Kryptografian nimeäminen kvanttilaskennan lupaavimmaksi sovellukseksi olisi kuitenkin hieman ristiriitaista, sillä kyse on ensisijaisesti kvanttilaskennan aiheuttamasta uhkasta eikä niinkään niiden tarjoamista mahdollisuuksista. Esimerkiksi Shorin algoritmi voi mahdollisesti murtaa laajalti käytettyjä salausjärjestelmiä, kuten RSA:n. Tämä on vakava haaste nykyisten salausmenetelmien turvallisuudelle. Huolena on, että kun riittävän tehokkaat kvanttietokoneet saadaan kehitettyä, ne voivat tehdä monista nykyisistä salausjärjestelmistä käyttökelvottomia, mikä vaarantaisi arkaluonteisten tietojen turvallisuuden maailmanlaajuisesti.

Edellä mainituista syistä valtaosa kvanttikryptografian tutkimuksesta keskittyy kvanttikestävien salausmenetelmien kehittämiseen – eli sellaisten salausjärjestelmien kehittämiseen, jotka kestävät salauksenpurkamisyrietykset. Näin ollen kvanttilaskenta ei ole vain merkittävä mahdollisuus kryptografialle, vaan myös keskeinen syy pyrkimyksille luoda uusia, entistä turvallisempia salausstandardeja, joihin voidaan luottaa myös tulevaisuudessa. (Lue lisää luvusta 7)

Optimointi

Optimointi mainitaan usein yhtenä kvanttilaskennan lupaavimmista sovelluksista, mikä johtuu pääasiassa sen keskeisestä roolista eri aloilla. Kvanttietokoneet eivät kuitenkaan ole kaikissa optimointitehtävissä luontaisesti klassisia tietokoneita parempia. Niiden todellinen potentiaali piilee tietyn tyyppisten optimointiongelmiin ratkaisemisessa – erityisesti sellaisten ongelmien, joille on ominaista 1) rajallinen tietomäärä mutta suuri laskentaintensiteetti ja joissa 2) likimääräisillä ratkaisuilla on merkittävä arvo.

TARJOAAKO KVANTTIANNELOINTI HELPOSTI SAAVUTETTAVIA OPTIMOINTIHYÖTYJÄ?

Kvanttiannelointi viittaa kvanttilaskennan erityiseen (analogiseen) lähestymistapaan, joka on osoittautunut lupaavaksi tavaksi ratkaista tietynlaisia optimointiongelmia. Optimoinnissa on kyse kustannusfunktion minimiarvon löytämisestä, ja kvanttisysteemit ovat luonnostaan taipuvaisia löytämään minimienergiatiloja. Optimointiongelman ohjelmoiminen kvanttisysteemiin voisi teoriassa johtaa optimaaliseen ratkaisuun, kun systeemi löytäisi tällaisen alhaisimman energiatilaa.

Kvanttiannelointijärjestelmä, jollaisen esimerkiksi D-Wave on kehittänyt, hyödyntää tätä lähestymistapaa, ja se on suunniteltu nimenomaan optimointitehtäviin. Vaikka kvanttiannelointi vaikuttaa lupaavalta, on vielä liian aikaista sanoa, saavutetaanko sillä käytännössä laajamittaisia etuja verrattuna klassisiin menetelmiin käytännön sovelluksissa.

Kombinatorinen optimointi on luultavasti lupaavin optimointiongelmiä alaluokka kvanttietokoneille – ja erityisen hyödyllinen rahoituksen ja logistiikan aloilla. Se keskittyy optimaalisen ratkaisun löytämiseen rajallisesta joukosta mahdollisia ratkaisuja. Usein tavoitteena on valita tai järjestellä erillisiä kohteita tietyllä tavalla määritellyn tavoitteen saavuttamiseksi. Tällaisissa ongelmissa esiintyy yleensä kombinatorinen räjähdys; ongelman koon kasvaessa mahdollisten ratkaisujen määrä kasvaa eksponentiaalisesti, jolloin optimaalisen ratkaisun löytämiseen tarvitaan paljon laskentatehoa.

Hyviä esimerkkejä ovat muun muassa seuraavat:

Kauppamatkustajan ongelma: etsi lyhin reitti, jota seuraamalla voit vieraila joukossa kaupunkeja täsmälleen kerran ja palata lähtökaupunkiin.

Reppuongelma (Knapsack problem): maksimoi reppuihin pakattavien tavaroiden arvoa ylittämättä kunkin repun painorajaa.

Töiden aikataulutus: tehtävien jakaminen resursseille (esim. työntekijöille tai koneille) siten, että valmistusaika on mahdollisimman lyhyt tai tehokkuus mahdollisimman suuri.

Kvanttitietokoneiden todellisen nopeusedun arvioiminen kombinatorisessa optimoinnissa on monimutkaista, ja sitä on tarkasteltava ongelmakohtaisesti. Vaikka kvanttialgoritmit tarjoavat kiehtovia mahdollisuuksia, suorituskyvyn parantuminen riippuu merkittävästi monista tekijöistä, kuten valitusta algoritmista, ongelman rakenteesta sekä nykyisten ja tulevien kvanttilaitteistojen rajoituksista. Monet kvanttialgoritmit tarjoavat teoreettisesti polynomisen nopeusedun verrattuna klassisiin algoritmeihin. Tämä olisi huomattava parannus, mutta algoritmien hyödyllisyydestä käytännössä ei ole edelleenkään varmuutta (erityisesti lähitulevaisuudessa) kvanttiporttien luontainen hitauden ja virheenkorjauksen tuoman ylimääräisen laskennallisen kuormituksen vuoksi.

Kvanttihakualgoritmit

Kvanttihakualgoritmeilla pyritään nopeuttamaan hakutehtäviä, joissa tavoitteena on löytää tietty kohde tai ratkaisu suuresta, järjestämättömästä tietojoukosta. Toisin kuin klassiset hakualgoritmit, jotka saattavat käydä kaikki kohteet läpi yksi kerrallaan, kvanttihaun ainutlaatuiset kvanttiominaisuudet vähentävät tarvittavien tarkistusten määrää. Tämä johtaa nopeampiin tuloksiin tietäntyyppisissä hakuongelmissa.

Tunnetuin kvanttihakualgoritmi, Groverin algoritmi, nopeuttaa teorian mukaan hakua neliöllisesti verrattuna klassisiin menetelmiin. Kun klassinen algoritmi voi joutua tutkimaan kaikki tietokannan kohteet löytääkseen kohteen, Groverin algoritmi löytää sen suunnilleen neliöjuuressa tästä vaihemäärästä. Tämä etu kasvaa merkittävästi suurempien tietojoukkojen myötä, mikä tekee kvanttitiedonhausta arvokkaan sovelluksissa, joissa tehdään hakuja suurista datamääristä, kuten kryptografiassa, optimoinnissa ja tiedonhaussa.

Lupaavista mahdollisuuksista huolimatta kvanttihaun hyötyä rajoittavat toistaiseksi nykyisten kvanttitietokoneiden mittakaava ja virheprosentit. Kvanttilaitteistojen kehittyessä hakualgoritmien odotetaan kuitenkin olevan ensimmäisiä sovelluksia, joissa voidaan saavuttaa käytännön nopeusetuja. Kiinnostavia aloja ovat erityisesti datanlouhinta, kryptografinen analyysi ja hahmontunnistus, joilla jo vaatimattomatkin parannukset hakutehokkuudessa voisivat tarjota merkittäviä etuja.

KVANTTIKÄVELYT: ASKEL ETEENPÄIN MONIMUTKAISTEN VERKOSTOJEN TUTKIMISESSA

Mitä ovat kvanttikävelyt (quantum walks)?

Kvanttikävelyt ovat klassisen satunnaiskävelyn kvanttivastine, jossa hiukkaset ”liikkuvat” kuvaajan tai verkon läpi. Toisin kuin klassiset menetelmät, kvanttikävelyt hyödyntävät kvanttiperiaatteita, kuten superpositiota ja interferenssiä, joiden ansiosta ne voivat tutkia monimutkaisia rakenteita tehokkaammin.

Miksi kvanttikävelyillä on merkitystä?

Kvanttikävelyt ovat erityisen tehokkaita analysoidaan verkkojen matemaattisia malleja. Ne soveltuvat hyvin rakenteellisten erojen tunnistamiseen, kuten verkkojen vertailuun, solmujen tärkeysjärjestyksen määrittämiseen tai tiettyjen pisteiden (esim. ”merkityt solmut”) etsimiseen.

Sovellukset liiketoiminnassa ja teknologiassa

Kvanttikävelyillä on lupaavia sovelluksia aloilla, joilla verkot ovat keskeisessä asemassa:

- Viestintäverkkojen optimointi: pullonkaulojen tunnistaminen ja tiedonkulun parantaminen.
- Toimitusketjun hallinta: solmupisteiden (esim. jakelukeskusten) asettaminen tärkeysjärjestykseen.
- Sosiaalisen median analytiikka: vaikuttavien käyttäjien sijoittaminen paremmuusjärjestykseen tai aktiivisuusklustereiden havaitseminen.
- Kyberturvallisuus: verkkorakenteiden haavoittuvuuksien kartoittaminen.

Kvanttikoneoppiminen

Kvanttikoneoppimisessa (Quantum Machine Learning, QML) yhdistetään kvanttilaskennan ja koneoppimisen periaatteita ja luodaan algoritmeja, jotka hyödyntävät kvanttisysteemien ainutlaatuisia ominaisuuksia, kuten superpositiota ja lomittumista. Tavoitteena on suorittaa koneoppimistehtäviä – kuten hahmontunnistusta, tietojen luokittelua ja ennakoivaa mallintamista – tehokkaammin tai tarkemmin kuin klassisilla algoritmeilla.

Teoriassa kvanttikoneoppiminen voisi tarjota etuja sellaisten kuvioiden tunnistamisessa, jotka jäävät huomaamatta klassisilta koneoppimisalgoritmeilta. Tämä potentiaali on seurausta siitä, että lomittuminen luo kubittien välille korrelaatioita, jotka ulottuvat datapisteiden välisiin suhteisiin ja voivat paljastaa monimutkaisia kuvioita. Lomittuneet kubitit voivat esimerkiksi käsitellä ja yhdistää useita datapisteitä samanaikaisesti ja tuottaa näin monipuolisempaa tietoa, mistä voi olla hyötyä erityisesti monimutkaisissa tietokokonaisuuksissa. Vaikka suuri osa näistä mahdollisuuksista on vielä teoreettisia, kvanttikoneoppimisen potentiaali vaikuttaa lupaavalta kahdella keskeisellä osa-alueella:

Nopeus: Jotkin kvanttikoneoppimisalgoritmit voivat tarjota eksponentiaalisia nopeusetuja esimerkiksi syväoppimismallien kouluttamisessa tai laajamittaisen optimointiongelmien ratkaisemisessa.

Laatu: Kvanttikoneoppiminen voi parantaa hahmontunnistuksen ja poikkeavuuksien havaitsemisen tuloksia hyödyntämällä kvanttiominaisuuksia, kuten lomittumista.

Kvanttikoneoppimisen teoria ja sovellukset ovat yhä kehitysvaiheessa. Mekanismit, jotka lopulta johtavat menestyksekkäisiin kvanttikoneoppimissovelluksiin, saattavat poiketa merkittävästi klassisen koneoppimisen mekanismeista, ja paljon on vielä ymmärtämättä. Vaikka kvanttikoneoppiminen tarjoaa jännittäviä mahdollisuuksia, sen tehokkuus on edelleen todistamatta käytännössä nykyisten kvanttietokoneiden rajoitteiden vuoksi.

Nykyiset rajoitukset ja tulevaisuuden mahdollisuudet

Kvanttilaskennan potentiaalia tarkasteltaessa väitettiin läpimurtoihin on tärkeää suhtautua terveellä skeptisyydellä. Pyrkinessään yksinkertaistamaan hyvin monimutkaista tieteenalaa toimittajat saattavat tahattomasti jättää huomiotta ratkaisevia yksityiskohtia, mikä voi johtaa liian optimistisiin tai jopa harhaanjohtaviin tulkintoihin. Esimerkiksi kiinalaiset tutkijat kertoivat hiljattain kehittäneensä kvanttialgoritmin, jonka avulla voidaan murtaa RSA-salaus. Jotkin tiedotusvälineet uutisoivat tästä sensaatiohakuisesti, mutta todellisuudessa läpimurto oli vähemmän dramaattinen – tutkijat olivat purkaneet vain 50-bittisen salauksen, joka on kaukana nykyisin yleisesti käytetyistä 1024- ja 2048-bittisistä salauksista.

Edellä kuvatuista väärinkäsityksistä ja markkinoinnin liioittelusta huolimatta kvanttilaskennan potentiaalia ei voi kiistää. Eksponentiaalisia nopeus- ja tarjoavista algoritmeista odotetaan kvanttilaskennan läpimurto- ja sovelluksia. Potentiaali on valtava lääkekehityksen, kryptografian ja optimoinnin kaltaisilla aloilla, ja tehokkaat algoritmit voivat mullistaa kokonaisia teollisuudenaloja ja yhteiskunnallisia toimintoja. Uraauurtavat algoritmit edellyttävät kuitenkin paljon kehittyneempää kvanttilaitteistoa kuin mitä tällä hetkellä on saatavilla, joten niiden käytännön edut ovat toistaiseksi pitkälti teoreettisia.

Myös pienemmällä nopeuseduilla, kuten heuristisilla ja polynomisilla algoritmeilla, voidaan saavuttaa merkittäviä käytännön hyötyjä, kun kvanttilaitteistot paranevat ja ongelmien mittakaava kasvaa. Tämän potentiaalın hyödyntäminen edellyttää kuitenkin merkittävien pullonkaulojen, kuten korkeiden virheta-sojen, rajallisen skaalautuvuuden ja integrointihaasteiden voittamista.

Tunnettujen sovellusten lisäksi kvanttilaskenta voi avata täysin uusia mahdollisuuksia aloilla, joilla klassisten tietokoneiden teho on rajoittava tekijä. Tutkijat kehittävät ahkerasti uusia algoritmeja, jotka voisivat laajentaa kvanttilaskennan soveltamisalaa. Teknologian kehittyessä ymmärrämme entistä paremmin, miten kvanttilaskennan ainutlaatuisia ominaisuuksia voidaan hyödyntää maailman monimutkaisimpien haasteiden ratkaisemisessa.

4/ Milloin kvanttilaskenta on valmis käyttöön?

Kun pohditaan oikeaa hetkeä ottaa käyttöön kvanttiteknologiaa, on tärkeää ymmärtää, että kvanttivalmius on monitahoinen käsite. Ensimmäinen askel on selvittää sovelluksesi erityisvaatimukset – jotkin teollisuudenalat ja ongelmat saattavat hyötyä kvanttilaskennasta nopeammin kuin toiset. Sovelluksesi erityistarpeiden lisäksi huomioon on otettava kvanttilaskennan laajempi valmius. Tämä kattaa laitteistojen kypsyyden, käytännön algoritmien saatavuuden, osaamisen ratkaisujen toteuttamiseksi, ohjelmistotyökalujen ja -alustojen kehityksen sekä kvantti-innovaatioita tukevan ekosysteemin ja toimitusketjun elinvoimaisuuden. Kukaan osa-alue on tärkeä arvioitaessa, milloin kvanttilaskenta voidaan todella ottaa käyttöön laajassa mittakaavassa.

Kriittiset virstanpylväät ja läpimurrot osoittavat, milloin kvanttilaskenta on valmis laajaan kaupalliseen käyttöön. Laitteiden valmiuden keskeinen mittari ei ole vain kubittien määrä vaan myös niiden laatu ja vakaus. Vaikka jo nyt on esiteltä yli tuhannen fyysisen kubitin järjestelmiä (esim. IBM ja Atom Computing), näihin järjestelmiin liittyy merkittäviä haasteita, jotka ovat seurausta laskennan suurista virhetasoista. Lupaavimpien sovellusten käyttöön saaminen edellyttää paitsi kubittien määrän kasvattamista myös virheprosenttien ja koherenssi-aikeiden (kuinka kauan kubitit pystyvät säilyttämään tilansa) parantamista sekä monien muiden haasteiden ratkaisemisesta.

✓ Valmiuden monitahoinen luonne

laitteisto

ohjelmistot ja algoritmit

osaaminen

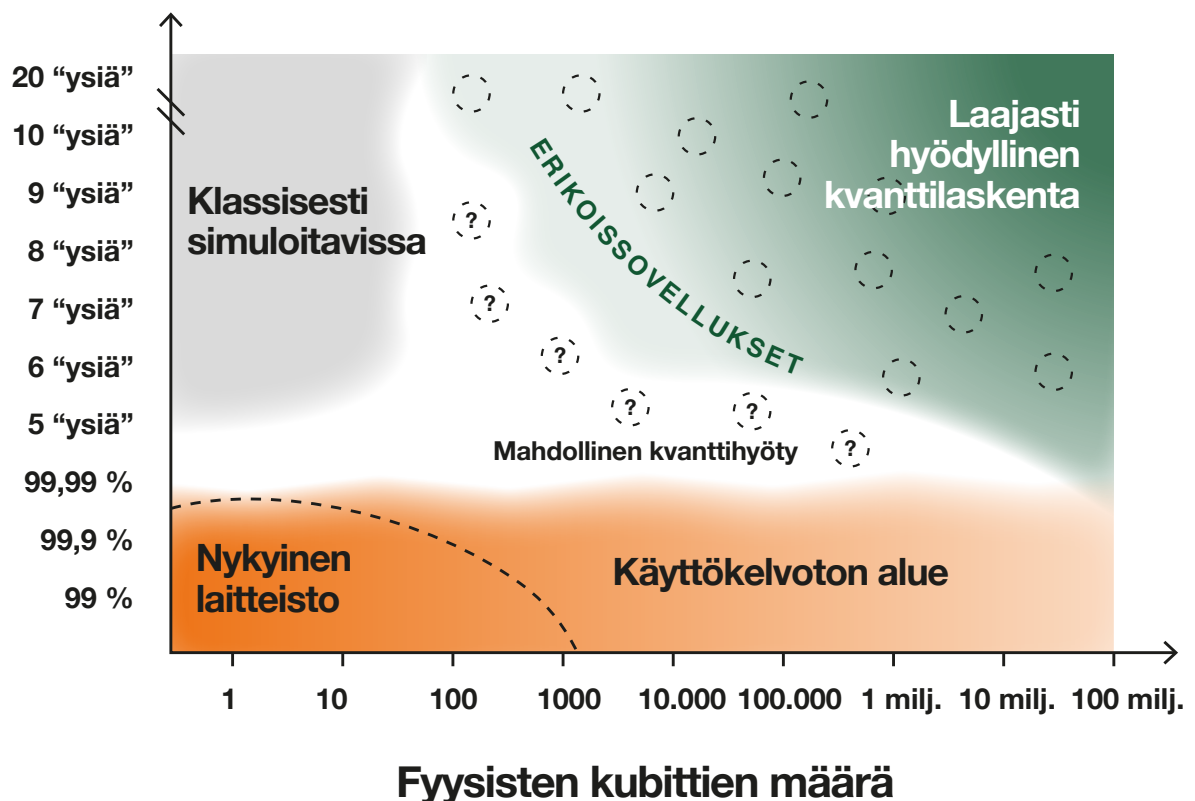
ekosysteemit

✓ Kvanttivalmiuden edistymisen seuraaminen

Kvanttilaskennan ”valmiuden” määrittäminen edellyttää eri tekijöiden kattavaa arviointia. Huomioitavia tekijöitä ovat muun muassa laitteiston kypsyyden, sopivien algoritmien saatavuus ja osaajien valmius. Tässä luvussa tarkastellaan näitä tekijöitä ja tuodaan esiin keskeisiä indikaattoreita, jotka ovat merkkejä valmiudesta laajaan kaupalliseen käyttöönottoon.

Miten voimme mitata valmiutta?

Jos olet seurannut uutisia kvanttilaskennasta, olet todennäköisesti kiinnittänyt huomiota kilpajuoksuun kubittien määrästä¹⁶. Tätä yksittäistä mittaria pidetään liian usein kvanttietokoneiden valmiuden mittarina, mikä luo harhaanjohtavia odotuksia uusimpien tietokoneiden todellisesta hyödyllisyydestä. Fyysisten kubittien määrä voi olla harhaanjohtava mittari, koska se ei kerro, kuinka monta näistä kubiteista voidaan todellisuudessa käyttää tosielämän ongelmien ratkaisemiseen. Kubittien lisääminen voi jopa huonontaa tilannetta, jos se samalla lisää kohinaa. Tämän seurauksena monet kvanttijärjestelmiä kehittävät yritykset ovat viime aikoina keskittyneet pikemminkin kubittien laadun parantamiseen (siirtymään ylös kuvaajassa Kuva 3) niiden määrän kasvattamiseen sijasta (siirtymään oikealle kuvaajassa).



Kuva 3. Nykyinen laitteisto ja toivottu kehityspolku kohti laajamittaista vikasietoista kvanttilaskentaa¹⁷.

Kvanttilaskennan ”valmiuden” määrittely on haastavaa myös siksi, että laitteiston valmiuden lisäksi on useita muita ulottuvuuksia, jotka vaikuttavat kvanttilaskennalla saavutettaviin hyötyihin. Valmiuden lisänäkökohtia ovat ainakin ohjelmistokehitys, algoritmien saatavuus ja kypsyys sekä työvoiman valmius. Lisäksi yritysten on otettava huomioon koko kvanttiekosysteemin valmius toimittajista toimitusketjuihin. Kvanttilaskennan onnistunut käyttöönotto edellyttää, että kaikki nämä ulottuvuudet kehittyvät rinnakkain, jolloin teknologian potentiaali voidaan hyödyntää laajassa mittakaavassa.

Yleisnäkymä kvanttilaskennan kehitykseen

Vuoden 2025 alkaessa kvanttilaskenta herättää edelleen vaihtelevia näkemyksiä. Viime vuosina sen mahdollisuuksiin on suhtauduttu optimistisesti. Toisaalta myös pessimistisiä arvioita on esitetty – erityisesti sellaisten tahojen toimesta, jotka kamppailevat kehitystä hidastavien erittäin monimutkaisten haasteiden kanssa. Tässä kirjassa pyrimme ottamaan huomioon molemmat näkökulmat ja ymmärtämään, että kummallakin näkökulmalla on perustelunsa. Keskeisin ero on siinä, kuinka paljon aikaa kuluu, ennen kuin merkittäviä läpimurtoja saavutetaan.

Emme tee tarkkoja ennusteita siitä, milloin tietyt virstanpylväät saavutetaan, sillä alalla riittää monenlaisia arvauksia. Sen sijaan tarjoamme joustavamman kehityksen, joka auttaa ymmärtämään tulevia kehitysvaiheita. Tämän lähestymistavan ansiosta voimme arvioida, millaisia vaikutuksia kvanttilaskennalla odotetaan olevan liiketoimintaan kussakin kehitysvaiheessa.

Pidä mielessä, että nämäkin aikakaudet ovat valistuneita arvauksia. Tieteen ja teknologian läpimurrot ja teknologian käyttötavat voivat viedä meidät lopulta odottamattomille poluille. Tarkastelemalla klassisen tietojenkäsittelyn kehitystä saamme perspektiiviä kvanttilaskennan kehityksen ennustamisen haasteeseen. Jopa jälkikäteen on vaikea määritellä tarkasti, milloin klassiset tietokoneet katsottiin ”valmiiksi”. Voimme kuitenkin tunnistaa aikakausien välisiä siirtymiä, keskeisiä virstanpylväitä ja läpimurtoja, jotka laajensivat tietokoneiden mahdollisuuksia. Monet niistä olivat sellaisia, joita silloiset edelläkävijätäkään eivät osanneet edes kuvitella.

Samaan tapaan kvanttilaskennan kehitys on ymmärrettävä asteittaisena etenemisenä eri kehitysvaiheiden kautta, joilla kullakin on omat mahdollisuutensa ja rajoituksensa. Jokainen vaihe on merkittävä askel kohti perimmäistä tavoitetta: vikasietoisia ja skaalautuvia kvanttietokoneita, jotka pystyvät ratkaisemaan monimutkaisia tosielämän ongelmia, jotka ylittävät klassisten järjestelmien mahdollisuudet (katso Kuva 4). Ymmärtämällä kvanttilaskennan kehitysvaiheita, aikakausia, voimme paremmin ymmärtää, missä vaiheessa teknologia on tällä hetkellä ja mitä sen odotetaan olevan tulevaisuudessa. Olennaista on huomata, että vaiheiden rajat eivät ole selkeitä. Siirtyminen seuraavaan aika-kauteen saattaa tapahtua vähitellen, ja aikakaudet menevät usein päällekkäin. Geologisten aikakausien tapaan voimme kuitenkin tunnistaa joitakin merkittä-

viä tapahtumia, joiden voidaan katsoa määrittelevän kvanttietokoneiden aikakausien väliset rajat. Ensimmäinen merkittävä tapahtuma voisi olla ensimmäinen NISQ-algoritmi, joka päihittää parhaat klassiset algoritmit hyödyllisessä tehtävässä.

”Ensimmäisten käytäntöön soveltuvien NISQ-algoritmien löytäminen on yksi aikamme kriittisimmistä haasteista. Jokaisen laskentaa hyödyntävän yrityksen tulisi tutkia, missä käyttötapauksissa ne voisivat hyötyä näistä varhaisen vaiheen algoritmeista.”

Ville Kotovirta, QMill

Kvanttilaskennan ympärille on muodostumassa yhä kasvava yhteisö, joka etsii ratkaisuja lähitulevaisuuden sovelluksiin. Jos sellaisia löytyy, se voi olla ratkaiseva hetki, joka nopeuttaa kvanttilaskennan kehitystä ja investointeja siihen. Jotkin asiantuntijat suhtautuvat kuitenkin edelleen epäilevästi NISQ-aikakauden sovellusten hyödyllisyyteen. He uskovat, että urauurtava tapahtuma on se, kun klassisen algoritmin teoriassa päihittävä kvantti-algoritmi pystytään suorittamaan vikasietoisella kvanttietokoneella. Tämä aloittaa vikasietoisuuden aikakauden ja nopeuttaa kvanttilaskennan sovellusten ja markkinoiden kasvua.



Kuva 4. Kvanttilaskennan kehityskaudet.

Nämä aikakaudet muodostavat ylätasen etenemissuunnitelman, jonka avulla voidaan arvioida, milloin kvanttilaskenta on valmis laajamittaiseen käyttöön. Ne auttavat myös ymmärtämään, miten yritykset voivat asemoitua strategisesti hyötyäkseen kvanttilaskennan kehityksestä. Seuraavassa luvussa tarkastelemme näitä käyttötapauksia yksityiskohtaisemmin, jotta osaisit hahmottaa paremmin, miten kvanttilaskenta voi vaikuttaa omaan toimialaasi.

Kvanttilaskenta nyt

Kvanttilaskennan nykyistä vaihetta kutsutaan usein NISQ-aikakaudeksi (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*), mikä viittaa käytettävissä olevan laitteiston rajoituksiin. Aikakaudella siirrytään pelkästään tutkimuspohjaisesta käytöstä kohti yritysten kanssa toteutettavia konseptitoteutuksia, joiden avulla opitaan ja tunnistetaan ne käyttötapaukset, jotka voivat tuottaa suurimmat hyödyt kvanttilaskennan läpimurron alkuvaiheessa.

Painopisteet ja käytäntö nyt

Tällä hetkellä tutkimus keskittyy pieniin, kapea-alaisiin ongelmiin, joissa kvanttietokoneet ovat erityisen hyviä. Näitä tarkasti rajattuja ongelmia ovat esim. tietyt optimointiongelmat, pienimuotoiset kvanttisimulaatiot ja koneoppiminen. Ennenaikaisista väitteistä huolimatta vielä ei ole pystytty osoittamaan, että kvanttietokoneet suoriutuisivat mistään näistä käytännön ongelmista nopeammin kuin parhaat klassiset tietokoneet. Näiden sovellusten avulla voidaan kuitenkin tutkia kvanttilaskennan mahdollisuuksia ja samalla pyrkiä ratkaisemaan kohinaan ja skaalautuvuuteen liittyviä ongelmia. Käyttötapaukset rajoittuvatkin alueille, joilla virheet eivät ole niin kriittisiä. Varhaiset sovellukset on hyvä nähdä kokeiluina, oppimisena ja valmistautumisena tuleviin mahdollisuuksiin.

Laitteisto (ja niiden rajoitukset) nyt

Nykyisiin kvanttietokoneisiin liittyy monia rajoituksia. Ensinnäkin ne ovat hyvin alltiita ympäristön häiriöille ja itse järjestelmästä aiheutuvalle kohinalle. Tämän takia ne pystyvät suorittamaan vain rajoitetun määrän laskutoimituksia, ennen kuin kohina alkaa häiritä tuloksia. Toiseksi nykyisissä laitteistoissa on hyvin rajallinen määrä kubitteja – tyypillisesti kymmenistä muutamaan sataan. Myös tämä rajoittaa merkittävästi sitä, kuinka suuria ja monimutkaisia ongelmia ne voivat ratkaista. Lisäksi kubittien välinen kytkettyvyys on hyvin rajallista, mikä voi rajoittaa algoritmien tehokasta hyödyntämistä.

Algoritmit nyt

Vaikka joidenkin algoritmien, kuten Shorin algoritmin, on teoreettisesti todistettu tarjoavan eksponentiaalisia nopeusetuja, niiden käyttö ei ole mahdollista reaalia maailman ongelmien ratkaisemisessa, vaan sitä varten tarvitaan huomattavasti kehittyneempiä laitteistoja. Tutkijat keskustelevat kuitenkin parhaillaan siitä, onko olemassa varhaisen vaiheen algoritmeja, jotka voisivat tarjota jotain etuja NISQ-laitteistolla vai pitääkö meidän odottaa vikasietoista kvanttietokoneita.

Ohjelmistotyökalut nyt

Kvanttiohjelmistoympäristö on tässä vaiheessa suunniteltu pääasiassa tutkijoille ja kvanttiasiantuntijoille. Vaikka ohjelmistokehityspaketit (SDK:t), kuten Qiskit (IBM) ja Cirq (Google), tarjoavat ohjelmistokehittäjille tutun kielen ja käytölliittymän kvanttiohjelmistojen kehittämiseen, algoritmien suunnittelu vaatii edelleen porttitason ymmärrystä. Näin ollen kehittäjillä on oltava peruskäsitys kvanttimekaniikasta, jotta he voivat työskennellä näiden työkalujen kanssa.

Klassisilla tietokoneilla toimivat simulaattorit ovat tässä vaiheessa ratkaisevan tärkeitä kvanttialgoritmien testaamisessa, koska kvanttilaitteistojen saatavuus on rajallinen ja laitteet ovat häiriöalttiita. Ohjelmistokehityspaketteihin on ohjelmoitu virheiden lieventämistyökaluja, mutta todellinen virheenkorjaus on edelleen tutkimusasteella.

Osaaminen nyt

Yksi NISQ-aikakauden merkittävimmistä haasteista on ammattitaitoisen kvanttialan työvoiman löytäminen. Vaikka yliopistot pyrkivät lisäämään kvantti-insinöörien ja -tutkijoiden kouluttamista ja varhaisvaiheen omaksujat ovat alkaneet palkata kvanttiasiantuntijoita, osaamisvaje on edelleen merkittävä. Oppimis- ja kokeiluhaluisten yritysten on tärkeää palkata asiantuntijoita, joilla on asiantuntemusta kvanttialgoritmeista ja ohjelmistokehityksestä, tai sitten niiden on etsittävä sopiva yhteistyökumppani. Lisäksi on olennaisen tärkeää kouluttaa nykyisiä työntekijöitä ja johtajia, jotta he ymmärtävät kvanttilaskennan ainutlaatuiset toimintaperiaatteet ja mahdollisuudet.

Ekosysteemit ja toimitusketjut nyt

Nykyinen kvanttiekosysteemi on hyvin hajanainen, sillä eri yritykset lähestyvät kvanttilaitteistojen hyödyntämistä eri tavoin (katso eri modaliteetit luvussa 2). Vaikka yhteistyö tutkimuksen, teollisuuden ja julkisen sektorin välillä lisääntyy, kvanttilaitteistojen ja -komponenttien toimitusketjuissa on paljon kehitettävää. Vahvojen toimitusketjujen luominen on ratkaisevan tärkeää, jotta tuotantoa voidaan kasvattaa ja kaupallistaa laajemmin kvanttitekniikan kehittyessä.

Lähiajan kehitys

Tulevina vuosina näemme todennäköisesti kubittien määrän kasvavan NISQ-järjestelmissä. Samalla siirrymme asteittain vikasietoiseen laskentaan, jota kutsutaan joskus myös varhaiseksi vikasietoisuudeksi. Siirtymän myötä kvanttietokoneissa esiintyy vähemmän virheitä laskutoimitusten aikana, mikä lisää niiden laskentapasiteettia, kun varsinaisiin laskutoimituksiin on käytettävissä enemmän loogisia kubitteja. Skaalautuvuus säilyy kuitenkin edelleen merkittävänä haasteena, mikä rajoittaa kvanttietokoneiden soveltuvuutta laajamittaisiin ongelmiin.

Painopisteet ja käytäntö lyhyellä aikavälillä

Kvanttitietokoneisiin liittyy edelleen erilaisia rajoitteita, joten niitä käytetään yhdessä klassisten järjestelmien kanssa hybridinä. Kvanttitietokoneet käsittelevät ongelman tiettyjä osia – erityisesti niitä, joiden käsittelyssä ne tarjoavat merkittäviä etuja – kun taas klassiset tietokoneet hoitavat suurimman osan tehtävistä, koska ne soveltuvat edelleen paremmin useimpiin käyttötarkoituksiin. Tämä hybridimalli on avainasemassa, kun kvanttilaskenta otetaan käyttöön käytännön liiketoimintaympäristöissä.

Tässä vaiheessa siirrytään kokeiluista todellisiin liiketoimintasovelluksiin. Hybridijärjestelmät osoittavat arvonsa niillä tietyillä aloilla, joilla kvanttitietokoneita käytetään ratkaisemaan niiden vahvuuksille sopivia osaongelmia. Kvanttijärjestelmien rajallinen skaalautuvuus rajaa kuitenkin niiden käytön kohdennettuihin, erikoistuneisiin sovelluksiin.

Laitteistot (ja niiden rajoitukset) lyhyellä aikavälillä

Kun kvanttilaitteistot kehittyvät, kilpailu kvanttilaskennan eri paradigmojen välillä todennäköisesti kiihtyy. Kullakin näistä paradigmoista on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, ja on epätodennäköistä, että mikään niistä nousisi selkeäksi voittajaksi ilman radikaalia läpimurtoa tietyssä kubittiteknologiassa. Jotkin järjestelmät voidaan luokitella kehittyneiksi NISQ-koneiksi, joissa on enemmän kubitteja mutta korkeampi virhetaso. Toiset taas asettavat etusijalle virhetason pienentämisen (kubittien määrän kustannuksella) pyrkien varhaiseen vikasietoiseen laskentaan. Joka tapauksessa näihin varhaisiin järjestelmiin liittyy edelleen merkittäviä laitteistorajoituksia:

- **Rajallinen kubittien skaalaus**
- **Tiedonsiirron pullonkaulat**
- **Kalliit ja vaikeasti saatavilla olevat laitteistot**

Vaikka kubittien määrän odotetaan kasvavan, loogisten kubittien luominen vaatii edelleen paljon fyysisiä kubitteja, mikä rajoittaa yleistä laskentatehoa. Suurinta osaa kubiteista käytetään virheenkorjaukseen laskennan sijasta. Lisäksi tiedonsiirron pullonkaulat ovat merkittävä haaste. Tietojen lataaminen kvanttitietokoneisiin ja tulosten lukeminen takaisin klassisiin järjestelmiin voi olla aikaa vievää ja aiheuttaa ylimääräistä viivettä. Hybridijärjestelmissä tämä jatkuva tiedonsiirto kumoaa osan laskennallisesta nopeusedusta. Varhaiset vikasietoiset järjestelmät ovat myös todennäköisesti kalliita ja vaativat pitkälle erikoistunutta infrastruktuuria, kuten kryogeenistä jäähdytystä, minkä vuoksi ne eivät ole monien saatavilla.

Algoritmit lyhyellä aikavälillä

Lyhyellä aikavälillä kvanttialgoritmeissa on odotettavissa edistystä erityisesti seuraavilla osa-alueilla:

- **Heuristiset algoritmit (ks. tietoruutu)**
- **Uudet alakohtaiset algoritmit**
- **Kvantti-inspiroituneet klassiset algoritmit**

Lähitulevaisuudessa on ratkaisevan tärkeää kehittää kvanttialgoritmeja, jotka on räätälöity alakohtaisiin käyttötapauksiin (esim. rahoitus-, terveydenhuolto- tai logistiikka-alalle). Näiden algoritmien on tarjottava selkeitä, mitattavissa olevia hyötyjä perinteisiin menetelmiin verrattuna, jotta yritykset voivat perustella investoinnit kvanttilaskentaan. Tällä hetkellä suurin osa algoritmeista on vielä kokeellisia tai teoreettisia, ja tarvitaan lisää testausta, ennen kuin ne voidaan saada laajasti käyttöön teollisuudessa.

Kvanttialgoritmien kehittyessä käynnissä on myös rinnakkainen kilpailu kvanttitietoa hyödyntävien klassisten algoritmien kehittämiseksi. Nämä klassiset algoritmit pyrkivät jäljittelemään kvanttialgoritmien rakennetta ja parantavat usein klassista suorituskykyä odottamattomilla tavoilla. Tätä klassisten ja kvanttialgoritmien välistä kilpailua voidaan pitää myönteisenä yritysten kannalta, sillä tavoitteena on viime kädessä tehokkuuden parantaminen käytetystä teknologiasta riippumatta.

OVATKO HEURISTISET ALGORITMIT AVAIN LÄHITULEVAISUUDEN KVANTTIETUUN?

Heuristiset kvanttialgoritmit (esim. VQE, QAOA, kvanttiannelointi) on suunniteltu tuottamaan kvanttietokoneilla likimääräisiä ratkaisuja matemaattisesti todistettujen optimaalisten tulosten sijaan. Nämä algoritmit ovat käyttökelpoisia monimutkaisissa ongelmissa, joissa tarkka ratkaisu on epäkäytännöllinen. Vaikka termit ”heuristinen algoritmi” ja ”NISQ-algoritmi” eivät ole synonyymejä, ne kulkevat usein käsi kädessä kvanttilaskennan nykyisessä kentässä.

Heuristiset algoritmit ovat usein iteratiivisia eli ne tarkentavat ratkaisua toistuvasti, kunnes se täyttää tietyt kriteerit tai saavuttaa tyydyttävän suoritustason. Ne eivät takaa absoluuttisesti parhaan ratkaisun löytymistä, vaan tähtäävät ”riittävän hyviin” käytännöllisiin ratkaisuihin hyväksyttävissä aikarajoissa.

Toistaiseksi yksikään heuristinen kvanttialgoritmi ei ole osoittautunut selvästi paremmaksi kuin parhaat klassiset algoritmit. Asiantuntijat ovat eri mieltä siitä, voivatko NISQ-tietokoneet saavuttaa kvanttiedun (*quantum advantage*) vai tarvitaanko kehittyneempää laitteistoa. Skeptikkojen näkemys on, että NISQ-järjestelmien kohina ja rajoitukset saattavat estää näitä algoritmeja päihittämästä klassisia menetelmiä. Puolestapuhujat sen sijaan huomauttavat, että heuristiset algoritmit, aivan kuten klassisessa tekoälyssä käytetyt algoritmit, voivat silti olla arvokkaita tarkkarajaisissa ongelmissa, vaikka niiden paremmuutta ei pystyttäisi teoreettisesti todistamaan. Epäilijöiden vakuuttamiseksi yritysten ja tutkijoiden on tehtävä laajoja kokeiluja, joilla osoitetaan, että nämä algoritmit pystyvät päihittämään perinteiset lähestymistavat.

Ohjelmistotyökalut lyhyellä aikavälillä

Kvanttilaskennan ohjelmistotyökalujen kehityksen odotetaan etenevän merkittävästi tulevina vuosina, kun helppokäyttöisempien, tehokkaampien ja käytännöllisempien kvanttilaskennan ratkaisujen kysyntä kasvaa.

- **Paremmat kehittäjien ohjelmistokehityspaketit ja -kehukset**
- **Kvanttialgoritmikirjastot**
- **Kvanttiklassiset hybridiratkaisut**

Kvanttiohjelmistoympäristöstä tulee entistä kehittyneempi ja helppokäyttöisempi. Ohjelmistokehityspaketit (SDK:t) mahdollistavat hybridityönkulut, joissa kvanttietokoneet käsittelevät ongelman kvanttinopeudesta hyötyviä osia ja klassiset järjestelmät hoitavat suurimman osan muista tehtävistä. Ristiin toimivat ohjelmistokehityspaketit mahdollistavat kehittäjille koodin kirjoittamisen siten, että se voidaan ajaa useissa eri kvanttilaskennan laiteympäristöissä vain vähäisin muutoksin.

Korkeamman tason kirjastot, jotka on räätälöity tietyille toimialoille, kuten rahoitus- tai terveydenhuoltoalalle, tulevat todennäköisesti saataville tässä vaiheessa, jolloin kvanttilaskennasta tulee helpommin lähestyttävää myös muille kuin asiantuntijoille. Myös tekoälyä hyödyntäviä koodittomia (*no-code*) ja matalan koodin (*low-code*) alustoja voi tulla markkinoille. Tällöin myös käyttäjät, joiden kvanttiosaaminen on vähäistä, voivat kokeilla kvanttilaskentaa omilla aloillaan.

Osaaminen lyhyellä aikavälillä

Yksi yritysten tärkeimmistä haasteista on sellaisen ammattitaitoisen työvoiman kartuttaminen, joka pystyy kehittämään, ottamaan käyttöön ja ylläpitämään varhaisen vaiheen vikasietoisia kvanttijärjestelmiä. Alalle on koulutettava asiantuntijoita, jotka ymmärtävät kvanttilaitteistoja ja -ohjelmistoja ja osaavat yhdistää klassiset ja kvanttijärjestelmät hybridiarkkitehtuureiksi. Kvanttilaskennan osajien koulutusputki on vielä suhteellisen pieni, joten varhaisvaiheen organisaatioiden on itse investoitava kvanttikoulutusohjelmiin ja työvoiman kehittämiseen.

Ekosysteemit ja toimitusketjut lyhyellä aikavälillä

Kun kvanttilaitteistot kehittyvät, suuret teknologiayritykset alkavat todennäköisesti ostaa lupaavimpia kvanttitekniologiaa kehittäviä startup-yrityksiä. Tämä johtaisi laajempiin kvanttiekosysteemeihin, jotka koostuvat laitteistovalmistajista, ohjelmistokehittäjistä, tutkimuslaitoksista ja alan kumppanuuksista. Tällaiset ekosysteemit tukevat kvanttitekniologian laajempaa kaupallistamista ja edistävät standardoitujen kvanttityökalujen luomista yrityskäyttöön.

Keskipitkän aikavälin tulevaisuus

Painopisteet ja käytäntö keskipitkällä aikavälillä

Tämä keskipitkän aikavälin vaihe edustaa kvanttilaskennan laajenevaa kaupallista käyttöönottoa. Ajanjakson aikana aidosti hyödyllisillä sovelluksilla aletaan ratkaista monimutkaisia ongelmia, joita aiemmin pidettiin ratkaisemattomina. Kvanttilaskenta alkaa vaikuttaa laajasti lukuisiin teollisuudenaloihin ja maailmanlaajuisiin järjestelmiin:

- **suurempien ja monimutkaisempien kvanttisysteemien simulointi**
- **suurten optimointiongelmien ratkaiseminen eri toimialoilla**
- **kvanttikoneoppimisen käyttöönotto (esim. hahmontunnistus ja ennakoiva mallintaminen)**
- **kvanttiturvallinen salaus hyväksytään teollisuuden normina**

Laitteisto keskipitkällä aikavälillä

Tämän vikasietoisen kvanttilaskennan aikakauden laitteistoa kuvataan yleisesti lyhenteellä FTQC (*Fault-Tolerant Quantum Computing*). Vaikka vaadittavia virsantapylväitä ei ole selkeästi määriteltä, tämän aikakauden laitteistojen odotetaan yleisesti skaalautuvan miljooniin fyysisiin kubitteihin virhetason pysyessä silti erittäin alhaisena. Myös koherenssiaikoja (kuinka kauan kubitit voivat säilyttää kvanttitilansa) on parannettava huomattavasti.

Vaikka nämä tavoitteet saavutettaisiin, joitakin rajoituksia jää todennäköisesti edelleen jäljelle:

- **virheenkorjaus vaatii paljon resursseja (suuri laskennan lisäkustannus)**
- **monimutkainen ja kallis fyysinen infrastruktuuri**
- **valmistus- ja materiaalivirheet**
- **moniprosessorikubitien välinen tiedonsiirto**
- **kvanttimuisti, QRAM (katso tietoruutu)**

Vaikka vikasietoisuus on edistynyt, loogisten kubitien ylläpitäminen vaatii edelleen huomattavan määrän fyysisiä kubitteja. Järjestelmät pystyvät käsittelemään suurempaa määrää kubitteja, mutta skaalauksen miljooniin loogisiin kubitteihin odotetaan aiheuttavan haasteita. Lisäksi kvanttietokoneiden, erityisesti suprajohtavia kubitteja tai ioniloukkuja käyttävien koneiden, odotetaan edelleen vaativan monimutkaista infrastruktuuria, kuten kryogeenisiä jäähdytysjärjestelmiä ja erittäin stabiileja ympäristöjä. Tällaisen infrastruktuurin ylläpito on kallista ja vaikeaa, mikä rajoittaa kvanttietokoneiden saatavuutta ja skaalautuvuutta. Lisäksi miljoonia kubitteja sisältävien kvanttiprosessoreiden rakentaminen edellyttää erittäin tarkkoja valmistusprosesseja, ja mahdolliset materiaalien tai suunnittelun puutteet voivat aiheuttaa virheitä. Tasaisen laadun ylläpitäminen suurissa mittakaavoissa on vaikeaa.

Nopean ja luotettavan kubitien välisen tiedonsiirron varmistaminen suurissa kvanttijärjestelmissä on todennäköisesti edelleen tekninen haaste. Kvanttitiedon on liikuttava tehokkaasti sekä prosessorin kubitien välillä, että useiden prosessorien välillä laajemmassa verkossa, mikä voi aiheuttaa pullonkauloja. Kvanttimuistin (QRAM) käytännön toteutus on hyvin epävarmaa, sillä sen rakentamiseen käyttökelpoisessa mittakaavassa liittyy merkittäviä teknisiä haasteita esimerkiksi koherenssin ylläpidon, resurssivaatimusten ja virheenkorjauksen osalta¹⁸.

ONKO TULEVAISUUDEN KVANTTITIETOKONEISSA MUISTI?

Kvanttimuisti QRAM (Quantum Random Access Memory) on teoreettinen käsite, jota ei ole vielä toteutettu laajamittaisesti käytännössä. Sen tavoitteena on tarjota kvanttietokoneille kyky tallentaa ja käyttää tietoja superpositiossa. Toisin kuin klassinen RAM-muisti, joka hakee tietoja yhdestä osoitteesta kerrallaan, kvanttimuisti voisi teoriassa käyttää useita muistiosoitteita samanaikaisesti, mikä parantaisi huomattavasti kvanttialgoritmien tehokkuutta suurten tietokokonaisuuksien käsittelyssä.

Kvanttimuisti on erityisen tärkeä tietyille kvanttialgoritmeille, kuten koneoppimis- ja tietokantahakualgoritmeille, joissa rinnakkainen tietojen käyttö tarjoaa merkittävän edun. Monet näistä algoritmeista olettavat, että algoritmin syötteenä käytetään kvanttimuistia (tai vastaavaa pysyvää kvanttitilaa). Tämä on tällä hetkellä mahdotonta, koska kvanttimuistia ei ole olemassa ja kvanttitilat romahtavat mittauksen jälkeen.

Algoritmit keskipitkällä aikavälillä

Kvanttialgoritmit kehittyvät edelleen keskipitkällä aikavälillä, mutta kehitykseen liittyy muutamia keskeisiä epävarmuustekijöitä. Toistaiseksi on epäselvää, kehitetäänkö kvanttilaskennassa pitkälle erikoistuneita algoritmeja, jotka on räätälöity tiettyihin ongelmiin, vai syntyykö yleiskäyttöisiä algoritmeja, joita voidaan soveltaa laajalti eri toimialoilla. Polynomisten ja heurististen algoritmien kilpailukyky on myös avoin kysymys. Jos kvanttioperaatioiden aiheuttama yleiskustannus pysyy korkeana, hyvin optimoidut klassiset algoritmit saattavat edelleen lyödä monet näistä kvanttialgoritmeista.

Ohjelmistotyökalut keskipitkällä aikavälillä

Ohjelmistotyökalujen odotetaan kehittyvän merkittävästi ja tarjoavan käyttäjäystävällisiä työkaluja ja alustoja, jotka tekevät kvanttilaskennasta entistä helpommin lähestyttävää yrityksille. Kvanttiohjelmistokehityspaketit (SDK:t) abstrahoidaan aiempaa pidemmälle, ja ne tarjoavat korkean tason kvanttiohjelmointirajapintoja, joiden ansiosta käyttäjät voivat keskittyä liiketoimintaongelmien ratkaisemiseen kvanttilaitteistojen teknisten yksityiskohtien sijasta. Kvanttilaskenta-alustat tarjoavat todennäköisesti alakohtaisia ohjelmistokehityspaketteja ja työkaluja, joiden avulla käyttäjät voivat suorittaa kvantti-sovelluksia kirjoittamatta lainkaan kvanttikoodia.

Kvanttipalveluista (QAAS, *Quantum-as-a-service*) tulee todennäköisesti normi, ja yritykset hyödyntävät kvanttitehoa reaaliaikaisessa päätöksenteossa, optimoinnissa ja data-analyysissa. Kvanttiresursseja jaetaan dynaamisesti eri pilvialustoilla, jolloin kvanttilaskennasta tulee yhtä yleistä ja helposti saatavilla olevaa kuin nykyiset pilvipalvelut.

Osaaminen keskipitkällä aikavälillä

Kun kvanttilaskennasta tulee käytännönläheisempää, myös osaamisympäristö todennäköisesti muuttuu. Käynnissä on keskustelu siitä, kuinka paljon kvanttiasiantuntemusta tulevaisuuden ohjelmistokehittäjät tarvitsevat. Koodittoman ja matalakoodin kehityksen kaltaiset suuntaukset ovat yleistymässä, joten tulevaisuuden kvanttilaskenta-alustat eivät välttämättä edellytä jokaiselta kehittäjältä syvällistä kvanttimekaniikan tuntemusta. Sen sijaan korkean tason kehitystyökalut voisivat tehdä kvanttilaskennasta helpommin lähestyttävää laajemmalle ammattilaisten joukolle.

Toinen kehityssuuntaus minkä odotetaan kasvavan, liittyy siihen, että kvanttilaskennan integroiminen nykyisiin työkultuihin on olennaisen tärkeää teknologian käytännön hyödyntämisen kannalta. Siten asiantuntijoiden tulee olla äärimmäisen hyviä laajojen, alojen yli menevien, kokonaisuuksien hahmottajia. Osaajien on mahdollisesti oltava kvanttiasiantuntijoita, ohjelmistosuunnittelijoita ja toimiala-asiantuntijoita esimerkiksi terveydenhuollon, rahoituksen tai logistiikan alalla.

Ekosysteemi ja toimitusketju keskipitkällä aikavälillä

Keskeinen epävarmuus liittyy siihen, nouseeko jokin ratkaisu voittajaksi. Läpimurrot eri modaaliteeteissa, kubittiteknologiassa (esim. suprajohtava vs. neutraalit atomit) voivat olla ratkaisevia tekijöitä kilpailussa voittavasta ekosysteemistä. Jos jokin toimija on lyönyt vetoa väärän hevosensa puolesta, se voi olla pakotettu luopumaan pelistä. Toisaalta toiset toimijat voivat nousta kubittiteknologian yläpuolelle ja kehittyä kokonaan alustarajat ylittäviksi toimijoiksi.

Pitkän aikavälin tulevaisuus

Kvanttilaskennan perimmäisenä tavoitteena on saavuttaa laajamittaisen vika-sietoisuuden vaihe, jossa koneet voivat suorittaa laajamittaisia virhekorjattuja kvanttilaskuja ilman ympäristöstä aiheutuvan häiriön aiheuttamia rajoituksia. Kun tämä teknologiataso saavutetaan, se avaa ovet uusille keksinnöille, mullistaa kokonaisia toimialoja ja luo pohjan tietojenkäsittelyn tulevaisuudelle (katso luvut 5 ja 6).

Laitteistojen, algoritmien ja ohjelmistojen kehityksen pitkälle tulevaisuuteen on haastavaa. Kun esimerkiksi klassiset tietokoneet keksittiin, kukaan ei luultavasti osannut aavistaa, miten tietokoneita hyödynnetään 2020-luvulla. Epävarmuutta aiheuttavat myös muut tekijät, kuten geopolitiittiset muutokset ja erityisesti tekoälyn kehitys. Nämä tekijät voivat vaikuttaa merkittävästi kvanttilaskennan kehitysvauhtiin ja -suuntaan. Geopolitiittinen kilpailu saattaa vauhdittaa kvanttititeknologian investointeja ja läpimurtoja, kun taas tekoälyn kehitys voi auttaa optimoimaan kvanttialgoritmeja, löytämään uusia sovelluksia tai parantamaan kvanttivirheenkorjaustekniikoita.

Yhteenveto – milloin se on valmis?

Vaikka kvanttilaskennan saaminen laajamittaiseen liiketoimintakäyttöön vaatii vielä aikaa ja suurten odotusten täyttämiseen liittyy edelleen merkittäviä haasteita, ala etenee nopeasti. Sekä julkinen että yksityinen sektori investoivat alaan voimakkaasti, ja viimeaikaiset läpimurrot ovat vahvistaneet luottamusta siihen, että käytännön sovelluksia on jo näköpiirissä. Valmiuden merkkien ymmärtäminen ja valmistautuminen on ratkaisevan tärkeää kaikille, jotka haluavat olla jatkossa innovaation kärjessä.

5/ Mitkä toimialat ovat kypsiä kvanttimurrokselle?

Yritysjohdon on olennaista keskittyä kvanttilaskennan ongelmanratkaisupotentiaaliin sen sijaan, että arvuutellaan, mitkä alat kokevat muutoksia ensimmäisenä. Kvanttilaskennalla voi olla monenlaisia hyötyjä, ja sen vaikutukset vaihtelevat eri toimialoilla. Esimerkiksi logistiikka-, valmistus- ja rahoitusaloilla optimointihaasteet ovat keskeisiä. Joillakin aloilla kvanttilaskenta saattaa parantaa tehokkuutta vain hieman. Toisilla aloilla se voi mahdollistaa mullistavia muutoksia, jotka johtavat kokonaan uuteen tapaan harjoittaa liiketoimintaa.

Kvanttilaskenta lupaa myös mullistaa alat, jotka ovat riippuvaisia kvanttimekaniikkaan perustuvista ilmiöistä, kuten materiaalitiede ja lääketiede. Edistysaskeleet voivat johtaa löytöihin ja innovaatioihin, jotka muokkaavat kokonaisia aloja. Kilpailuedun saavat todennäköisesti yritykset, jotka ottavat kvanttilaskennan käyttöön varhaisessa vaiheessa. Esimerkiksi finanssialan kaltaisilla laskentaintensiivisillä aloilla jopa tilapäisestä kvanttiedusta voi olla merkittävää hyötyä.

Yritysjohdon on syytä tarkastella kvanttilaskennan liiketoimintamahdollisuuksia ja -riskejä ainakin kolmella aikajänteellä: lyhyellä, keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä. Kussakin vaiheessa kvanttilaskennan rooli ja merkitys on erilainen eri toimialoilla.

- ✓ **Optimointimahdollisuudet**
- ✓ **Kvanttimekaniikkaan perustuvat läpimurrot**
- ✓ **Kolmen aikahorisontin ajattelutavan omaksuminen mahdollisuuksien jäsentämiseksi**

Kvanttilaskennan kehityksen ennakointi auttaa meitä valmistautumaan sen mahdollisesti tuomiin muutoksiin. Tässä luvussa tarkastelemme sen vaikutuksia sekä teollisuudenaloihin että laajemmin yhteiskuntaan käyttäen samaa kolmea aikajännettä, joita on käytetty aiemmin tässä kirjassa kvanttiteknologian ja kvanttilaskennan kehityksen arvioinnissa.

Miten ennakointi voi auttaa tunnistamaan kvanttimahdollisuuksia?

Ennakointi tarjoaa arvokkaan näkökulman tulevaisuuden liiketoimintamaiseman tarkasteluun erityisesti kvanttilaskennan kaltaisten monimutkaisten ja mullistavien teknologioiden yhteydessä. Rakentamalla järjestelmällisesti mahdollisia teknologiaskenaarioita, tunnistamalla kehityksessä olevia toimialatrendejä ja analysoimalla, miten nämä trendit risteävät kvanttilaskennan tarjoamien mahdollisuuksien kanssa, voimme saada arvokasta tietoa liiketoiminnan mahdollisuuksista ja haasteista.

Verkottunut ennakointi sopii hyvin kvanttilaskentaan, koska epävarmuuden ja monimutkaisuuden vuoksi on haastavaa määrittää, mikä siinä on liiketoiminnallisesti merkityksellistä. Tämä lähestymistapa, jossa hyödynnetään erilaisten sidosryhmien kollektiivista älyä, on toiminut pohjana esittelemillemme ”tulevaisuustutkille” (katso Kuvat 5 ja 6). Kokosimme nämä tutkat yhdessä rahoitus- ja lääketeollisuuden yritysten ja muiden toimijoiden kanssa osana tutkimusta. Ne tarjoavat dynaamisen kehityksen kehittyvän kvanttimaailman ymmärtämiseksi.

Näiden tutkien lähestymistapa eroaa jossain määrin yleisemmästä tulevaisuustutkien käytöstä. Tyypillisesti tulevaisuustutkat tunnistavat signaaleja laajasta joukosta tulevia teknologioita ja trendejä pääasiassa kirjallisuustutkimusten perusteella. Tässä tapauksessa olemme kuitenkin keskittyneet tutkimaan syvällisesti yhtä nousevaa teknologiaa – kvanttilaskentaa – useissa ulottuvuuksissa ja erittäin yksityiskohtaisesti. Kvanttilaskennan uutuuden vuoksi olemassa oleva tieto keskittyy usein teknisiin näkökohtiin ja antaa näin vain vähän tietoa mahdollisista muutoksista ja laajemmista seurauksista tietyillä toimialoilla. Tässä eri alojen tuleviin kehityskulkuihin liittyvien signaalien tunnistamiseen on tarvittu myös mielikuvitusta.

Nämä tutkat ovat kehittyviä kuvia, jotka muuttuvat jatkuvasti uusien näkemysten perusteella ja kannustavat jatkuvaan vuoropuheluun. Toivomme, että nämä tutkat inspiroivat yritystäsi pohtimaan luovasti tämän teknologian tarjoamia mahdollisuuksia. Ne voivat toimia perustana yrityksesi tulevaisuuden tutkimusvalmiuksien ja -strategioiden kehittämiseksi ja auttaa tunnistamaan nousevia suuntauksia ja mahdollisia murroksia. Todellinen arvo ei piile yksittäisissä signaaleissa vaan niistä johdettavissa olevien laajempien kehityskulkujen ymmärtämisessä.

Aloitetaan tarkastelemalla rahoituspalvelualaa ja kvanttilaskennan mahdollisia vaikutuksia sen kehitykseen. Nostamme seuraavana tutkalta esiin joitakin signaaleja, jotka havainnollistavat keskeisiä trendejä ja kehityskulkuja. Rahoitus-

alan jälkeen tarkastelemme samalla tavalla lääketeollisuutta ja lopuksi tarkastellaan kvanttilaskentaa energiasiirtymän ja kiertotalouden katalyyttinä.

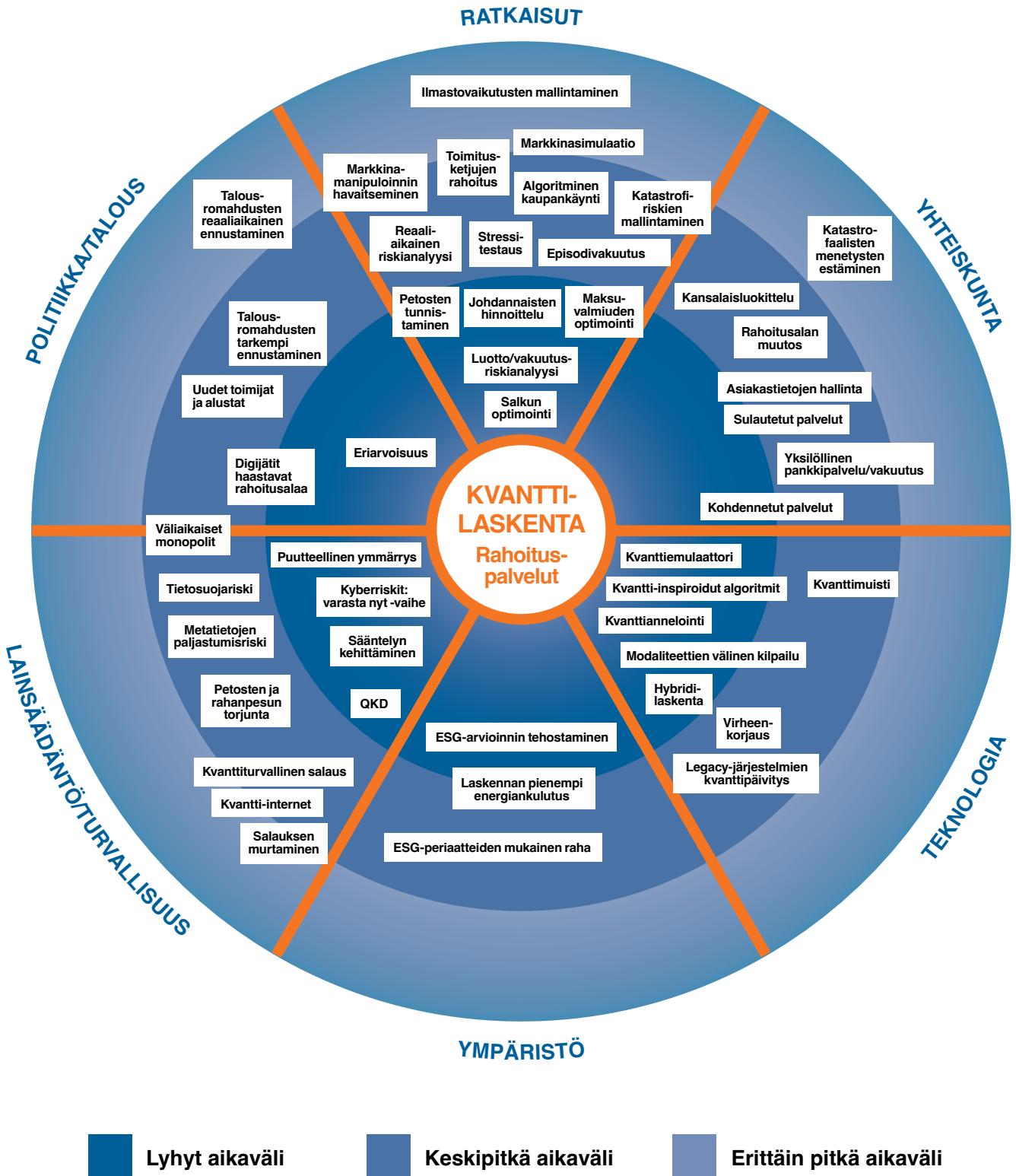
Rahoituspalvelujen kehitys kolmella kvanttiaikajänteellä

Rahoituspalveluissa kvanttilaskenta tarjoaa tulevaisuudessa mullistavan edun, sillä se voi parantaa huomattavasti optimoinnin ja stokastisen mallintamisen kykyä. Toisin kuin klassinen laskenta, kvanttialgoritmit pystyvät käsittelemään todennäköisyyslaskelmia ja samanaikaisesti arvioimaan useita skenaarioita. Tämä on erityisen arvokasta rahoituslaskennalla, jossa tilastollisia malleja ja algoritmeja käytetään usein ennustamaan omaisuuserien hintoja, tuottoja ja riskitekijöitä, jotka kehittyvät satunnaisesti ajan mittaan. Mitä monimutkaisempia laskutoimitukset ovat, sitä paremmin kvanttilaskennan vahvuudet käyvät selviksi.

Kvanttilaskennan avulla on mahdollista nopeuttaa kombinatorista optimointia, jolloin rahoitusmalleissa voidaan ottaa huomioon laajempi joukko muuttujia ja tuottaa globaaleja ratkaisuja paikallisten sijasta. Vaikka kvanttisimulaatioiden merkitys saattaa olla pienempi rahoituslaskennalla kuin esimerkiksi molekyylien mallinnuksessa lääketeollisuudessa tai lentokoneiden virtausdynamiikan simuloinnissa, kvanttilaskennan huomattavaa potentiaalia mullistaa markkinasimulaatiot ja reaaliaikaiset optimoinnit ei sovi ohittaa. Koneoppimiseen integroituna kvanttilaskenta voi myös parantaa ennakoivaa analytiikkaa ja poikkeamien havaitsemista. Tämä voi parantaa päätöksentekoa rahoituslaskennalla tavoilla, joihin klassisella laskennalla ei pystytä¹⁹. Tarkempia tietoja kvanttilaskentaan soveltuvista ongelmatyypeistä löydät luvusta 3 (Taulukko 4).

Tulevaisuustutka (Kuva 5) esittelee signaaleja, jotka havainnollistavat kvanttilaskennan mahdollisia vaikutuksia eri ulottuvuuksissa – yhteiskunnan, ympäristön, lainsäädännön/turvallisuuden ja politiikan/talouden tasolla – mahdollisten käyttötapauksien lisäksi. Siinä käytetään samoja aikahorisontteja kuin muissakin tämän kirjan osioissa: lyhyttä, keskipitkää sekä kolmantena ulommaisella kehällä yhdistelmää tulevaisuudesta pitkän ja hyvin pitkän aikavälin tulevaisuudesta. Yksittäisten signaalien tarkka paikka tutkassa ei kuitenkaan ole tässä yhteydessä kriittistä. Tavoitteena ei ole tehdä tarkkoja ennusteita vaan tuoda esiin erilaisia mahdollisia kehityspolkuja ja kannustaa strategiseen ajatteluun.

On tärkeää huomata, että teknologiat ja sovellukset kehittyvät todennäköisesti kvanttietokoneiden ja -algoritmien kehittymisen rinnalla. Esimerkiksi portfolio-optimointi voidaan nykyään tehdä kvantti-inspiroiduilla algoritmeilla, mutta tulevaisuudessa tämä voidaan tehdä oikeilla kvanttietokoneilla. Kvanttietokoneiden kehittyessä voimme odottaa niiltä entistä suurempaa tarkkuutta, kykyä käsitellä yhä useampia muuttujia ja lähes reaaliaikaista toimintaa. Kannattaa siis pitää mielessä, että tässä tutkassa mainitut signaalit ovat yhden ennakointiharjoituksen tulos ja perustuvat nykyisiin näkymiin. Signaalien sijoittelu tutkalla sekä ajallisesti että eri ulottuvuuksiin määräytyy sen mukaan, millaisia kehityksen näkökulmia kukin signaali pyrkii välittämään.



Kuva 5. Esimerkki tulevaisuustutkasta, joka esittelee kvanttilaskennan roolia rahoituspalveluissa.

Rahoituspalvelut nyt ja lyhyellä aikavälillä

Rahoituspalvelualalla monet edelläkävijäyritykset, erityisesti suuret pankit, ovat jo perustaneet omia kvanttilaskentatiimejä. Nämä yritykset tutkivat aktiivisesti käyttötapauksia liittyen esimerkiksi hiilijalanjäljen arviointiin, palveluominaisuuksien optimointiin, luottoriskianalyysiin, salkun optimointiin ja kvanttikoneoppimisen mahdollisuuksiin²⁰. Rahoitusala on juuri sellainen toimiala, jolla pienetkin parannukset optimoinnissa voivat johtaa merkittäviin hyötyihin, koska toiminnot ovat maailmanlaajuisesti skaalautuvia²¹.

Lähtöleveysuudessa kvanttialgoritmit voivat mahdollisesti parantaa merkittävästi riskinarviointia luotto- ja vakuutuslalla. Nämä alat, joihin liittyy usein monimutkaisia optimointiongelmia, soveltuvat hyvin kvanttietokoneiden laskennallisten etujen hyödyntämiseen. Kvanttialgoritmeja voitaisiin käyttää esimerkiksi luottotappioiden tehokkaampaan mallintamiseen ja ennustamiseen sekä vakuutuskorvausten todennäköisyyden arviointiin. Kvanttipohjaiset Monte Carlo -simuloinnit voisivat tarjota merkittäviä parannuksia näillä aloilla mahdollistaen monimutkaisten riskiskenaarioiden tarkemman ja tehokkaamman analysoinnin pienemmillä laskentaresursseilla. Rahoituslaitokset voisivat tehdä tietoon perustuvia päätöksiä lainojen hyväksymisestä ja vakuutusten hinnoittelusta hyödyntämällä parempia riskimalleja. Tämä voisi johtaa pääoman tehokkaampaan kohdentumiseen, pienempiin riskeihin ja mahdollisesti kilpailukykyisempiin tuotteisiin ja palveluihin asiakkaille.

Kvanttialgoritmeja sovelletaan myös ESG-sijoittamiseen, jossa se saattaa mahdollistaa entistä kehittyneemmän analyysin ja salkkujen optimoinnin ympäristöön, yhteiskuntaan ja hallintotapaan liittyvät tekijät huomioiden. Kun kvanttietokoneet ja algoritmit kehittyvät, ne pystyvät käsittelemään suurempia tietokokonaisuuksia tehokkaammin, mikä helpottaa erittäin kehittyntä ESG-mallinnusta ja auttaa sijoittajia tekemään tietoon perustuvia ja kestäviä valintoja.

Kvanttilaskenta voi myös nopeuttaa digijättien tuloa rahoituspalvelumarkkinoille. Moni nykyinen digijätti toimii jo aktiivisesti kvanttilaskennan alalla, ja niiden asiantuntemus voi antaa niille merkittävän edun kvanttiteknologiaa hyödyntävien rahoitussovellusten kehittämisessä ja käyttöönotossa. Tämä suuntaus voi johtaa merkittäviin muutoksiin rahoituslalla. Monet digijättit tarjoavat jo esimerkiksi pankkitilien lisäksi lainoja, mikä hämärtää teknologian ja rahoituksen rajoja²². Koska monet näistä yrityksistä voivat hyödyntää kvanttietokoneita innovatiivisten ja yksilöllisten rahoitustuotteiden tarjoamiseen, rahoituspalvelumarkkinoiden perinteiset rajat voivat hälvetä, mikä lisää kilpailua ja saattaa muuttaa koko alaa.

Rahoituslaitosten on otettava huomioon myös kvanttilaskennan vaikutus kyberturvallisuuteen. Koska ne käsittelevät erittäin arkaluonteisia tietoja ja hallinnoivat sopimuksia, joiden on pysyttävä muuttumattomina, erityinen huolenaihe on ”*harvest now, decrypt later*” -uhka, jossa salatut tiedot tallennetaan nyt, jotta ne voidaan myöhemmin purkaa kvanttietokoneilla. Rahoituslaitosten tulee puuttua tähän haavoittuvuuteen ennakoivasti, jotta ne voivat varmistaa järjestelmiensä ja asiakastietojensa turvallisuuden pitkällä aikavälillä. Näitä kvanttilaskennan riskejä käsitellään tarkemmin luvussa 7.

Rahoituspalvelut keskipitkällä aikavälillä

Keskipitkällä aikavälillä kvanttietokoneet voivat ylittää klassisen tietojenkäsittelyn rajoitukset ja ratkaista jopa aiemmin mahdottomina pidettyjä ongelmia. Kun loogisten kubittien määrä kasvaa merkittävästi, kvanttialgoritmit voivat mahdollistaa monimutkaisten optimointiongelmiä ratkaisemisen ennen näkemättömässä laajuudessa ja johtaa ratkaisuihin, jotka olivat aiemmin saavuttamattomissa. Simuloinnissa kvanttietokoneet voisivat mallintaa yhä monimutkaisempia ilmiöitä ja jopa mahdollistaa dynaamisten ympäristöjen reaaliaikaiset simulaatiot. Keskipitkällä aikavälillä rahoituslalle saatetaan kehittää myös kvanttitehostettuja tekoälyjärjestelmiä, joita käytetään laajamittaiseen data-analyysiin, hahmontunnistukseen ja ennakoivaan mallintamiseen.

PANKIT JA RAHOITUSLAITOKSET

Kvanttilaskenta voi mullistaa pankkialaa mahdollistamalla monimutkaisten tietoineistojen käsittelyn ja nostamalla päätöksentekoprosessit täysin uudelle tasolle. On erittäin todennäköistä, että kvanttialgoritmit päihittävät klassiset menetelmät esimerkiksi salkun optimoinnissa, hintaoptimoinnissa, ennustamisessa, riskinhallinnassa ja arbitraasissa. Tämä johtaisi nopeampiin ja tarkempiin toimintoihin, jotka tukevat dataohjautuvan päätöksenteon ja automatisoitujen järjestelmien yleistymistä. Reaaliaikainen havainnointi ja ennakoiva analytiikka voivat nopeasti muodostua uudeksi standardiksi.

Kvanttilaskenta voi myös tukea suuntausta kohti yksilöllisiä rahoituspalveluja parantamalla asiakkaiden profiloitua ja luottokelpoisuusarvioita. Kvanttilaskennan avulla tarjolle saatetaan tuoda kehittyneempiä rahoitustuotteita, mikä voi kiihdyttää pankkialan murrosta ja suosia digijättejä ja muita uudenlaisia toimijoita. Tämä kiristäisi kilpailua ja saattaisi kehittää rahoituspalveluja kohti alustapohjaisia malleja, joissa reaaliaikainen, yksilöllinen rahoitus yhdistyy saumattomasti jokapäiväiseen liiketoimintaan, ja joissa pankkien ja muiden palveluntarjoajien väliset rajat hämärtyvät.

Toimitusketjurahoitus auttaa virtaviivaistamaan kassavirtaa varmistamalla, että toimittajille maksetaan nopeasti, vaikka ostajat maksaisivat itse laskun myöhemmin²³. Kvanttilaskenta voisi viedä tämän askeleen pidemmälle optimoimalla huipputehokkaasti taloudellisten resurssien virtaamisen monimutkaisten toimitusketjuverkostojen läpi. Kvanttilaskennan avulla voisi pystyä seuraamaan ja analysoimaan transaktioita reaaliajassa, hallinnoimaan tehokkaasti likviditeettiä ja kohdentamaan varoja sinne, missä niitä eniten tarvitaan. Kvanttitekniikan kehittyessä siitä voi tulla yrityksille korvaamaton työkalu, joka parantaa toimitusketjujen joustavuutta ja reagoitokykyä.

Lisäksi kvanttilähtöinen talouden skenaariomallinnus voisi parantaa riskinhallintastrategioita ja rahoitusjärjestelmien resilienssiä epävakassa maailmantaloudessa.

I ”Rahoituksessa on pohjimmiltaan kyse optimoinnista ja luottamuksesta.”

Petri Liimatta, OP

VAKUUTUSALA

Kvanttitietokoneet voivat uudistaa vakuutusala, sillä ne mahdollistavat tarkemman riskinarvioinnin²⁴ ja hinnoittelun optimoinnin, jolloin vakuutusenantajat voivat tarjota yksilöllisempiä ja kilpailukykyisemmin hinnoiteltuja vakuutuksia. Koska kvanttilaskennalla pystytään käsittelemään valtavia tietokokonaisuuksia ja huomioimaan paljon enemmän muuttujia kuin klassisilla menetelmillä, se voisi mahdollistaa nopeammat ja tarkemmat riskilaskelmat, jolloin vakuutukset voitaisiin mukauttaa reaaliaikaisesti kehittyviin riskeihin. Lisäksi kvanttitekнологia voi parantaa petosten havaitsemista, skenaariomallinnusta ja vakuutusyhtiöiden salkunhallintaa.

Kvanttitehostetulla data-analyysillä vakuutusenantajat voisivat myös pystyä tarjoamaan asiakkailleen ennakoivia, reaaliaikaisia neuvoja riskien vähentämiseksi, jolloin heidän roolinsa muuttuisi riskien vähentäjistä riskien ennaltaehkäisyn kumppaneiksi. Esimerkiksi kyky mallintaa luonnonilmiöitä entistä tarkemmin voisi auttaa vakuutusenantajia neuvomaan asiakkaita katastrofivahinkojen minimoimisessa.

Alalla pohditaan jo, turvaavatko kvanttilaskennan varhaiset omaksujat itselleen suotuisamman riskipoolin, jolloin riskialttiimmat asiakkaat jäisivät perässä tuleville. Kvanttipohjainen reaaliaikainen riskinarviointi voisi myös nopeuttaa vakuutustuotteiden integroimista suoraan muihin palveluihin ja hämärtää näin perinteisten vakuutusenantajien ja digitaalisten palveluntarjoajien välisiä rajoja.

”Kvanttilaskenta itsessään tuo vakuutusyhtiöiden käyttöön lähes rajattoman ja hiilipäästöttömän laskentatehon. Yhdistettynä tekoälyyn ja esineiden internetiin ala kokee mullistuksen, joka on verrattavissa siihen, kun tietokoneet tulivat mukaan kuvaan.”

Heikki Lassila, LähiTapiola

SÄÄNTELYN KEHITTÄMINEN

Kun kvanttilaskenta uudistaa rahoituspalveluja, sääntelyä on kehitettävä niin, että siinä huomioidaan sekä uudet hyödyt että riskit. Tietoturvaan ja yksityisyyteen liittyvien huolenaiheiden lisäksi kvanttilaskennan nopeus ja teho tuovat mukanaan avoimuuteen ja vaatimustenmukaisuuteen liittyviä haasteita. Raportointistandardeja on todennäköisesti tiukennettava, jotta kvanttityökalujen – kuten reaaliaikaisten riskiarviointien – laillisuus ja eettisyys voidaan varmistaa.

Kvanttilaskenta voi tarjota mahdollisuuksia parantaa markkinoiden valvontaa, jolloin sääntelyviranomaiset voisivat havaita järjestelmäriskit ja mahdolliset rahoituskriisit aikaisemmin. Tämä voisi mahdollistaa ennakoivat toimenpiteet markkinoiden vakauttamiseksi ennen häiriöiden syntymistä. Kvanttitekнологiaa hyödyntävä petosten havaitseminen voisi tarjota sääntelyviranomaisille ja laitoksille nopeampia ja tarkempia välineitä petosten tunnistamiseen, kun

ne voisivat analysoida aiempaa monimutkaisempia tietokokonaisuuksia. Tämä vahvistaisi rahoitusjärjestelmän eheyttä.

Tiedon kasvava merkitys kriittisenä resurssina herättää olennaisia kysymyksiä sen omistajuudesta ja luotettavuudesta. Jotta voimme säännellä tehokkaasti kvanttipohjaista rahoitusympäristöä, meidän on ymmärrettävä alaa muokkaavia kehittyviä yhteyksiä, riippuvuuksia ja muutoksia liiketoimintakäytännöissä.

Katja Taipalus, Suomen Pankki

Kvanttilaskenta voi myös vaikuttaa markkinakilpailuun ja antaa varhaisille omaksujille etulyöntiaseman. Sääntelyviranomaisten on seurattava alan tasapainoa ja laajennettava valvontansa kattamaan myös muut kuin perinteiset toimijat, kuten kvanttia hyödyntävät teknologiayritykset, jotta rahoitusympäristö säilyy oikeudenmukaisena ja kilpailukykyisenä.

Rahoituspalvelut pitkällä aikavälillä

Pitkällä aikavälillä kvanttilaskenta voi mahdollisesti mullistaa rahoituspalvelualan, vaikuttaa alan käytäntöihin ja tuottaa laajempia yhteiskunnallisia vaikutuksia. Teknologia voisi mahdollistaa rahoitusalan kriisien reaaliaikaisen ennustamisen²⁵ analysoimalla laajoja ja monimutkaisia markkinatietoja ennäkemättömällä nopeudella ja tarkkuudella, jolloin rahamarkkinakriisejä voitaisiin ennustaa ja lieventää jo ennen niiden kärjistymistä. Tällaiset valmiudet edistäisivät vakaampaa ja joustavampaa rahoitusjärjestelmää ja turvaisivat talouksia maailmanlaajuisesti.

Kun rahoituslaitokset pystyisivät paremmin mallintamaan ja ennustamaan riskejä, ne voisivat kehittää tehokkaampia riskinhallintastrategioita, kuten innovatiivisia vakuutus tuotteita, ja optimoida sijoitussalkut mahdollisten häiriöiden varalta. Kvanttipohjaiset ilmastomallit voisivat esimerkiksi antaa vakuutuksenantajille mahdollisuuden arvioida ja hinnoitella ilmastoon liittyvät riskit tarkemmin ja auttaa niitä neuvomaan asiakkaitaan riskinhallintastrategioissa. Nämä tukisivat kestävämpää ja vahvemmin tietoon nojaavaa lähestymistapaa ilmastovaikutusten hallintaan.

Reaaliaikaisista simulointimalleista voisi tulla uusi normi, jos kvanttilaskennan avulla voitaisiin käsitellä ja simuloida markkinoiden dynamiikkaa ja riskitekijöitä reaaliajassa. Tämä kehitys parantaisi hinnoittelun, salkun optimoinnin ja sijoitusstrategioiden tarkkuutta, mikä johtaisi dynaamisempaan ja tehokkaampaan markkinaympäristöön. Tästä hyötyisivät sekä sijoittajat että talous laajemmin.

Kvanttitekniologioiden kehitykseen liittyy myös haasteita. RSA-salaus, jolle nykyinen verkkotietoturva pitkälti perustuu, odotetaan muuttuvan haavoittuvaksi. Rahoituslaitosten tuleekin kiireellä ottaa käyttöön kvanttiturvallinen salaus arkaluonteisten tietojen suojaamiseksi ja luottamuksen säilyttämiseksi digitaalisessa rahoitusjärjestelmässä. Kvantti-internet on tulevaisuudessa toinen tek-

nologiaratkaisu, joka voi mahdollistaa turvallisen viestinnän tietyissä korkean turvallisuustason sovelluksissa. Tietoturvaan ja salaukseen liittyvistä haasteista puhutaan lisää kappaleessa 7.

Lääkealan kehitys kolmella kvanttiaikajänteellä

Lääketeollisuus erottuu muista aloista ainutlaatuisten haasteiden vuoksi. Uuden lääkkeen tuominen markkinoille on monimutkainen ja kallis hanke, joka vaatii usein vuosikymmeniä kestävästä tutkimuksesta ja miljardien eurojen investointeja. Lisäksi useimmat lääkekehityshankkeet epäonnistuvat, koska biologiset järjestelmät ovat monimutkaisia luonteeltaan, ja uusien hoitomuotojen tehoa ja turvallisuutta on vaikea ennustaa. Nämä haasteet tekevät lääkealasta kuitenkin erinomaisen sovelluskohteen kvanttilaskennalle.

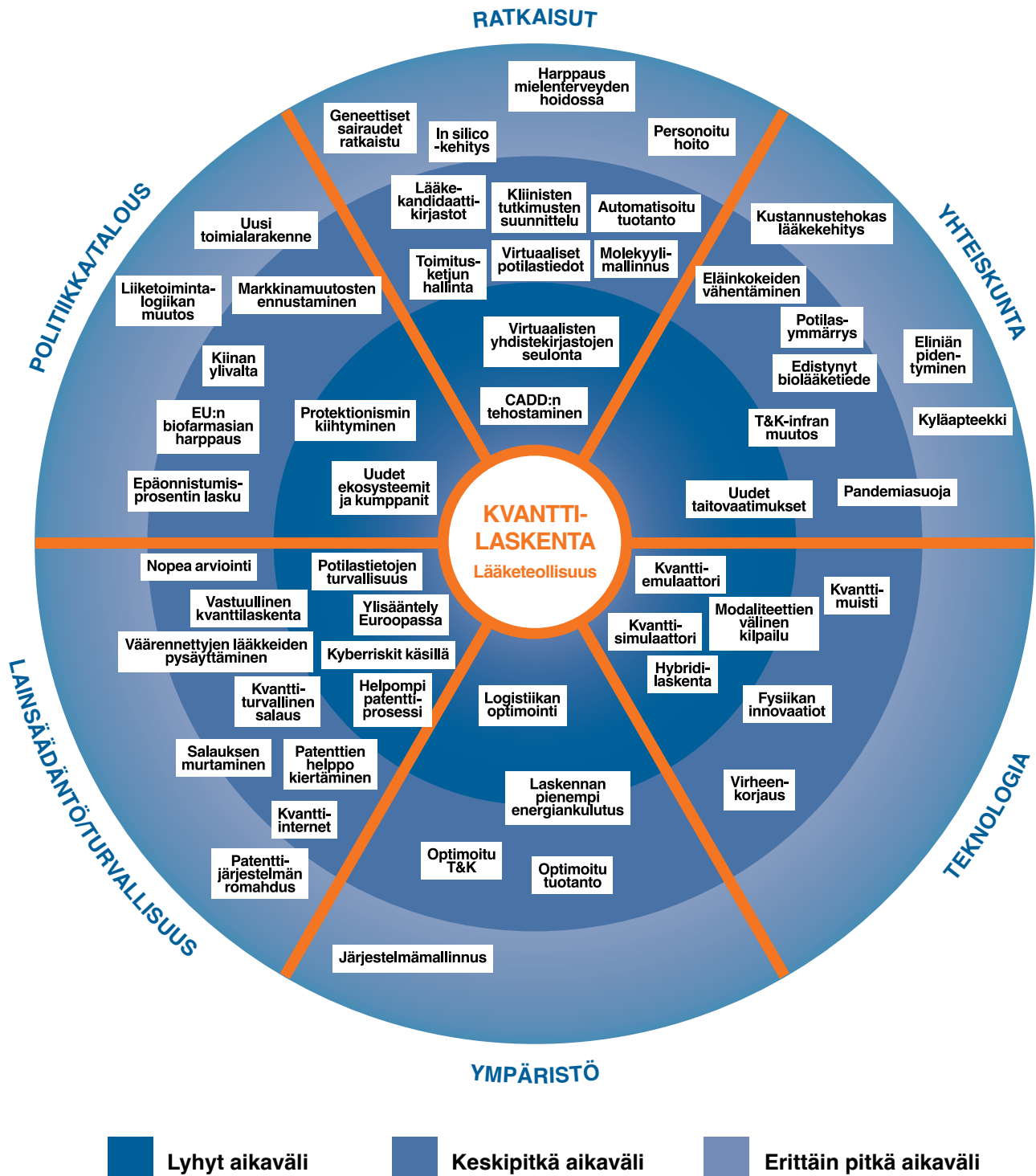
Lääkekehityksen ytimessä on molekyylien vuorovaikutus, jota säätelevät kvanttimekaniikan lait. Kvanttitietokoneet, joilla on luontainen kyky simuloida kvantti-ilmiöitä, tarjoavat mahdollisuuden nopeuttaa lääkekehitystä, optimoida kliinisiä tutkimuksia ja tasoittaa tietä yksilöllisemmille hoitomuodoille. Tässä luvussa tarkastellaan, miten kvanttilaskenta voisi muuttaa lääketeollisuutta ja johtaa merkittäviin edistysaskeliin terveydenhuollossa ja ihmisten terveydessä.

Yksi tapa aloittaa kvanttilaskennan potentiaalin analysointi on jaotella alan keskeiset prosessit ja tunnistaa niihin liittyvät haasteet ja kehitystarpeet. Kun ymmärretään kunkin prosessin taustalla olevat matemaattiset ongelmat, voidaan tutkia, miten kvanttilaskenta voi tarjota niihin ratkaisuja. Lääketeollisuudessa tämä lähestymistapa voi olla erityisen hyödyllinen. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 5) lääketeollisuuden prosessit on luokiteltu kuhunkin vaiheeseen liittyvien haasteiden ja mahdollisten kvanttilaskennan käyttötapauksien mukaan.

Taulukko 5. Esimerkkejä lääketieteellisuuden prosesseista, keskeisistä haasteista ja mahdollisista kvanttilaskennan käyttötapauksista.

	Tarve	Mahdolliset kvanttikäyttötapaukset
Lääkekeksinnöt Lääkkeen konseptointi molekyyliksi, jolla on tunnetut farmakologiset vaikutukset <ul style="list-style-type: none"> Kohdeidentifikaatio Kohteen validointi Analysimenetelmän kehitys Seulonta 	<ul style="list-style-type: none"> Signaalien parempi havaitseminen suurista tietoaaineistoista Kokeellisten rajoitusten ylittäminen Testien luotettavuuden parantaminen Kattava analyysi Massiivisten kirjastojen virtuaalinen seulonta 	<ul style="list-style-type: none"> Tehostaa molekyylien löytämistä Parantaa CADD-lähestymistapoja Koneoppimisdatan tuottaminen Hypoteesien muodostaminen koneoppimisen avulla ja kohdeproteiinien 3D-rakenteen ennustaminen Parantaa osumayhdisteiden tuottamista ja tunnistamista Virtuaalinen seulonta Sairauksien parempi ymmärtäminen
Lääkekehitys Molekyylin kehittäminen hyväksytyksi ja rekisteröidyksi lääkevalmisteeksi <ul style="list-style-type: none"> Optimointi Prekliiniset tutkimukset CMC (kemia, valmistus, valvonta) 	<ul style="list-style-type: none"> Parempi lääkesuunnittelu Lääkeaihioiden optimointi T&K-toiminnan tuottavuuden parantamiseksi Algoritmit, jotka heijastelevat inhimillisiä järjestelmiä Kliinisten tulosten ennustaminen prekliinisten tulosten perusteella 	<ul style="list-style-type: none"> Kandidaattimolekyylien ominaisuuksien optimointi ADME-arviointi (imeytyminen, jakautuminen, aineenvaihdunta, erittyminen) Aktiivisuuden ja toksisuuden ennustaminen Molekyylimekaniikan- ja dynamiikan simulointi Annostelun optimointi Liukoisuuden – ja katalyysiprosessin optimointi Rahoitusriskien optimointi Uuden tuotteen formulointi
Lääkekehitys – kliiniset tutkimukset <ul style="list-style-type: none"> Faasi I Faasi II Faasi III 	<ul style="list-style-type: none"> Epäonnistumisprosentin vähentäminen (>90 %) Kustannusten vähentäminen Lääkkeen ja potilaan välistä vuorovaikutusta simuloivat algoritmit In vitro in vivo -korrelaatio Farmakokineettisten ja -dynaamisten vaikutusten ennuste Potilaiden virtualisointi 	<ul style="list-style-type: none"> Potilaiden tunnistaminen ja ryhmittely Potilaan farmakogeneettinen mallintaminen Sivuvaikutusten syy-yhteysanalyysi Tutkimuspaikan valinnan optimointi Puuttavien tietojen täydentäminen klinisiin tutkimuksiin / reaali maailman todistusaineistoon
Hyväksyntä <ul style="list-style-type: none"> Lupahakemusten lähettäminen ja tarkistaminen 	<ul style="list-style-type: none"> Epävarmuuden vähentäminen Lanseerausviiveiden minimointi Kliinisten tutkimusten nopea analysointi Eri tietolähteiden nopea analysointi 	<ul style="list-style-type: none"> Tehostettu riskinarviointi Potilasvastausten ennakoiva mallintaminen Kvanttikoneoppiminen mallien tunnistamiseen ja tietojen analysointiin
Kaupallistaminen <ul style="list-style-type: none"> Markkinoille tulon jälkeinen valvonta ja kliiniset tutkimukset (faasi IV) Markkinoille pääsy – kaupallinen ja lääketieteellinen 	<ul style="list-style-type: none"> Hoidon optimointi ja kustannustehokkuus yhteiskunnallisesta näkökulmasta Personoidut lääkkeet 	<ul style="list-style-type: none"> Potilaan ymmärtäminen: reaali maailman tietojen analysointi kvanttikoneoppimisella Automaattinen lääkesuositus Räätälöidyt terveydenhuollon tarjoaja – potilas sitoutuminen Markkinoiden kysynnän, sääntelyn muutosten, kilpailijoiden toimien ja markkinoiden dynamiikan ennustaminen
Tuotanto	<ul style="list-style-type: none"> Vastuullisuus ja kustannustehokkuus 	<ul style="list-style-type: none"> Reaktionopeuksien laskeminen API-tuotannossa Katalyyttisten prosessien optimointi Materiaali- ja jätevirtojen optimointi tuotantolaitoksissa Uusien tuotevalmisteiden parantaminen Laadun seuranta Tuotantolaitosten lämpötilan optimointi Ennakoiva kunnossapito
Logistiikka ja toimitusketju	<ul style="list-style-type: none"> Vastuullisuus ja kustannustehokkuus 	<ul style="list-style-type: none"> Reitin optimointi Verkoston optimointi Dynaaminen varastonhallinta ja hankinta
Elinkaaren hallinta	<ul style="list-style-type: none"> Uudelleenkäyttö/uudelleenmuotoilu 	<ul style="list-style-type: none"> Mahdollisten uusien kohteiden tunnistaminen ja validointi Koostumuksen optimointi Kliinisten tulosten ennustaminen

Rahoituspalvelujen tapaan olemme keränneet signaaleja myös lääketeollisuuden tulevaisuustutkaan kolmella aikajänteellä (katso Kuva 6). Tutka sisältää erityisesti lääketeollisuudelle ominaisia yhteiskunnallisia, lainsäädännöllisiä / turvallisuuteen liittyviä, poliittisia/taloudellisia ja ympäristönäkökulmia sekä myös muiden alojen yrityksille relevantteja yleiseen tuotekehitykseen, logistiikkaan ja markkina-analysiin, liittyviä tekijöitä.



Kuva 6. Esimerkki tulevaisuustutkasta, joka esittelee kvanttilaskennan roolia lääketeollisuudessa.

Lääketeollisuus nyt ja lyhyellä aikavälillä

Lääketeollisuudessa suuret T&K-intensiiviset yritykset ovat jo edenneet merkittävästi potentiaalisten käyttötapauksen tunnistamisessa, kvanttialgoritmien testaamisessa sekä kumppanuuksien ja ekosysteemien rakentamisessa innovoinnin edistämiseksi²⁶. Monet startup-yritykset kehittävät myös aktiivisesti algoritmeja erityisesti kohinaista kvanttiaikaa varten²⁷. Lääkekehitysprosessissa ensimmäiset sovellukset eivät välttämättä liity molekyylihallinnukseen vaan virtuaalisten yhdistekirjastojen seulontaan. Kvanttilaskennan odotetaan tulevaisuudessa parantavan tietokoneavusteista lääkesuunnittelua (CADD), kun järjestelmät pystyvät ennustamaan molekyylien ominaisuuksia suurella tarkkuudella. Tällä hetkellä CADD-menetelmä rajoittuu pieniin ja keskisuuriin lääkeaihioiden ja on peräkkäistä lähinnä nykyisten tietokoneiden suorituskyvyn vuoksi. Tekoäly ja kvanttipohjainen CADD ovat jo tässä varhaisessa vaiheessa viitoittamassa tietä kohti tulevaisuuden automatisoitua lääkekehitystä.

Lisäksi lääkekehitykseen ja -tuotantoon liittyy lukuisia optimointiongelmia, joihin voidaan soveltaa varhaisen vaiheen kvanttialgoritmeja ja kvanttitutkimuksista inspiroituneita algoritmeja, kuten kliinisten tutkimusten suunnittelu ja logistiikan optimointi. Kvanttilaskennan kehittyessä lääkeyritykset rakentavat uusia verkostoja ja valmiuksia hyödyntää tätä teknologiaa tehokkaasti. Valmistautukseen näiden edistysaskeleiden mahdollisesti tuomiin liiketoimintahyötyihin, monet lääkeyritykset ovat perustaneet yhteistoiminnallisia oppimisekosysteemejä, joissa on mukana sekä sisäisiä tiimejä että ulkoisia kumppaneita.

Lääketeollisuus keskipitkällä aikavälillä

LÄÄKEKEHITYS

Kvanttilaskennasta on tulossa ratkaiseva tekijä *in silico* -lääkekehityksessä, jossa simuloinnit ja mallintaminen korvaavat perinteiset laboratoriotekniikat. Kvanttialgoritmit mahdollistavat molekyylien vuorovaikutusten tarkemman simuloinnin, jolloin tutkijat voivat tunnistaa lääkeaihoita nopeammin ja tarkemmin. Tämä edistysaskel voi nopeuttaa merkittävästi lääkeaihojen löytämisprosessia, vähentää kustannuksia ja avata uusia mahdollisuuksia kehittää hoitoja, jotka olivat aiemmin liian monimutkaisia tutkittaviksi.

Lääkekehityksen lisäksi kvanttitekniikka todennäköisesti parantaa kliinisten tutkimusten suunnittelua ja optimointia. Kvanttialgoritmit voisivat analysoida suuria potilastietoaineistoja ja tunnistaa niistä optimaaliset osallistujat, lyhentää tutkimuksiin kuluva aikaa ja lisätä onnistumisen todennäköisyyttä. Tekniikka voi myös tukea yksilöllisen hoidon yleistymistä, sillä sen avulla hoitoja voidaan sovittaa tarkemmin yksilöllisiin geneettisiin profiileihin. Tämä johtaa tehokkaampiin hoitoihin, joilla on vähemmän sivuvaikutuksia.

Eriyksen lupaava käyttökohde kvanttilaskennalle on biofarmasia, jossa lääkekehitykseen liittyy usein suuria ja monimutkaisia biologisia molekyyliä. Kvanttilaskenta sopii erinomaisesti näiden suurten molekyylien välisten monimutkaisten vuorovaikutusten käsittelyyn, mikä avaa uusia mahdollisuuksia lä-

pimurtoihin esimerkiksi proteiinien taittamisen ja biologisten lääkkeiden alalla. Tämä voisi auttaa biofarmasiaa kehittämään kohdennettuja hoitoja kroonisiin ja harvinaisiin sairauksiin. Lisäksi kvanttisimulaatiot voisivat vähentää eläinko-keiden käyttöä parantamalla varhaisvaiheen testauksen tarkkuutta.

TEHOKAS JA KESTÄVÄ LÄÄKETIEDE

Lääkekehityksen lisäksi kvanttilaskenta voi tukea lääketuotantoa optimoimalla valmistusprosesseja. Kvanttialgoritmit voivat parantaa tuotantolinjojen automatisointia, vähentää hukkaa ja lisätä resurssitehokkuutta. Kvanttilaskenta voi myös muuttaa logistiikkaa ja toimitusketjun hallintaa lääkealalla. Mahdollistamalla reaaliaikaisen seurannan ja ennakoivan logistiikan kvanttitekniikat voisivat auttaa tehostamaan toimintoja ja varmistamaan, että lääkkeet toimitetaan nopeammin ja luotettavammin jopa maailmanlaajuisissa toimitusketjuissa.

Myös petosten havaitseminen voi parantua kvanttiturvallisten menetelmien avulla, mikä auttaisi suojautumaan väärennetyiltä lääkkeiltä, jotka ovat kasvava huolenaihe. Parempien seuranta- ja tunnistusjärjestelmien avulla kvanttitekniologia voisi auttaa varmistamaan, että potilaat saavat vain aitoja tuotteita.

LÄÄKETEOLLISUUS T&K-INTENSIIVISENÄ TEOLLISUUDENALANA

Kvanttilaskennan kyky nopeuttaa lääkkeiden löytämistä voi horjuttaa patenttijärjestelmän tasapainoa. Patentit ovat lääkeyrityksille tärkeä keino suojella alkuperäislääkkeitä ja niistä saatavia voittoja. Kun kvanttilaskenta ja tekoäly helpottavat valtaviin tietomäärien käsittelyä, patenttien tarjoama kilpailuetu voi kuitenkin heikentyä.

Kvanttilaskennan vaikutus patentteihin voi myös siirtää lääkekehitystä uusiin maihin. Esimerkiksi Kiina lisää nopeasti investointejaan kvanttilaskentaan ja tekoälyyn, sekä hyödyntää maan tietojen käyttöä koskevaa sääntelykehystä yksilöllisen lääketieteen ja lääkekehityksen edistämiseksi. Kiina on jo nyt merkittävä toimija lääkkeiden vaikuttavien ainesosien (API) valmistuksessa. Kvanttitekniologian käyttöönoton myötä Kiina voisi edelleen vahvistaa asemaansa lääketeollisuuden arvoketjussa nopeuttamalla lääkekehitystä ja lyhentämällä lääkkeiden markkinoille tuloaika.²⁸

Kvanttitekniologia terveydenhuollossa pitkällä aikavälillä

Kvanttilaskennan kehittyessä lähestymme pistettä, jossa teknologian muutospotentiaali realisoituu. Tämä avaa kiehtovia mahdollisuuksia lääketieteessä ja biotieteissä, kun voimme ratkaista aiemmin ratkaisemattomia haasteita. Kvanttilaskenta voisi esimerkiksi tarjota ratkaisun geneettisiin sairauksiin ja auttaa ymmärtämään paremmin mielenterveyttä. Kun valtavat tietomäärät tulevat entistä helpommin saataville, kvanttilaskenta voisi edistää yksilöllisten hoitojen laajamittaista kehitystä, jolloin hoidot voitaisiin räätälöidä yksittäisille potilaille ennennäkemättömän tarkasti.

”Tällä hetkellä kestää noin 10–12 vuotta kehittää yksittäinen molekyyli potilaiden hoidoksi. Polku on hyvin riskialtis, ja hanke voi päättyä milloin tahansa. Kvanttilaskenta tarjoaa lupaavan mahdollisuuden nopeuttaa tätä prosessia, mikä mahdollistaisi uusien hoitojen nopeamman ja kustannustehokkaamman kehittämisen. Erityisesti kehityksen alkuvaiheet voivat muuttua, jos kvanttilaskenta lisää todennäköisyyttä viedä oikeita molekyyliä eteenpäin. Parhaimmillaan se laskee kehityskustannuksia ja nopeuttaa uusien hoitojen saatavuutta.”

Nadia Tamminen, Lääketeollisuus ry

Kvanttilaskenta saattaa myös pienentää merkittävästi lääkekehityksen epäonnistumisprosenttia. Tällä hetkellä yli 90 prosenttia uusista lääkeaihoista epäonnistuu – usein vasta kalliiden myöhäisvaiheen tutkimusten aikana. Kvanttitietokoneilla molekyylien vuorovaikutusta voitaisiin simuloida tarkemmin, jolloin ne voisivat ennustaa myrkyllisyyttä ja tehoa jo varhaisemmassa vaiheessa, mikä vähentäisi riskejä ja antaisi useammille yrityksille mahdollisuuden osallistua lääkekehitykseen.

Lisäksi kvanttilaskenta voi tehostaa merkittävästi *in silico* -lääkekehitysprosesseja siirtämällä merkittävän osan tutkimusprosessista virtuaalisiin simulaatioihin. Molekyylien käyttäytymistä nopeasti mallintamalla kvanttitietokoneet voisivat nopeuttaa lääkkeiden testausta ja ennustaa turvallisuutta ja tehoa ilman laajoja laboratorioskokeita. Siirtyminen digitaalisiin laboratorioihin edellyttäisi merkittäviä investointeja IT-infrastruktuuriin, valmiuksien kehittämiseen, tiedonhallintaan ja kyberturvallisuuteen.

Kvanttisimulaatioilla voitaisiin myös optimoida lääketuotantoa, vähentää hukkaa ja parantaa valmistuksen tehokkuutta. Kvanttilaskenta voi auttaa ihmisiä pysymään terveempinä mahdollistamalla nopeammat ja tarkemmat hoidot, mikä voi keventää terveydenhuoltojärjestelmien taakkaa ja vähentää yhteiskunnan terveydenhuoltokustannuksia.

Tulevien siirtymien katalysointi

Tarkastelimme edellä, miten strateginen ennakointi auttoi tunnistamaan kvanttilaskennan mahdollisuuksia erityisesti rahoituspalvelujen ja lääketeollisuuden aloilla. Tunnistimme trendejä, kuten digijättien ja sulautettujen palvelujen nousun rahoituksessa sekä kvanttilaskennan roolin personoidun hoidon toteuttamisessa.

Yksittäisten toimialojen murrosten lisäksi voimme pyrkiä tunnistamaan laajempia siirtymiä. Tarkastelemalla laajempia kehityskulkuja voimme pohtia esimerkiksi, miten kvanttitietokoneet saattavat nopeuttaa edistymistä kohti kestäväää kehitystä kokonaisuutena tai syventyä tiettyihin teemoihin, kuten energiamurrokseen tai sähköistymiseen. Tässä osiossa nostamme esiin muutamia tällaisia kiinnostavia aiheita ja tarkastelemme, miten kvanttilaskenta voi vauhdittaa niiden kehitystä ja muovata tulevaisuutta.

Energiasiirtymä

Energia-ala on ollut eturintamassa kvanttilaskentasovellusten tutkimisessa, koska sillä on tarve vastata monimutkaisiin haasteisiin, jotka liittyvät siirtymiseen kestävämpään ja joustavampaan energiajärjestelmään. Suuret yritykset tutkivat kvanttialgoritmeja energiantuotannon ja -varastoinnin, verkonhallinnan ja monimutkaisten energianhallintatehtävien optimoimiseksi. Ne tutkivat myös asiakassovelluksia, kuten kysynnän ennustamista ja älykästä latausta. Tässä vaiheessa tärkeimmät syyt tehdä yhteistyötä tutkimuskumppaneiden kanssa kvanttilaskennan aiheiden parissa ovat odotettavissa olevat parannukset tehokkuudessa ja innovoinnissa.

Teknologian kehittyessä kvanttilaskenta tulee muuttamaan tapaamme tuottaa, siirtää ja kuluttaa energiaa. Kvanttilaskennan avulla voidaan mahdollisesti säästää läpimurtoja puhtaan energian innovaatioissa ja kestävien materiaalien suunnittelussa. Kvanttisimuloinnit mahdollistavat monimutkaisten kemiallisten reaktioiden syvemmän ymmärtämisen, mikä voi auttaa kehittämään uusia teknologioita, kuten kehittyneitä aurinkokennoja, tehokkaampia biopolttoaineita ja jopa fuusioenergiaa. Samalla kvanttimateriaalitutkimus voi johtaa kevyempiin ja kestävämpiin komponentteihin uusiutuvan energian infrastruktuuria varten tuuliturbiineista aurinkopaneeleihin. Tämä tekisi puhtaan energian ratkaisusta sekä energia- että kustannustehokkaampia.

Kiertotalous valmistavassa teollisuudessa

Kiertotalous tarjoaa kvanttietokoneille houkuttelevan mahdollisuuden edistää teollisuuden murrosta. Vaikka nämä mahdollisuudet ovat vielä pääosin tutkimusvaiheessa, niiden potentiaali on selvä: kvanttitekniikat voivat mahdollistaa teollisuuden tuotantojärjestelmien uudelleenajattelun niin, että kestävyys ja resurssitehokkuus ovat keskiössä.

Uusien kierrätettävien tai biohajoavien materiaalien kehittäminen on yksi alue, jossa kvanttilaskenta voi tuoda merkittävää edistystä. Kyky simuloida materiaaleja atomitasolla voi nopeuttaa sellaisten kestävien vaihtoehtojen löytämistä, jotka ovat helpommin kierrätettävissä tai hajoavat, mikä tukisi kiertotalouden suunnitteluperiaatteita alusta alkaen. Kvanttisimulaatiot voisivat myös auttaa mallintamaan monimutkaisia kemiallisia prosesseja, mikä mahdollistaisi materiaalien tehokkaamman erottelun tai niiden muuntamisen uudelleenkäytettäviin muotoihin.

Kvanttialgoritmeja voidaan mahdollisesti käyttää myös resurssien käytön optimointiin ja hukan minimointiin tuotantoprosesseissa. Valmistajat voisivat vähentää kustannuksia ja ympäristövaikutuksia merkittävästi, jos ne onnistuisivat löytämään tehokkaampia tapoja käyttää raaka-aineita ja sovittamaan toimintansa kiertotalouden tavoitteisiin. Kvanttilaskenta voisi myös parantaa tuotteiden elinkaaren mallintamista ja optimointia, jolloin kestävyys, korjattavuus ja kierrätettävyys voitaisiin asettaa suunnittelussa etusijalle.

Tehokas logistiikka ja resurssien jakaminen ovat ratkaisevia tekijöitä, jotta kiertotaloutta voidaan edistää suuressa mittakaavassa. Kvanttilaskennan optimointikyvyt voisivat muuttaa materiaalien ja tuotteiden kuljetusta ja uudelleenjakelua kiertotalouden toimitusketjuissa ja luoda kestävämpiä järjestelmiä, joissa jätteen määrä ja energiankulutus on minimoitu. Olennainen osa kiertojärjestelmiä on jäljitettävyys, sillä se varmistaa, että materiaaleja ja tuotteita voidaan seurata koko niiden elinkaaren ajan. Kvanttikryptografia voisi tarjota turvallisen ja luotettavan tavan ylläpitää avoimuutta kiertotalousketjuissa, lisätä luottamusta ja parantaa siten resurssien virtauksen tehokkuutta.

Energiatehokkuus on toinen ratkaiseva tekijä. Monet nykyiset kierrätys- ja materiaalinkäsittelytekniikat kuluttavat paljon energiaa. Kvanttisimulaatiot voisivat paljastaa uusia, vähemmän energiaa vaativia menetelmiä materiaalien käsittelyyn ja jalostukseen, mikä tekisi niistä taloudellisesti kannattavampia ja ympäristön kannalta kestävämpiä.

6/ Miten kvanttilaskenta voi luoda valoisamman tulevaisuuden?

Kvanttilaskenta voi auttaa löytämään ratkaisuja joihinkin ihmiskunnan polttavimpiin ongelmiin. Se voi mullistaa teollisuudenaloja, talouksia ja jopa planeettamme tulevaisuuden.

Historian saatossa tutkijat ovat keksineet hämmästyttäviä uusia teknologioita, kuten sähkön, tietojenkäsittelyn ja internetin, joille ei aluksi näyttänyt olevan käytännön sovelluksia. Ihmisten erittäin rajalliset näkemykset näiden teknologioiden mahdollisuuksista saattavat jälkikäteen tarkasteltuna vaikuttaa huvittavilta. Nykyään tiedämme, että kodit, teollisuus ja viestintäjärjestelmät pyöriivät kaikki sähköllä. Nykyaikainen tietojenkäsittelytekniikka ja internet kulkevat taskuissamme, ja ne ovat muuttaneet lähes kaikki elämän osa-alueet. Kun nyt olemme toisen teknologisen vallankumouksen – kvanttilaskennan läpimurron – kynnyksellä, meitä rajoittaa samalla tavalla kyvyttömyys kuvitella tulevaisuus, joka näyttää merkittävästi erilaiselta kuin nykyään.

Kvanttitietokoneet hyödyntävät kvanttimekaniikan periaatteita laskutoimitusten suorittamisessa tavoilla, joita alamme vasta ymmärtää. Aivan kuten sähköä pidettiin aikoinaan tieteellisenä kuriositeettina, myös kvanttilaskennan varhaiset sovellukset saattavat vaikuttaa hyvin rajallisilta – varsinkin jos niitä tarkastellaan nykyisten teknisten rajoitusten sisällä.

Tämän luvun tavoitteena on laajentaa tätä näkökulmaa ja rohkaista meitä katsomaan kauemmas tulevaisuuteen, jossa kvanttilaskenta voi mahdollistaa mullistavia edistysaskeleita eri toimialoilla. Tässä tulevaisuudenkuvassa kvanttilaskennan luvataan parantavan elämäämme ratkaisemalla ihmiskunnan suurimpia haasteita, kuten ilmastonmuutos, ja avaavan samalla joitakin maailmankaikkeuden syvimpiä mysteerejä.

- ✓ **Hyötyjä useilla aloilla**
- ✓ **Ihmiskunnan suurimpien ongelmien ratkaiseminen**
- ✓ **Auttaa ymmärtämään maailmankaikkeutta**

Tässä luvussa tuomme esille pidemmän aikavälin mahdollisuuksia, joita kvanttilaskenta voi tarjota, kunhan siihen liittyvät teknologiset haasteet on ratkaistu.

Monimutkaisten haasteiden ratkaiseminen

Kvanttilaskenta voi mullistaa monia eri aloja – ei vain tarjoamalla lyhytaikaisia parannuksia vaan ratkaisemalla monimutkaisia, laajamittaisia haasteita pitkällä aikavälillä.

Optimointi maailmanlaajuisessa mittakaavassa

Yksi kvanttilaskennan merkittävimmistä hyödyistä on sen kyky optimoida suuria, toisiinsa kytkeytyneitä järjestelmiä, jotka ulottuvat yli toimialojen ja maantieteellisten rajojen. Suuren mittakaavan kvanttietokoneet voivat mahdollisesti käsitellä lukemattomia muuttujia reaaliajassa, mikä voisi auttaa tekemään esimerkiksi maailmanlaajuisista toimitusketjuista, kaupunkien liikennejärjestelmistä ja energiaverkoista tehokkaampia ja luotettavampia. Olipa kyse sitten logistiikan mukauttamisesta maailmanlaajuisen kriisin aikana tai vaihtelevan energiantarpeen hallinnasta reaaliajassa, kvanttilaskenta voi mahdollistaa uudenlaista resurssien hallintaa ja optimointia.

Innovoinnin nopeuttaminen

Kvanttilaskennan kyky simuloida erittäin monimutkaisia prosesseja voi edistää innovointia monilla aloilla valmistavasta teollisuudesta terveydenhuoltoon ja energiasektoriin. Ominaisuuksiltaan parempien – kuten lujempien, joustavien tai johtavampien – materiaalien löytäminen voisi mullistaa esimerkiksi auto- ja ilmailuteollisuuden. Kvanttisimuloinnit tarjoavat vertaansa vailla olevaa tietoa molekyyli- ja atomitasolta, joten ne voivat nopeuttaa uusien teknologioiden ja materiaalien kehittämistä ja edistää siten innovointia ennennäkemättömällä vauhdilla.

Tietojenkäsittelyn ja tekoälyn parantaminen

Kun kvanttitehostettu tekoäly ja koneoppiminen tulevat vähitellen mahdollisiksi, dataan tukeutuvat toimialat – kuten rahoitus, terveydenhuolto ja vähittäiskauppa – voivat saada käyttöönsä tarkempaa tietoa nopeammin. Tulevaisuudessa kvanttilaskennan avulla yritykset voinevat käsitellä laajoja tietokokonaisuuksia aiemmin mahdottomilla tavoilla, mikä voi johtaa parannuksiin ennakoivassa mallintamisessa, asiakkaiden käyttäytymisen analysoinnissa ja reaaliaikaisessa päätöksenteossa. Tämä kyky voi muuttaa sitä, miten yritykset reagoivat markkinoiden muutoksiin, räätälöivät tarjontaansa ja laativat strategioita tulevaisuutta varten.

Kestävä kehitys

Yksi keskeisistä alueista, jolla kvanttilaskennasta on todennäköisesti hyötyä eri toimialoilla, on kestävä kehityksen edistäminen. Teknologia voisi mahdollistaa tehokkaamman energiankäytön, paremman jätehuollon ja vähähiilisten teknologioiden suunnittelun. Kvanttilaskennalla voikin olla ratkaiseva merkitys teollisuuden ympäristöjalanjäljen pienentämisessä ja siirtymässä kohti vihreämpää teknologiaa aina energiaverkkojen optimoinnista uusien tehokkaampien energiavarastointiratkaisujen kehittämiseen.

Maailmanlaajuisiin haasteisiin vastaaminen

Kvanttilaskennalla on mahdollisuus vaikuttaa laaja-alaisesti eri toimialoihin, mutta sen merkitys ulottuu myös ihmiskunnan suurimpiin haasteisiin. Tarjoamalla uusia keinoja monimutkaisten, toisiinsa kytkeytyneiden ongelmien ratkaisemiseksi kvanttilaskenta voi avata tietä kohti parempaa terveydenhuoltoa, kestävä kehitystä ja maailmanlaajuisia turvallisuutta – kaikki olennaisen tärkeitä tekijöitä planeettamme tulevaisuuden kannalta.

Terveydenhuollon edistäminen

Kvanttilaskennan kyky käsitellä ja simuloida biologisia järjestelmiä kvanttitasolla voi tuoda ennennäkemättömiä edistysaskeleita terveydenhuoltoon. Yksi sen mullistavimmista sovelluksista voi löytyä lääkekehityksestä. Kvanttitietokoneet voisivat simuloida molekyylien vuorovaikutusta ennennäkemättömällä tarkkuudella ja auttaa näin tutkijoita mallintamaan, miten mahdolliset lääkkeet ovat vuorovaikutuksessa ihmiskehon kanssa atomitasolla. Tämä voisi merkittävästi nopeuttaa uusien hoitojen ja rokotteiden löytämistä vähentäen samalla elintärkeiden lääkkeiden markkinoille tuomisen aikaa ja kustannuksia.

Lisäksi kvanttilaskenta voisi mahdollistaa personoidut hoitomuodot, kun sen avulla voitaisiin analysoida massiivisia geneettisiä ja ympäristötekijöitä sisältäviä tietoaaineistoja. Terveydenhuollon ammattilaiset voisivat räätälöidä hoidot yksilöllisesti potilaille, mikä parantaisi hoitotuloksia ja vähentäisi sivuvaikutuksia. Kyky mallintaa monimutkaisia biologisia järjestelmiä reaaliajassa voisi myös parantaa sairauksien ennustamista ja ennaltaehkäisyä mahdollistaen varhaisemmat hoidot ja tarkemmat diagnoosit.

Ilmastonmuutoksen torjunta

Ilmastonmuutoksen torjunta on yksi aikamme merkittävimmistä haasteista, ja kvanttilaskenta tarjoaa siihen uusia työkaluja. Ilmastomallinnus on yksi aloista, joilla kvanttilaskennalla voi olla huomattava vaikutus. Vaikka nykyiset ilmasto-

mallit ovat kehittyneitä, perinteisten tietokoneiden puutteellinen laskentateho rajoittaa niiden parantamista. Kvanttitietokoneet voisivat viedä ilmastosimulaatiot kokonaan uudelle tasolle, jolloin voitaisiin laatia tarkempia ennusteita siitä, miten ekosysteemit reagoivat lämpötilan nousuun, jääpeitteiden sulamiseen ja muuttuviin säämalleihin. Tämä puolestaan antaisi poliittisille päättäjille mahdollisuuden luoda tehokkaampia strategioita ilmastonmuutoksen hillitsemiseen ja siihen sopeutumiseen.

Lisäksi kvanttilaskennalla voi olla keskeinen rooli puhtaiden energiateknologioiden kehittämisessä. Kvanttisimulaatiot voivat auttaa tutkijoita suunnittelemaan tehokkaampia aurinkokennoja, akkuja ja energian varastointijärjestelmiä, mikä tekisi uusiutuvasta energiasta maailmanlaajuisesti kannattavampaa. Lisäksi kvanttialgoritmit voisivat optimoida energiankulutusta eri teollisuudenaloilla vähentäen hiilijalanjälkeä ja edistäen kestävää tulevaisuutta.

Maailmanlaajuisen turvallisuuden varmistaminen

Tarve parantaa tietoverkkojen turvallisuutta kasvaa koko ajan, kun maailman digitaaliset yhteydet lisääntyvät. Kvanttilaskenta on tälle alalle sekä haaste että mahdollisuus. Ensinnäkin kvanttitietokoneilla pystytään mahdollisesti murtaamaan RSA:n ja ECC:n kaltaiset salausmenetelmät, joilla nykyiset tiedot on suojattu. Tämä on merkittävä uhka maailmanlaajuiselle turvallisuudelle.

Samalla kvanttiuhka toimii kuitenkin myös kryptografian alan innovaatioiden moottorina. Tutkijat kehittävät kvanttiturvallisia salausalgoritmeja, jotka on suunniteltu kestäämään kvanttitietokoneiden hyökkäyksiä. Vaikka nämä algoritmit ovat luonteeltaan klassisia, ne ovat saaneet vaikutteita kvanttilaskennan mahdollisuuksista. Ne ovat ratkaisevan tärkeitä viestinnän, rahaliikenteen ja arkaluonteisten julkishallinnon tietojen turvaamisessa kvanttiakakaudella.

Lisäksi kvanttilaskenta voi parantaa maailmanlaajuisia turvallisuutta tehostamalla riskianalyysijä ja auttamalla ennustamaan laajamittaisia tapahtumia, kuten pandemioita, luonnonkatastrofeja ja geopoliittisia konflikteja. Käsittelemällä valtavia tietomääriä reaaliajassa kvanttitietokoneet voisivat auttaa hallituksia ja organisaatioita ennakoimaan uusia uhkia ja vastaamaan niihin entistä tehokkaammin.

Kestävän maatalouden edistäminen

Elintarviketurvan varmistaminen ja kestävien maatalouskäytäntöjen edistäminen ovat myös maailmanlaajuisia haasteita, joihin kvanttilaskenta voi tarjota ratkaisuja. Kvanttisimulaatioilla voitaisiin mallintaa monimutkaisia maatalousjärjestelmiä, jolloin tutkijat voisivat kehittää viljelykasveja, jotka kestävät paremmin kuivuutta, tuholaisia ja tauteja. Lisäksi kvanttialgoritmit voisivat optimoida veden käyttöä ja resurssien jakamista maataloudessa, mikä mahdollistaisi kestävämpiä viljelykäytäntöjä ja suurempia satoja pienemmillä ympäristövaikutuksilla.

Tuntemattomista haasteista tulevaisuuden ratkaisuihin

Kvanttilaskennassa ei ole kyse vain tämän päivän ongelmien ratkaisemisesta vaan myös valmistautumisesta tulevaisuuteen. Kuten kaikkien läpimurtoteknologioiden kohdalla, täyden potentiaalin esiin tuleminen voi viedä aikaa. Aivan kuten emme osanneet ennustaa sähkön tai internetin mullistavia vaikutuksia niiden alkutaipaleella, meidän on tunnustettava, että kvanttilaskenta avaa todennäköisesti mahdollisuuksia, joita emme vielä täysin käsitä.

Valmistautuminen tuntemattomaan

Kvanttilaskennalla voidaan mahdollisesti ratkaista ongelmia, joiden olemassaolosta emme vielä tiedä. Kun maailma jatkaa kehittymistään, uusia haasteita syntyy niin teknologian, tieteen kuin yhteiskunnankin saralla. Kvanttitietokoneet voi tarjota tarvittavat välineet näiden odottamattomien esteiden poistamiseen, sillä niiden mahdollistamat ratkaisut ylittävät klassisten tietokoneiden kyvyt.

Kun esimerkiksi toimialat kytkeytyvät yhä enemmän toisiinsa digitaalisesti, syntyy uusia monimutkaisuuden ja riskien tasoja. Kvanttilaskennan kyky käsitellä laajoja ja monimutkaisia järjestelmiä voi mahdollistaa näiden riskien mallintamisen ja hallitsemisen tavoilla, joita emme osaa vielä edes kuvitella. Tämä ei koske ainoastaan datavetoisia aloja, kuten kyberturvallisuutta ja tekoälyä, vaan myös yhteiskunnallisia järjestelmiä. Kvanttitietokoneilla voitaisiin esimerkiksi mallintaa talouden dynamiikkaa, globaaleja toimitusketjuja tai jopa kaupunkien infrastruktuuria entistä tarkemmin, mikä antaisi ennakoivaa tietoa tulevista häiriöistä.

Lisäksi kvanttilaskenta voi auttaa luomaan valoisamman ja kestävämmän tulevaisuuden, jossa tietoa pystytään hyödyntämään entistä tehokkaammin. Se voisi mahdollistaa globaalien järjestelmien reaaliaikaisen ja monimuuttujaisen analyysin esimerkiksi energianjakelussa, kaupunkisuunnittelussa ja maailmanlaajuisessa terveydenhuollossa. Sen sijaan, että reagoisimme kriiseihin, voisimme ehkä ennustaa kehityskulkuja, optimoida resursseja ja kehittää ratkaisuja ennen ongelmien syntymistä. Tämä antaisi valtiolle, yrityksille ja yhteiskunnille mahdollisuuden parantaa resilienssiä ja vastata tehokkaammin ennakoimattomiin haasteisiin.

Mahdollisuudet käsityskyvyn tuolla puolen

Tunnettujen haasteiden ratkaisemisen lisäksi kvanttilaskennan odotetaan johdavan myös löytöihin sellaisilla aloilla, joita emme ole vielä tulleet edes ajatteleeksi. Samalla tavoin kuin internet synnytti täysin uusia toimialoja, kvanttilaskenta voi mahdollistaa sovelluksia ja läpimurtoja, jotka muokkaavat tieteen ja teknologian tulevaisuutta.

Kvanttitietokoneet voisivat esimerkiksi auttaa selvittämään joitakin tieteen salaperäisimpiä ilmiöitä. Olipa kyse sitten pimeän aineen todellisen luonteen ymmärtämisestä, kvanttigravitaation salaisuuksien selvittämisestä tai uusien lähestymistapojen kehittämisestä fuusioenergian alalla, kvanttilaskenta voi mahdollistaa uusia tutkimuksia, jotka laajentavat ihmiskunnan tiedon rajoja. Kyky mallintaa maailmankaikkeutta kvanttitasolla saattaa johtaa fysiikan perusasioiden syvempään ymmärtämiseen, mikä puolestaan voi muuttaa käsityksemme ympäröivästä maailmasta.

7/ Miten voimme varautua kvanttilaskennan riskeihin?

Vaikka kvanttilaskennan täyttä potentiaalia ei pystytä hyödyntämään vielä vuosiin, sen aiheuttama uhka nykyisille salausstandardeille on kiistaton. Riskiä lisää se, että arkaluonteisia tietoja voidaan varastaa jo nyt ja purkaa tulevaisuudessa, kun kvanttietokoneet pystyvät murtamaan nykyiset salausmenetelmät. Tämä herättää huolta ja korostaa sitä, miten organisaatioiden on arvioitava nykyiset haavoittuvuutensa ja aloitettava suunnittelu kvanttiaikakautta varten.

Kaikkien organisaatioiden, jotka haluavat suojata taloudellisia tietojaan, immateriaalioikeuksiaan tai muita arkaluonteisia tietoja – erityisesti terveystietojen kaltaisia arkaluonteisia henkilötietoja – on ryhdyttävä toimiin välittömästi. Tämä koskee erityisesti yrityksiä, jotka ylläpitävät kriittistä infrastruktuuria, kuten sähköverkkoja, televerkkoja, liikennejärjestelmiä ja rahoituslaitoksia.

Uhka koskee erityisesti tietoja, joiden on oltava salaisia vielä kymmenenkin vuoden kuluttua, joten tarve ryhtyä toimiin on todella välitön. Kriittisten järjestelmien tunnistaminen ja siirtyminen kvanttiturvalliseen salaukseen on monimutkaista ja vie paljon aikaa. Riskien minimoimiseksi organisaatioiden on siirryttävä kvanttiturvalliseen salaukseen, asetettava arkaluonteiset tiedot etusijalle, otettava käyttöön kvanttiturvallisia teknologioita ja tehostettava yhteistyötä valtioiden ja sääntelyviranomaisten kanssa.

Kvanttilaskenta ei aseta haasteita ainoastaan tietoturvalle, vaan sillä on myös merkittäviä vaikutuksia yhteiskuntaan ja geopolitiikkaan. Kun maat ryhtyvät ”kvanttikilpavarusteluun”, resurssien ja kyvykkyyksien erot uhkaavat lisätä globaalia eriarvoisuutta. Lisäksi kvanttiteknologian nopea kehitys herättää eettisiä ja yhteiskunnallisia kysymyksiä esimerkiksi sen vaikutuksista yksityisyyteen, datanomistajuuteen ja valvontaan. Näiden riskien ymmärtäminen on välttämätöntä, jotta voimme valmistautua ja lieventää kvanttiteknologian kehityksen mahdollisia haittapuolia.

- ✓ **Arkaluonteiset tiedot ovat vaarassa**
- ✓ **Kvanttiturvallisiin ratkaisuihin siirtyminen edellyttää välittömiä toimia**
- ✓ **Yhteistyö on ratkaisevan tärkeää tämän haasteen voittamiseksi**

Tässä luvussa siirrytään edellisissä luvuissa käsitellyistä kvanttilaskennan tarjoamista mahdollisuuksista sen mahdollisesti aiheuttamiin riskeihin ja uhkiin. Kvanttitekniikat voivat kehittyessään luoda uusia haavoittuvuuksia, jotka vaarantavat tietoturvan, kriittisen infrastruktuurin ja maailmanlaajuisen vakauden. Kun ymmärrämme riskit ja uhat varhaisessa vaiheessa, voimme ryhtyä ennakoiviin toimenpiteisiin niiden lieventämiseksi tehokkaasti.

Kvanttilaskenta turvallisuusuhkana

Vaikka kvanttilaskenta tarjoaa mullistavia mahdollisuuksia, siihen liittyy myös merkittäviä riskejä erityisesti kyberturvallisuuden alalla. Nämä riskit voivat vaikuttaa yksilöiden yksityisyyteen, häiritä elintärkeää infrastruktuuria ja uhatta kansallista turvallisuutta, joten niihin varautuminen edellyttää välittömiä ja koordinoituja toimia.

Tietojen luottamuksellisuuteen ja yksityisyyteen kohdistuvia uhkia

Kvanttilaskenta voi uhata perusteellisesti tietojen luottamuksellisuutta ja yksityisyyttä, koska se tekee nykyisistä salausalgoritmeista käyttökelvottomia. Shorin algoritmia käyttävät kvanttietokoneet voisivat vaarantaa erittäin arkaluonteisia tietoja liittyen esimerkiksi rahansiirtoihin, ihmisten terveyteen ja kansallisesti kriittiseen viestintään. Tätä haavoittuvuutta pahentavat ”*harvest now, decrypt later*” -tyyppiset hyökkäykset, joissa hyökkääjät varastavat salattuja tietoja nyt ja suunnittelevat purkavansa ne myöhemmin, kun kvanttitekniikka on kehittynyt riittävästi (katso tietoruutu).

Kiireellisin uhka koskee tietoja, jotka ovat arkaluonteisia pitkällä aikavälillä, kuten valtioiden salaisuudet, terveystiedot, tai kriittiset kansalliset infrastruktuuritiedot. Tällaisten tietojen vuotaminen voisi heikentää merkittävästi yleisön luottamusta digitaalisiin järjestelmiin, mikä heikentäisi keskeisten palvelujen luotettavuutta ja uhkasi digitalouden vakautta. Nämä riskit korostavat kvantitikestäviin salausratkaisuihin siirtymisen tärkeyttä tietoturvan varmistamiseksi.

RISKI TIETOJEN KERÄÄMISESTÄ TULEVAA SALAUKSEN PURKAMISTA VARTEN

"Harvest now, decrypt later" viittaa verkkohyökkäykseen, jossa hyökkääjät varastavat salattuja tietoja ja suunnittelevat purkavansa niiden salauksen myöhemmin, kun kvanttietokoneet ovat tarpeeksi tehokkaita murtamaan nykyiset salausten menetelmät.

- Keruvaihe: Hyökkääjät varastavat salattuja tietoja kannettavista tietokoneista, palvelimista tai verkon kautta tapahtuvan siirron aikana. Hyökkääjä säilyttää varastetut tiedot, kunnes kvanttilaskennan kehitys mahdollistaa salauksen purkamisen.
- Salauksenpurkuvaihe: Kvanttietokoneita käytetään salauksen murtamiseen, jolloin arkaluonteiset tiedot vaarantuvat.

Tämä taktiikka on merkittävä uhka tiedoille, jotka säilyttävät arvonsa pitkään. Voit ajatella sitä tikittävänä aikapommina arkaluonteisille tiedoillesi. Tällaisten hyökkäysten mahdolliset seuraukset ovat merkittävät. Jos luottamuksellisten tietojen salaus murrettaisiin, se voisi johtaa vakaviin yksityisyyden suojan loukkauksiin ja vaarantaa yksityishenkilöiden ja yritysten tiedot.

Digitaalisten allekirjoitusten salausten murtaminen voisi johtaa oikeudellisten asiakirjojen väärentämiseen, häiritä liiketoimintaa ja aiheuttaa taloudellista vahinkoa sekä mainehaittaa. Hyökkääjät voisivat myös varastaa arvokasta immateriaaliomaisuutta tai tutkimus- ja kehitystyötä koskevia tietoja, mikä johtaisi kilpailuedun merkittävään menetykseen. Lisäksi kiristyskampanjat voisivat vaarantaa organisaatioiden vakautta.

Kriittisen infrastruktuurin ja palvelujen häiriöt

Kvanttilaskennan avulla voitaisiin myös häiritä kriittisen infrastruktuurin ja keskeisten palvelujen toimintaa, jos hyökkääjät onnistuisivat murtamaan viestintä- ja valvontajärjestelmien salauksen. Sähköverkot, rahoitusjärjestelmät ja viestintäverkot ovat kaikki vaarassa. Näihin järjestelmiin kohdistuvat hyökkäykset voisivat johtaa laajoihin taloudellisiin häiriöihin ja vaarantaa maan suvereniteetin. Lainvalvonta- ja tiedusteluviranomaisille salaus on ratkaisevan tärkeää turvallisen viestinnän, tiedustelutietojen keräämisen ja tietojen tallentamisen kannalta. Jos salaus on murrettavissa, heidän kykynsä suojella kansallisia etuja ja toteuttaa salaisia operaatioita vaarantuu. Tämä voisi vaikuttaa yleiseen turvallisuuteen ja maanpuolustuskykyyn.

Miten voimme rakentaa kvanttiturvallisen tulevaisuuden?

Kvanttiturvallisen tulevaisuuden rakentaminen edellyttää näihin haasteisiin vastaamista kahden toisiaan täydentävän lähestymistavan avulla: kvanttiturvallisen salauksen (*Post-Quantum Cryptography*, PQC) ja kvanttiavainten jakelun (*Quantum Key Distribution*, QKD). PQC keskittyy kehittämään uusia salausalgoritmeja, jotka kestävät sekä klassiset että kvanttihyökkäykset, kun taas QKD hyödyntää kvanttimekaniikan periaatteita turvallisten viestintäkanavien luomiseen. Yhdessä ne muodostavat kvanttiturvallisen digiympäristön perustan.

RSA-SALAUKSEN MURTAMINEN – MIKSI NYT ON OIKEA AIKA TOIMIA?

Jotkin kvanttisovellukset, kuten Shorin algoritmin käyttäminen 2048-bittisen RSA-avaimen murtamiseen, vaativat erittäin suorituskykyisiä laitteita. Arvioiden mukaan tämä voisi edellyttää miljoonia tai jopa kymmeniä miljoonia fyysisiä kubitteja. Tarkasta määrää ei kuitenkaan ole vielä varmuutta, sillä virheenkorjauksen kehittyminen voisi pienentää tätä vaatimusta merkittävästi. Tämän epävarmuuden vuoksi on erittäin vaikeaa ennustaa, milloin kvanttietokoneet pystyvät murtamaan RSA-salauksen, ja asiantuntijoiden mielipiteet vaihtelevat suuresti viidestä vuodesta neljäänkymmeneen vuoteen.

Huolimatta siitä milloin uhka toteutuu, on ratkaisevan tärkeää toimia nyt. Siirtyminen kvanttiturvallisiin salausalgoritmeihin on monimutkainen ja aikaa vievä prosessi, jonka arvioidaan kestävän kolmesta kahteentoista vuotta. Lisäksi on otettava huomioon, kuinka kauan tietojen on pysyttävä luottamuksellisina. Viivyttely lisää riskiä siitä, että arkaluonteiset tietosi ovat haavoittuvia, kun salauksen purkaminen kvanttilaskennalla tulee mahdolliseksi.

Kvanttiturvallinen salaus ja standardointi

Kvanttiturvallinen salaus (PQC) viittaa uusiin salausalgoritmeihin, joiden uskotaan kestävän sekä klassisten ja kvanttitietokoneiden hyökkäykset. Vaikka tällaisia algoritmeja on jo saatavilla, niitä ei vielä käytetä laajasti. Standardit ovat olennaisen tärkeitä tässä siirtymävaiheessa, jotta voidaan varmistaa laajamittainen käyttöönotto. Standardit varmistavat, että näitä uusia algoritmeja käyttävät järjestelmät voivat toimia saumattomasti yhdessä ja tarjota yhtenäisen suojan kvanttitietohyökkäyksiä vastaan. Ne takaavat myös, että käytetyt algoritmit on testattu tarkasti ja että ne ovat aidosti turvallisia. Lisäksi standardit yksinkertaistavat siirtymistä kvanttiturvalliseen salaukseen tarjoamalla selkeitä ohjeita ja parhaita käytäntöjä, jotka tekevät prosessista sujuvamman ja kustannustehokkaamman.

Yhdysvaltain kansallinen standardointi- ja teknologiainstituutti (NIST) on tärkeä toimija näissä ponnisteluissa, sillä se on edelläkävijä kvanttikestävien algoritmien standardoinnissa. Vuonna 2024 NIST julkaisi kolme ensimmäistä standardoitua algoritmia kvanttiturvallista salausta varten, mikä on merkittävä virstanpylväs siirtymässä uudenlaiseen salaukseen. Valtiot kaikkialla maailmassa tunnustavat tämän asian tärkeyden. Ne luovat säännöksiä ja aloitteita, joilla edistetään kvanttiturvallisen ratkaisun käyttöönottoa.

Kvanttiavaintenjakelun tutkimus

Vaikka kvanttiturvallinen salaus, PQC, on olennaisen tärkeä kvanttiturvallisen tulevaisuuden kannalta, se ei välttämättä yksistään riitä. Kvanttilaskennan (tai muiden laskentamenetelmien) kehittyessä voi löytyä uusia menetelmiä, joilla voidaan murtaa jopa kaikkein kestävimmit PQC-algoritmit. Tämä edellyttää myös muiden vaihtoehtoisten ratkaisujen, kuten kvanttiavaintenjakelun (*Quantum Key Distribution*, QKD) tutkimista. QKD:ssa hyödynnetään kvanttimekaniikan periaatteita salausavainten jakamiseksi turvallisesti kahden osapuolen välillä. Salakuuntelijoiden on käytännössä mahdotonta siepata avaimia ilman, että hyökkäys huomataan.

QKD on keskeinen rakennuspalikka kvantti-internetille, jossa hyödynnetään kvantti-ilmiöitä ennennäkemättömän turvallisuuden saavuttamiseksi. Koska QKD mahdollistaa erittäin turvallisen viestinnän, joka kestää jopa tehokkaiden kvanttietokoneiden hyökkäykset, siitä voi tulla kriittinen osa tulevaisuuden viestintäinfrastruktuuria. Nämä järjestelmät voidaan integroida perinteiseen viestintäinfrastruktuuriin, kuten valokuitukaapeleihin. Yhteensopivuus voisi helpottaa asteittaista siirtymistä hybridimuotoiseen kvantti-klassiseen internetiin, jossa QKD turvaa kaikkein arkaluonteisimman viestinnän.

Yhteistyö kvanttiturvallisen tulevaisuuden puolesta

Siirtymä kvanttiturvalliseen maailmaan on monimutkainen ja pitkäkestoinen hanke, joka edellyttää merkittäviä resursseja, teknistä asiantuntemusta ja maailmanlaajuisia koordinoitua. Valtioiden, teollisuuden ja tutkimuslaitosten välinen yhteistyö on ratkaisevan tärkeää näiden haasteiden voittamiseksi ja digitaalisen ympäristön turvallisuuden varmistamiseksi. Viime kädessä standardit ja kvanttiavainten jakelun kaltaisten tekniikoiden kehitys ovat perusta, jolle voimme rakentaa kvanttiturvallisen maailman ja mahdollistaa turvallisen ja yhteentoimivan digiympäristön tällä uudella teknologian aikakaudella.

Kvanttilaskennan aiheuttama riski on saanut Yhdysvallat ryhtymään varhaisiin toimiin. Presidentti Biden allekirjoitti vuonna 2022 Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act -lain²⁹, joka käynnisti vaiheittaisen siirtymäsuunnitelman kvanttiturvalliseen salaukseen. Euroopan unioni on sen sijaan toiminut hitaammin: se antoi huhtikuussa 2024 suosituksen koordinoitua siirtymistään kvantti-aikakauden kryptografiaan³⁰. Vaikka kyseessä on toistaiseksi vain suositus, tiukempia sääntelytoimia saattaa seurata, ja yritysten on syytä valmistautua entistä tiukempiin EU:n ohjeisiin lähitulevaisuudessa.

Yhteiskunnalliset ja geopoliittiset vaikutukset

Kvanttilaskennan nopea kehitys on johtanut maailmanlaajuiseen ”kvanttikilpavarusteluun”, jossa kansakunnat kilpailevat tämän mullistavan teknologian hallinnasta. Kilpailulla on merkittäviä yhteiskunnallisia ja geopoliittisia vaikutuksia. Ensimmäiset maat, jotka saavuttavat edistyneet kvanttikyvykkyydet, voivat saada merkittävän geopoliittisen edun, mikä voi johtaa voimatasapainon muuttumiseen esimerkiksi kyberturvallisuuden, taloudellisen vaikutusvallan ja teknologisen innovoinnin aloilla.

Samalla kilpailu uhkaa pahentaa nykyistä maailmanlaajuista eriarvoisuutta. Varakkaammilla mailla ja organisaatioilla on paremmat mahdollisuudet investoida kvanttitekologiaan ja varmistaa kvanttiturvallisuus, jolloin vähemmän kehittyneet maat ja pienemmät organisaatiot voivat jäädä haavoittuviksi. Protektionistinen politiikka, jolla rajoitetaan kvanttitekologian tai -osaamisen saatavuutta, voisi entisestään haitata kansainvälistä yhteistyötä ja pahentaa eriarvoisuutta.

Julkinen mielipide kvanttilaskennasta vaikuttaa ratkaisevalla tavalla sen kehitykseen. Pelot ja väärinkäsitykset voivat hidastaa edistystä ja viivästyttää kvanttilaskennan yhteiskunnalle mahdollisesti tuomia hyötyjä. Siksi on tärkeää lisätä yleistä tietoisuutta kvanttilaskennan myönteisistä vaikutuksista ja käsitellä samalla mahdollisia huolenaiheita. Kvanttitekologian nopea kehitys herättää myös kriittisiä eettisiä kysymyksiä liittyen yksityisyyteen, tietojen omistamiseen ja lisääntyneisiin valvontamahdollisuuksiin. Ilman merkittävää panostusta eettiin näkökulmiin on olemassa vaara, että kvanttitekologiaa käytetään väärin.

Tarve toimia nopeasti ja yhteistyössä

Yhteistyöllä voimme edistää vastuullista innovointia ja varmistaa, että kvanttitekologia palvelee ihmiskunnan etua. Riskien lieventäminen edellyttää kiireellisiä kansainvälisiä yhteistoimia useilla alueilla:

- **Kvanttiturvallisen salauksen käyttöönotto**
- **Tietoisuuden ja osaamisen kasvattaminen**
- **Kansainvälisen yhteistyön edistäminen**

Investointi kvanttiturvallisiin salaustekniikoihin on ratkaisevan tärkeää. Tavoitteena tulee olla kehittää, standardoida ja ottaa käyttöön uusia algoritmeja, jotka kestävät kvanttihyökkäykset. Hallitusten ja organisaatioiden on omaksuttava kryptografinen ketteruus, jolloin niiden järjestelmiä voidaan helposti päivittää uusien kryptografisten ratkaisujen tullessa saataville.

Tietoisuuden ja asiantuntemuksen kehittäminen ovat myös kriittisiä osatekijöitä varautumisessa³¹. Poliittisten päättäjien, yritysjohtajien ja kansalaisten on

ymmärrettävä kvanttiturvallisuuden merkitys. Näihin haasteisiin vastaaminen edellyttää sellaisen ammattitaitoisen työvoiman kouluttamista, joka kykenee kehittämään ja ottamaan käyttöön kvanttiteknologiaa.

Kvanttiuhat ovat maailmanlaajuisia haasteita, jotka edellyttävät yhteistyöhankkeita tutkimuksessa, standardoinnissa ja tietojen jakamisessa. Kansainvälinen koordinointi auttaa suojelemaan digitaalista infrastruktuuria ja varmistamaan, että kvanttiteknologian hyödyt jakautuvat laajasti sen sijaan, että ne keskittyisivät vain muutamille alueille.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka kvanttilaskennan yhteiskunnalliset ja kansalliset turvallisuushkat herättävät huolta, ennakoivilla toimenpiteillä riskejä voidaan lieventää. Yhteiskunnat voivat turvata digitaalisen infrastruktuurinsa kehittämällä ja ottamalla käyttöön kvanttiturvallisia ratkaisuja, investoimalla osaamiseen ja tietoisuuteen sekä edistämällä kansainvälistä yhteistyötä. Tämä tasoittaa tietä turvalliseen ja kestäväan tulevaisuuden kvanttiaikakauteen, jolloin yhteiskunnat voivat hyödyntää kvanttiteknologian koko potentiaalia vaarantamatta yksityisyyden, oikeudenmukaisuuden ja maailmanlaajuisen yhteistyön kaltaisia perusarvoja.

”Kvanttitietokoneet aiheuttavat myös yhteiskunnallisia riskejä, mutta niitä pohditaan jo nyt ja yritetään lieventää etukäteen, joten tilanne ei ole toivoton.”

Jasmin Jutila, August Associates

8/ Mikä on paras kvanttistrategia yritykselleni?

Alati muuttuvassa teknologisten edistysaskeleiden maailmassa kvanttilaskenta erottuu merkittävänä mahdollisuutena. Yritysten huomiosta kilpailevat monet uudet teknologiat, joten on tärkeää arvioida, miten kvanttilaskenta voisi tukea liiketoimintasi tavoitteita ja millaista arvoa kvanttistrategiasta voisi syntyä. Vaikka kvanttilaskennan välitön merkitys ei olisi täysin selvä, sen potentiaalinen rooliin pohtiminen yrityksessäsi voi antaa arvokkaita näkemyksiä tulevaisuuden sovelluksista ja mahdollisuuksista.

Useimmille yrityksille erityisen kvanttistrategian laatiminen ei ole välttämätöntä. Sen sijaan avainasemassa ovat jatkuva oppiminen ja kokeilut. Kvanttilaskennan uhat ja mahdollisuudet tulee ymmärtää johtotasolla, sisällyttää laajempaan liiketoimintastrategiaan ja niiden kehitystä on hyvä seurata säännöllisesti. Parasta suunnitelmaa omalle yrityksellesi ei voida määrittellä ulkopuolelta, vaan sen tulee perustua siihen, millaisia murroksia kvanttilaskennan odotetaan aiheuttavan toimialallesi ja omalle roolillesi alalla. Suunnitelmaan vaikuttavat myös käytettävissä olevat T&K-resurssit, teknologian käyttöönottokulttuuri ja uudistumisvalmiudet.

Kvanttistrategian tulisi ennen kaikkea heijastella yrityksesi kunnianhimoa ja riskinsietokykyä. Kvanttilaskennan mahdollisuuksien integroiminen liiketoimintaan edellyttää useita vaiheita ja strategisia päätöksiä teknologian kehityksessä. On tärkeää valmistautua eri ajanjaksoihin ja pysyä joustavana – myös sen suhteen, että kvanttilaskenta ei välttämättä täytä kaikkia, siihen kohdistuvia odotuksia. Valmiutesi hyödyntää uutta teknologiaa parantuvat kuitenkin koko ajan, kun tutkit kvanttilaskennan tarjoamia mahdollisuuksia ja teet tietoon perustuvia päätöksiä.

- ✓ **Suhtaudu kvanttilaskentaan uteliain mielin**
- ✓ **Tutustu alaan aikaisessa vaiheessa**
- ✓ **Räätälöi strategiasi**
- ✓ **Ole sopeutuvainen**
- ✓ **Paranna tulevaisuusvalmiuksiasi**

Tässä luvussa tarkastelemme keskeisiä näkökulmia, jotka kannattaa huomioida, kun yritys haluaa luoda omia lähtökohtiaan ja tavoitteitaan vastaavan kvanttistrategian. Luku tarjoaa viitekehysten kvanttilaskennan merkityksen arvioimiseen liiketoiminnallesi.

Miten voit arvioida kvanttilaskennan merkitystä yrityksellesi?

Kuten kaikkien uusien teknologioiden kohdalla, kvanttilaskennan käyttöönoton polku määräytyy sen koetun hyödyllisyyden ja käytön helppouden perusteella. Kvanttilaskennan varhaiseen kehitysvaiheeseen liittyy kuitenkin ainutlaatuinen haaste: kvanttilaskenta ei ole vielä tuottanut selkeitä liiketoimintahyötyjä, ja sen täyden potentiaalin saaminen käyttöön vie aikaa. Lisäksi kvanttilaskennan käytötapoja ei vielä tunneta täysin, ja ne voivat vaihdella eri aloilla merkittävästi.

Näistä epävarmuustekijöistä huolimatta ensimmäinen askel on aloittaa kvanttilaskennan kehityksen seuraaminen. Teknologian ja sen mahdollisuuksien tuntemus antaa yrityksellesi valmiudet arvioida sen potentiaalia sekä tunnistaa oikea hetki kokeilujen aloittamiseen. Kvanttistrategiaa suunnitellessasi arvioi teknologian mahdolliset hyödyt, pohdi sen sovelluksia ja harkitse vaihtoehtoisia etenemistapoja.

Mahdollisten hyötyjen ja sisäisten valmiuksien arviointi

Jos haluat arvioida kvanttilaskennan potentiaalia yrityksesi kannalta, aloita tutkimalla kirjallisuudessa jo esiteltyjä sovelluksia ja käytötappauksia, kuten optimointia, koneoppimista tai simulointia. Arvioi miten ne liittyvät yrityksesi nykyisiin ja pitkän aikavälin tarpeisiin.

Pohdi seuraavaksi, miten yrityksesi suhtautuu innovointiin ja teknologian käyttöönottoon. Onko yrityksesi edelläkävijä, joka on valmis kokeilemaan uusia teknologioita, vai seuraatteko mieluummin hyväksi havaittuja trendejä? Jatka arvioimalla organisaatiosi kunnianhimoa, riskinsietokykyä, käytettävissä olevia resursseja, T&K-panosta ja kokeilukulttuuria. Kaikki nämä tekijät vaikuttavat siihen, miten aktiivisesti kvanttilaskennan hyötyjä kannattaa lähteä tavoittelemaan. Joillekin yrityksille varovainen eteneminen voi olla järkevää, kun taas toisille varhainen käyttöönotto voi tarjota merkittävän kilpailuedun ja edistää innovatiivista ajattelua.

Ulkoiset tekijät toimialan kontekstin arvioinnissa

Kvanttilaskennan merkitykseen vaikuttavat myös toimiala ja kilpailuasetelma. Esimerkiksi rahoituksessa, logistiikassa tai lääketeollisuudessa kvanttitekniologiat voivat tarjota huomattavia etuja, kuten merkittäviä kustannussäästöjä

logistiikassa tai läpimurtoja lääkekehityksessä. Pohdi, voisiko kvanttilaskenta auttaa ratkaisemaan toimialasi kriittisiä haasteita tai tarjota uusia mahdollisuuksia erottua kilpailijoistasi. Vakiintuneilla tai erittäin kilpailluilla toimialoilla toimivat yritykset voivat huomata kvanttiteknologian avaavan uusia mahdollisuuksia, jotka voivat muuttaa perusteellisesti toimialan dynamiikkaa.

”Onko yrityksesi asemassa, jossa huomattavasti paremman ratkaisun avulla voisit mullistaa oman toimialasi tai päästä uudelle toimialalle?”

Topias Uotila, Unitary Zero Space

Keskittyminen pitkän aikavälin valmiuteen

Kvanttilaskennan käyttöönotto on pitkän aikavälin prosessi erityisesti yrityksille, joiden keskeiset järjestelmät – kuten toimitusketjun hallinta, rahoitustoiminnot tai data-analyysi – ovat vahvasti integroituja ja vaativat huomattavia ponnisteluja, jotta ne pystytään sopeuttamaan uusiin teknologioihin. Näissä organisaatioissa valmius riippuu asteittaisesta integroinnista ja jatkuvasta oppimisesta teknologian kehittyessä. Tämän vuoksi strategioiden on hyvä olla joustavia, jotta ne mukautuvat muuttuvaan ympäristöön.

Kvanttilaskennan lähestymistavan räätälöinti tarkoittaa tasapainoilua kunnianhimon ja varovaisuuden välillä sekä tutkimuksen sovittamista yhteen organisaatiosi valmiuksien ja tavoitteiden kanssa. Arvioimalla mahdollisia hyötyjä, ymmärtämällä toimialasi dynamiikkaa ja aloittamalla pienin askelin voit varmistaa yrityksellesi mahdollisuuden tarttua kvanttimahdollisuuksiin niiden ilmaantuessa.

Mikä strategia sopii yrityksellesi?

Yritykset voivat omaksua kvanttilaskennan käyttöönotossa erilaisia rooleja aina edelläkävijästä ja varhaisesta omaksujasta varovaiseen tarkkailijaan tai odottajaan. Oman roolisi ymmärtäminen kehittyvässä ekosysteemissä on ratkaisevan tärkeää, jotta pystyt sovittamaan kvanttimahdollisuudet yhteen strategisten tavoitteidesi kanssa. Brändi-imago, riskinottohalukkuus ja kvanttiteknologian kokeiluihin käytettävissä olevat resurssit ovat keskeisiä tekijöitä strategisten päätösten teossa. Riskit ja mahdollisuudet ovat erilaiset sen mukaan, milloin yrityksesi hyppää mukaan kehityksen kelkkaan ja minkä roolin se siinä ottaa.

Kun haluttu rooli on tunnistettu, on yrityksen syytä miettiä erilaisia strategioita kvanttilaskennan hyödyntämiseen. Strategioiden soveltavuuteen vaikuttavat muun muassa yrityksen riskiprofiili, innovaatiovalmiudet ja liiketoiminnalliset tavoitteet. Useimmille yrityksille on suositeltavaa noudattaa vaiheittaista strategiaa, jossa aloitetaan pienimuotoisista kokeiluista (esim. proof-of-concept-hankkeista) ja laajennetaan kvanttilaskennan soveltamisesta sitä mukaa, kun teknologia kypsyy. Näin voit tunnistaa mahdollisia kumppaneita ja ymmärtää paremmin, miten kvanttilaskennan kehitys linkittyy muihin liiketoimintaasi tukevien teknologioiden kehitykseen. Valitusta strategiasta huolimatta varmis-

ta, että se pysyy joustavana ja mukautuu mahdollisiin muutoksiin, sillä kvanttilaskenta on vielä alkuvaiheessa ja siihen liittyy monia epävarmuustekijöitä. Seuraavana tarkastelemme neljää ylätasoa strategiaa.

Älä tee mitään -strategia

Jos kvanttilaskenta ei vaikuta merkitykselliseltä yrityksesi kannalta tai sen mahdolliset hyödyt eivät tunnu houkuttelevilta, *älä tee mitään* -strategia voi olla paikallaan. Tämä lähestymistapa toimii hyvin esimerkiksi perinteisillä, rakentamisen kaltaisilla aloilla, joilla kvanttietokoneiden ei odoteta mullistavan markkinoita lyhyellä tai keskipitkällä aikavälillä. Tämä strategia voi soveltua myös yrityksille, joilla on rajalliset T&K-resurssit, hitaat teknologian käyttöönottosyklit, tiukkoja taloudellisia rajoituksia tai liiketoimintamalli, jossa innovointia ei aseteta etusijalle. Vaikka toimialasi ei lukeutuisikaan varhaisiin omaksujiin, sinun on kuitenkin oltava tietoinen salauksen purkamiseen liittyvistä riskeistä ja mahdollisista pitkän aikavälin vaikutuksista (katso luvut 6 ja 7).

Jos käsityksesi kvanttilaskennasta muuttuu tulevaisuudessa, tilaisuus olla edelläkävijä tai varhainen omaksuja saattaa olla lipunut ohi, mutta myöhäinen omaksuminen voi silti olla yhä vaihtoehtona. Tämä strategia voi soveltua myös silloin, jos kvanttilaskennan mahdollisiin hyötyihin suhtaudutaan epäilevästi. Skeptikoillakin on kuitenkin arvokas rooli kehitysyhteisössä, sillä heidän hankalat kysymyksensä voivat tukea teknologian kehittymistä.

I ”Kvantti ei sovi kaikille. Ei vielä.”

Aparna Prabhakar, Schneider Electric³²

Tarkkaile ja tutki -strategia

Tarkkaile ja tutki -strategia sopii monenlaisille yrityksille, sillä se tarjoaa tasapainoisen lähestymistavan kvanttilaskennasta kiinnostuneille yrityksille, jotka eivät ole vielä valmiita tekemään merkittäviä investointeja. Se on erityisen hyödyllinen toimialoilla, jotka todennäköisesti muuttuvat kvanttilaskennan myötä, mutta joilla merkittävä investointi uusiin teknologioihin ei ole vielä käytännössä järkevää. Tähän strategiaan sisältyy kvanttilaskennan kehityksen säännöllinen seuraaminen, osallistuminen alan yleistajuisiin keskusteluihin tai aloitteisiin (esim. Business Finlandin tapahtumat ja tutkimushankkeet) sekä pienimuotoisten kokeilujen tai kumppanuuksien hyötyjen säännöllinen arvioiminen.

Yrityksille, joilla on paineita innovoida ympäristön tai taloudellisten haasteiden vuoksi, *tarkkaile ja tutki* -strategia antaa mahdollisuuden tehdä alustavia tutkimuksia sitomatta liikaa resursseja. Siten se mahdollistaa kvanttilaskennan mahdollisuuksien tutkimisen pienten, kohdennettujen oppimiskokeilujen avulla, mikä auttaa yrityksesi henkilöstöä ja päätöksentekijöitä omaksuma pitkäaikaavälin näkökulman. Samalla pysyt ajan tasalla ja olet valmis toimimaan, kun teknologia kypsyy.

Kokeile ja ota käyttöön -strategia

Tämä *kokeile ja ota käyttöön* -strategia asemoi yrityksesi *varhaiseksi omaksujaksi*, joka tutkii aktiivisesti kvanttilaskennan ja sen sovellusten mahdollisuuksia. Pilottihankkeiden tai proof-of-concept-kokeilujen kautta saat arvokasta tietoa siitä, miten kvanttilaskenta voisi kehittää toimintojasi ja edistää pitkän aikavälin tavoitteitasi.

Tämä strategia sopii erinomaisesti yrityksille, joilla on vahva innovaatio- ja tutkimuskulttuuri ja jotka haluavat nousta edelläkävijöiksi tai pysyä sellaisina uusien teknologioiden käyttöönotossa. Se soveltuu hyvin myös toimialoille, joilla jo vaatimatonkin kvanttietu voi johtaa merkittäviin hyötyihin. Esimerkiksi rahoitusriskien arvioinnin tai logistiikan optimoinnin aloilla voi kehittyä tilaisuuksia, joita yritykset eivät kerta kaikkiaan voi jättää käyttämättä.

Omaksumalla tämän strategian yrityksesi voi pysyä kvanttiteknologian eturintamassa, asemoitua tämän nopeasti kehittyvän alan johtavaksi toimijaksi ja valmistautua tuleviin läpimurtoihin.

Etulinjan edelläkävijä -strategia

Tämä *etulinjan edelläkävijä* -strategia on tarkoitettu yrityksille, jotka haluavat vakiinnuttaa asemansa kvanttilaskennan *edelläkävijöinä*. Se edellyttää huomattavia investointeja tutkimus- ja kehitystyöhön, kumppanuuksien vaalimista tutkimuslaitosten kanssa ja innovaatioekosysteemin luomista kvanttikehityksen vauhdittamiseksi.

Edelläkävijäyritykset menevät varhaista käyttöönottoa pidemmälle sitomalla enemmän resursseja kvanttiteknologiaan kuin niiden kilpailijat. Tämä lähestymistapa mahdollistaa räätälöidyn kvanttiekosysteemin kehittämisen, joka vastaa toimialakohtaisiin haasteisiin ja asemoi organisaation keskeiseksi kvanttiläpimurroista hyötyväksi tahoksi. Varhaisilla ja merkittävillä investoinneilla yrityksesi voi muokata kvanttiteknologian kehitystä omalle toimialallesi sopivaksi.

Strategisilla kumppanuuksilla on tässä lähestymistavassa ratkaiseva merkitys. Yhteistyö julkisten aloitteiden, kvanttiteknologian startup-yritysten ja vakiintuneiden teknologiatoimittajien kanssa voi nopeuttaa toteuttamiskelpoisten kvanttiratkaisujen kehittämistä ja vähentää samalla riskejä. Tällaiset liittoumat auttavat myös varmistamaan paikan innovoinnin eturintamassa, jolloin yrityksesi pääsee hyötymään suoraan uusista mahdollisuuksista.

Tämän strategian omaksuminen ei ainoastaan vakiinnuta yrityksesi asemaa kvanttivallankumouksen edelläkävijänä, vaan tarjoaa myös ainutlaatuisen mahdollisuuden vaikuttaa kvanttiteknologian kehityskulkuun. Ottamalla aktiivisen roolin tämän mullistavan teknologian kehittämisessä organisaatiosi pystyy määrittelemään oman tulevaisuutensa sen sijaan, että se vain reagoisi siihen.

Joustavan ja tulevaisuuteen suuntautuneen lähestymistavan säilyttäminen

Olipa yrityksesi strategiana jättää kvanttilaskenta toistaiseksi huomiotta, tarkkailla ja tutkia sen kehitystä, pilotoida ja ottaa sitä käyttöön tai toimia edelläkävijänä, jokaisella lähestymistavalla on omat vahvuutensa. Tärkeintä on omaksumaa joustava strategia, joka kehittyy kvanttiteknologian mukana ja varmistaa, että organisaatiosi on valmistautunut tuleviin mahdollisuuksiin ja haasteisiin. Taulukko 6 tiivistää kunkin strategian ja roolin sekä antaa tietoa siitä, ketkä voisivat hyötyä kustakin lähestymistavasta ja millaisia toimenpiteitä eri rooleissa kannattaa harkita.

Taulukko 6. Strategiat ja roolit.

Strategia	Rooli	Kuvaus	Sopii	Esimerkkejä toimenpiteistä
A) Älä tee mitään	Ei-omaksuja tai epäilijä	Sitoutuu minimaalisesti kvanttilaskentaan. Seuraa riskejä ja edistystä etäältä.	Perinteiset teollisuudenalat, joilla teknologian merkitys on vähäinen, T&K-toiminta on rajallista tai yrityksillä on merkittäviä taloudellisia rajoitteita.	Tarkastele ajoittain edistystä ja alakohtaisia riskejä.
B) Tarkkaile ja tutki	Varovainen tarkkailija	Pysy ajan tasalla kvanttilaskennan kehityksestä osallistumalla keskusteluihin ja tapahtumiin sekä säännöllisesti arvioimalla tarvetta mahdollisille pienen riskin kokeiluille.	Yritykset, jotka haluavat tutustua kvanttilaskentaan ilman merkittävää sitoutumista, tai yritykset, joilla ei ole valmiuksia tai resursseja aktiivisempaan kokeiluun.	Seuraa, tee oppimiskokeiluja, valmistaudu uuhkiin.
C) Kokeile ja ota käyttöön	Varhainen omaksuja	Tutkii aktiivisesti kvanttilaskennan mahdollisuuksia pilottihankkeilla ja proof-of-concept-kokeiluilla. Kehittää sisäisiä valmiuksia ja arvioi strategisia etuja.	Tutkimuspainotteiset teollisuudenalat (esim. materiaalitie-de, kemia) ja alat, joilla kvanttilaskennan odotetaan tarjoavan merkittäviä etuja.	Liity kvanttilaskennan ekosysteemeihin. Johda proof-of-concept-projekteja tai osallistu sellaisiin. Laadi etenemissuunnitelma.
D) Etulinjan edelläkävijä	Edelläkävijä	Sitoutuu merkittäviin kvanttialan T&K-investointeihin ja muodostaa ekosysteemejä tutkimuslaitosten, startup-yritysten ja valtiollisten toimijoiden kanssa innovoinnin edistämiseksi.	Suuret organisaatiot, joilla on vankka T&K-budjetti, vahva innovaatiokulttuuri ja kunnianhimoinen pyrkimys johtaa teknologisia mullistuksia.	Rakenna innovaatioekosysteemi tai erityisiä kvanttilaboratoriota.

Kvanttilaskenta on kehittyvä teknologia, joka voi muuttaa yritysten toimintaa merkittävästi. Vaikka käytännön liiketoimintahyötyjen toteutumista odotetaan vielä, kvanttilaskennan varhainen tutkiminen tuottaa arvokasta tietoa ja valmistaa yritystäsi tuleviin mahdollisuuksiin. Minkä strategian sitten valitsetkin, pitkän aikavälin näkökulman säilyttäminen on ratkaisevan tärkeää. Kvanttilaskennan ala kehittyy nopeasti, ja kyky mukauttaa lähestymistapaa teknologian kehittyessä on avain kilpailukyvyn ja –edun säilyttämiseen.

Keskeiset opit

- **Kvanttilaskenta on mullistava teknologia, johon yritysten on syytä kiinnittää huomiota, vaikka sen välitön merkitys ei olisikaan täysin selvä.**
- **Varhainen tutustuminen alaan tuottaa arvokasta tietoa ja valmistelee yritystä tuleviin mahdollisuuksiin.**
- **Paras kvanttistrategia riippuu yrityksesi T&K-resursseista, innovaatiokulttuurista, toimialasta ja riskinsietokyvystä.**
- **Strateginen joustavuus on olennaisen tärkeää – ole valmis mukautumaan kvanttilaskennan kehittyessä.**
- **Kvanttilaskentaan tutustuminen nyt parantaa kykyäsi hyödyntää uusia teknologioita tulevaisuudessa.**

”Aika pian, ellemme jo nyt, olemme siinä vaiheessa, että kvanttilaskenta olisi huomioitava kaikkien yritysten pitkän aikavälin strategiaskenaroinnissa. Tämä vaatii aiheen perusymmärrystä myös ylimmältä johdolta.”

Jasmin Jutila, August Associates

9/ Miten pääsen alkuun?

Kvanttilaskennasta on tulossa mullistava teknologia, jolla on potentiaalia muovata uusiksi kokonaisia toimialoja. Kvanttimatkan aloittaminen edellyttää tietoisuuden lisäämistä kvanttilaskennan mahdollisuuksista ja perusteltujen strategisten päätösten tekemistä koko organisaatiossa. Kvanttilaskentaa koskevan perustason ymmärryksen lisääminen eri tiimeissä – erityisesti IT:ssä, tutkimus- ja kehitystoiminnassa ja johdossa – auttaa vähentämään teknologiaan liittyviä väärinkäsityksiä ja synnyttää innovatiivista ajattelua. Yksinkertaiset aloitteet, kuten tiedonjakotilaisuudet ja pilottihankkeet, auttavat organisaatiotasi pysymään kvanttilaskennan kehityksen tahdissa.

Koska yksittäinen organisaatio ei pysty hallitsemaan yksin kaikkia kvanttilaskennan osa-alueita, kumppanuudet yliopistojen, tutkimuslaitosten, startup-yri-tysten ja innovaatiohubien kanssa ovat välttämättömiä. Yhteistyö alueellisissa kvanttiverkostoissa ja -yhteenliittymissä nopeuttaa oppimista ja liittää yrityk- sesi osaksi kasvavaa kvanttiekosysteemiä. Aloittamalla pienistä proof-of-con-cept-hankkeista tai kvantti-inspiroiduista menetelmistä voit tutkia käytännön sovelluksia ilman kehittyneempiä kvanttietokoneita. Tällaisten projektin kaut- ta voit saada arvokkaita oivalluksia ja valmistella tiimejasi tuleviin läpimurtoihin.

Tutkimusintensiivisissä organisaatioissa investoinnit erityisiin kvanttitiimeihin tai yhteistyö yliopistojen ja tutkimuslaitosten kanssa voi auttaa kehittämään räätälöityjä ratkaisuja. Edelläkävijäyritykset osoittavat, miten varhaiset inves- toinnit kvanttitutkimukseen edistävät innovointia ja mahdollistavat johtavan aseman vakiinnuttamisen omalla alalla. Riippumatta siitä, mikä on kvanttiosaa- misesi nykyinen taso, teknologian muutospotentiaalin tunnistaminen ja jous- tavan pitkän aikavälin strategian kehittäminen varmistavat, että organisaatiosi pysyy kilpailukykyisenä nopeasti kehittyvässä ympäristössä.

- ✓ **Tietoisuus ja ymmärrys**
- ✓ **Ulkoiset kumppanuudet ja verkostot**
- ✓ **Pilottihankkeet**

Tässä luvussa esitellään käytännön esimerkkejä ja parhaita käytäntöjä, jotka ohjaavat yritystäsi ottamaan ensiaskeleet kvanttilaskennan tutkimisessa ja sen mahdollisten sovellusten kartoittamisessa yrityksesi tarpeisiin ja valittuun strategiaan sopivalla tavalla.

Herätä uteliaisuus ja lisää ymmärrystä

Kvanttilaskenta on ainutlaatuinen teknologia, joka toisaalta tarjoaa valtavia mahdollisuuksia ja toisaalta luo liiketoiminnalle erityisiä haasteita. Se ei ole vain fyysikoiden ja tietojenkäsittelytieteilijöiden leikkikenttä, vaan sen potentiaalin täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää, että kehitykseen osallistuu monenlaisia henkilöitä organisaation eri toiminnoista ja tasoilta. Onnistunut siirtymä kvantti aikaan edellyttää uteliaisuuden vaalimista ja perustavanlaatuisen ymmärryksen levittämistä koko organisaatiossa.

Koska kvanttilaskenta voi mullistaa yrityksen eri osa-alueita, kuten tutkimusta ja kehitystä, logistiikkaa, tuotannon suunnittelua ja rahoitusanalyysijä, sen mahdollisuuksien tutkimiseen on ratkaisevan tärkeää ottaa mukaan eri toimintoja ja osaamisalueita. Yhteistyö auttaa tunnistamaan sekä disruptiiviset mahdollisuudet, että tehokkuutta lisäävät ratkaisut, joita kvanttitekniologia voi tarjota.

Tämä vaihe edellyttää strategista näkökulmaa, syvällistä näkemystä nykyisistä liiketoimintaprosesseista ja perusteellista ymmärrystä kvanttilaskennasta. Käytännön näkökulmasta IT-tiimien olisi huomioitava kuinka tärkeää on huolehtia ”datan valmiudesta” – puhtaasta, jäsennellyn tiedon saatavuudesta – kvanttilaskennan tulevia sovelluksia varten. Tiimien varhainen tietoisuus ja sitoutuminen luo yhteisen käsityksen kvanttilaskennan mahdollisista vaikutuksista, jolloin organisaatio voi tehdä tietoon perustuvia päätöksiä sopivien tilaisuuksien ilmaantuessa. Tämä edellyttää johdolta selkeää visiota, joka ohjaa organisaation kvanttitekniologian tutkimista ja edistää innovaatiokulttuuria.

Kvanttilaskenta on joukkuelaji

Osastojen ja toimintojen välinen yhteistyö on olennaista kvanttilaskennan potentiaalin ymmärtämiseksi ja hyödyntämiseksi. Kvanttilaskenta eroaa perustavanlaatuisesti klassisesta laskennasta, joten yhteisen ymmärryksen edistäminen ja yhdessä oppiminen ovat tehokas tapa edetä. Vaikka kaikkien ei tarvitse ymmärtää kvanttilaskennan monimutkaisia erityispiirteitä, tiimeillä on oltava käsitys kvanttikehityksestä sekä sen liike-elämää ja toimialaa koskemista vaikutuksista.

Kuten aiemmin totesimme, kvanttilaskentaan liittyy paljon väärinkäsityksiä ja epärealistisia odotuksia. Kollektiivisen oppimisen lähestymistapa auttaa tiimin jäseniä saamaan tietoa ja hallitsemaan odotuksia, mikä auttaa varmistamaan, että he tarttuvat kvanttimahdollisuuksiin realististen näkemysten pohjalta.

CASE: KVANTTITIEOTOISUUDEN LISÄÄMINEN YHDESSÄ OPPIMALLA

LähiTapiolassa kvanttietoisuutta on lisätty esittelemällä FutureQ-tutkimushankkeen havainnot intranetin blogissa. Raisa Peltoniemi sanoo: ”Olen tarkastellut kvanttilaskennan mahdollisia vaikutuksia yleisesti ja sitä, miten sitä voitaisiin hyödyntää jo käynnissä olevissa hankkeissa. Vaikka kvanttilaskenta on vielä kehittyvä teknologia, sen mahdollisuuksia on syytä tarkastella jo nyt. Olen myös huomannut, että tietoisuus datan arvosta kasvaa ja ymmärrys datan laadun merkityksestä syvenee.”

Vastausten etsiminen yhdessä on olennainen tapa ymmärtää kvanttilaskennan mahdollisuuksia vakuutusalaalla. Esiin on noussut erityisesti kvanttilaskennan potentiaali riskienhallinnassa, tietojen analysoinnissa ja vakuutusprosessien optimoinnissa. Lisäksi erilaisten skenaarioiden ja simulaatioiden tarkkuuden parantaminen voi parantaa tappioiden ennustamista ja hinnoittelun tarkkuutta tulevaisuudessa. Raisa Peltoniemi toteaa: ”Uskon, että vakuutusala kehittyy sisäisesti ja ulkoisesti kvanttilaskennan avulla ja tarjoaa tulevaisuudessa asiakkaille yksilöllisiä, dataan perustuvia vakuutustuotteita ja -palveluita.”

Kvanttitietoisuuden lisääminen omassa organisaatiossasi

Jos haluat lisätä tehokkaasti tietoisuutta kvanttilaskennasta organisaatiossasi, voit kokeilla muutamia käytännön lähestymistapoja kvanttistrategiasi erityistarpeiden ja -tavoitteiden mukaan. Esimerkiksi pilottihankkeiden esitleminen sisäisesti auttaa osoittamaan, miten uudet teknologiat voivat tukea liiketoimintayksikön tavoitteita, ja tarjoaa konkreettisia esimerkkejä kvanttilaskennasta käytännössä.

Käytännön demonstraatioiden lisäksi kvanttilaskentaan liittyvää oppimiskulttuuria voidaan edistää erilaisilla tiedonjakohankkeilla. Voit valita jonkun jakamaan tietoa kvanttilaskennasta yrityksen blogissa tai muissa sisäisissä viestintäkanavissa. Myös helppokäyttöisten oppimisresurssien tarjoaminen on ratkaisevan tärkeää. Kerää artikkeleita, videoita³³ ja verkkokursseja³⁴, joissa kvanttilaskentaa selitetään yksinkertaisin termein, jotta kaikkien työntekijöiden on helpompi ymmärtää teknologiaa. Myös epäviralliset lounaskoulutukset voivat olla tehokkaita. Rennoissa kokoontumisissa tiimit voivat tutustua kvanttikäsitteisiin helposti lähestyttävien vertauskuvien ja todellisten esimerkkien avulla, mikä edistää sitoutumista ja ymmärrystä. Edistämällä aktiivisesti tiedon jakamista ja tarjoamalla oppimismahdollisuuksia voit rakentaa valmiuksia ja ruokkia osaamista, jota tarvitaan menestymiseen kvanttiaikakaudella.

Ulkoisten verkostojen rakentaminen

Ulkoiset verkostot ovat kvanttimatalla yhtä tärkeitä kuin sisäiset tiimit. Mikään yksittäinen organisaatio ei pysty hallitsemaan kaikkia kvanttilaskennan osa-alueita – varsinkaan sen kehityksen ollessa vielä varhaisessa vaiheessa. Yhteistyö yliopistojen, tutkimuslaitosten, suuryritysten ja startup-yritysten kanssa on olennaisen tärkeää, jotta uusimmat innovaatiot ja asiantuntemus saadaan käyttöön.

Mikään kvanttiratkaisu ei ole vielä noussut voittajaksi, vaan eri modaliteetit (tavat rakentaa kubitteja) kilpailevat keskenään, ja niillä kullakin on omat ekosysteeminsä. IBM:n kaltaiset globaalit toimijat tarjoavat kvanttilaskentaa pilvipalveluiden ja innovaatiokeskusten kautta, ja jotkin suuret yritykset ja valtiot investoivat omiin kvanttietokoneisiin. Samaan aikaan tiettyjen teknologioiden ja alueellisten keskittymien ympärille on muodostunut erillisiä kvanttiekosysteemejä. Lisäksi vertaisoppimista toteutuu eri toimialojen sisällä, kuten lääke-teollisuudessa.

Esimerkiksi Suomessa InstituteQ:n³⁵ ja Alankomaissa Quantum Deltan³⁶ kaltaiset hubit edistävät yritysten välistä yhteistyötä. Vastaavasti alueelliset kvanttiteknologian kattojärjestöt, kuten European Quantum Industry Consortium (QuIC), pyrkivät vauhdittamaan kvanttiteknologioiden kaupallistamista kumppanuuksien avulla tuomalla yhteen tutkimuksen, varhaiset omaksujat ja teknologian tarjoajat. Avoimet innovaatiohankkeet ja hackathonit voivat myös olla arvokkaita tapoja tutkia uusia ideoita ja löytää potentiaalisia yhteistyökumppaneita.

CASE: KVANTTILASKENNAN EKOSYSTEEMIN EDISTÄMINEN

Business Finlandin kvanttilaskentakampanja on hyvä esimerkki siitä, miten ulkoiset verkostot voivat vauhdittaa kvanttiteknologian kehitystä. Tapahtumien ja työpajojen avulla yritykset voivat tutustua kvanttilaskentaan sekä luoda yhteyksiä asiantuntijoihin ja alan muihin toimijoihin. Lisäksi yritykset voivat osallistua käytännön kokeiluihin liittymällä tutkimuskonsortioihin tai käynnistämällä omia hankkeita, joita rahoitus- ja yhteistyömahdollisuudet tukevat.

Kumppanien valintaan vaikuttavat valitsemasi kvanttistrategia ja olemassa olevat resurssisi. Huomioi osajien saatavuus nyt ja tulevaisuudessa, kun päätät, mitkä valmiudet kannattaa rakentaa sisäisesti ja mitkä hankkia verkoston kautta. Muista, että tarvitset monenlaista osaamista – et siis vain kvanttialgoritmien kehittäjiä. Euroopan kvanttiteknologian lippulaivanhanke on kehittänyt viitekehysten, joka auttaa arvioimaan eri taitotasojen eri tehtävissä³⁷.

Käytännön kokemuksen hankkiminen

Aloittaminen pienestä on tärkeää käytännön kokemuksen hankkimiseksi kvanttilaskennasta³⁸. Proof-of-concept-hankkeiden avulla organisaatiot voivat tutkia erityisiä käyttötapauksia ja opiskella samalla kvanttilaskennan perusteita. Koska olemme vielä alkuvaiheessa – emmekä siis pysty vielä päihittämään johdonmukaisesti parhaita klassisia järjestelmiä – voit laajentaa valintakriteerjasi kriittisimpien prosessien ulkopuolelle. Jos yrityksellä ei ole sisäistä kvantti-osaamista, kumppanuus konsulttien, teknologiatoimittajien tai tutkimusorganisaatioiden kanssa voi auttaa pilottihankkeiden suunnittelussa ja toteutuksessa.

CASE: KVANTTILASKENNAN POTENTIAALI LUOTTORISKIMALLINNUKSESSA

OP Ryhmä on tutkinut aktiivisesti kvanttilaskennan mahdollisuuksia ja selvitti hiljattain sen soveltamista luottoriskien hallintaan. OP Lab tutki yhteistyössä yliopistojen kanssa, voisiko kvanttiannelointi parantaa parametrien valintaa luottoriskien mallintamisessa. Tavoitteena oli tunnistaa suuresta tietokokonaisuudesta ennustettavimmat muuttujat luottoriskien tunnistamisen tarkkuuden parantamiseksi. Vaikka nykyisten laitteistojen rajoitteet vaikuttivat kvanttijärjestelmän kapasiteettiin, tämä tutkimus³⁹ toi esiin kvanttimenetelmien mahdollisuuksia rahoituslalla. OP:n ennakoiva lähestymistapa on hyvä esimerkki rahoituslaitosten kokeiluista kvanttiteknologian parissa ja luo pohjaa tuleville edistysaskeleille.

Oppimiseen ja kokeilemiseen keskittyminen voi tuottaa arvokkaita oivalluksia, vaikka kvanttialgoritmeja ei edes sovellettaisi suoraan. Esimerkiksi monissa varhaisissa hankkeissa, jotka alkoivat kvanttialgoritmien kokeilemisestä, on löydetty uusia kvantti-inspiroituneita algoritmeja⁴⁰, joita voidaan suorittaa tehokkaasti klassisilla tietokoneilla. Dekvantisointi (*dequantisation*) on tärkeä käsite, jonka avulla voidaan ymmärtää kvantti-inspiroitujen ratkaisujen ja todellisten kvanttialgoritmien välinen yhteys. Dekvantisointi pyrkii

1. tunnistamaan olosuhteet, joissa kvanttialgoritmit tarjoavat todellisen nopeusedun klassisiin lähestymistapoihin verrattuna
2. kehittämään tehokkaampia kvanttialgoritmeja ymmärtämällä niiden perusperiaatteita
3. luomaan mahdollisesti uusia klassisia algoritmeja siirtämällä kvanttialgoritmeista saadut opit klassiseen kehukseen.

Kvanttilaskennan ensimmäisissä kokeiluissa vähemmän ilmeisten sovellusten tutkiminen voi auttaa herättämään kiinnostuksen ja lisäämään tietoisuutta. Tällaiset hankkeet voivat auttaa sitouttamaan useampia henkilöitä toteuttamiskelpoisten käytötapauksen tunnistamiseen ja luomaan perustavanlaatuista ymmärrystä, joka antaa johdolle valmiudet tehdä tietoon perustuvia investointipäätöksiä jatkotutkimuksia varten. Esimerkiksi eräs lääkeyritys keskittyi pilottihankkeessaan markkinointiin ja osoitti näin kvanttitekniikan laajemmat mahdollisuudet⁴¹. Alankomaissa Alliander-tutkimuskeskus valitsi pilotukseen sähköverkon optimointihankkeen, joka koko organisaation oli helppo ymmärtää, mikä edisti sitoutumista myös teknisten tiimien ulkopuolella⁴².

Ongelman ratkaiseminen kvanttilaskennalla

Alkuun pääsemistä kvanttilaskennan alalla helpottavat valmiit kvanttialgoritmi-kirjastot ja pilvipohjaiset kvanttilaskenta-alustat⁴³, joita hyödyntämällä yritykset voivat aloittaa pienistä kokeiluista ja oppia vähitellen. Kvanttialgoritmit eroavat kuitenkin olennaisesti klassisista algoritmeista, joten liiketoimintaongelmien mukauttaminen kvanttijärjestelmiin vaatii usein erityisosaamista. Useimmat yritykset tarvitsevat yhteistyökumppanin, joka osaa kääntää heidän ongelmansa kvantille soveltuvaan muotoon.

Seuraavassa esitetyt vaiheet antavat yleiskuvan siitä, miten yritykset voivat järjestelmällisesti tutkia kvanttiratkaisuja aina sopivien käytötapauksen tunnistamisesta lopullisen ratkaisun toteuttamiseen:

- Tunnista lupaavat käytötapaukset
- Pilko ongelmat hallittaviin osiin ja aseta selkeät tavoitteet
- Suunnittele työnkulku, jossa klassiset tehtävät on eroteltu kvanttitehtävistä
- Kehitä räätälöity kvanttialgoritmi
- Arvioi algoritmin nopeus- ja skaalautumisetuja
- Arvioi kvanttialgoritmeja kvanttisimulaattoreiden tai -laitteistojen avulla
- Yhdistä kvanttikomponentit ja klassiset komponentit yhtenäiseksi ratkaisuksi ja arvioi sen vaikutuksia

Tutkimuslähtöinen lähestymistapa

Monet organisaatiot – erityisesti sellaiset, joilla on merkittävät tutkimusresurssit – pyrkivät kvanttikentälle omaksumalla tutkimuslähtöisen strategian.

Yksi yleinen strategia on palkata tohtoriopiskelijoita tutkimaan kvantti-aiheita, jotka liittyvät yrityksen tavoitteisiin. Usein tämä tarkoittaa kumppanuuksia, joiden kautta yritykset pääsevät hyödyntämään kvanttitutkimuksen tuloksia, osallistumaan akateemisiin konferensseihin ja kehittämään yhteyksiä laitteistojen ja ohjelmistoekosysteemeihin. Ruotsissa Wallenbergin kvanttitekniologiakeskus (Wallenberg Centre for Quantum Technology, WACQT) helpottaa yritysten

ja väitöskirjatutkijoiden välistä yhteistyötä, jonka avulla voidaan tutkia toimialakohtaisia sovelluksia, kuten kvanttikohinatutkaa puolustuslalle ja kvanttikeemia lääkekeksintöihin⁴⁴.

CASE: KVANTTILASKENTAA ENERGIAMURROKSEEN⁴⁵

EDF (Electricité de France), integroitu energiayhtiö, joka keskittyy vahvasti tutkimus- ja kehitystoimintaan, on tutkinut aktiivisesti kvanttilaskentaa vuodesta 2018 lähtien. EDF:llä on 20 tutkijan tiimi, joka on tuottanut yli 20 akateemista julkaisua, ja se yhdistää tutkimusvetoisen lähestymistavan ja tulevaisuuteen suuntautuvat näkökohdat, kuten kvanttitekniikan integroinnin tulevaisuuden datakeskuksiin. Tutkimustyö keskittyy klassisen laskennan rajoituksiin kriittisillä aloilla, joista yksi esimerkki on materiaalin vanheneminen säteilyn vaikutuksesta, sekä infrastruktuurin eheyden kannalta olennaisten osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen.

Koska EDF on ottanut kvanttilaskennan käyttöön varhaisessa vaiheessa, sillä on hyvät valmiudet selviytyä perustavanlaatuisista murroksista algoritmeissa. Yhtiö pyrkii kehittämään käyttöönsä uusia algoritmeja, jotka on räätälöity energianhallintaan ja materiaalitutkimukseen, ja korostaa avoimen tieteen ja innovoinnin edistämisen tärkeyttä. Sidosryhmien valistaminen kvanttikehityksen todellisuudesta ja sen mahdollisista vaikutuksista on keskeinen osa heidän strategiaansa.

”Tärkeintä oli taitojen kehittäminen.”

Stéphane Tanguy, EDF Lab

Yhteistyö on EDF:n lähestymistavan ydin. Siihen sisältyy aktiivinen osallistuminen dynaamiseen ekosysteemiin: yhtiö tekee yhteistyötä Pasqalin, Evidenin, Quandelan ja IBM:n kaltaisten kumppaneiden kanssa sekä Sorbonnen yliopiston kaltaisten akateemisten laitosten kanssa. QuaTERAn (Quantum Technologies Energy Result Accelerator) jäsenenä EDF hyödyntää suurteho-laskentaa (HPC) ja kvanttilaskentaa edistääkseen kestäviä energiaratkaisuja, mikä osoittaa sen sitoutumista sekä innovoinnin että käytännön vaikutusten edistämiseen⁴⁶.

Toinen lähestymistapa on perustaa erityisiä kvanttitiimejä. Esimerkiksi Deutsche Bahnilla on kvanttitiimi, joka tutkii kvanttisovelluksia ja kvantin vaikutuksia kyberturvallisuuteen⁴⁷. Vastaavasti pankit, kuten Erste Bank, Intesa Sanpaolo ja J.P. Morgan, ovat perustaneet kvanttityöryhmiä tutkimaan niille sopivia käytötapauksia optimointialgoritmeista riskinarviointityökaluihin⁴⁸. Kaikkien näiden pyrkimysten, mukaan lukien erityisen kvanttitiimin perustaminen, tärkeimpiin tavoitteisiin kuuluu valmiuksien luominen sitä hetkeä varten, jolloin kvanttilaskennasta saadaan merkittäviä käytännön hyötyjä.

Organisaation tulevaisuuskestävyyden rakentaminen

Valitsemastasi kvanttilaskentastrategiasta riippumatta olennaista on tunnistaa tämän kehittyvän teknologian mahdollisuudet ja riskit. Mullistavan potentiaalin vuoksi kvanttilaskennan perusteet on tärkeää ymmärtää, vaikka se ei vaikuttaisikaan välittömästi omaan strategiaasi. Kvanttilaskennan huomioiminen ja sisäisten keskustelujen käynnistäminen mahdollisista vaikutuksista voivat synnyttää arvokasta tulevaisuuteen suuntautuvaa ajattelua ja valmistaa organisaatiosi muutoksiin, ennen kuin ne todella tapahtuvat.

Laajentamalla näitä keskusteluja ja kokeiluja oman yrityksesi rajojen ulkopuolelle voit liittyä laajempiin ekosysteemeihin ja verkostoihin. Ulkopuolisten kumppaneiden – kuten yliopistojen, tutkimuskonsortioiden tai toimialaryhmien – kanssa tehtävä yhteistyö mahdollistaa asiantuntemuksen jakamisen ja yhteisten vahvuuksien hyödyntämisen, mikä on olennaisen tärkeää kvanttilaskennan täyden potentiaalin hyödyntämiseksi.

Nostamme tässä oppaassa ensisijaisesti esille mahdollisuuksia, mutta luvussa 7 käsittelemme myös riskejä, joita ei voi jättää huomiotta. Vaikka ensisijainen motivaatiosi kvanttiteknologioihin tutustumisessa olisikin riskinarviointi, kannustamme sinua pohtimaan myös mahdollisia hyötyjä. Kuten luvun 5 tulevaisuustutkat havainnollistavat, samat trendit voivat näyttäytyä toisille riskeinä ja toisille mahdollisuuksina – erityisesti niille varhaisille omaksujille, jotka ovat valmiita toimimaan. Tutustumalla proaktiivisesti kvanttilaskentaan organisaatiosi voi turvata tulevaisuutensa ja olla mukana muovaamassa seuraavaa mullistavaa innovaatiota.

Loppuviitteet

- 1 Kirja perustuu FutureQ-tutkimushankkeeseen ”Kvanttilaskennan tulevaisuuden kestävien markkinoiden rakentamisen ehdot - Hyödyntäjäyritysten tarpeet, esteet, ajurit ja uskomukset.”
- 2 Tuoreita raportteja, esim. McKinsey, 2021 ja 2024; Deloitte, 2024; Capgemini Research Institute, 2022; ja Yole, 2024.
- 3 Kvanttilaskentaa esimerkkinä käyttäen tutkijat (Hilkamo et al., 2021) osoittavat induktiivisen analyysin avulla, miten konsultit toimivat aktiivisina välittäjinä ja ovat luomassa markkinoita.
- 4 Esim. IBM:n kvanttihyöty (*“quantum utility”*; IBM Quantum Research Blog, 2023), Pasqalin liiketoimintahyöty (*“business utility”*; Pasqal Blog, 2024) ja Googlen kvanttiylivoima (*“quantum supremacy”*, Arute et al., 2019).
- 5 [D-Wave What is Quantum Annealing? – YouTube](#)
- 6 Mukautettu lähteestä Ezratty (2024, s. 261).
- 7 IBM Technology Roadmaps, 2024
- 8 X Prize Guidelines, 2024
- 9 Bandic et al., 2022
- 10 Olivier Ezratty päivittää vuosittain kattavaa [sivustoa](#) kvanttitekniikan kehityksestä
- 11 tuore kooste listaa 16 tanskalaista käyttötapausta. Danish Business Authority & Danish Quantum Community, 2024
- 12 Kothari, 2020
- 13 Tietojenkäsittelytutkija ja tohtorikoulutettava Ewin Tang kehitti klassisen vaihtoehdon kvanttikoneoppimisalgoritmile, jonka uskottiin tarjoavan eksponentiaalisen nopeusedun, ja osoitti, että hyöty voidaan saavuttaa klassisilla menetelmillä (Davis, 2023).
- 14 IBM Quantum Research Blog, 2023
- 15 Chen, 2023
- 16 Esim. ennätys yli 1 000. 24.10.2023. (Wilkins, 2023)
- 17 Mukailtu lähteestä Ezratty, 2024
- 18 Phalak et al., 2023
- 19 Rahoituspalvelualan käyttötapauksia sisältävät raportit, esim. Deloitte, 2024 ja IBM Institute for Business Value, 2019, ja niitä käsittelevät tieteelliset julkaisut, esim. Orús et al., 2019b ja Egger et al., 2020.
- 20 Katsaus mahdollisiin kvanttikoneoppimisen sovelluksiin Doosti et al., 2024
- 21 Esim. Herman et al., 2023 sisältää yhteenveton kvanttilaskennan sovelluksista rahoituslalle
- 22 International monetary fund, 2022
- 23 Lisää toimitusketjurahoituksesta, esim. Griffin ja Sampat, 2021
- 24 Vakuutusriskien arvioinnista, esim. Bramblet, 2022.
- 25 Rahoituskriisien ennustamiseen liittyvä tutkimus, esim. Orús et al., 2019a.
- 26 Esimerkiksi Q2B Paris 2024 -tapahtumassa AstraZenecan, Merckin ja Amgenin puhujat korostivat ekosysteemien rakentamisen, startup-yritysten kanssa tehtävän yhteistyön ja asiantuntemuksen kehittämisen merkitystä, myös kohdennetun rekrytoinnin avulla. Useat lääkeyritykset ja kvanttilaitteistoyritykset ovat myös ryhtyneet yhteistyöhön, kuten [Bayer ja Google](#), [Boehringer Ingelheim ja Google](#) sekä [Moderna ja IBM](#). Yksi merkittävä alaa koskeva aloite on Novo Nordisk -säätiön pitkäaikainen [kvanttilaskentaohjelma](#).
- 27 Esimerkiksi suomalainen Algorithmiq on tutkimusvetoinen startup-yritys, joka kehittää algoritmeja biotieteen ja kemian tarpeisiin (Rajah, 2023), ranskalainen Qubit Pharmaceuticals on kehittänyt yhdessä Pasqalin kanssa hybridilähestymistavan proteiinien hydratointiin (Pasqal Blog, 2023) ja tanskalainen Kvantify nopeuttaa osuimien tunnistamista ja edistää samalla kvanttilaskennan (Kvantify, 2024).
- 28 Kiina johtaa lääkealan tutkimus- ja kehitystoimintaa, sillä sen osuus maailmanlaajuisista patentihakemuksista on 33 prosenttia (Pharmaceutical Technology, 2024) ja se tuottaa 44 prosenttia maailman lääkkeiden vaikuttavista aineista (Statista, 2023). Kiina investoi kvanttitekniikkaan kaksi kertaa enemmän kuin kaikki EU-maat yhteensä, ja sillä on noin puolet maailman kvanttitekniikkaapatenteista, myös kvanttilaskennan alalla (Statista, 2023).
- 29 H.R.7535, 2022
- 30 European Commission, 2024
- 31 Lisätietoja kvanttikyber turvallisuudesta, esim. Huoltovarmuuskeskus, 2024; WEF, 2023; Mosca & Piani, 2023; [NIST Post-quantum cryptography](#).
- 32 Prabhakar, 2024
- 33 YouTubesta löytyy runsaasti materiaalia kvanttilaskennasta, kuten CERNin luento: [A practical introduction to quantum computing.](#)
- 34 Jyväskylän yliopisto on julkaissut kolmeosaisen kurssin [Kvanttilaskennan aakkoset](#). Muita verkkokursseja on saatavilla MOOC-alustoilla, kuten [Coursera](#), [EDX](#) ja [FutureLearn](#). MIT on yksi harvoista, joka tarjoaa aiheesta yritysjohtajille suunnattuja kursseja.
- 35 Kansallinen kvantti-instituutti – [InstituteQ](#)
- 36 Alankomaiden kvanttiekosysteemi – [Quantum Delta NL](#)

37 Quantum Flagship, 2024

38 Netistä löytyy useita sivustoja kvanttiohjelmoinnin avuksi, kuten [Pennylane Codebook](#), IBM:n [Qiskit](#), Googlen [Cirq](#) ja [Quantum Algorithm Zoo](#),

39 Liimatta et al., 2024

40 Esimerkiksi BosonQ Psi, 2024

41 Fachot & Cimino, 2024

42 Nas, 2024

43 Kvanttilaskennan pilvipalveluita tarjoavat muun muassa IBM Quantum, Amazon Braket ja Microsoft Azure Quantum. Eurooppalaisia kvanttikoneita voi käyttää esimerkiksi IQM:n, IBM:n ja OVHcloudin kautta.

44 Wallenberg Center for Quantum Technology – [WAC-QT](#)

45 Case-kuvaus perustuu Tanguyn (2024) esitykseen ja Darganin (2024) artikkeliin.

46 Swayne, 2022

47 Rieck, 2024

48 Erste Bankilla on 8-henkinenkvanttilaskentaan keskittyvä QuanTeam (Fratini, 2024) ja Intesa Sanpaololla oma kvanttiosaamiskeskuksensa (Corbelleto, 2024). Molemmat näistä tutkivat pankkitoiminnan käyttötapauksia ja käyttävät todellista dataa sen arvioimiseksi, milloin kvanttilaskennasta saadaan liiketoiminta-arvoa.

Kiitokset

Tämän kirjan oivallukset ovat peräisin FutureQ-hankkeesta ”*Kvanttilaskennan tulevaisuuden kestävien markkinoiden rakentumisen ehdot - Hyödyntäjät yritysten tarpeet, esteet, ajurit ja uskomukset.*” Tutkimme yhdessä osallistuvien yritysten ja asiantuntijoiden kanssa ennakointimenetelmillä kvanttilaskennan tulevaa kehitystä ja vaikutusta.

Kiitämme Business Finlandia tämän hankkeen rahoittamisesta sekä mahdollisuudesta tutkia tätä muutosvoimaista aihetta. Erityiskiitokset FutureQ-hankkeen ohjausryhmälle: Outi Keski-Äijö (Business Finland), Mika Niskanen (Business Finland), Katja Taipalus (Suomen Pankki), Jussi Hyvärinen (Metsä Group), Jasmin Jutila (August Associates), Heikki Lassila (LähiTapiola), Nadia Tamminen (Lääketeollisuus ry), Topias Uotila (Unitary Zero Space), Petri Liimatta (OP) ja Katri Valkokari (VTT) yhteistyöstä ja asiantuntijuudesta.

Kiitämme kaikkia ennakointityöpajoihin osallistujia, erityisesti lääkealan, rahoituspalvelualan ja valmistusteollisuuden edustajia sekä kvanttilaskentasovelluksia kehittävien yritysten edustajia. Heidän näkemyksensä laajensivat suuresti ymmärrystämme kvanttilaskennan hyödyntämisestä. Kiitämme myös haastattelellemme henkilöitä heidän pohdintoistaan kvanttilaskennasta ja sen tulevasta vaikutuksista.

Kiitämme VTT:n kollegojamme heidän tärkeästä panoksestaan: Jutta Suksea, joka toi horisonttiskannauksen vaiheeseen laki- ja sääntelyasiantuntemustaan, ja Katri Valkokaria, joka tuki meitä kaikissa kirjoitusprosessin vaiheissa ja jonka oivaltavat kommentit auttoivat tarkentamaan käsikirjoitusta niin, että se puhuttelee paremmin kohdeyleisöä. Lisäksi kiitämme Topias Uotilaa ja Petri Liimattaa heidän keskeisestä roolistaan hankkeen tulosten saavuttamisessa ja arvokkaasta palautteesta käsikirjoitusvaiheessa.

Kiitämme myös Business Finlandin kvanttiohjelman ja Suomen kvanttiteknologian lippulaivahankkeen osallistujia heidän näkemyksistään, ja erityisesti kaikkia, jotka antoivat palautetta oppaan luonnoksesta: Valter Uotila (Helsingin yliopisto), Jorma Kilpi (VTT), Mikael Johansson (CSC), Jukka K. Nurminen (Helsingin yliopisto) ja Matti Palomäki (VTT).

Haluamme kiittää myös TNO Vectorin tutkijoita, erityisesti Julian Rabbietta, Amber Geurtsia ja Hugo Gelevertiä, sekä muita Alankomaiden kvanttiekosysteemin toimijoita. Olemme myös kiitollisia kaikille, joiden kanssa olemme puhuneet kansainvälisissä konferensseissa ja tapahtumissa kvanttilaskennan tulevista mahdollisuuksista. Nämä keskustelut ovat syventäneet ymmärrystämme alan nykyisestä tilanteesta ja tulevaisuuden mahdollisuuksista.

Lopuksi esitämme erityiskiitokset VTT:n kollegoillemme, jotka hankkeen eri vaiheissa auttoivat meitä ymmärtämään kvanttilaskennan tulevaa potentiaalia. Heidän asiantuntemuksensa ja näkemyksensä ovat olleet korvaamattomia: Pekka Pursula, Pauli Komonen, Matthias Deschryvere, Kalle Kantola, Johanna Anteroinen ja Piia Konstari.

Kiitos kaikille tuestanne, panoksestanne ja luottamuksestanne yhteisellä tutkimusmatkalla kvanttilaskennan tulevien mahdollisuuksien ja haasteiden parissa. Tämä työ on esimerkki yhteistyön ja yhteisen uteliaisuuden voimasta.

Viitteet ja kirjallisuus

- Aaronson, S. (2024). [Quantum computing: Between hope and hype](#).
- Aaronson, S. (2008). [The limits of quantum computers](#). Scientific American. March. pp. 62–69.
- Abbas, A., Ambainis, A., Augustino, B., Bärtschi, A., Buhrman, H., Coffrin, C., Cortiana, G., Dunjko, V., Egger, D. J., Elmegreen, B. G., Franco, N., Fratini, F., Fuller, B., Gacon, J., Gonciulea, C., Gribling, S., Gupta, S., Hadfield, S., Heese, R., . . . Zoufal, C. (2023). [Challenges and Opportunities in Quantum Optimization](#). ArXiv.
- Abbot, J. (2022). Future-proofed. The journey toward quantum-safe security. Vanguard report.
- Accenture. (2017). [Think beyond ones and zeros. Quantum computing. Now](#).
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., Biswas, R., Boixo, S., Brandao, F. G., Buell, D. A., Burkett, B., Chen, Y., Chen, Z., Chiaro, B., Collins, R., Courtney, W., Dunsworth, A., Farhi, E., Foxen, B., . . . Martinis, J. M. (2019). [Quantum supremacy using a programmable superconducting processor](#). Nature, 574(7779), 505-510.
- Auer, R., Dupont, A., Gambacorta, L., Suk Park, J., Takahashi, K., & Valko, A. (2024). [Quantum computing and the financial system: opportunities and risks](#). BIS Papers 149.
- Ball, H., Biercuk, M. J., & Hush, M. R. (2021). [Quantum firmware and the quantum computing stack?](#) Physics Today. 74(3), 28–34.
- Bandic, M., Feld, S., & Almudever, C. G. (2022) [Full-stack quantum computing systems in the NISQ era: algorithm-driven and hardware aware compilation techniques](#)
- Bauer, B., Bravyi, S., Motta, M., & Chan, G. K. (2020). [Quantum algorithms for quantum chemistry and quantum materials science](#). ArXiv.
- BCC Research. (2023). Quantum computing: Technologies and global markets to 2028.
- BCG. (2024). [The Long-term forecast for quantum computing still looks bright](#).
- BCG. (2023). [Quantum computing is becoming business ready](#).
- Berger, C., Di Paolo, A., Forrest, T., Hadfield, S., Sawaya, N., Stęchły, M., & Thibault, K. (2021). [Quantum technologies for climate change: Preliminary assessment](#). ArXiv.
- Blunt, N.S., Camps, J., Crawford, O., Izsák, R., Leontica, S., Mirani, A., Moylett, A.E., Scivier, S.A., Sunderhauf, C., Schopf, P., & Taylor, J.M. (2022). [Perspective on the current state-of-the-art of quantum computing for drug discovery applications](#). Journal of Chemical Theory and Computation, 18(12), 7001-7023.
- BosonQ Psi. (2024). [Quantum-inspired evolutionary algorithms: Revolutionizing optimization in engineering](#).
- Bramlet, J. (2022). [What quantum computing means for insurance](#). Accenture Insurance Blog.
- Brandas, C., Cosmin, E., Didraga, O., & Albu, A. (2024). [Enhancing the Financial Sector with Quantum Computing: A Comprehensive Review of Current and Future Applications](#). In: Ciurea, C., Pocatilu, P., Filip, F.G. (eds) Proceedings of 22nd International Conference on Informatics in Economy (IE 2023). 367. Springer, Singapore.
- Cappgemini Research Institute. (2022). [Quantum technologies: How to prepare you organization for a quantum advantage now](#).
- CEA. (2024). [Quantum 2042. Prospective study on the impacts of quantum computing in 2042](#).
- Chan, G. K. (2024). [Quantum chemistry, classical heuristics, and quantum advantage](#). ArXiv.
- Chen, S. (2023). [Are quantum computers really energy efficient?](#) Nature Computational Science, 3, 457–460.
- Childs, A. M., Maslov, D., Nam, Y., Ross, N. J., & Su, Y. (2018). [Toward the first quantum simulation with quantum speedup](#). Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(38), 9456-9461.
- Choi, C. Q. (2021). [Quantum computing makes inroads towards pharma. Pharma giants and computing titans increasingly partnering on quantum computing](#). IEEE Spectrum.
- Choi, S., Moses, W. S., & Thompson, N. (2023). [The quantum tortoise and the classical hare: A simple framework for understanding which problems quantum computing will accelerate \(and which it will not\)](#). ArXiv.
- Cooper, P., Ernst, P., Kiewell, D., & Pinner, D. (2022). Quantum computing just might save the planet. McKinsey Digital.
- Corbelleto, D. (2024). [The Intesa Sanpaolo journey towards quantum](#). Presentation at Q2B 2024. Paris. 8.3.2024.
- Daley, A. J., Bloch, I., Kokail, C., Flannigan, S., Pearson, N., Troyer, M., & Zoller, P. (2022). [Practical quantum advantage in quantum simulation](#). Nature, 607(7920), 667-676.

- Dalzell, A. M., McArdle, S., Berta, M., Bienias, P., Chen, C., Gilyén, A., Hann, C. T., Kastoryano, M. J., Khabiboulline, E. T., Kubica, A., Salton, G., Wang, S., & Brandão, F. G. (2023). [Quantum algorithms: A survey of applications and end-to-end complexities](#). ArXiv.
- Danish Business Authority & Danish Quantum Community (2024). [16 Danish quantum use cases. Practical insights into applications of quantum technologies across industries](#).
- Dargan, J. (2024) [EDF CTO Stéphane Tanguy discusses quantum computing for energy transition](#). Quantum Insider.
- Davis, R. (2023). [How Ewin Tang's dequantized algorithms are helping quantum algorithm researchers](#). Qiskit.
- De Wolf, R. (2017). [The potential impact of quantum computers on society](#). Ethics and Information Technology, 19, 271-276.
- Deloitte. (2024). [Financial services industry market research: Market analysis of quantum computing use cases](#).
- Doga, H., Sahin, M.E., Bettencourt-Silva, J., Pham, A., Kim, E., Address, A., Saxena, S., Bose, A., Parida, L., Robertus, J.L., & Kawaguchi, H., 2024. [Towards quantum computing for clinical trial design and optimization: A perspective on new opportunities and challenges](#). arXiv
- Doosti, M., Wallden, P., Hamill, C.B., Hankache, R., Brown, O.T., & Heunen, C. (2024). [A brief review of quantum machine learning for financial services](#). arXiv
- Egger, D.J., Gambella, C., Marecek, J., McFaddin, S., Mevissen, M., Raymond, R., Simonetto, A., Woerner, S. and Yndurain, E. (2020). [Quantum computing for finance: State-of-the-art and future prospects](#). IEEE Transactions on Quantum Engineering, 1, 1-24.
- European Commission. (2024). [Recommendation on a Coordinated Implementation Roadmap for the transition to Post-Quantum Cryptography](#)
- Evers, M., Heid, A., & Ostojic, I. (2021). [Pharma's digital RX: Quantum computing in drug research and development](#). McKinsey.
- Ezratty, O. (2024). [Understanding quantum technologies](#). 7th ed.
- Fachot, E., & Cimino, X. (2024). Quantum annealing and quantum-inspired solutions for resource allocation within the pharma industry. Presentation at Q2B 2024. Paris. 8.3.2024.
- Ferrie, C. (2024). [What you shouldn't know about quantum computers](#). ArXiv.
- Flöther, F.F., (2023). [The state of quantum computing applications in health and medicine](#). Research Directions: Quantum Technologies. 1(10), 1–10
- Fratini, F. (2024). [Erste Group Bank quantum prototypes](#). Presentation at Q2B 2024. Paris. 8.3.2024.
- Google. [Quantum AI](#).
- Google AI. [Our focused and responsible approach to quantum computing](#).
- Graps, A. (2024). [The Many faces of hybrid classical – quantum computing – Part 1](#). GQI Quantum Computing Report.
- Griffin, P. & Sampat, R. (2021). [Quantum computing for supply chain finance](#). 2021 IEEE International Conference on Services Computing (SCC), Chicago, IL, USA, 456-459.
- Gunashekar, S., d'Angelo, C., Flanagan, I., Motsi-Omoijade, D., Virdee, M., Feijao, C., & Porter, S. (2022). [Using quantum computers and simulators in the life sciences: Current trends and future prospects](#). RAND Corporation.
- Heidari, N., Olgati, S., Meloni, D., Pirovano, F., Noorani, A., Slevin, M. and Azamfirei, L., 2021. [A quantum-enhanced precision medicine application to support data-driven clinical decisions for the personalized treatment of advanced knee osteoarthritis: development and preliminary validation of precisionKNEE_QNN](#). medRxiv, pp.2021-12.
- Herman, D., Googin, C., Liu, X., Sun, Y., Galda, A., Safro, I., Pistoia, M. & Alexeev, Y. (2023). [Quantum computing for finance](#). Nature Reviews Physics, 5(8), 450-465.
- Hilkamo, O., Barbe, A. S., Granqvist, N., & Geurts, A. (2021). [Temporal work by consultants in nascent market categories: constructing a market for knowledge in quantum computing](#). Technology Analysis & Strategic Management, 33(11), 1303–1316.)
- H.R.7535. (2022). [Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act](#). 117th Cong.
- Huoltovarmuuskeskus. (2024). [Kvanttilaskennan tietoturvaikutukset – suositus varautua](#).
- IBM. [Qiskit](#).
- IBM Institute for Business Value. (2023). [The quantum decade. A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage](#). 4th ed.
- IBM Institute for Business Value. (2019). [Exploring quantum computing use cases for financial services](#). Expert Insight.
- IBM News. (2023). [Moderna and IBM to explore quantum computing and generative AI for mRNA science](#).
- IBM Technology Roadmaps. (2024). [Quantum roadmap](#).
- IBM Quantum Research Blog. (2023). [What is quantum utility?](#)
- International monetary fund. (2022). [BigTech in financial services: Regulatory approaches and architecture](#). Fintech Notes.
- Koen Groenland. 2024. [Introduction to quantum computing for business](#).
- Kothari, R. (2020). [Quantum speedups for unstructured problems: Solving two twenty-year-old problems](#). Microsoft Research Blog.

- Kvantify. (2024). [Kvantify launches first product to revolutionize drug discovery](#).
- Langione, M., Bobier, J-F., Meier, C., Hasenfuss, S., & Schilze, U. (2019). [Will quantum computing transform biopharma R&D?](#) BCG.
- Leijnse, K. (2024). [Photocatalysis for water splitting](#). Quantum Application Lab.
- Liimatta, P., Taipale, P., Halunen, K., Heinosaari, T., Mikkonen, T., & Stirbu, V. (2024). [Research Versus Practice in Quantum Software Engineering: Experiences from Credit Scoring Use Case](#). In IEEE Software, 41 (6), 9–16). IEEE.
- Liu, H., Low, G. H., Steiger, D. S., Häner, T., Reiher, M., & Troyer, M. (2022). [Prospects of quantum computing for molecular sciences](#). Materials Theory, 6(1), 1-17.
- Maheshwari, D., Garcia-Zapirain, D. & Sierra-Sosa, D. (2022). [Quantum machine learning applications in the biomedical domain: A systematic review](#). IEEE Access, 10, 80463-80484
- Matsuura, A., Johri, S. & Hogaboam, J. (2019). [A systems perspective of quantum computing](#). Physics Today, 72(3), 40-46.
- Mazzola, G. (2024). [Quantum computing for chemistry and physics applications from a Monte Carlo perspective](#). The Journal of Chemical Physics, 160(1).
- McKinsey. (2024). [Quantum technology monitor](#).
- McKinsey. (2021). [Quantum computing: An emerging ecosystem and industry cases](#).
- Meige, A., Eagar, R., & Arribart, H. (2023). [Quantum summer or winter?](#) Arthur D. Little. Brue Shift report.
- Meige, A., Könnecke, L., & Eagar, R. (2022). [Unleashing the business potential of quantum computing](#). Arthur D. Little. Brue Shift report.
- Montanaro, A. (2016). [Quantum algorithms: An overview](#). Npj Quantum Information, 2(1), 1-8.
- Mosca, M., & Piani, M. (2023). [Quantum threat timeline report 2023](#). GRI.
- Nas, D. Societal impact of quantum technologies. Keynote at QuTech – Quantum computing for industry and public sector. Delft.17.10.2024.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Quantum computing: Progress and prospects. Washington, DC: The National Academies Press.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- NIST. (2024). [NIST releases first 3 finalized post-quantum encryption standards](#).
- Nuutinen, M., Apilo, T. & Wallin, A. (2023). Turning emerging technology towards innovations in ecosystems - quantum computing case. Proceedings of 24th CINet Conference 17th-19th September 2023. Continuous Innovation Network (CINet).
- Orús, R., Mugel, S. & Lizaso, E. (2019a). [Forecasting financial crashes with quantum computing](#). Physical Review A, 99(6), p.060301.
- Orús, R., Mugel, S., & Lizaso, E. (2019b). [Quantum computing for finance: Overview and prospects](#). Reviews in Physics, 4, 100028.
- Pakin, S., & Coles, P. (2019). [The problem with quantum computers](#). Scientific American.
- Pasqal Blog. (2024). [Pasqal announces new roadmap focused on business utility and scaling beyond 1,000 qubits towards fault tolerance era](#).
- Pasqal Blog. (2023) [Quantum algorithm can help drug discovery](#).
- Peral-García, D., Cruz-Benito, J. and García-Peñalvo, F.J. (2024). [Systematic literature review: Quantum machine learning and its applications](#). Computer Science Review, 51,100619.
- Phalak, K., Chatterjee, A., & Ghosh, S. (2023). [Quantum random access memory for dummies](#). ArXiv.
- Pharmaceutical Technology. (2024). [Q3 2024 update: patent activity in the pharmaceutical industry](#).
- Potter, K. & Stilinski, D. (2024). [Quantum Machine Learning: Exploring the Potential of Quantum Computing for AI Applications](#).
- Prabhakar, A. (2024). Getting ready for Quantum in AI-first world – the role of different ecosystem players. Keynote speech at Quantum.Tech USA 2024, Washington. 24.4.2024.
- Preskill, J. (2018). [Quantum computing in the NISQ era and beyond](#). Quantum 2, 79.
- Puhakainen, P. (2023). [7 steps to quantum secure cryptography – the transition must start now](#). VTT Blog.
- Quantum Computing Report. (2024). [NISQ Versus FTQC in the 2025 – 2029 Timeframe](#). GQI.
- Quantum Delta. (2023). [Exploratory quantum technology assessment](#). Centre for Quantum and Society.
- Quantum Flagship. 2024. [European Competence Framework for Quantum Technologies](#). v.2.5.
- Quera. (2023). [Understanding fault-tolerant quantum computing](#).
- Rajah, P. (2023). [Seven observations about how Algorithmiq is bringing quantum algorithms to life](#). Quantum Life Science Blog.
- Rieck, M. (2024). An update on Deutsche Bahn's quantum security strategies. Presentation at Quantum Tech 2024 USA. Washington.
- Ruane, J., McAfee, A., & Oliver, W. D. (2022). [Quantum Computing for Business Leaders. Will the reality live up to the hype?](#) Harvard Business Review.
- Santagati, R., Babbush, R., Degroote, M., González, L., Kyoseva, E., Moll, N., Oppel, M., Parrish, R. M., Rubin, N. C., Streif, M., Tautermann, C. S., Weiss, H., & Wiebe, N. (2024). [Drug design on quantum computers](#). Nature Physics, 20(4), 549-557.

- Schetakis, N., Aghamalyan, D., Boguslavsky, M., Rees, A., Rakotomalala, M. and Griffin, P.R. (2024). [Quantum machine learning for credit scoring](#). Mathematics, 12(9), p.1391.
- Scholten, T. L., Williams, C. J., Moody, D., Mosca, M., Hurley, W., Zeng, W. J., Troyer, M., & Gambetta, J. M. (2024). [Assessing the benefits and risks of quantum computers](#). ArXiv.
- Soller, H. Hijazi, H., Gschwendtner, M., & Taibah, R. (2024). [Enabling the next frontier of quantum computing](#). McKinsey Digital.
- Swayne, M. (2022). [EDF, Exaion Inc., PASQAL and the Quantum Innovation Zone bring high-performance computing and quantum technologies to the forefront of energy solutions](#). Quantum Insider.
- Tanguy, S. (2024). [Quantum computing for the electric grid. Key learning from a quantum early adopter](#). Keynote presentation at Q2B Paris 2024.
- Taylor, P. (2023). [Bayer taps Google's quantum power for drug discovery](#). Pharmaphorum.
- TNO. (2023). [The PQC migration handbook. Guidelines for migrating to post-quantum cryptography](#).
- Troyer, M., Benjamin, E. V., & Gevorkian, A. (2024). [Quantum for good and the societal impact of quantum computing](#). ArXiv.
- Ukpabi, D., Karjaluoto, H., Bötticher, A., Nikiforova, A., Petrescu, D., Schindler, P., Valtenbergs, V., & Lehmann, L. (2023). [Framework for understanding quantum computing use cases from a multidisciplinary perspective and future research directions](#). Futures, 154, 103277.
- von Burg, V., Low, G.H., Häner, T., Steiger, D.S., Reiher, M., Roetteler, M. & Troyer, M. (2021). [Quantum computing enhanced computational catalysis](#). Physical Review Research, 3(3), p.033055.
- WEF. (2023). [Quantum readiness toolkit: Building a quantum-secure economy](#).
- Wilkins, A. (2023). [Record-breaking quantum computer has more than 1000 qubits](#). New Scientist.
- X Prize Guidelines. (2024). [Quantum for Real World Impact](#).
- Yole. (2024). [Market and technology trends: Quantum technologies 2024](#)

Kirjoittajat

Tekniikan tohtori **Arto Wallin** on VTT:n erikoistutkija, jonka erikoisalaa ovat yritysten tulevaisuuden ennakointi ja yritysten opastaminen niiden pyrkimyksissä uudistua kehittyvien teknologioiden avulla. Hän auttaa yrityksiä ymmärtämään kvanttilaskentaa ja valmistautumaan muuttuviin mahdollisuuksiin ja murroksiin kehittyvässä liiketoimintaympäristössä.

Tekniikan tohtori **Tiina Apilo** on VTT:n erikoistutkija, jolla on asiantuntemusta yritysten tulevaisuuden ennakoinnista, innovaatioekosysteemeistä ja kehittyvien teknologioiden hyödyntämisestä liiketoimintamahdollisuuksien luomiseksi. Hän pyrkii tutkimustyössään erityisesti selvittämään, miten kvanttilaskenta voi muuttaa liiketoimintaympäristöjä eri toimialoilla ja millaisia laajempia yhteiskunnallisia vaikutuksia sillä voi olla tulevaisuudessa.

Tekniikan tohtori **Olli Nurmi** on kvanttialgoritmi- ja ohjelmistotiimissä johtava tutkija, jolla on asiantuntemusta kvanttilaskennan sovelluksista. Hän on kiinnostunut koneoppimisen, laskennallisen kemian ja optimoinnin toimialakohtaisista sovelluksiin, joissa hyödynnetään sekä klassisia että kvanttilaskentaresursseja.

Psykologian tohtori **Maaria Nuutinen** on VTT:n johtava erikoistutkija. Hänellä on vankkaa asiantuntemusta ihmiskeskeisestä suunnittelusta, innovaatiokäytännöistä, ennakoinnista, yhteiskunnallisesta kestävydestä ja liiketoiminnan muutoksesta. Nuutinen on erityisen kiinnostunut auttamaan yrityksiä kvanttilaskennan sisällyttämisessä pitkän aikavälin strategioihin.

Tekniikan tohtori **Ville Kotovirta** veti VTT:n kvanttialgoritmien ja -ohjelmistojen ryhmää osallistuessaan tämän kirjan kirjoittamiseen. Tällä hetkellä hän on yksi QMillin perustajista ja teknologiajohtaja. Hän tutkii alkuvaiheen kvanttialgoritmeja ja kuroo umpeen kuilua kehittyvien kvanttiteknologioiden ja käytännön sovellusten välillä.

10/ Milloin on paras aika aloittaa?

Vastaus on aloittaa nyt.

Wallin, A., Apilo, T., Nurmi, O., Nuutinen, M., & Kotovirta, V. (2025).
Kvanttilaskenta: Käytännön matkaopas tulevaisuuteen. VTT

ISBN: 978-951-38-8840-4

DOI: 10.32040/2025.978-951-38-8840-4

Ota yhteyttä:

nimi.sukunimi@vtt.fi