

Kvanttitietokoneiden läpimurto teknologiassa tapahtunut

1.7.2022

Kvanttitietokoneiden kehitys on jo niin pitkällä, että kaupallisiakin kvanttitietokoneita alkaa olla jo saatavissa. Kvanttitietokoneiden toiminta perustuu, toisin kuin perinteisten tietokoneiden, kvanttifysiikan ilmiöihin, kuten superpositioon ja lomittumiseen. Kvanttitietokoneet käyttävät perinteisten tietokoneiden bittien (0 ja 1) sijaan kubitteja eli kvanttibittejä, joissa hyödynnetään tilojen välistä superpositiota. Superposition ja lomittumisen avulla laskutoimitus voidaan suorittaa monilla eri luvuilla samanaikaisesti, jolloin saavutetaan hyvin suuri laskentateho. Kvanttitietokoneen etuna on nimenomaan erittäin suuri laskentateho, mutta mahdollisesti myös sellaisten ongelmien ratkaiseminen, jotka ovat perinteiselle tietokoneelle mahdottomia. Kvanttitietokoneiden laskentatehoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tekoälyn optimointitehtävissä ja kemiallisten yhdisteiden simuloinnissa. Menestyksellisiä kvanttitietokoneiden rakentamisprojekteja on maailmalla vireillä useita, myös Suomessa.

Kvanttitietokone – mikä se on?

Kvanttifysiikka on fysiikan merkittävä osa-alue, jolla on lukuisia teknillisiä sovelluksia. Niistä yksi ja ajankohtainen on kvanttitietokone. Innostus kvanttilaskentaan ja kvanttitietokoneiden rakentamiseen alkoi Japanissa vuonna 1999, kun ensimmäinen suprajohtavista kvanttipiireistä valmistettu kvanttibitti eli kubitti keksittiin. Nyt on jo osoitettu, että kvanttitietokone pystyy suorittamaan ainakin joitakin laskutoimituksia nopeammin kuin nopeimmat supertietokoneet. Maailmalla on kehitteillä useita kaupallisiakin kvanttitietokoneita. Suomessa ensimmäinen kvanttitietokone on jo toiminnassa Teknologian tutkimuskeskus VTT:llä Espoon Otaniemessä.

Konventionaalisen tietokoneen toiminta perustuu bitteihin, jotka voivat saada arvon 0 tai 1. Itse tieto voidaan tallentaa biteistä muodostettujen hyvinkin monimutkaisten vain numeroita 0 ja 1 sisältävien binäärilukujen avulla. Esimerkiksi kirjain A binäärilukuna on 01000001. Teknisesti bitit ovat tietokoneen sisällä olevia hyvin pieniä elektronisia elementtejä, joissa sähkövirta joko kulkee (bitin arvo 1) tai ei kulje (bitin arvo 0). Kaikki tietokoneen tekemät toiminnot ovat bittien siirtelyä, käytännössä sähkövirran kulun muuttelua.

Kvanttitietokoneessa bittien sijaan on käytössä **kvanttibittejä eli kubitteja**. Ne hyödyntävät kvanttimekaanista **superpositio-ilmiötä**. Yleisesti fysiikassa superpositio tarkoittaa usean samanaikaisen, samanlaatuisen ja samassa paikassa vaikuttavan osavaikutuksen yhdistymistä. Kvanttifysiikassa se on tulkittavissa periaatteeksi, jonka mukaan kahden tai useamman kvanttitilan summa on myös kvanttitila, ja toisaalta jokainen kvanttitila voidaan esittää kvanttitilojen summana. Kubitin arvo voi näin olla tavallisen bitin arvon 0 tai 1 lisäksi jotain siltä väliltä so. ykkösen ja nollan superpositio. Kvanttitietokoneen suuri laskentateho liittyy nimenomaan kubittien superpositioon eli koneen tilojen suureen lukumäärään. Kvanttitietokoneen kubitit voidaan toteuttaa teknisesti suprajohtavuutta hyödyntävällä ns. Josephsonin liitoksella. Jos kubitteja on kaksi tai useampia, ne on mahdollista **lomittaa**. Silloin kahden tilan superpositiossa olevat kubitit ovat toisiinsa kytkettyjä. Teknisesti kubitit ovat esimerkiksi hiukkasia tai suprajohteesta valmistettuja komponentteja. Suprajohtava piiri on sähköpiiri, jonka sähkövastus on nolla. Näitä piirejä on mahdollista rakentaa laskemalla niiden lämpötila lähelle absoluuttista nollapistettä. Suprajohtavilla komponenteilla kubitin arvo on kytketty sähkön värähtelyyn sähköpiireissä. Sähkö värähtelee suprajohtavassa piirissä pienimmällä mahdollisella energialla, kun kubitti on tilassa 0. Silloin kun kubitissa on yksi värähtelykvantti, kubitti on tilassa 1. Konventionaalisessa tietokoneessa kaksi bittiä voidaan esittää neljällä eri tavalla. Kvanttitietokoneessa superposition ansiosta kaksi lomittunutta kubittia voi olla näissä kaikissa tiloissa samanaikaisesti. Yleisesti sanoen kokonaisluvun n:n bitin tilan kuvaamiseen tarvitaan n bittiä, mutta n:n kubitin tilan kuvaamiseen tarvitaan 2^n bittiä, mikä johtuu siitä, että yksi kubitti voi olla molempien bittitilojen superpositiossa. Konventionaalinen tietokone tarvitsee 8 bittiä esittämään minkä tahansa luvun väliltä 0 … 255. Kvanttitietokoneelle riittää tuo 8 kubittia esittämään kaikkia lukuja väliltä 0 … 255 samanaikaisesti.

Kvanttitietokoneen uutuusarvo laskennassa ja käyttö

Kvanttitietokoneen tehokkuus konventionaaliseen tietokoneeseen verrattuna perustuu siihen, että superposition ja lomittumisen ansiosta lasku voidaan suorittaa monilla eri luvuilla samanaikaisesti. Kvanttitietokone hyödyntää lomittumista ja kubittien superpositioon liittyviä todennäköisyyksiä. Kvanttitietokone käyttää kvanttialgoritmejä suorittaessaan operaatioita siten, että oikeiden vastausten todennäköisyyden suurenevat ja väärien vastausten todennäköisyydet pienenevät. Kvanttitietokoneet tarjoavat hyvin suuria laskentanopeuksia todennäköisesti vain tietyn typpisissä tehtävissä. Monissa laskentaongelmatyypeissä konventionaaliset tietokoneet laskevat edelleenkin kvanttitietokonetta tehokkaammin. Tämän vuoksi tulevaisuudessa saattaakin olla hybriditietokoneita, joissa on yhdistetty sekä konventionaalisen että kvanttitietokoneen piirteitä.

Kvanttitietokoneen suurta laskentatehoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tekoälyn optimoinnissa.

koneoppimisen nopeuttamisessa ja molekyylien sekä kemiallisten reaktioiden mallintamisessa. Kvanttilaskentaa voidaan soveltaa lääketieteen ja ilmastonmuutokseen liittyvien ongelmien ratkaisemisessa. Logistiikassa kvanttilaskentaa voidaan hyödyntää lentoreittien ja logistiikkayritysten toimitusreittien suunnittelussa. Autoteollisuus on jo hyödyntänyt kvanttilaskentaa hankintaketjujen ja liikenteen optimoinnissa.

Kvanttilaskennalla voidaan siis ratkaista monimutkaisia ongelmia huomattavasti nopeammin kuin konventionaalisella tietokoneella, mikä on kvanttilaskennasta saatavaa käytännön hyötyä. Toinen merkittävä lisäarvo kvanttitietokoneesta olisi se, että kvanttitietokone pystyisi ratkaisemaan sellaisen ongelman, jonka ratkaiseminen on mahdotonta konventionaaliselle tietokoneelle. Tällä ymmärretään ns. ”kvanttiherruutta”.

Kvanttitietokoneprojekteja Suomessa ja maailmalla

Kvanttitietokoneiden kehitysprojekteja on maailmalla useita ja niihin on tehty miljardisijoituksia. Suomessa on kvanttitietokoneen perustaa luotu jo 1960-luvulta asti, jolloin Espoon Otaniemeen Teknilliseen korkeakouluun perustettiin Kylmälaboratorio erillislaitokseksi. Siellä rakennettiin jo 50 vuotta sitten suprajohtavia piirejä, jotka ovat hyvin herkkiä magneettikentän antureita ns. SQUIDeja. Edelleen niitä hyödynnettiin aivokuvantamislaitteiden ja myös suprajohtavien kubittien rakentamisessa. Laskennallisten nanotieteiden huippuyksikköön perustettiin Kvanttilaskennan ja -laitteiden tutkimusryhmä. Suprajohtavia kubitteja ja piirejä rakennettiin, mutta varsinaisesti kvanttitietokoneiden kehittämiseen ei pureuduttu. Lopulta vuonna 2018 perustettiin kvanttitietokoneyritys IQM, jossa työskentelee noin 150 henkilöä. Yrityksellä on kvanttiprosessorien valmistuslaitos Espoon Mankkaalla ja kvanttitietokoneiden testauslaitos Espoon Keilaniemessä. Yrityksen tavoitteena on rakentaa kvanttitietokone. IQM:n jälkeen Suomeen on syntynyt muutamia kvanttiohjelmistoalan yrityksiä. Kaiken tämän kehityksen taustalla on voimakkaasti Aalto-yliopiston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT:n kannustama tutkimus- ja innovaatioekosysteemi.

Sittemmin avoimen tarjouskilpailun jälkeen IQM valikoitui Teknologian tutkimuskeskus VTTn kumppaniksi rakentamaan kvanttitietokonetta. Pienellä osuudella hankkeessa on mukana myös Aalto-yliopisto, Sveitsin teknillinen korkeakoulu ja Jülichin tutkimuslaitos. Projektin nimi on ”Suomalainen kvanttitietokone”, ja sen puitteissa on tarkoitus rakentaa 5, 20 ja 50 kubittin kvanttitietokoneet. Viiden kubitin kvanttitietokone onkin jo valmis. Suomalainen kvanttitietokone on nyt olennainen osa perustettua Suomen kvanttilaskennan infrastruktuuria, jonka kautta on tarkoitus tarjota tutkimuslaitoksiin ja yrityksiin kvanttilaskentapalveluita, ja aikanaan Tieteen tietotekniikan keskus (CSC) ylläpitänee kvanttitietokoneita samaan tyylin kuin nyt supertietokoneita. Suomalainen kvanttitietokone on myös osa eurooppalaista tutkimusympäristöä mm. EU:n kvanttiteknologian lippulaivahankkeessa.

Muualla maailmassa mainittavia kvanttitietokoneprojekteja ovat mm. IBM:n Eagle prosessori, jonka suprajohtavan kvanttitietokoneen kubittimäärä on peräti 127. Yhdysvaltalainen yritys Rigetti on ilmoittanut tuovansa markkinoille 80 kubitin kvanttitietokoneen. Kiinalaisen USTC-yliopiston Zuchongzhi 2.1 -kvanttitietokoneessa on 63 kubittia. Google Sycamore -kvanttitietokoneessa on 53 kubittia. Kanadalaisen D-Waven Advantage -tietokoneessa on yli 5000 kubittia, mutta sillä ratkaistaan vain tarkasti rajattuja optimointitehtäviä. Yhdysvaltalainen QuEra on rakentanut 256 kubitin kvanttitietokoneen. On huomautettava,

että kubittiluku ei yksinomaan ratkaise kvanttitietokoneen suorituskykyä. Todellista laskentatehoa mittaa kvanttivolyymi, joka ottaa huomioon mm. laskentaprosessien virhealttiuden.

Koneiden suorituskyvyn kasvaminen vaatii myös uudenlaisia teknologisia ratkaisuja ongelmiin. Äskettäin onkin tapahtunut läpimurto suprajohdeteknologiassa, jota kvanttitietoteknologiakin hyödyntänee. Kansainvälinen fyysikkoryhmä on kehittänyt yksisuuntaisen suprajohteen, joka tavanomaisen suprajohteen tapaan johtaa sähköä ilman resistanssia, mutta tavanomaisesta poiketen sähkö kulkee vain yhteen suuntaan. Tämä on erittäin olennaista tietokoneiden toiminnassa. Yksisuuntaista suprajohdetta on aikaisemmin epäilty mahdottomuudeksi. Tosin suprajohtavuuden edellyttämää hyvin alhaista lämpötilaa on teknisesti hankala saavuttaa. Normaalilämpötilassa ja -paineessa toimiva suprajohtava aine olisi ihanteellinen. Suprajohtavat tietokoneet voisivat toimia arviolta 300 … 400 kertaa nykyisiä tietokoneita nopeammin vastaten suunnilleen yhtä rajua tietotekniikan innovaatiota kuin kvanttitietokone. Kvanttitietokoneiden tekniikassa keskeinen haaste yleisesti on superpositiotilan saavuttaminen. Kvanttisysteemi on herkkä ulkopuolisille häiriöille ja vaatii komponenteilta alhaista lämpötilaa lähellä absoluuttista nollapistettä. Toinen merkittävä ongelma on kubittien lomittuminen keskenään. Lisäksi haastetta on ongelmanratkaisussa ja algoritmeissä. Kubitit vaativat oman koodikielensä ja algoritminsä, joita on vielä hyvin vähän. Lisäksi on eliminoitava ulkopuoliset häiriöt.

Jouni Björkman
filosofian tohtori, dosentti
Seinäjoen ammattikorkeakoulu

Kirjallisuusviitteet:

Möttönen, Mikko. Kvanttitietokoneet vihdoinkin lyöneet läpi. Arkhimedes 1/2022. Suomen fyysikkoseura. s. 11 – 17.

Kvanttitietokoneet, Tekniikka & Talous 11.2.2022, s. 12 – 14.

Teema-artikkeli: Kvanttitietokoneet, Tekniikan maailma, 28.1.2020.

Fyysikoilta läpimurto suprajohteissa, Tekniikka & Talous 20.5.2022, s. 6.