TIEDEISKU

Tutkijoiden asiantuntemukseen perustuva tilannekuva ilmiöstä ja sen yhteiskunnallisesta merkityksestä päätöksentekijöitä varten

KVANTTI-TEKNOLOGIA

Missä kehityksessä mennään? Mitkä ovat alan mahdollisuudet ja riskit Suomelle?

Lähivuosina tulemme näkemään ensimmäiset esimerkit kvanttiteknologian käytännön sovelluksista. Vielä ei tiedetä, missä sen suurin arvo piilee. Ratkaisut voivat liittyä kyberturvallisuuteen, energiaan tai lääkekehitykseen. Kvanttiteknologialla tulee todennäköisesti olemaan merkittävä vaikutus Euroopan keskeisiin teollisuuden aloihin.

Alaan kohdistuu suuria odotuksia. Kehitys on nopeaa, ja maailmalla investoinnit voimistuvat. Kvanttiteknologian strateginen merkitys on tunnustettu globaalisti. Kilpailu Yhdysvaltojen, Kiinan ja Euroopan kesken on kovaa. Suomen mahdollisuudet menestyä ovat erinomaiset.

MITÄ KAIKKEA KVANTTITEKNOLOGIA ON?

Kvanttiteknologia hyödyntää kvantti-ilmiöitä, jotka tapahtuvat atomien ja niitä pienempien hiukkasten ja fotonien tasolla. Siitä voidaan erottaa seuraavanlaisia sovellusalueita:

KVANTTILASKENTA ELI -TIETOKONEET

> Monituhatkertainen laskentateho nykyisiin supertietokoneisiin verrattuna.
> Auttavat esimerkiksi laajojen kokonaisuuksien optimoinnissa, kuten toimitusketjujen suunnittelussa. Suomessa on jo useampi kansainvälisesti menestynyt alan yritys.

KVANTTISIMULAATIO

> Molekyylien ja materiaalien ominaisuuksien ja käyttäytymisen mallintaminen atomitasolta alkaen.
> Voi tehostaa esimerkiksi materiaalien valmistusta ja lääkkeiden kehitystä.

KVANTTIVIESTINTÄ

> Aukottomasti salattu, kryptattu viestintä.
> Yhdysvalloissa ja Hollannissa on jo käynnissä isoja hankkeita. Hollannissa esimerkiksi rakennetaan kaupunkien välille kvanttikommunikaatiota tukevaa kuituverkkoa. Suomikin on sitoutunut infrastruktuurin kehittämiseen Euroopassa.

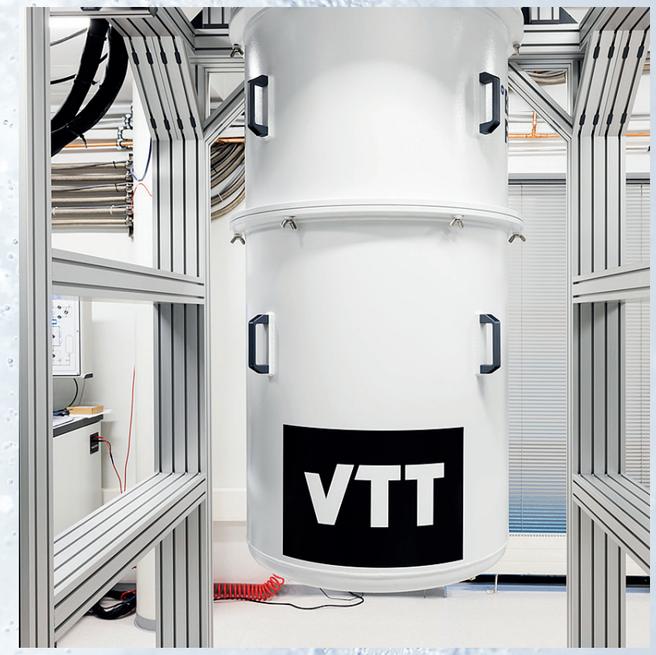
KVANTTIHAVAINNOINTI JA KVANTTIANTURIT

> Molekyylitason ilmiöiden tarkka mittaaminen.
> Voidaan hyödyntää esimerkiksi lääketieteessä (kuvantaminen), ympäristötutkimuksessa ja metrologiassa (mittayksiköiden määritys).

! Kilogramma määriteltiin ennen Pariisissa sijainneen punnuksen perusteella. Nykyään painoyksikkö määritetään kvanttiteknologian avulla atomitason ilmiöistä. VTT:n Mittatekniikan keskus osallistui kilon uudelleen määrittelyyn.

MIKÄ ON KVANTTITIETOKONE?

- Kvanttitietokone on huipputehokas tietokone, joka hyödyntää kvanttimekaniikan *superpositiota* eli sitä, että kubitti on ennen mittausta ikään kuin kahdessa eri tilassa samaan aikaan. Kun tavallisen tietokoneen bitin tila on joko 1 tai 0, kvanttitietokoneen kubitti laskee molempia vaihtoehtoja samaan aikaan. Kubittien määrä nostaa tehoa eksponentiaalisesti: kahden kubitin kone voi laskea neljää vaihtoehtoa kerrallaan, kolmen kubitin kahdeksaa, neljän kubitin kuuttatoista ja niin edelleen. Jo kahdenkymmenen kubitin kone voisi teoriassa olla yli miljoonassa tilassa yhtä aikaa.
- Kubittien määrään ei kuitenkaan pidä keskittyä liikaa, sillä niiden laadulla on iso merkitys. Ne ovat hyvin hauraita, ja pienikin vuorovaikutus ympäristön kanssa aiheuttaa *dekoherenssia* eli sen, että kubitin kvanttitila romahtaa. Tämä taas voi tuottaa virheen laskennassa. Siksi tarvitaan virheenkorjausalgoritmeja ja ylimääräisiä kubitteja.
- Kvanttitietokoneilla pystytään tekemään tiettyjä asioita merkittävästi nopeammin kuin nykytietokoneilla. Kvanttitietokoneet tuskin korvaavat klassisia tietokoneita vaan tulevat niiden rinnalle. Parhaaseen lopputulokseen päästään todennäköisesti usein hyödyntämällä klassista supertietokonetta ja kvanttitietokonetta yhdessä.
- Kvanttitietokoneiden edellyttämiä kubitteja voidaan toteuttaa eri tavoin. Kehitys on toistaiseksi pisimmällä *suprajohtavassa teknologiassa*, ja suurin osa Suomessa ja Euroopassa tehtävästä tutkimuksesta keskittyy tähän. Muita merkittäviä kehityslinjoja ovat esimerkiksi *piipohjaiset sovellutukset* sekä niin sanotut *ioniloukut*.



KUVA: VTT

Suomen ensimmäinen kvanttitietokone Helmi sijaitsee Otaniemessä Espoossa.

MISSÄ ALAN KEHITYKSESSÄ MENNÄÄN NYT?

- Kvanttifysiikka syntyi 1900-luvun taitteessa, ja niin sanotussa **ensimmäisessä kvanttivallankumouksessa** noin 100 vuotta sitten opittiin ymmärtämään ja manipuloimaan yksittäisiä atomeja ja niiden välistä vuorovaikutusta. Tämän pohjalta ovat syntyneet monet kvantti-mekaniikkaan perustuvat innovaatiot, kuten transistorit, laserit ja LEDit.
- Elämme parhaillaan **toista kvanttivallankumousta**, jossa on opittu hallitsemaan ja hyödyntämään kvantti-ilmiöitä. Perustutkimuksesta siirrytään soveltavaan tutkimukseen ja kaupallisiin sovellutuksiin, ja syntyy start-up-yrityksiä ja kaupallisia toimijoita. Tällä hetkellä liiketoiminnassa korostuvat tutkimuslaitevalmistajat ja kvanttiteknologian vaatiman infrastruktuurin toimijat. Eri alojen yritykset alkavat yhä laajemmin pohtia, mitä kvanttiteknologia tarkoittaa niiden toiminnan kannalta.
- Vuoden 2023 alkuun mennessä maailmassa on onnistuttu rakentamaan muutamia kymmeniä kvanttitietokoneita. Yksi näistä on Suomessa VTT:llä. Viisikubittinen kvanttitietokone on rakennettu yhteistyössä suomalaisen kvanttitietotekniikkayritys IQM:n kanssa. VTT:n ja IQM:n tavoitteena on rakentaa vielä tehokkaampi 50-kubittinen kvanttitietokone vuoteen 2024 mennessä.
- Toistaiseksi (vuoden 2022 lopussa) suurin toiminnassa oleva kvanttitietokone on IBM:n 127 kubitin kone. Tulevat läpimurtosovellukset vaativat todennäköisesti vähintään useiden satojen ellei tuhansien kubittien kokoisen koneen.

Maailmassa on vasta muutamia kymmeniä kvanttitietokoneita. Yksi näistä on Suomessa.

MITÄ SOVELLUKSIA ON ODOTETTAVISSA...

...2020- tai viimeistään 2030-luvulla?

- **Kvanttisalaus:** Mahdollistaa turvallisen tiedon siirron. On jo käytössä.
- **Optimointi:** Kvanttilaskenta voi auttaa esimerkiksi kustannustehokkaimpien reittien suunnittelussa. Myös rahoitusalalla laskennan nopeuden ja tehon lisääntymisellä voi olla suuri vaikutus.
- **Materiaalien ja kemian mallintaminen:** Eri aineiden ominaisuuksien ja vaikutuksien ennustaminen voi nopeuttaa esimerkiksi uusien materiaalien, lannoitteiden, lääkkeiden ja energiaratkaisujen kehittämistä.
- **Kuvantaminen:** Esimerkiksi lääketieteen ja materiaalien kuvantamisessa on mahdollista päästä ennen näkemättömään tarkkuuteen.
- **Tekoälysovellukset:** Kvanttilaskenta voi mahdollistaa hyvin suurten data-aineistojen tehokkaan käsittelyn koneoppimisessa.

...vasta useamman vuosikymmenen päästä?

- **Toimintavarmat yleiskäyttöiset kvanttitietokoneet** (yhdistävät klassisten ja kvanttitietokoneiden parhaita ominaisuuksia)
- **Vaativimmat kvanttifysiikan simulaatiot**
- **Täysmittaiset biologisten ja kemiallisten reaktioiden simuloinnit**
- **Salauksen purku**
- **Kuluttajaelektroniikassa hyödyntäminen** (toteutunee korkeintaan niin, että kuluttajalaite on yhteydessä pilveen, joka hyödyntää kvanttilaskentaa)

On myös mahdollista, että kehitys on jollain kvanttiteknologian alueella merkittävästi arvioitua nopeampaa.

MITKÄ OVAT KESKEISIMMÄT KYSYMYSMERKIT?

- ? Kvanttitietokoneet ovat vielä hyvin alttiita tekemään virheitä. On välttämätöntä löytää virheenkorjaukseen toimivat ratkaisut.
- ? Miten tunnistaa ongelmat, jotka sopivat kvanttiteknologian ratkottavaksi – niin nykyisillä pienemmillä kvanttitietokoneilla kuin tulevilla tehokkaammilla ja toimintavarmemmilla laitteilla?
- ? Mitä teknologiaa hyödyntäen kvanttitietokoneet kannattaa jatkossa rakentaa ja kubitit tuottaa?
- ? Miten kehitetään laajempia käyttäjäryhmiä palvelevia algoritmeja, ohjelmistoja ja sovelluksia?

MITKÄ OVAT SUOMEN VAHVUUDET...

+ Kokoonsa nähden Suomi on vahva ja kilpailukykyinen peluri.
+ Suomessa on pitkä tutkimusperinne sekä kansainvälisesti korkeatasoista osaamista ja tutkimusta kvanttiteknologialle keskeisillä alueilla, kuten kylmä- ja suprajohtavassa teknologiassa.
+ Täällä on toimiva perus- ja soveltavan tutkimuksen ja teollisuuden innovaatioekosysteemi, jossa syntyy myös start-up-yrityksiä.
+ Eri sovellusalueilla tehdään tiivistä yhteisyötä tutkimus- ja innovaatiotoiminnassa.
+ Tutkimusinfrastruktuuri on korkeatasoista. Esimerkiksi Otaniemessä on Pohjoismaiden suurin T&K-käytössä oleva puhdastila.
+ Suomella on hyvät mahdollisuudet ottaa merkittävä asema laitteiden rakentamisessa. VTT valmistaa jo nyt laadukkaita komponentteja, joilla on kansainvälistä kysyntää.
+ Muita aloja, joissa Suomella voisi olla mahdollisuus menestyä ovat esimerkiksi perinteiset liitännät korvaavat optiset dataväylät, piipohjainen kvanttilaskenta ja fotoniikka sekä kvanttianturit.
+ Suomi on otollinen paikka ottaa käyttöön uusia teknologioita, sillä koulutustaso on korkea ja julkiseen hallintoon luotetaan.

...JA HEIKKOUDET TÄLLÄ HETKELLÄ?

– Laajuus puuttuu: tutkimus ja osaaminen keskittyvät pitkälti supra-johdeteknologiaan, ja vain yksi yritys (IQM) on kerännyt yli 200 miljoonan euron rahoituksen.
– Alan osaajista on puute ja kansainvälinen rekrytointi on vaikeaa.
– Kvanttitietokoneiden algoritmi- ja ohjelmistotyö vaatii lisäpanostuksia.
– Kvanttisensoreihin liittyvä soveltava tutkimus ja sen kaupallistaminen on vasta alkuvaiheessa.
– Kansallinen yhteistyö ja koordinaatio koulutuksessa ja tutkimuksessa on riittämätöntä.
– Alaan erikoistuneita koulutusohjelmia (kuten maisteri- ja tohtoriohjelmia) on vähän.
– Tutkimusrahoitus on merkittävästi vähäisempää kuin esimerkiksi verrokkimaissa Ruotsissa ja Hollannissa.

VARO NÄITÄ VÄITTEITÄ

”Kvanttilaskenta tulee ratkaisemaan ilmastonmuutoksen” ja muut ylioptimistiset lupaukset. – Kvanttiteknologian ratkaisut eivät ehdi ajoissa ratkaisemaan välitöntä ilmastokriisiä. Ne voivat kuitenkin auttaa löytämään kestävämpiä ratkaisuja, esimerkiksi vähentämään energian tarvetta (nopeampi ja tehokkaampi laskenta ja optimointi) ja kehittämään kestävämpiä materiaaleja.

”Kvanttitietokone tulee korvaamaan klassiset tietokoneet.” – Kvanttitietokoneet eivät ole hyviä samoissa asioissa kuin nykykoneet vaan toimivat hyvin erikoistuneissa sovellutuksissa. Kvanttitietokoneet myös edellyttävät klassisten tietokoneiden ohjausta. Kvanttitietokone on pikemminkin seuraava supertietokone tai sen oheislaite.

”Kilpajuoksun voittaa kone, jossa on eniten kubitteja.” – Kvanttiprosessorin koko eli kubittien määrä ei ole lopulta ratkaisevaa. Keskeistä on laitteen stabiilius, virheiden lukumäärän vähentäminen ja se, miten hyvin kubitteja pystytään hyödyntämään.

”Salausjärjestelmät ovat välittömässä vaarassa.” – Kyberturvallisuuden uhkia voidaan torjua kehittämällä kvanttiturvallisia algoritmeja. Suomessakin tehdään jo *post quantum cryptography* -tutkimusta eli kehitetään salausalgoritmeja, joita ei pysty murtamaan kvantin keinoin.

”Kvanttiteknologia on yhtä kuin kvanttitietokoneet.” – Kvanttitietokoneet ovat vain yksi kvanttiteknologian osa-alue, ja käytännön sovellutuksia saatetaan nähdä muilla alueilla nopeammin kuin kvanttitietokoneilla. Panostukset kvanttiteknologiaan tulevat tuottamaan merkittäviä tuloksia, mutta ne voivat olla myös jotain muuta kuin kvanttitietokoneet.

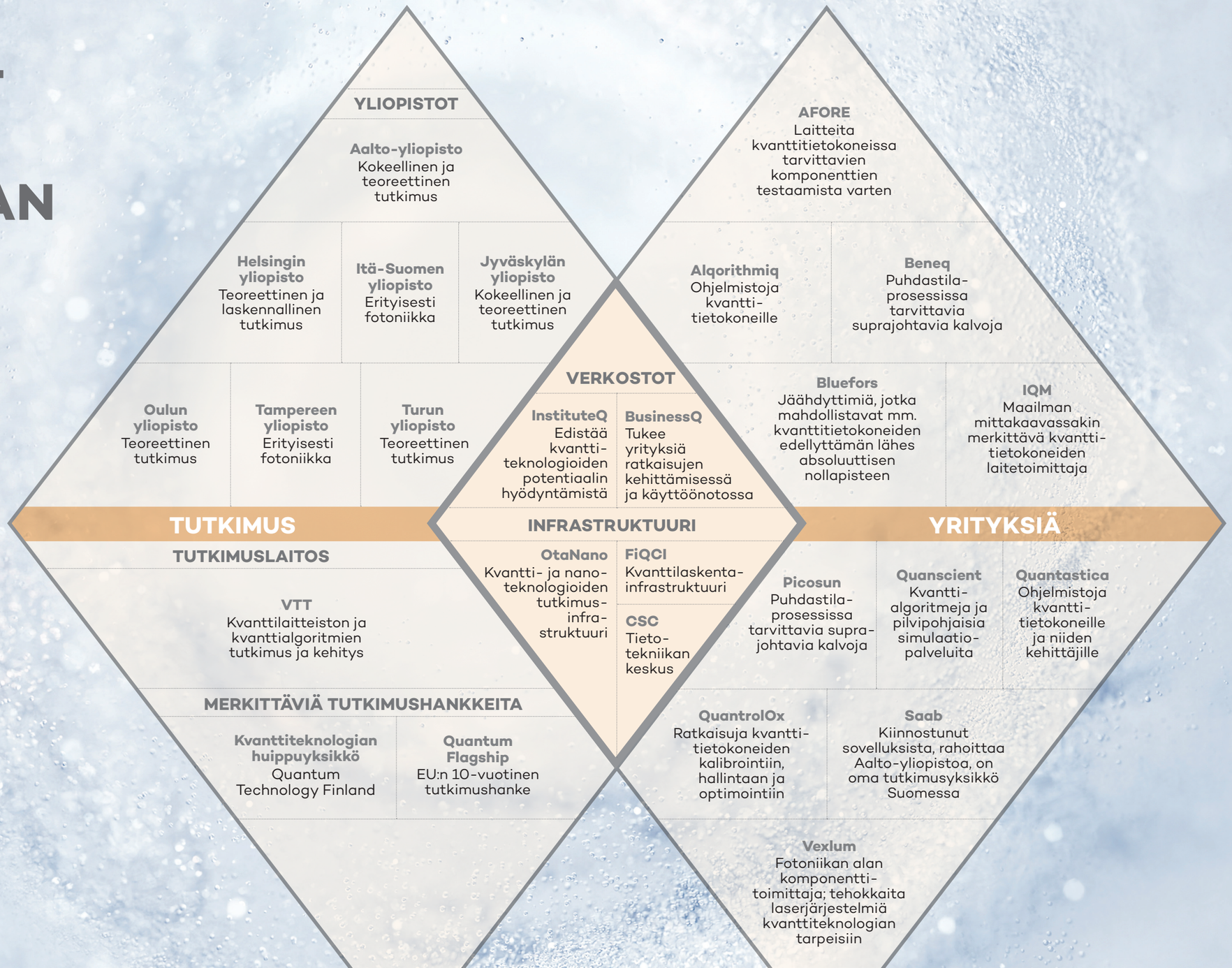
MITÄ RISKEJÄ ON?

- **Hype vie mennessään.** Nousevatko odotukset epärealistisiksi? Unohtuuko riskeihin varautuminen? On tärkeää muistaa, että samalla kun kvanttiteknologian mahdollisuudet ovat suuret niin on myös riskien skaala.
- **Rahahanat sulkeutuvat liian aikaisin.** Jos talous taantuu, riittääkö riskirahaa? Nouseeko hype liian nopeasti liian suureksi, niin että rahoittajat ehtivät kyllästyä ennen kuin näemme tuloksia? Viekö joku toinen innovaatio rahoittajien huomion?
- **Kansainvälisessä politiikassa uusi blokkijako ja etupiireihin ryhmittyminen jatkuu.** Suomi ei pärjää yksin. Euroopan maiden kannattaa yhdistää voimat keskenään ja tiivistää yhteistyötä Yhdysvaltojen kanssa.
- **Liiallinen erikoistuminen.** Jos Suomessa keskitytään vain yhteen kapeaan osa-alueeseen, voikin käydä niin, että kyse oli häviävästä teknologiasta. Myös asiantuntijoiden liiallinen erikoistuminen ja eriytyminen on riski: osaamiseen voi jäädä aukkoja. Tarvitaan poikkitieteellistä ymmärrystä ja yhteistyötä eri alojen kesken.
- **Nopeasti toteutettavat kokeilut voivat herättää moraalipaniikkia.** On varmistettava, että kansalaiset ymmärtävät, mistä on kyse, ja jakaa tietoa, jotta kehitysaskeleet eivät herätä pelkoa. Ymmärrystä kvantista pitää lisätä kaikilla tasoilla.
- **Pelkkään teknologiaan keskittyminen.** Kvanttiteknologian vaikutukset ovat potentiaalisesti perustavanlaatuisia ja laajoja. Siksi esimerkiksi eettiset pohdinnat tulee aloittaa ajoissa.
- **Kvanttiteknologian kehitys ruokkii globaalia epätasa-arvoa.** Jäävätkö kvanttiteknologian hyödyt ja mahdollisuudet vain rikkaiden länsimaiden ulottuville? Kehitetäänkö sitä vain näiden ehdoilla ja hyödyksi?

KANSAINVÄLINEN KILPAILUTILANNE

- Kvanttiteknologiassa Yhdysvaltoja pidetään johtavana toimijana, vaikka Eurooppa onkin tehnyt alaan selvästi eniten julkisia investointeja. Yhdysvalloissa kaupallisen kehitystyön ajureita ovat olleet teknologia-alan suuryritykset kuten Microsoft, Google, Intel ja IBM.
- Kehitystä Euroopassa on hidastanut hajaantuneisuus: yhteistyö tutkimuksen, startup-yritysten, sijoittajien ja teollisten toimijoiden välillä vaatisi nykyistä parempaa koordinointia. Yksityistä pääomaa liikkuu Euroopassa alalle varsin vähän.
- Kvanttiteknologialla tulee todennäköisesti olemaan suuri vaikutus Euroopan keskeisiin teollisuuden aloihin. On myös tärkeää, että Eurooppa pysyy Kiinan ja Yhdysvaltojen kilpailussa mukana ja pyrkii omavaraisuuteen, johon sillä on kvanttiteknologiassa paremmat mahdollisuudet kuin monilla muilla aloilla. EU on tunnistanut tilanteen ja rahoittaa muun muassa kymmenvuotista Quantum Flagship -tutkimushanketta, jossa on myös suomalaisia tutkimusryhmiä mukana.
- Merkittäviä osaamiskeskittymiä maailmassa ovat myös Hollanti, Japani ja Israel. Suomi ja Ruotsi pärjäävät kilpailussa kokoonsa nähden hyvin.

KETKÄ OVAT SUOMEN KVANTTIALAN KESKEISET TOIMIJAT?



3 + 1 POINTTIA PÄÄTTÄJILLE

1. Luottamusta ja malttia tarvitaan.

- Kvanttiteknologian vaikutukset tulevat olemaan merkittäviä, mutta miten tarkalleen ja milloin, se on vielä epäselvää.
- Suomessa kannattaa kehittää osaamista riittävän laajalla skaalalla.
- Samaan aikaan on välttämätöntä keskittää resursseja alueille, joilla meillä on parhaat menestymisen mahdollisuudet.
- Rajoittavia ratkaisuja, kuten standardien määrittämistä, ei tule tehdä liian varhain.

2. Kansainvälinen yhteistyö on elintärkeää Suomelle.

- Suomen on oltava valppaana kansainvälisillä areenoilla. Euroopassa esimerkiksi käydään keskustelua siitä, pitäisikö kvanttikehitystä keskittää. Suomen kannalta tämä on riski. Myös immateriaalioikeuksiin (patentit) ja protektionismiin liittyvät toimet, kuten vientirajoitukset, voivat olla uhka.
- NATO-jäsenyyden myötä Suomi voi päästä mukaan sen tutkimustoimintaan, mikä puolestaan voi vahvistaa tutkimusyhteistyötä Yhdysvaltojen kanssa.

3. Menestys edellyttää osaajia.

- Osaajapula on pullonkaula alan kehityksessä. Tutkimusorganisaatiot joutuvat kouluttamaan tarvitsemansa tekijät. Osaajia myös siirtyy tieteen parista yrityksiin, missä kehitys tapahtuu suljettujen ovien takana.
- Suomen on tärkeää näyttäytyä houkuttelevana maana alan osaajille.
- Menestys edellyttää laadukasta koulutusta ja perustutkimusta etenkin fysiikan, matematiikan, tietojenkäsittelytieteen, kemian ja tekniikan aloilla. Huipulle pääsemiseksi tarvitaan myös täsmäkoulutusta kvanttiteknologiasta (esimerkiksi maisteri- ja tohtoriohjelmat).
- Koulutusta tulee suunnitella kokonaisuutena hyödyntäen eri organisaatioiden ja oppilaitosten vahvuuksia.

+ Ymmärrystä kvantti-ilmiöistä kannattaa lisätä.

- Kvantti-ilmiöt ovat arkikokemuksen valossa epäintuitiivisia ja haastavat ajatteluamme.
- Ymmärrystä kvantti-ilmiöistä kannattaa kuitenkin lisätä, jotta kvanttiteknologiasta kiinnostutaan, sen mahdollisuuksia osataan hyödyntää eikä se herätä pelkoa. Tämä kannattaa nähdä myös mahdollisuutena: kvantti-ilmiöt voivat opettaa meille uudenlaista ja luovempaa ajattelua.
- Kvantti-ilmiöihin tutustumisen tulisi alkaa jo nuorena. Tässä voidaan hyödyntää esimerkiksi pelillistämistä ja taiteen keinoja.

SUOMALAINEN
TIEDEAKATEMIA

Tämän tiedeiskun on laatinut Suomalainen Tiedeakatemia osana Jane ja Aatos Erkon säätiön rahoittamaa Tieteelliset ilmiökartat -hanketta. Työtä johti akateemikko **Risto Nieminen** ja sisällön toimittamisesta ja ulkoasusta vastasi **Nanna Särkkä**. | Sisällöt perustuvat keskusteluille seuraavien tutkijoiden kanssa: **Nina Granqvist** (Aalto-yliopisto), **Teiko Heinosaari** (Turun yliopisto ja VTT), **Jukka Jouhki** (Tampereen yliopisto), **Sabrina Maniscalco** (Helsingin yliopisto), **Elsa Mannila** (VTT), **Juha Muhonen** (Jyväskylän yliopisto), **Mikko Möttönen** (Aalto-yliopisto ja IQM), **Jukka Pekola** (Aalto-yliopisto), **Matti Silveri** (Oulun yliopisto) ja **Visa Vesterinen** (VTT). Lämmin kiitos kaikille! Tiedeiskussa on hyödynnetty myös kvanttialan toimijoiden julkaisuja ja nettisivuja. | Tiedeisku on valmistunut tammikuussa 2023, ja sisällöt perustuvat sen hetkiseen tilanteeseen. | Taustakuva: DKosig/iStockphoto