

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Engineering Science

Laskennallisen tekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

Kvanttitietokone

Työn tarkastaja: Jouni Sampo

Työn ohjaaja: Jouni Sampo

Lappeenranta 26.5.2019

Inka Saarikoski

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Engineering Science

Laskennallisen tekniikan ja analytiikan koulutusohjelma

Inka Saarikoski

Kvanttitietokone

Kandidaatintyö

2019

38 sivua, 2 kuvaa

Ohjaaja: Yliopisto-opettaja, TkT Jouni Sampo

Avainsanat: kvanttitietokone; kubitti; optimointi; universal quantum computer; quantum annealer;

Kandidaatintyön tavoite oli tutustua kvanttitietokoneeseen ja sen mahdollisiin sovelluskohteisiin etenkin optimoinnin parissa. Kandidaatintyössä kartoitettiin erilaisia kvanttitietokoneen toteutusmahdollisuuksia, kuten kvanttipistettä, laskentanestettä ja suprajohdelaskentaa. Työssä tutkittiin kvanttitietokoneen määritelmää DiVincenzon kriteerien mukaan. Työssä tutustuttiin kahteen kvanttilaskentasysteemiä tekevän yrityksen, D-Waven ja IBM:n, kehittämiin kvanttitietokoneisiin ja tarkasteltiin niitä DiVincenzon kriteerien valossa. Huomattiin, että yritysten kehittämät kvanttitietokoneet täyttivät ainakin suurimman osan DiVincenzon kriteereistä. Työssä pohdittiin kvanttitietokoneen tulevista käyttötarkoituksista optimointia ja simulointia, ja todettiin niiden olevan varteenotettavia sovelluskohteita kvanttilaskennalle.

Sisällys

1. Johdanto.....	1
2. Teoria.....	2
2.1 Elektronisen tietokoneen toimintaperiaate	2
2.2 Kvanttimekaaninen superpositio ja kubitti.....	3
3. Kvanttitietokoneen määritelmä.....	5
3.1 DiVincenzon kriteerit.....	5
3.2 Kolme kvanttitietokonetyyppiä	6
4. Kubitin ja kvanttitietokoneen toteuttaminen	7
4.1 Kvanttipiste	8
4.2 Laskentaneste	8
4.3 Suprajohdelaskenta.....	11
5. Olemassa olevat kvanttitietokoneet	12
5.1 IBM	12
5.2 D-Wave	14
6. Kvanttitietokoneen käyttötarkoitukset.....	17
6.1 Optimointi	18
6.2 Simulointi.....	21
6.3 Kvanttitietokoneen käyttö yritysmaailmassa	22
7. Kvanttitietokoneen ongelmat.....	23
8. Pohdinta.....	25
9. Lähteet	29
10. Kuvalähteet	35

1. Johdanto

Laskenta pyörittää maailmaamme. Olemme nykyään tietokoneiden ympäröimiä koko ajan. On kuitenkin olemassa ongelmia, joita nykypäivän klassinen laskenta ei voi ratkaista. Jotkin ongelmat ovat yksinkertaisesti vain liian isoja tai monimutkaisia klassiselle laskennalle. Tällaisia ongelmia löytyy niin kemian, materiaalitekniikan kuin optimoinnin saralta (Microsoft Quantum Team 2018).

Näiden ongelmien ratkaisuja etsittäessä on tärkeää kehittää uusia, tehokkaampia laskentatapoja. Kvanttilaskenta antaa mahdollisuuden ratkaista juuri niitä ongelmia, joiden ratkaisu nykypäivänä ei ole mahdollista. Kvanttitietokone on mahdollisuus sellaisen laskennallisen systeemin rakentamiseen, jonka laskentateho nousee systeemin koon kasvaessa (IBM). Kvanttilaskennan sovelluskohteita on monenlaisia ja toteutettuna se voi mahdollistaa erilaista ongelmanratkaisua monimutkaisten molekyyliarakenteiden simuloinnista aina tehtaan tuoton maksimointiin (Microsoft Quantum Team 2018).

Tämä työ käsittelee laskennan viimeisintä edistysaskelta, kvanttitietokonetta, ja eri tapoja määrittellä ja toteuttaa se. Työssä esitellään myös muutamia olemassa olevia kvanttilaskentasysteemejä ja tutkitaan kvanttitietokoneen käyttötarkoituksia. Työn tarkoitus on tutkia kvanttitietokoneen eri määrittelytapoja, sen konkreettista kehitystä tällä hetkellä ja selvittää sen soveltumista optimointiin.

Työ toteutettiin keräämällä tietoa kirjallisuuslähteistä, uutisista ja blogiteksteistä. Työtä varten haastateltiin Aalto-yliopiston Quantum Computing and Devices-ryhmän johtajaa, professori Mikko Möttöstä, joka on tutkinut kvanttitietokonetta ja esimerkiksi kvanttilaskennan energiatehokkuutta (Ikonen, Salmilehto & Möttönen 2017).

2. Teoria

Ymmärtääksemme kvanttietokoneen toimintaa meidän pitää ensin ymmärtää tietokoneen määritelmä. Tässä kappaleessa käymme läpi elektronisen tietokoneen toimintaperiaatteen ja kvanttietokoneen pienimmän rakennuspalikan, kubitin, toimintaperiaatteita.

2.1 Elektronisen tietokoneen toimintaperiaate

Tietokoneen toimintaperiaate perustuu 1800-luvulla kehitettyyn Boolean algebraan, joka muodostuu erilaisista väittämistä, joilla on totuusarvo, joko tosi tai epätosi. Boolean algebran käytännöllinen sovelluskohde löydettiin 1930-luvulla, kun se liitettiin puhelinten reitityssystemien suunnitteluun. Huomattiin myös, että puhelinten reitityspiirejä voitiin käyttää Boolean algebran ongelmien ratkaisuun. Boolean algebra toimii edelleen perustana kaikkien digitaalisten tietokoneiden piirien suunnittelussa. Nykypäivän tietokoneet käyttävät loogiseen ratkaisuun elektronisia kytkimiä. (O'Regan 2008, s. 33.)

Tietokone voidaankin yksinkertaisimmillaan määritellä sarjaksi nopeita kytkimiä, joita yhteen liitettynä voidaan käyttää erilaisten ongelmien ratkaisuun. Historian ensimmäiset tietokoneet eroavat paljon siitä, mitä nykypäivän ihminen ajattelee kuullessaan sanan "tietokone". Nykypäivän elektroniset tietokoneet ovat pitkän teknologisen kehityskaaren tulos. Ensimmäisen tietokoneen määrittelemine on hankalaa, sillä tietokoneita on ollut todella erilaisia, elektronisia, mekaanisia ja massatuotettuja, joiden jokaisen ensimmäistä versiota voitaisiin pitää tyyppinsä ensimmäisenä tietokoneena. Tietokoneiden luokittelu erilaisiin sukupolviin teknologisten eroavaisuuksien perusteella on kuitenkin mahdollista. Ensimmäisen polven tietokoneissa kytkimet olivat tyhjiöputkia ja toisen sukupolven tietokoneissa transistoreja. Tietokoneiden kolmas sukupolvi käytti mikropiirejä ja neljäs mikroprosessoreja, jotka molemmat koostuvat suuresta määrästä pieniä transistoreita. (Atkinson 2011, s. 13-14) Nykypäivän elektronisten tietokoneiden ongelmanratkaisukyky perustuu transistoreihin.

Tietokoneen mikropiireissä olevat tuhannet pienet elektroniset kytkimet on järjestetty loogiseksi porteiksi, jotka tarkoittavat Boolean algebran loogisia konjunktioita JA, TAI ja EI. Loogisia portteja yhdistelemällä saadaan tietokone tekemään erilaisia tehtäviä. Elektronisessa tietokoneessa loogisen portin tulos on joko korkea tai matala jännite, korkea jännite tarkoittaen totuusarvoa "tosi" ja matala arvoa "epätosi". (O'Regan 2008, s. 33.)

2.2 Kvanttimekaaninen superpositio ja kubitti

Elektronisen tietokoneen pienin tiedon yksikkö on bitti, joka on yhden numeron kuvaama arvo, joko 0 tai 1, joista 0 tarkoittaa "epätosi" ja 1 "tosi". Kvanttitietokoneessa bitin korvaa kubitti, joka voidaan kuvata esimerkiksi kahdessa eri tilassa olevana atomina. Kaksi eri tilaa voidaan tulkita elektronisen tietokoneen tapaan joko nollana tai ykkösenä. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 66.)

Kubitin ja normaalin bitin ero on se, että normaali bitti voi olla aina vain jompaakumpaa arvoa, nollaa tai ykköstä, kun taas kubitti voi olla kahden eri arvon yhdistelmä, niin sanottu superpositio. Kubitissa eri arvoille on numeerinen todennäköisyyskerroin. Kahden kubitin tietokone tarvitsee siis neljä kerroinlukua, sillä kahden kubitin tietokone voi päätyä neljään eri tilaan. Yleisesti n kubittia tarvitsee aina 2^n kerroinlukua. Tällöin esimerkiksi viidenkymmenen kubitin tietokoneella laskettaessa eri tilojen todennäköisyyskertoimien määrä olisi $2^{50} \approx 10^{15}$ luokkaa. Tällaisten todennäköisyyksien laskeminen on tavanomaisten tietokoneiden ulottumattomissa. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 66.)

Kvanttitietokoneen tehokkuus perustuu juuri kubittien superpositioon. Yksinkertaisimmillaan superpositio tarkoittaa sitä, että kubitti voi olla kahta eri arvoa, kunnes sen arvo mitataan. Superposition voi ymmärtää myös Schrödingerin kissan ajatusleikin avulla. Ajatusleikissä kissa on laatikossa, ja kissan elossa oleminen riippuu laatikossa olevan radioaktiivisen atomin hajoamisesta (Monroe, Meekhof, King & Wineland 1996). Kissa on täten kuolleen ja elävän superpositiotilassa, kunnes laatikkoon kurkistetaan ja varmistetaan kissan olevan joko elävä tai kuollut. Schrödingerin kissa on hämmäntävä ajatusleikki, sillä sen tapaisia superpositiotiloja ei tule vastaan makroskooppisella tasolla. Schrödingerin kissa on kuitenkin paljon käytetty

esimerkki, joka haastaa meidät vertaamaan kvanttisuperpositiota omaan tapaamme tutkia maailmaa.

Samalla tavalla kuin Schrödingerin kissa on kahden eri tilan superpositiossa, myös kubitit voivat olla kahden eri tilan superpositiossa. Kubitit voivat olla yhdistelmä kahden eri arvon välillä ja täten ratkaista ongelmia yhtäaikaisena prosessina (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 66) normaalin elektronisen tietokoneen ratkaistessa eri vaihtoehtoja eri ongelmina. Kvanttitietokoneen ongelmanratkaisu tapahtuu siis ikään kuin käymällä ongelmanratkaisun eri vaihtoehdot läpi samanaikaisesti superposition avulla, löytäen aina jokaiselle vaihtoehdolle oman todennäköisyytensä. Normaali tietokone käsittelee ongelmaa käymällä vaihtoehdot läpi erikseen.

Kvanttimekaniikka aiheuttaa kubiteille myös toisen erityisen ominaisuuden, lomittumisen. Lomittuminen voidaan esittää kahden vastakkaisiin suuntiin emittoituvien fotonien avulla. Kahden vastakkaisuuntaisen fotonin oskilloivat sähkökentät ovat myös vastakkaisuuntaiset. Kummankaan fotonin polarisaatiota ei voi tietää ennen kuin se havaitaan, mutta havaittaessa yhden fotonin polarisaatio, toisen fotonin polarisaatio kiinnittyy. Tätä kvanttien korrelaatiota kutsutaan lomittumiseksi. Lomittuminen toimii kvanttisysteemien, esimerkiksi kubittien, luonnollisena kytkentänä kvanttitietokoneessa. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 66-67.)

Superposition ja lomittumisen lisäksi kubiteilla on muitakin kvanttimekaanisia ominaisuuksia, joita klassinen fysiikka ei tunne. Yksi näistä on kvanttisysteemin tilan superposition romahtus, jossa superpositio romahtaa yhdelle tilalle tarkkailijan havainnoissa sen tilaa. Superposition romahtaminen aiheuttaa kvanttitietokoneen suunnittelussa haasteen, sillä kubittien pitäisi olla täysin eristettynä ympäristöstään toimiakseen kvanttitietokoneen osana. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 67.)

Superposition romahtamiseen johtavaa valoa, ääntä, lämpöä, säteilyä, värähtelyä tai magneettikenttää kutsutaan dekoherenssiksi. Dekoherenssi tekee kubiteista herkkiä romahtamaan superpositiosta, mikä puolestaan aiheuttaa laskennassa virheitä. (Bassan 2018)

3. Kvanttitietokoneen määritelmä

Kvanttitietokoneen määrittely on lähes yhtä monimutkaista kuin sen rakentaminen. On hankala arvioida, mitä kvantti-ilmiöitä käyttävää laskentalaitteistoa voidaan pitää kvanttitietokoneena. Kvanttitietokonetta varten on kehitetty erilaisia määritelmiä ja kriteerejä, joista kahta, DiVincenzon kriteerejä ja IBM:n kolmea kvanttitietokonetyyppiä, käsitellään tässä kappaleessa. DiVincenzon kriteerit määrittelevät kvanttitietokoneen vähimmäiskriteerejä ja IBM:n tyypit lajittelevat kvanttitietokoneet niiden kehityksen mukaan.

3.1 DiVincenzon kriteerit

DiVincenzon kriteerit ovat vuonna 2000 laadittu lista kriteerejä, jotka kvanttitietokoneen pitää täyttää toimiakseen (DiVincenzo 2000). David DiVincenzon laatimien kriteerien tarkoitus oli yhdistää ja luoda viitekehys niiden kehitysvaiheessa vielä lapsenkengissä olleelle kvanttilaskentateknologialle. Viisi ensimmäistä kriteeriä keskittyvät laskentaan ja kaksi viimeistä kommunikaatioon. DiVincenzon kriteerit ovat:

1. Skaalattava, fyysinen systeemi, jossa on tunnistettavat kubitit. Kubitteja on oltava mahdollista rakentaa yhden lisäksi myös sarja.
2. Mahdollisuus asettaa kubiteille jokin tunnettu alkuarvo. Kubitit on voitava alustaa.
3. Pitkät dekoherenssiajat, joka tarkoittaa, että kubitit pystyvät olemaan superpositiotilassa pitkän aikaa ennen kuin dekoherenssi aiheuttaa superposition romahtamisen. Datan on pysyttävä muistissa ja kubittien kyettävä superpositioon, jotta niillä voidaan laskea.
4. Universaalit kvanttiportit. Kvanttitietokoneen pitää pystyä suorittamaan mikä tahansa algoritmi ollakseen yleiskäyttöinen tietokone.
5. Kyky mitata yksittäisiä kubitteja. Tietokoneen on voitava lukea yksittäisiä tuloksia.
6. Kyky muuntaa paikallaan olevia ja liikkuvia kubitteja. Jotta dataa voidaan siirtää pitkiä matkoja, se pitää voida muuntaa paikallaan olevasta, kuten mikrosirulta, liikkuvaksi, esimerkiksi valoksi.
7. Kyky välittää liikkuvia kubitteja tiettyjen paikkojen välillä. On oltava mahdollista siirtää kubitteja tarkasti.

DiVincenzon kriteerit määrittelevät ”puhdasoppisen” kvanttietokoneen, eivätkä ne määrittele kvanttietokonetta esimerkiksi sen tehokkuuden tai siitä saatavan hyödyn mukaan. Kriteerejä voisikin kritisoida siitä, että ne joko olettavat kvanttietokoneen olevan tehokas laskentaväline tai sitten eivät vain kiinnitä sen tehokkuuteen huomiota. Tämä herättääkin kysymyksen siitä, kuinka tärkeää DiVincenzon kriteerien täyttäminen lopulta on. Jos laskentajärjestelmä käyttää hyväkseen kvanttiominaisuuksia, se on tehokas ja onnistuu laskennassa, onko silloin tärkeää, että se täyttää DiVincenzon kriteerit? Mikko Möttösen mukaan DiVincenzon kriteerit ovat itsestäänselvyyksiä, ja ainakin viiden ensimmäisen kriteerin on täytyttävä, jotta loogisiin portteihin perustuva yleiskäyttöinen kvanttietokone olisi toimiva (Möttönen 2019).

Kvanttietokoneen kehittämisessä tärkeimpiä asioita ovat sen toteuttamisen mahdollisuus ja sillä tehtävän laskennan luotettavuus. Kvanttietokoneen laskentatehokkuus ja sillä saavutettu hyöty ovat asioita, jotka kiinnostavat kvanttietokoneesta innostuneita yrityksiä. Tämä aiheuttaa todellisuuden ja kriteerien välille ristiriidan. Kriteerit eivät välitä siitä, onko kvanttietokone keksintönä järkevä ja kalliin kehitystyön arvoinen. Kriteerit tutkivat kvanttietokonetta hyvin teoreettiselta kannalta, eivätkä ota kantaa kvanttietokoneen käytännön toteutukseen. Toisaalta kriteerit ovat hyvät, sillä ne ohjaavat kvanttietokoneen rakentamisen oikeaan suuntaan ja kyseenalaistavat meitä miettimään olemassa olevien kvanttilaskentajärjestelmien toimintaperiaatteita. DiVincenzon kriteerit ovat hyvä kehys kvanttietokoneen rakentamiselle, mutta niitä ei pidä käyttää jarruna kvanttietokoneen kehittämisessä.

3.2 Kolme kvanttietokonetyyppiä

IBM Research on jakanut kvanttietokoneet kolmeen eri tyyppiin (IBM 2015). Ensimmäistä tyyppiä kutsutaan quantum annealeriksi. Annealer on kvanttietokoneista helpoin rakentaa, mutta se on myös laskennallisesti heikoin ja rajoittunein. Annealer on rakennettu vain yhtä käyttötarkoitusta varten ja on siten hyvin erikoistunut kvanttilaskennan väline. Annealerialia voidaan käyttää optimointiongelmiin, mutta tiedeyhteisön yleinen mielipide on, ettei annealerilla saavuteta etuja, joita ei saavutettaisi myös normaalilla laskennalla (IBM 2015).

Toinen kvanttietokonetyyppi on analoginen kvanttietokone. Sen odotetaan olevan kvanttietokoneen versio, joka todella näyttää kvanttilaskennan ylivoimaisuuden tavanomaiseen laskentaan verrattuna. Analoginen kvanttietokone voisi simuloida monimutkaisia kvanttivuorovaikutuksia, jotka tuottavat ongelmia normaaleille tietokoneille. Analogisen kvanttietokoneen sovelluksia voi löytyä esimerkiksi kvanttikemian ja materiaalitieteen saroilta sekä annealerin tavoin optimoinnista. Analoginen kvanttietokone koostuisi noin 50-100 kubitista.

Kvanttilaskennan todellinen haaste tulee kuitenkin olemaan kolmannen tyypin, universaalien eli yleiskäyttöisen kvanttietokoneen, rakentaminen. Yleiskäyttöistä kvanttietokonetta kutsutaan joskus Turingin kvanttietokoneeksi (Deutsch 1985, s. 1). Yleiskäyttöinen kvanttietokone olisi muiden kvanttietokonetyyppien tapaan nopeampi ongelmanratkaisussa elektronisiin tietokoneisiin verrattuna. Tämän kvanttietokoneen sovelluksia olisi esimerkiksi entistä paremmat mahdollisuudet koneoppimiseen, kryptografiaan, kyberturvallisuuden parantamiseen ja analogisen tietokoneen sovelluskohteiden syventämiseen. Yleiskäyttöisen kvanttietokoneen arvioidaan rakentuvan jopa yli 100 000 kubitista. Yleiskäyttöisen kvanttietokoneen rakentaminen on kvanttilaskennan hankalin tekninen haaste.

4. Kubitin ja kvanttietokoneen toteuttaminen

Kvanttietokonetta ei voi rakentaa elektronisen tietokoneen tapaan transistoreista ja diodeista, vaan se eroaa normaalista tietokoneesta jo suunnittelultaan. Rakentaaksemme kvanttietokoneen, meillä on oltava sopiva kubitti, joka toteuttaa superposition periaatteen. Kubitin toteutukselle on olemassa monia eri vaihtoehtoja, jotka eroavat toisistaan suuresti. Seuraavissa kappaleissa esitellään muutamia eri keinoja, joilla kvanttietokoneen rakentaminen olisi mahdollista ainakin teoriassa.

4.1 Kvanttipiste

Eräs tapa toteuttaa kubitti on niin sanottu kvanttipiste (Bone & Castro). Kvanttipiste on atomien seassa oleva elektroni, joka voidaan nostaa viritystasolle tietyn aallonpituuden omaavan laservalopulssin avulla. Toinen laserpulssi aiheuttaa elektronin putoamisen takaisin perustasolle. Viritystasoa ja perustasoa voidaan täten ajatella kubitin eri arvoina 0 ja 1. Laserpulssi muuttaa kubitin arvon toiseksi, joten se voidaan kuvata Boolean algebrasta tuttuna NOT-funktiona.

Kvanttipiste toteuttaa superposition niin, että laserpulssin ollessa puolet NOT-funktioon tarvittavasta pituudesta, elektroni jää superpositioon, jossa se on samanaikaisesti kummassakin energiatilassa. Muita loogisia portteja voi mallintaa asettamalla kvanttipisteitä pareiksi.

Vaikka kvanttipisteet vaikuttavatkin teoriassa täydellisiltä kvanttietokoneen kubiteilta, todellisuudessa niihin liittyy monia ongelmia, jotka tekevät kvanttipisteistä hankalia toteuttaa. Kvanttipisteen elektroni pysyy viritystasolla vain mikrosekunnin, jonka jälkeen se tippuu taas alemmalle tasolle. Tämä rajoittaa mahdollisten laskentatoimien määrää, sillä elektronin nostamiseen tarvittavan laserpulssin pituus on noin nanosekunnin luokkaa.

Kvanttipisteiden rakentaminen on hyvin vaikeaa niiden pienen koon takia. Kvanttipistekubitien tarvitsemat laserit aiheuttavat myös päänvaivaa. Tuhansien laserien laittaminen pieneen kvanttipistetilaan ei olisi kannattavaa. Kvanttipisteet voitaisiin kuitenkin tehdä vastaamaan eri laservalojen aallonpituuksia. Laserin pitäisi siis vastata useista erilaisista kvanttipisteistä säätämällä aallonpituuttaan niille sopivaksi.

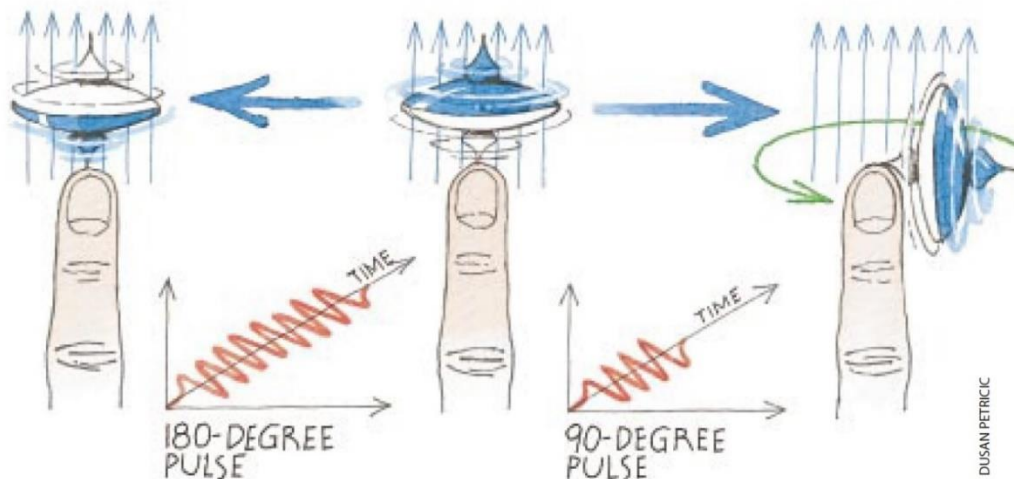
4.2 Laskentaneste

Kvanttietokoneessa käytettävän aineen ei tarvitse välttämättä olla pieni tai eristetty. Bonen ja Castron mukaan kvanttietokoneen välittäjäaine voi koostua myös suuresta määrästä

molekyylejä. Tätä kutsutaan computing liquidiksi eli laskentanesteeksi ja se on yksi kvanttietokoneen toteutusmahdollisuuksista. Laskentanesteeseen perustuvan kvanttietokoneen voidaan ajatella olevan molekyyli ja molekyylin atomien ytimien olevan kubitteja. Laskentanestetekniikassa käytetään kuitenkin yhden molekyylin sijasta ”mukillista” nestemolekyylejä. Ytimissä laskennan tekee siis ytimien spinit. Spin on hiukkasen tai atomin ytimen (Merzbacher 1998, s. 372) ominaisuus. Spin tarkoittaa hiukkasen sisäistä magneettista momenttia, joka sillä on sen ympäristöstä huolimatta. Kyseessä olevaa hiukkasta voisi spinin takia kuvata kuin pieneksi magneettisauvaksi (Burkhardt & Leventhal 2008, s. 262).

Ytimien spinejä voidaan tarkastella kemistien käyttämällä nuclear magnetic resonance-tekniikalla, lyhennettynä NMR-tekniikalla. NMR-tekniikkaa on käytetty jo kauemman aikaa molekyylien tutkimiseen. NMR vaikuttaa laskentanesteen molekyylien atomien ytimien kvanttipartikkeleihin. Spinin omaavat partikkelit mukautuvat ulkopuoliseen magneettikenttään ikään kuin ne olisivat pieniä magneettisauvoja. Partikkelien spinit voivat asettua joko magneettikentän suuntaisesti tai vastakkaisuuntaisesti, jolloin voidaan ajatella näiden kahden suunnan tarkoittavan kahta eri kvanttitilaa, kubitin arvoja 0 ja 1. Magneettikentän kanssa yhdensuuntaisella spinillä on alempi energia kuin magneettikentän suuntaa vastakkaisella spinillä. Spinien energioiden suuruuteen vaikuttaa ulkoinen magneettikenttä. Eri spinien lukumäärä on yleensä yhtä suuri, mutta ulkoisen magneettikentän takia sen kanssa yhdensuuntaisia spinejä on hieman enemmän. NMR-tekniikalla eri spinejä omaavien ytimien erotus voidaan laskea. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 68.)

Asettamalla laskentanesteeseen juuri oikealla taajuudella oskilloiva sähkömagneettinen kenttä, spinien suuntaa voidaan vaihtaa muuttaen täten kubitin arvoa. Esimerkiksi 10 teslan magneettikentässä olevien protonien suuntaa voidaan muuttaa 400 MHz:a oskilloivalla magneettikentällä. Kyseinen oskilloiva magneettikenttä on radiotaajuuksilla oleva pulssi, jonka pituus on sekuntin miljoonasosaluokkaa. Tämänlainen radioaalto kääntää ytimen spinin oskilloivaa kenttää vastaan. Oskilloivan radiotaajuuden pulssin ollessa pidempi, partikkelin spin voi pyörähtää myös 180 astetta, jolloin partikkelin spin on vastakkainen alkuperäiseen nähden. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 68-69.)



Kuva 1. Partikkelia voi ajatella hyrränä, jonka pyöriminen riippuu sen saaman radiopulssin pituudesta (Petričić 1998).

Jos radiopulssi olisi puolet 180 asteen spinin pulssin pituudesta, partikkelin todennäköisyys kumpaankin spiniin, magneettikentän suuntaiseen ja vastakkaisuuntaiseen, olisi yhtä suuri. Laskennallisesti puhuttaessa spin, eli kubitti, olisi siis yhtä aikaa sekä 0 että 1. Tätä tilaa kuvataan yleensä niin, että partikkelin spin on 90 asteen kulmassa magneettikenttää kohti ja partikkeli alkaa pyörimään magneettikentässä itsensä ympäri. Partikkelin pyöriminen tapahtuu sille ominaisella taajuudella, jolloin se lähettää radiosignaalin, jonka NMR-laite tunnistaa. (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 69.)

Yhden molekyylin sijaan laskentanesteeseen perustuva kvanttietokone toimii siis ”mukillisella” nestemolekyylejä. Nesteen molekyylit eivät toisiinsa osuessaan häiritse toistensa ytimiä. Dekoherenssi, yksi kvanttietokoneen valmistamisen suurimmista ongelmista, alkaa vaikuttamaan laskentanestesysteemiin muihin kvanttietokonetekniikoihin verrattuna vasta paljon pidemmän ajan päästä. Tämän takia laskentanesteeseen perustuvat kvanttietokoneet voivat tehdä useampia operaatioita ennen kubittien dekoherenssia. (Bone & Castro.)

Monimutkaisten tehtävien tekemiseen tarvitaan monimutkaisempia molekyyliä, joissa on enemmän ytimiä. Yksi hyvä ehdokas laskentanesteeseen perustuvan kvanttietokoneen rakennuspalikaksi olisi kofeiinimolekyyli. (Bone & Castro.)

4.3 Suprajohdelaskenta

Suprajohdekubitit lainaavat toimintaperiaatteensa elektroniselta mikropiiriltä. Mikropiirin pitää täyttää tiettyjä piirteitä toimiakseen kvanttimekaanisesti ja ollakseen täten käyttökelpoinen kvanttilaskentaan. Mikropiirissä ei saa olla häviötä, eli sen kaikkien metalliosien resistanssin pitää olla nolla kubittien toimintalämpötilassa ja siirtymätaajuudessa. Jos mikropiirin osilla on resistanssia, mikropiirin signaalit menettävät osan energiastaan ja kubittien yhtenäisyys kärsii. Ongelman ratkaisemiseksi voidaan käyttää alumiinin kaltaista materiaalia, joka on niin sanottu suprajohde, jolla ei ole resistanssia matalassa lämpötilassa. (Devoret, Wallraff & Martinis 2008, s. 1, 5)

Suprajohdepiirit painetaan silikonilevyille optisesti tai katodisädetekniikkaa käyttäen ja ne muistuttavat perinteisiä, elektronisia mikropiirejä. Niissä on liitoksia, kondensaattoreita ja käämejä, jotka on yhdistetty johdoilla. Mikrosirun osia voidaan analysoida pitkälti elektroniikasta tutulla normaalilla piirianalyysillä ja approksimoinnilla. Siruun saadaan kontakti käyttämällä millimetrin luokkaa olevia metallianturoita. Vaikka kvanttimikropiiri voidaankin suunnitella normaalin elektronisen mikropiirin tavoin mukailemaan niissä käytettäviä sijoitteluja, sen suunnittelussa on silti monia tärkeitä käsitteellisiä eroavaisuuksia elektroniseen mikropiiriin nähden. (Devoret, Wallraff & Martinis 2008, s. 5-6)

Tyypillisesti sähköön liittyvät suureet, kuten kondensaattorin levyjen varaus, voidaan ajatella yksinkertaisena numerona. Kvanttimikropiireissä kondensaattorin varaus kuvataan aaltofunktiona, jonka amplitudi toimii todennäköisyytenä kaikille varauksen mahdollisille arvoille. Kondensaattorin varaus voi olla superpositio yhtäaikaisesti sekä positiivisesta, että negatiivisesta varauksesta. Samalla tavalla piirissä oleva virta voi kiertyä samanaikaisesti eri suuntiin. Näitä tilanteita kutsutaan makroskooppisiksi kvanttikoherenssin vaikutuksiksi, sillä

ne osoittavat kvanttipiirin käyttäytyvän samalla tavalla kuin hiukkasjoukko. (Devoret, Wallraff & Martinis 2008, s. 6)

5. Olemassa olevat kvanttietokoneet

Kvanttietokoneesta on olemassa jo useita toimivia versioita, vaikkakin kvanttilaskentatekniikka onkin vielä hyvin lapsenkengissä. Tässä kappaleessa käsitellään kahta olemassa olevaa kvanttietokoneita tekevää yritystä ja niiden erilaisia versioita kvanttietokoneesta.

5.1 IBM

Keväällä 2016 IBM julkaisi uutisen (IBM 2016), jossa se ilmoitti avaavansa IBM Quantum Experience-nimellä kulkevan kvanttilaskenta-alustan. Alusta on pilvipalvelussa toimiva laskentaväline, jonka käyttäjät voivat kokeilla New Yorkissa sijaitsevaa IBM:n kvanttiosessoria omilta laitteiltaan käsin. Viidestä suprajohdekubitista koostuvaa kvanttiosessoria käyttävä Quantum Experience oli maailman ensimmäinen kvanttilaskenta-alusta. IBM:n prosessorin kubitit on valmistettu silikonisirulle asetetuista suprajohdemetalleista.

Quantum Experienceen ilmestymisen aikaan IBM kertoi 50-100 kubitin kvanttiosessorin rakentamisen olevan mahdollisuus seuraavan kymmenen vuoden aikana. Quantum Experience ei vielä itsessään ole IBM:n luokittelun mukaan yleiskäyttöinen kvanttietokone, mutta yhtiön mukaan se on keksintö, joka voi auttaa yleiskäyttöisen koneen rakentamisessa. IBM:n tutkijat uskoivat Quantum Experienceen toimivan kvanttilaskennan käyttöönottovälineenä uudelle käyttäjäkunnalle. Quantum Experienceen tarkoitus on auttaa yrityksiä ja yliopistoja ymmärtämään kvanttilaskentaa, sen potentiaalia ja opiskelumahdollisuuksia.

Toukokuussa 2017 IBM julkaisi tiedotteen (IBM 2017b), jossa kerrottiin yhtiön rakentaneen kaksi sen voimakkainta yleiskäyttöistä kvanttiprosessoria ja myös testanneen niiden käyttöä. Kuten aikaisempaakin viiden kubitin prosessoria, myös toista, kuudentoista kubitin kvanttiprosessoria pääsi käyttämään IBM Cloud-palvelun kautta. IBM kertoi uuden prosessorin olevan monimutkaisempi kokeilu aikaisempaan prosessoriin verrattuna. Tiedotteessa ei kuitenkaan eritelty, miksi laskentajärjestelmiä kutsuttiin prosessoriksi eikä kvanttietokoneeksi. Toinen IBM:n julkaisemista prosessoreista oli seitsemäntoista kubitin prosessori, joka toimii prototyypinä mahdolliselle kaupalliselle kvanttiprosessorille. Seitsemäntoista kubitin prosessoriin tehtiin materiaali-, arkkitehtuuri- ja laitemuutoksia, jotka tekivät siitä taas IBM:n voimakkaimman kvanttiprosessorin. Kahden uuden prosessorin julkaisemisella IBM toivoi asettavansa lähtökohdat uudelleenlaiselle käytännön ongelmien ratkaisutavalle, joka on klassisilla laskentajärjestelmillä ollut mahdotonta. IBM toivoi prosessorien suunnitteluun tekemien parannuksien auttavan heitä myöhemmin isompia kubittimääriä sisältävien prosessorien rakentamisessa.

Tammikuussa 2019 IBM julkaisi IBM Q System One-nimisen maailman ensimmäisen likipitään yleiskäyttöisen kvanttilaskentajärjestelmän. System One on suunniteltu sekä tieteelliseen, että myös kaupalliseen käyttöön ja IBM kertoi sen tiiviin mallin olevan optimoitu luotettavaksi myös jatkuvaa kaupallista käyttöä varten. System One mahdollisti kvanttietokoneen toiminnan tutkimuslaboratorion ulkopuolella. (IBM 2019)

IBM:n koneita voi olla hyödyllistä tarkastella aikaisemmin esiteltyjen DiVincenzon viiden ensimmäisen kriteerin mukaan. IBM:n kertoi System Onen tiedotuksessaan (IBM 2019) tässä laskentajärjestelmissä olevan korkealaatuisia kubitteja. IBM:n aikaisemmat kuudentoista ja seitsemäntoista kubitin prosessorit kertovat, että IBM:n laitteiden kubitteja voidaan ainakin jossain määrin rakentaa sarjoittain. IBM kertoi System One-laitteeseen suunnitelluista rakenteista, joiden tarkoitus on ehkäistä dekoherenssia (IBM 2019). IBM:n tutkimusblogissa kerrottiin maaliskuussa 2019 (Temme & Gambetta 2019) testatusta kvantti-algoritmista, joka luokitteli dataa. Algoritmin kerrottiin toimineen oletetulla tavalla ja tuottaneen oikeanlaisia tuloksia, vaikka tutkimuksessa käytetyt kvanttiprosessorit kohtasivatkin dekoherenssia. IBM ei siis ollut päässyt eroon dekoherenssista, vaikka heidän toisissa laitteissaan oli joitakin dekoherenssia ehkäiseviä ominaisuuksia. IBM:n tiedotuksesta voi päätellä, että koska

laskennasta saatiin myös tuloksia, heidän laskentajärjestelmänsä kubitit voidaan alustaa ja yksittäisiä kubitteja voidaan myös mitata. IBM:n prosessorien dekoherenssiajat ovat myös tarpeeksi pitkiä ainakin jonkinlaisen laskennan suorittamiseen siitä huolimatta, että kvanttiprosessoreissa tavataan jonkin verran dekoherenssia.

Ehkä kiinnostavin DiVincenzon kriteereistä on kuitenkin universaalit kvanttiportit, joita IBM kertoi tehneensä kvanttiprosessoriin jo vuonna 2017 (IBM 2017b). On kuitenkin epäselvää, miksi tätä laskentajärjestelmää ei kutsuttu yleiskäyttöiseksi tietokoneeksi, vaan pelkästään prosessoriksi. IBM on kutsunut System One-quanttitietokonettaan lähestulkoon yleiskäyttöiseksi (IBM 2019). Tiedotuksesta voisi päätellä, että universaalien kvanttiporttien rakentaminen on mahdollista pienempiin kvanttiprosessoreihin, mutta IBM ei ole vielä rakentanut oikeaa universaaleilla kvanttiporteilla toimivaa yleiskäyttöistä kvanttitietokonetta.

IBM:n koneet toteuttavat siis ensimmäisen, toisen ja viidennen DiVincenzon kriteerin. Dekoherenssiin liittyvästä kolmannelta kriteeristä voisi kiistellä, mutta sekin on toteutunut IBM:n omissa tutkimuksissa. Universaalit kvanttiportit ovat IBM:n oman tiedotuksen mukaan ainakin jossain määrin toteutuneet heidän kvanttiprosessoreissaan, mutta yleiskäyttöistä kvanttitietokonetta heillä ei kuitenkaan vielä ole.

5.2 D-Wave

Toinen kvanttiprosessoreja kehittävä tunnettu yritys on D-Wave. D-Wave myi ensimmäisen kvanttitietokoneensa jo vuonna 2011 (D-Wave 2011).

D-Wave ilmoitti (D-Wave 2016) jo syksyllä 2016 kehittäneensä kaksi tuhatta kubittia sisältävän kvanttiprosessorin. D-Waven prosessorit ovat annealer-koneita, jotka etsivät laskennallisille ongelmille optimeja ratkaisuja. Syksyllä 2016 esitelty annealer-kone ja yleiskäyttöinen kvanttitietokone ovat hyvin erilaisia koneita, eikä niitä voi pitää toistensa kilpailijoina. Vaikka yleiskäyttöinen kvanttitietokone ja annealer perustuvat jokseenkin

samaan konseptiin, niiden käyttötarkoitukset ja mahdolliset sovelluskohteet ovat hyvin erilaiset (Marchenkova 2016).

Annealer on hyvä optimoimaan ja löytämään nopeasti parhaita mahdollisia ratkaisuja. Sen antamat mahdollisuudet kattavat kuitenkin vain pienen osuuden siitä, mihin kvanttilaskentaa voitaisiin käyttää. Yleiskäyttöinen kvanttietokone käyttää ongelmanratkaisuun loogisia portteja ja sen suunnittelussa tavoitteena on rakentaa varmoja kubitteja, joita voidaan käsitellä piirioperaattoreilla. Yleiskäyttöisen kvanttietokoneen rakentamisessa on myös tarpeellista, että piirioperaattorien järjestystä ja määrää voidaan muuttaa, jotta tietokoneella voidaan ratkaista monimutkaisiakin algoritmeja. (Marchenkova 2016.)

Koska annealer-koneella on mahdollista ratkaista vain tietyntylaisia ongelmia, herää kysymys siitä, kuinka paljon parempi se lopulta on elektroniseen tietokoneeseen verrattuna. Tähän mennessä tutkijat ovat saaneet selville, että annealer, tässä tapauksessa D-Wave, pystyy suorittamaan laskennallisesti monimutkaisia ongelmia jopa tuhansia kertoja klassista tietokonetta nopeammin (McGeoch & Wang 2013). Vaikka annealerin sovellusmahdollisuudet ovat yleiskäyttöiseen kvanttietokoneeseen verrattuna kapeat, se antaa mahdollisuudet laskentaan, joka ei aikaisemmin ole ollut mahdollista. Vaikka kaikki asiantuntijat eivät pidäkään annealeria kvanttietokoneena, sen kehitys on yleiskäyttöistä kvanttietokonetta paljon pidemmällä (Woodward 2013).

D-Waven annealer-koneisiin on kohdistunut paljon kritiikkiä ja yksi suurimmista kriitikkoista on ollut Massachusetts Institute of Technologyn professori Scott Aaronson. Aaronsonin mielestä D-Waven rakentama laskentajärjestelmä oli vaikuttava, mutta huomautti, ettei D-Wavella ollut vielä D-Wave Onen julkaisun aikaan vuonna 2011 todisteita siitä, että järjestelmä todella käytti kvanttimekaniikkaa laskentansa toteuttamiseen. D-Wave todisti myöhemmin rakentaneensa kvanttimekaniikkaa hyödyntävän tietokoneen. Aaronsonin mielestä D-Waven markkinointipuheissa esitettyjen väitteiden ja silloisen kvanttitekniikan välillä oli selvä ristiriita. Aaronsonin mukaan D-Waven kone on kovakoodattu yhtä tietynlaista ongelmaa varten. Kriitikkojen mielestä D-Waven pitäisi vielä todistaa kubittien olevan todella

mahdollisia superpositioon ja lomittumiseen, ja kvanttietokoneen olevan selvästi elektronista tietokonetta nopeampi. (Simonite 2012)

Myös D-Waven annealer-koneita voidaan tarkastella DiVincenzon kvanttilaskentaan keskittyvien kriteerien mukaan. D-Waven koneiden kubittien määrä on paljon suurempi kuin aikaisemmin esiteltyjen IBM:n koneiden. D-Wave on jo rakentanut kokonaisia kubittisarjoja, josta voi päätellä, että heidän käyttämällään tekniikalla on mahdollista rakentaa sekä pienempiä, että suurempia kvanttilaskentajärjestelmiä. D-Waven annealer-koneen käyttöohjeissa (D-Wave 2018) kerrotaan tarkemmin annealer-koneen toiminnasta. Ohjeissa kerrotaan myös, miten laskentajärjestelmän alustaminen toimii. Käyttöohjeet käyvät läpi myös tulosten tarkistamisen, joka vaatii yksittäisten kubittien arvojen mittausta. D-Waven koneet täyttävät siis DiVincenzon ensimmäisen, toisen ja viidennen kriteerin.

Vuonna 2013 julkaistussa D-Waven uutisessa (D-Wave 2013) kerrottiin D-Waven prosessorilla tehdystä tutkimuksesta, jossa käytettiin kuuttatoista kubittia. Tutkimuksessa huomattiin, että vaikka laskentaan käytettävä aika olikin paljon pidempi kuin ennustettu yksittäisen kubitin dekoherenssiaika, todennäköisyys suorittaa sillä laskenta loppuun onnistuneesti oli silti samanlainen kuin sellaisessa systeemissä tehdyn laskennan onnistumistodennäköisyys, missä ei ollut yhtään dekoherenssia. Dekoherenssi ei siis aiheuttanut epäiltyjä ongelmia laskennassa. D-Waven koneilla on tarpeeksi pitkät dekoherenssiajat ja ne täyttävät DiVincenzon kolmannen kriteerin.

D-Waven koneet ovat annealereita, joten ne eivät siis ole yleiskäyttöisiä kvanttietokoneita. Annealer-koneissa ei ole universaaleja kvanttiportteja, joten D-Wave ei täytä DiVincenzon neljättä kriteeriä.

6. Kvanttitietokoneen käyttötarkoitukset

Tulevaisuuden kvanttitietokoneiden odotetaan olevan selvästi nopeampia monimutkaisessa ongelmanratkaisussa nykyaikaisiin tietokoneisiin verrattuna. Yksi kvanttilaskennan keskeisimmistä tavoitteista on nopeuttaa laskentaa tasolle, joka on nykyisten elektronisten tietokoneiden ulottumattomissa. Kvanttitietokoneella esimerkiksi suuren luvun tekijöihin jako saattaa onnistua paljon nopeammin kuin klassisella, elektronisella tietokoneella. (Clavin 2017.)

Tietokoneilla ratkaistavia ongelmia voidaan luokitella (Hartnett 2018) sen mukaan, millä resursseilla, siis minkälaisella tietokoneella, ne ovat ratkaistavissa. On olemassa ongelmia, jotka klassinen tietokone voi ratkaista nopeasti. On olemassa myös ongelmia, joita klassinen tietokone ei voi ratkaista nopeasti, mutta joiden ratkaisun paikkansapitävyyden se voi kuitenkin varmistaa. Kaikki ongelmat, jotka ovat klassisen tietokoneen ratkaistavissa, ovat myös kvanttitietokoneen ratkaistavissa. Ongelmia, jotka voi ratkaista vain kvanttitietokone, on myös olemassa, mutta niiden todistaminen on haastavaa. Eräs todistetusti (Raz & Tal 2018) vain kvanttitietokoneen ratkaistavissa oleva ongelma kuuluu näin:

On olemassa kaksi satunnaislukugeneraattoria, jotka antavat molemmat lukujonon. Ovatko kaksi lukujonoa täysin riippumattomia toisistaan vai onko niillä jokin yhteys?

On hyvin hankalaa arvioida, mitkä ongelmat ovat vain liian haastavia nykytietokoneille, ja mitkä teoreettisesti mahdottomia klassisille tietokoneille. Se, että ongelmaa ei voida ratkaista tämän hetken tekniikalla, ei tarkoita välttämättä sitä, etteikö sitä voisi ratkaista tulevaisuuden klassisella tietokoneella. Tässä kappaleessa käsiteltävät ongelmat ovat nykytietokoneilla ratkaistaviksi joko liian haastavia tai niiden laskeminen nykytietokoneilla ei ole kannattavaa.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään kahta tällä hetkellä lupaavinta kvanttitietokoneen sovellusala, optimointia ja simulointia, sekä kvanttitietokoneen käyttöä yritysmaailmassa. Optimointi ja simulointi ovat kuitenkin vain kaksi tätä työtä varten valittua käyttökohdetta, jotka vaikuttavat tällä hetkellä keskeisimmiltä sovelluskohteilta kvanttitietokoneelle.

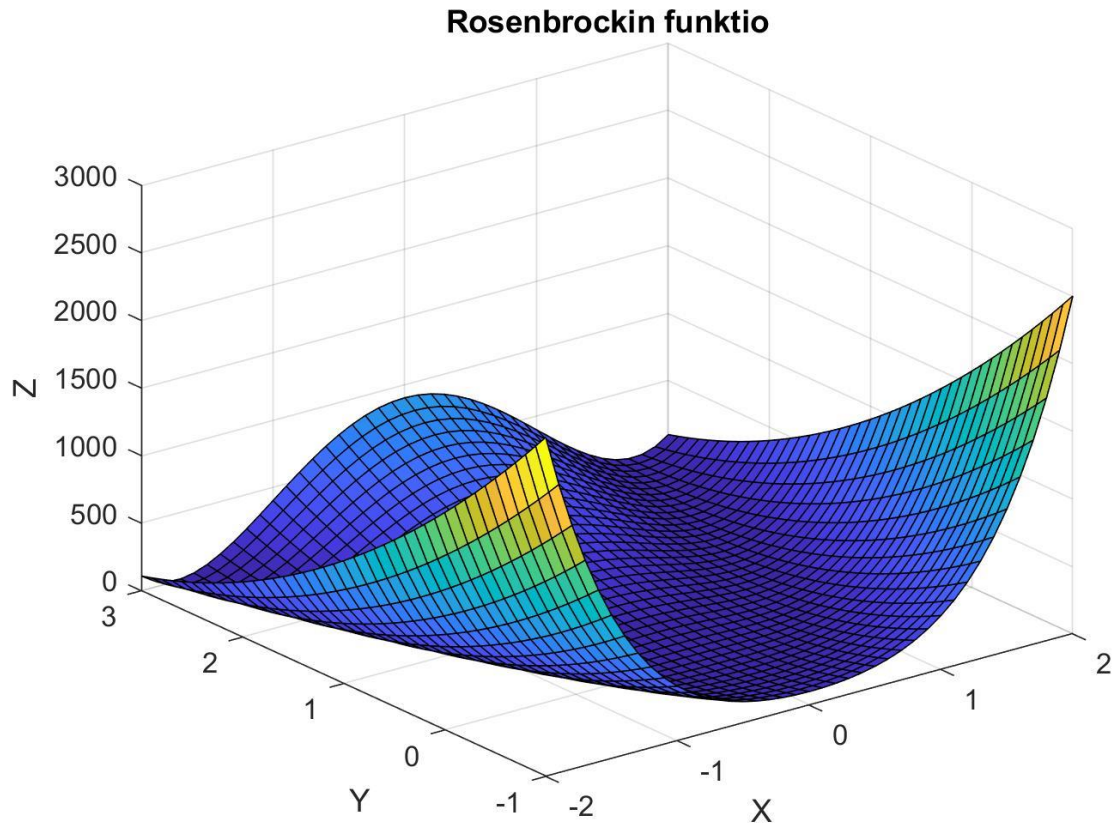
Kvanttietietokoneen todelliset tärkeimmät ja hyödyllisimmät käyttötarkoitukset selviävät luultavasti vasta monien vuosien päästä.

6.1 Optimointi

Optimoinnissa esitetään tavoite ja etsitään ratkaisu, jolla päästään lähelle haluttua tavoitetta. Optimoinnissa pyritään löytämään ongelmalle paras mahdollinen ratkaisu, mutta sen löytäminen ei kuitenkaan ole pakollista. Optimointialgoritmeja testataan usein testifunktiolla (Germundsson 2000). Yksi esimerkki suositusta testifunktiosta on Rosenbrockin funktio (Rosenbrock 1960):

$$f(x, y) = (1 - x)^2 + 100(y - x^2)^2$$

Optimointiongelmana voidaan pitää esimerkiksi Rosenbrockin funktion pienimmän arvon löytämistä. Optimointialgoritmin pitää löytää funktion pienin arvo sen banaanimuotoisesta kaarteesta.



Kuva 2. Rosenbrockin funktio.

Optimointiongelmilla voi olla rajoitteita ja löydettyjen ratkaisujen pitää täyttää ne. Usean muuttujan optimoinnissa optimoidaan useita muuttujia samanaikaisesti. Rosenbrockin funktiossa on vain kaksi muuttujaa, mutta käytännössä muuttujia voi olla paljon enemmän, jopa tuhansia. Käytännön ongelmat vaativat yleensä usean muuttujan optimointia. Optimointiongelmalla voi olla myös useita tavoitteita, jotka voivat olla ristiriidassa keskenään. Tällöin esimerkiksi yhden tavoitteen optimointi ei optimoi toista arvoa. Optimointiongelmissa esiintyy myös usein rajoitteita, jotka vaikuttavat siihen, mitkä muuttujien arvot ovat ylipäättään mahdollisia. Esimerkiksi suunnitteluongelmalle rajoitteita aiheuttavat tuotantokulut, suorituskyky ja resurssit. Rajoitteet voivat olla kiinteitä tai muuttua funktion tapaan. Monitavoitteisilla optimointiongelmilla ei yleensä ole yksiselitteistä parasta ratkaisua, vaan ryhmä erilaisia ratkaisuja, jotka ovat kompromisseja eri tavoitteiden kesken. (Kukkonen 2012, s. 15, 21)

Kvanttitietokoneiden voimakkuus perustuu niiden kykyyn käyttää kubittien superpositiota rinnakkaiseen ongelmanratkaisuun. Superposition avulla data voi esittää montaa eri arvoa samanaikaisesti, jolloin yhtä ongelmaa ratkaistaessa ratkaistaan oikeastaan samalla useita ongelmia. (Fermilab.)

Superpositiosta on hyötyä erityisesti optimointiongelmissa, joissa yksittäisten ratkaisujen laskeminen on mahdollista, mutta ratkaisujen määrä kasvaa ongelman kasvaessa todella voimakkaasti. Optimointiongelmiin vastausten löytäminen voi olla nykytietokoneilla laskennallisesti hankalaa. Nykyiset tietokoneet eivät aina ole tarpeeksi tehokkaita löytääkseen optimointiongelmiin ratkaisuja kohtuullisessa ajassa. (Fermilab.)

Lineaarinen optimointi on matemaattisen ohjelmoinnin metodi, jota käytetään parhaimman ratkaisun löytämiseksi jostakin matemaattisesta mallista, joka voidaan kuvata lineaarisena funktiona (Side & Erol 2017). Optimointiongelmiä voidaan ratkaista lineaarisella ohjelmoinnilla. Lineaarista ohjelmointia käytetään esimerkiksi erilaisten riskien minimointiin tai toimintojen tehokkuuden lisäämiseen. Vuonna 2017 julkaistussa Caltechin tutkimuksessa todettiin kvanttilaskennan olevan mahdollisesti hyvä työkalu optimointiongelmiä ratkaisevien ohjelmien nopeuttamiseen. Caltechin tutkimuksessa esiteltiin kvanttialgoritmi, joka vähensi optimointiongelmiin ratkaisemiseen käytettävää aikaa merkittävästi. Caltechin algoritmi voisi tulevaisuudessa nopeuttaa optimointiohjelmia, joilla tutkitaan tuntemattomia kvanttilojoja ja kvanttiaineen käyttäytymistä. (Clavin 2017.)

Kvanttitietokoneen hakualgoritmi toimii muodostamalla superpositio kaikista mahdollisista hakutiloista. Tämän avulla kvanttitietokone arvioi eri hakuvaihtoehtojen ominaisuudet läpi siinä ajassa, missä klassinen tietokone arvioisi vain yhden vaihtoehdon. Kvanttilaskennalle sopivimmat ongelmat keskittyvät päätöksentekoon, jossa etsitään paras yhdistelmä päätöksiä parhaimman lopputuloksen aikaansaamiseksi. Joissakin hakuongelmissa halutulle lopputulokselle on niin monta toivottua ominaisuutta, ettei yksikään haun vaihtoehto täytä niitä, eikä ongelmalle ole täten yksiselitteistä ratkaisua. Tällöin hakuongelmaa pitää muuttaa siten, että ongelmassa etsitään ratkaisua, joka on eri vaihtoehdoista kaikkein suotavin, ja jolla on eniten toivottuja ominaisuuksia. Voidaankin ajatella, että jokaisella vaihtoehdolla on tietty

hinta ja hakualgoritmin tarkoituksena on löytää vaihtoehto, jolla on matalin hinta. Monet optimointiohjelmat löytävät matala-arvoisia tiloja, jotka eivät kuitenkaan oikeasti ole pienimpiä mahdollisia arvoja. Onkin tärkeää miettiä, miten kvanttialgoritmeista saadaan sellaisia, etteivät ne etsi vain paikallisia minimiarvoja, vaan myös oikeita, globaaleja minimiarvoja. (Hogg & Portnov 2000, s. 182.)

Kvanttitietokoneet voivat auttaa koneoppimisen ongelmissa hyödyntäen optimoinnista tuttuja periaatteita. Koneoppiminen toimii useimmiten niin, että kone yhdistää eri syötteitä ja oppii yhdistelmien kautta erilaisia yhteyksiä. Elektronisella tietokoneella löydetty riippuvuussuhteet ovat kuitenkin rajattuja verrattuna kvanttitietokoneeseen, jonka avulla voidaan käyttää useampia yhteyksiä ja rakentaa niistä entistä hienostuneempia malleja. (Fermilab.)

6.2 Simulointi

Kvanttitietokoneet tarjoavat parhaimman laboratorioympäristön kvanttimekaniikan tutkimiseen. Kvanttitietokoneen avulla voidaankin päästä tutkimaan erilaisia kvanttimekaniikan lakien mukaan toimivia systeemejä (Gerschenfeld & Chuang 1998, s. 70-71). Ympäristömme toimii kvanttimekaniikan lakien mukaan, joten luonnon mikrotason simuloiminen kvanttitietokoneella on luonnollisesti paras vaihtoehto (IBM 2017d). Atomien ja molekyylien simulointi on klassisella tietokoneella hankalaa, sillä se tarvitsee paljon laskentatehoa. Useiden eri partikkelien väliset vuorovaikutukset ovat hyvin monimutkaisia. Molekyyleissä olevat elektronit käyttäytyvät kvanttimekaanisten lakien mukaan, joka tekee molekyylin sisäisen elektronijakauman laskemisen erityisen hankalaksi (Popkin 2017). Kvanttitietokoneen laskentatehon voisi valjastaa molekyylien simulointiin.

Kvanttitietokoneen superpositiosta voi siis olla hyötyä uusien lääkeaineiden ja materiaalien löytämiseen. Syksyllä 2017 julkaistun uutisen (IBM 2017c) mukaan IBM:n tutkijat onnistuivat simuloimaan berylliumhydridimolekyylin ja mittaamaan sen alimman energiatason seitsemänkubitteisella kvanttiprosessorilla. Kyseessä oli siihen asti suurin kvanttitietokoneella simuloitu molekyyli.

Molekyylien ja atomien vuorovaikutus vaikuttaa kaikkien materiaalien ominaisuuksiin. IBM:n tavoitteena on käyttää kvanttilaskentaa apuna uusien materiaalien ja lääkkeiden löytämisessä ja kehittämisessä. Kvanttilaskennasta olisi etenkin apua kemiallisten reaktioiden ja molekyylien analysoinnissa. Nykyajan tehokkaimmakaan supertietokoneet eivät pysty simuloimaan molekyylien elektronien käyttäytymistä tarpeeksi hyvin. IBM:n simulaation tekeminen olisi ollut mahdollista myös klassisella tietokoneella, mutta tutkijaryhmän työ näytti mahdollisuuksia monimutkaisten kemiallisten reaktioiden tutkimiseen kvanttilaskennan avulla.

6.3 Kvanttitietokoneen käyttö yritysmaailmassa

Useat yritykset ovat näyttäneet kiinnostuksensa kvanttilaskentaa kohtaan. Joulukuussa 2017 IBM ilmoitti (IBM 2017a) perustaneensa IBM Q Network-nimisen yhteistyöverkoston, jonka tavoitteena on edistää kvanttilaskennan kehittämistä. Verkosto vaalii IBM:n kvanttiohjelmistolle perustuvaa kvanttilaskentajärjestelmiä. Q Networkiin kuuluvat yhteistyökumppanit saavat kvanttilaskentaan erikoistunutta asiantuntemusta ja mahdollisuuden käyttää IBM:n uusimpia kvanttiprosessorien prototyyppisiä pilvipalvelun kautta. Q Network toimii yrityksille välineenä tutustua kvanttilaskennan antamiin hyötyihin esimerkiksi talouspalvelujen, kemiantekniikan tai autoteollisuuden aloilla. Yritysyhteistyön tavoitteena on löytää uusia aihealueita ja ongelmia, joilla kvanttilaskennasta olisi hyötyä tulevaisuudessa.

Q Networkiin liittyi esimerkiksi rahoitusalan globaali yritys JPMorgan Chase, jonka päämääränä on löytää kvanttilaskennasta sovelluksia kauppastrategioille, optimoinnille ja riskianalyysiin, autoteollisuuden ja kuljetuksen yhtiö Daimler AG, joka toivoo löytävänsä ratkaisuja niin materiaalifysiikan kuin valmistusprosessin ongelmiin, sekä elektroniikkajätti Samsung, jonka tavoitteena on tutkia kvanttilaskennan mahdollista vaikutusta elektroniikkateollisuuteen. Eri alojen yritysten lisäksi IBM ilmoitti myös alkavansa tehdä yhteistyötä monen eri yliopiston kanssa.

Joulukuussa 2018 konsultointiyritys Accenture patentoi monimuotoisen kvanttioptimointikoneen, jonka on tarkoitus toimia optimointivälineenä taloudellisessa päätöksenteossa (Accenture 2018). Accenturen patentti yhdistää sekä klassisen, että kvanttilaskennan hyviä puolia kokonaisuudeksi, jonka toivotaan toimivan ratkaisuna aiemmin ratkaisematta jääneisiin liiketaloudellisiin ongelmiin.

Patentti kuvaa optimointilaitetta, jonka avulla sitä käyttävät tahot voivat tunnistaa entistä laajempia ratkaisuja liiketoiminnassa ilmeneviin haasteisiin. Kvanttioptimointikone mahdollistaisi useiden simulaatioiden samanaikaisen suorittamisen ja siten optimaalisen tuloksen löytämisen sekä liiketalouden päätöksenteon, että toiminnanohjauksen parantamiseksi.

Yksi Accenturen kuvaama koneen käyttötarkoitus on suurien ketjujakelijoiden toiminnanohjauksen helpottaminen. Suunnittelutyössä haasteita jakelijoille aiheuttaa usein se, minkä autojen pitäisi mennä mihin jakelukeskuksiin, mitä rahtia niiden pitäisi ottaa ja mille asiakkaille niiden pitäisi tuoda rahti. Tällä hetkellä kyseisiin ongelmiin on tarjolla vain hyvin yksinkertaistettuja ratkaisua. Accenturen uuden patentin antamalla ratkaisulla jakelija voisi tutkia monia erilaisia malleja ja ymmärtää paremmin jakeluverkoston eri muuttujien muuttamisen tuloksia ja lopulta löytää optimaalisin vaihtoehto jakeluverkoston ominaisuuksille.

7. Kvanttitietokoneen ongelmat

Kvanttitietokoneet ovat hyvin herkkiä ympäristön vuorovaikutukselle, joka voi helposti johtaa kvanttitilan superposition romahtamiseen. Dekohärenssi on kvanttilaskennan kehittämisen yksi suurimmista haasteista, sillä sen torjuminen vaatii laskentaprosessorin täydellisen erottamisen ympäristöstä (Ponnath 2006, s. 2). Laskentajärjestelmän eristäminen muusta ympäristöstä vaikeuttaa kvanttitietokoneen rakentamista, sillä laskentajärjestelmän kanssa pitäisi eristämistä huolimatta päästä vuorovaikutukseen, jotta siitä voisi esimerkiksi lukea

laskennan tuloksia. Kvanttilaskennassa laskentajärjestelmän kanssa vuorovaikuttaminen on keksittävä täysin uudella tavalla, jottei ympäristö vaikuta kubitien superpositioihin.

Laskentajärjestelmissä olevia virheitä korjataan lisäämällä piiriin muistia, joka kvanttietokoneen tapauksessa tarkoittaisi myös kubitien lisäämistä. Ylimääräisten kubitien lisääminen systeemiin korjaamaan toisten kubitien vaihevirheitä tai spinejä kasvattaisi myös dekoherenssin riskiä, sillä mitä enemmän kubitteja systeemissä on, sitä herkempi se on ympäristön vaikutuksesta johtuville virheille. Ylimääräisten kubitien lisääminen ei siis korjaisi dekoherenssista johtuvia virheitä, vaan luultavasti vain nostaisi niiden syntymisen mahdollisuutta systeemissä. (Ponnath 2006, s. 2.)

Kubiteilla laskettaessa on ehdottoman tärkeää, ettei niiden arvojen muutoksissa tapahdu virheitä. Käytännön toimeenpanossa niiden syntyminen on kuitenkin yleistä. Virheitä saattaa myös aiheuttaa kvanttitietokoneissa jo ennen laskentaa olevat virheet, jotka johtuvat ympäristön vaikutuksesta. (Ponnath 2006, s. 2-3.)

Kvanttilaskennassa kohdataan erilaisia virheitä, jotka voivat johtua prosessorin sisällöstä tai sen ympäristöstä. Elektronisella tietokoneella tehdyssä laskennassa pienten virheiden poistaminen on mahdollista, mutta kvanttilaskennassa se ei ole (Ponnath 2006, s. 3.). Kubiteissa tapahtuvia virheitä on mahdollista korjata vain, jos niiden arvot ovat diskreettejä, siis joko 0 tai 1. Diskreettien arvojen virheet ovat kuitenkin vain hyvin pieni osa kaikista laskennassa tapahtuvista virheistä (Kak 2003 s. 6). Kubitin määritelmään kuuluu mielivaltainen vaihe, jonka vuoksi on tärkeää miettiä laskennan virheitä pelkän lopputuloksen sijaan myös kubitin kvanttitalan kannalta (Kak 2003, s. 2). Kvanttialgoritmit ja dekoherenssi lisäävät laskentaan vaihe-epävarmuutta. Pienet virheet kubitien vaiheissa suurenevät kvanttialgoritmin edetessä. Vaihearvoissa olevilla virheillä voi olla hallitsematon vaikutus laskentaan (Kak 2003 s. 8).

8. Pohdinta

Kvanttitietokoneen tulevaisuudennäkymät ovat positiiviset ja lupaavat. Sen toteutuksesta ja käyttösovelluksista ollaan kiinnostuneita monella eri alalla sekä yritysmaailmassa että yliopistoissa. Kvanttitietokoneen rakentaminen ja kehittäminen sitoo monia eri tieteen- ja tekniikan aloja yhteen, sillä se on projekti, jossa kaikki haluavat olla osallisina.

Syy kvanttitietokoneen kiinnostavuudelle on varmasti sen tuomat edut optimoinnissa, josta on hyötyä ja kilpailuetua jokaisella alalla. Monella globaalilla yrityksellä on ongelmia, joiden ratkaisuun tarvittaisiin laskentatehoa, jota yksinkertaisesti ei vain vielä ole olemassa. Näiden ongelmien ratkaisuun menee varmasti vielä useita vuosia, mutta on houkuttavaa ajatella, miten maailma saattaisi muuttua kvanttitietokoneiden tullessa yleisemmiksi. Muuttuuko elämämme helpommaksi, kun yritysten tarjoamat palvelut muuttuvat optimoinnin avulla entistä tehokkaammiksi ja personoidummiksi?

Kvanttitietokoneita kehittävät yritykset luokittelevat rakentamiaan kvanttilaskentajärjestelmiä hyvin epämääräisesti. IBM kertoi rakentaneensa yleiskäyttöisen kvanttiprosessorin (IBM 2017b) ja muutama vuosi sen jälkeen lähes yleiskäyttöisen kvanttitietokoneen (IBM 2019). Tietokoneen luokittelu likipitään yleiskäyttöiseksi on epämääräinen tapa kuvailla sen tämänhetkistä kehitystasoa, sillä se ei kerro mitään siitä, mihin laite todellisuudessa pystyy. Tiedotteiden ja uutisten epämääräisyydellä luodaan lukijoille tietynlaisia mielikuvia, jotka eivät välttämättä vastaa todellisuutta. Uusia kvanttitietokoneita koskevia uutisia seuraa suuri joukko ihmisiä, joten näillä mielikuvilla on suuri merkitys siihen, miten ihmiset suhtautuvat eri kvanttitietokoneita kehittäviin yrityksiin. Kuluttaja saa uutisista helposti sen mielikuvan, että kvanttitietokoneita rakentavan yrityksen muutkin tuotteet ja palvelut ovat varmasti laadukkaita, koska kvanttitietokoneen rakentaminen on haastavaa ja vaatii tarkkaa erikoisalan osaamista.

Kvanttitietokoneiden luokittelun lisäksi myös kovin konkreettisia esimerkkejä kvanttilaskennasta on vaikea löytää. Ilman konkreettisia tuloksia voidaan helposti antaa se kuva, että kvanttilaskennassa ollaan todellisuutta paljon pidemmällä. Se nostaa kysymyksen siitä, eikö kvanttilaskennassa tosiaan olla vielä niin kehittyneitä, että siitä saataisiin oikeasti

sensaatiomaisia uutisia. Professori Mikko Möttösen mielestä (Möttönen 2019) epäselvälle uutisoinnille on selvä syy. Kahdenkymmenen kubitin koneella ei yksinkertaisesti ratkaista mitään, minkä esitleminen toisi yritykselle kilpailuetua. Möttösen mukaan on hankala arvioida, mikä kvanttilaskentasysteemi on toista parempi. Tällä hetkellä voi vain arvailla, mikä yritys onnistuu rakentamaan ensimmäisen kvanttietokoneen, josta on asiakkaalle oikeasti hyötyä.

Kaikilla kvanttilaskennasta kiinnostuneilla tahoilla on varmasti unelma jäädä historiaan ensimmäisen kvanttietokoneen rakentajana tai ensimmäisenä kvanttilaskentaa hyödyntävänä yrityksenä. Esimerkkinä tästä on aikaisemmin käsitelty Accenture, joka haki patentin suunnittelemaansa optimointivälineelle (Accenture 2018). Patentin avulla Accenture varmisti asemansa kvanttitekniikan hyödyntämisen kärjessä, mutta ennen kaikkea patentti toimi hyvänä mainoksena. Kvanttietokoneita pidetään tämän hetken huipputeknologiana ja siihen investointia voidaankin pitää jonkinlaisena statussymbolina ja tulevaisuuteen sijoittamisena.

Kvanttietokoneiden ympäröivää määrällistä ja niistä lukijoille jäävät mielikuvat toimivat siis mainonnan välineinä. Mielikuvien tarkoitus on nostattaa keskustelua ja hehkutusta, joka taas auttaa kvanttitekniikkaa saamaan enemmän näkyvyyttä. Ylimääräinen hehkutus takaa kuitenkin myös sen, että uutisten läpi on hankalaa nähdä kuvaa siitä, millä tasolla kvanttilaskenta todella on. Hehkutus turhauttaa myös aiheeseen tutustuvaa, sillä uutisista pitää osata lukea rivien välistä kehitetyn laskentakoneen oikea luonne.

Tämänhetkistä tilannetta kvanttietokoneiden saralla voi hyvin verrata aikaan, jolloin klassisia tietokoneita kehitettiin ensimmäistä kertaa, eikä vielä tiedetty kaikkia mahdollisia sovelluksia, joihin niitä voitaisiin käyttää. Tietokoneisiin ja internettiin alkuvaiheissa panostaneilla yrityksillä oli varmasti suuri etumatka teknologian kehityksessä. Klassiset tietokoneet ovat muuttaneet kanssakäymistämme toisten ihmisten kanssa, tapaamme tehdä töitä ja yleisesti elämäntapojamme. Klassisten tietokoneiden avulla monet teknologiat vanhentuivat ja teollisuuden oli pakko uudistaa toimintatapojaan. Tällä hetkellä olemme siinä vaiheessa, jossa kvanttietokoneet ovat vielä alkeellisia ja niillä on paljon kriitikoita. On mahdotonta tietää tulevaisuuden tuoman kehityksen suuntaa, mutta hyviä veikkauksia voi aina tehdä. Uuden

teknologian murroksessa on parasta pysyä kehityksen aallonharjalla varmistaakseen menestyksen vielä tulevaisuudessakin. Kukin aiheesta kiinnostunut voi itse päättää, pitääkö tulevaisuuden tekniikan kritisointia pienempänä pahana tietokonefirmojen hehkuttavan ylimarkkinoinnin uhriksi joutumiseen verrattuna.

Möttösen mukaan yleiskäyttöisten kvanttietokoneiden kehitys eivät ole vielä siinä pisteessä, että niistä olisi sellaisenaan laskennallista hyötyä. Möttönen toivoo, että hänen omaa tutkimustyötään voitaisiin käyttää kvanttietokoneen tarkkuuden ja nopeuden parantamiseen. Hän arvioi kemiallisten yhdisteiden simuloinnin saattavan olla ensimmäinen sovellus, jolle kvanttietokoneesta olisi hyötyä (Möttönen 2019). Kvanttietokoneen käyttötarkoituksista jäädyänkin innokkaimmin odottamaan simulointia etenkin lääketeollisuudessa. Lääkkeiden kehittäminen ja testaaminen on tällä hetkellä hyvin pitkä ja tarkkaan säädelty prosessi, jota kvanttietokone tulee varmasti nopeuttamaan ja helpottamaan. Voisi hyvinkin ennustaa, että osaamme jonakin päivänä parantaa sairauksia, joita parantavien lääkkeiden suunnittelussa kvanttietokone on ollut osallisena.

Kvanttietokoneiden luokittelu auttaa meitä määrittelemään kvanttilaskennan kehitystä ja tutkimaan erilaisia kvanttilaskentajärjestelmiä. IBM:n kvanttietokoneet vaikuttavat lupaavalta alulta kvanttietokoneen rakentamiselle, mutta kuten Möttönen asian ilmaisi, kahdenkymmenen kubitin luokkaa olevilla koneilla ei vielä tehdä laskentaa, josta olisi paljoa hyötyä. IBM:n koneet toteuttavat toki suurimman osan DiVincenzon kriteereistä, mutta koneista puuttuu etenkin universaalit kvanttiportit. Loogisten kvanttiporttien kehittäminen pysyy edelleen kvanttietokoneiden kehittäjien suurimpana haasteena. D-Waven koneet eivät myöskään toteuta DiVincenzon kriteerejä, jättäen pois loogiset kvanttiportit sisältävän neljännen kriteerin. D-Waven kehitystä seurattaessa voisi kuitenkin tulla siihen tulokseen, etteivät he yritäkään kehittää kvanttietokonetta, joka täyttäisi kaikki DiVincenzon kriteerit.

Yleiskäyttöisen kvanttietokoneen toteuttaminen saattaa olla hyvin kaukana tulevaisuudessa, mutta sen rakentamisen ajankohdan arvioimisen ei pitäisi olla tärkeää. Meidän ei pitäisi olla turhan kriittisiä tämän hetken annealer-koneita kohtaan, sillä ne ovat monella tapaa edistyneitä. Kritiikki niiden yksipuolisesta käyttötarkoituksesta on ymmärrettävää, mutta se pitäisi silti

jättää omaan arvoonsa. Möttösen mielestä annealer-koneesta on hyötyä yleiskäyttöisen kvanttietokoneen kehittämiseksi ainakin mielikuvatasolla, sillä se saa kvanttilaskennan alan näyttämään monimuotoisemmalta. Möttönen kertoo annealer-koneen näyttävän myös erilaisia tapoja ratkaista ongelmia kvanttietokoneella ja sitä pidetäänkin yhtenä tapana nopeuttaa laskennallisten ongelmien ratkaisua (Möttönen 2019).

Optimointi ja laskennan tehostaminen klassisilla tietokoneilla on kehittynyt paljon ja jatkaa kehittymistään vielä tulevaisuudessa. Kvanttietokoneen keksiminen on kuitenkin kieltämättä suuri harppaus eteenpäin, joka saattaa viedä tehokkaan laskennan aivan uudelle tasolle. Yllättävintä teknologian uudessa muutoksessa on kuitenkin se, ettei innovaatio tapahtunut tietojenkäsittelyn tai algoritmien kehityksestä, vaan kvanttimekaniikasta. Kvanttietokoneet ovat nostaneet paljon kiinnostusta kvanttimekaniikkaa kohtaan ja kvanttilaskennan yleistymisen voi tulevaisuudessa tuoda tämän tieteenalan yleisempään tietoon kuin mitä se aikaisemmin on ollut. Tällä hetkellä ei voi vielä tietää, kuinka paljon apua kvanttietokoneesta lopulta on, mutta siitä huolimatta voimme kiittää kvanttilaskentaa sen nostamasta kiinnostuksesta modernia fysiikkaa kohtaan.

Kysymykset siitä, mikä kvanttietokone lopulta on, onko se mahdollista rakentaa ja onko tämänhetkiset kvanttiprosessorimme oikeita kvanttietokoneita, ovat kaikki hyviä pohdittavia. Meidän ei kuitenkaan pitäisi takertua liikaa teoreettisiin kysymyksiin, vaan mieluummin tutkia keinoja parantaa tämänhetkisiä kvanttiprosessoreja. Ensimmäisen kvanttietokoneen arviointi on yhtä hankalaa kuin tietokoneen keksimisen hetken asettaminen tiettyyn vuosilukuun. Tietokoneen määritelmä on häilyvä ja se voi tarkoittaa eri asioita eri ihmisille. Siksi tällä hetkellä pitäisi määritelmien ja kritiikin sijaan keskittyä tämän hetken saavutuksiin ja siihen, miten niitä voitaisiin tulevaisuudessa vielä kehittää.

9. Lähteet

Accenture. 2018. *Accenture Awarded US Patent for Combining Classical and Quantum Computing with Potential to Address Previously Unsolvables Business Problems*. [Verkkouutinen]. [Viitattu 7.4.2019]. Saatavilla: <https://newsroom.accenture.com/news/accenture-awarded-us-patent-for-combining-classical-and-quantum-computing-with-potential-to-address-previously-unsolvable-business-problems.htm>

Atkinson, P. 2011. *Computer*. Lontoo, Yhdistynyt Kuningaskunta: Reaktion Books. 249 s. ISBN 1-86189-664-6

Bassan, T. 2018. *Decoherence: Quantum Computer's Greatest Obstacle*. Hackernoon. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.4.2019]. Saatavissa: <https://hackernoon.com/decoherence-quantum-computers-greatest-obstacle-67c74ae962b6>.

Bone, S. & Castro, M. *A Brief History of Quantum Computing*. [Verkkosivu], [Viitattu 6.4.2019]. Saatavilla: https://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_97/journal/vol4/spb3/

Burkhardt, C. E. & Leventhal, J. J. 2008. *Foundations of Quantum Physics*. New York, NY: Springer-Verlag New York. 530 s. ISBN 9780387776521

Clavin, W. 2017. *Developing quantum algorithms for optimization problems*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 7.4.2019]. Saatavilla: <https://phys.org/news/2017-07-quantum-algorithms-optimization-problems.html>

Deutsch, D. 1985. *Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer*. The Royal Society of London. Vol. 400:1818. S. 97-117. ISSN 0080-4630.

Devoret M. H, Wallraff, A. & Martinis, J. M. 2008. *Superconducting Qubits: A Short Review*. Lähdekokoelma: Cornell University. 41 s.

DiVincenzo, D. 2000. *The Physical Implementation of Quantum Computation*. Fortschritte der Physik. Vol. 48:9-11. S.771-783. ISSN 0015-8208.

D-Wave. 2011. *D-Wave Systems sells its first Quantum Computing System to Lockheed Martin Corporation*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://www.dwavesys.com/news/d-wave-systems-sells-its-first-quantum-computing-system-lockheed-martin-corporation>

D-Wave. 2013. *Quantum Computing Firm D-Wave Systems Announces Publication of New Peer-Reviewed Paper in Nature Communications*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 7.5.2019]. Saatavilla: <https://www.dwavesys.com/news/quantum-computing-firm-d-wave-systems-announces-publication-new-peer-reviewed-paper-nature>

D-Wave. 2016. *D-Wave Systems Previews 2000-Qubit Quantum System*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-previews-2000-qubit-quantum-system>

D-Wave. 2018. *Getting Started with the D-Wave System*. [Käyttöohje]. [Viitattu: 7.5.2019]. Saatavissa: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/doc_getting_started.html

Fermilab. Julkaisuaika tuntematon. *Quantum optimization and machine learning*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 7.4.2019]. Saatavilla: <https://qis.fnal.gov/quantum-optimization-machine-learning/>

Germundsson, R. 2000. *Mathematica Version 4*. The Mathematica Journal. Vol 7:4. [Verkkolehti]. [Viitattu: 8.5.2019]. Saatavilla: <https://www.mathematica-journal.com/issue/v7i4/>

Gerschenfeld, N & Chuang, I. 1998. *Quantum Computing with Molecules*. Scientific American. Vol. 278:6. S. 66-71. ISSN 0036-8733

Hartnett, K. 2018. *Finally, a Problem That Only Quantum Computers Will Ever Be Able to Solve*. Quantamagazine. [Verkkosivu]. [Viitattu: 5.5.2019]. Saatavilla: <https://www.quantamagazine.org/finally-a-problem-that-only-quantum-computers-will-ever-be-able-to-solve-20180621/#>

Hogg, T. & Portnov, D. 2000. *Quantum Optimization*. Information Sciences. Vol. 218:3-4. S. 181-197. ISSN 0020-0255.

IBM. 2015. *Infographic: Three Types of Quantum Computing*. [Kuva]. [Viitattu 7.4.2019]. Saatavilla: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/photo/48259.wss>

IBM. 2016. *IBM Makes Quantum Computing Available on IBM Cloud to Accelerate Innovation*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/49661.wss>

IBM. 2017a. *IBM Announces Collaboration with Leading Fortune 500 Companies, Academic Institutions and National Research Labs to Accelerate Quantum Computing*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53483.wss>

IBM. 2017b. *IBM Builds Its Most Powerful Universal Quantum Computing Processors*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/52403.wss#release>

IBM. 2017c. *IBM Pioneers New Approach to Simulate Chemistry with Quantum Computing*. [Verkkouutinen]. [Viitattu 7.4.2019]. Saatavilla: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53137.wss>

IBM. 2017d. *Quantum and Chemistry*. [Video]. [Viitattu 7.4.2019]. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=qarc7AA4-wM>

IBM. 2019. *IBM Unveils World's First Integrated Quantum Computing System for Commercial Use*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://newsroom.ibm.com/2019-01-08-IBM-Unveils-Worlds-First-Integrated-Quantum-Computing-System-for-Commercial-Use>

IBM. Julkaisuaika tuntematon. *A new kind of computing*. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.4.2019]. Saatavilla: <https://www.research.ibm.com/ibm-q/learn/what-is-quantum-computing/>

Ikonen, J. Salmilehto, J. & Möttönen, M. 2017. *Energy-Efficient Quantum Computing*. npj Quantum Information. Vol 3:1. S. 1-7. ISSN 2056-6387

Kak, S. 2003. *General Qubit Errors Cannot Be Corrected*. Information Sciences. Vol. 152. S. 195-202. ISSN 0020-0255

Kukkonen, S. 2012. *Generalized Differential Evolution for Global Multi-Objective Optimization with Constraints*. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Matematiikka ja fysiikka. Lappeenranta. 217 s. ISBN 978-952-265-235-5.

Marchenkova, A. 2016. *What's the difference between quantum annealing and universal gate quantum computers?* [Verkkosivu]. [Viitattu: 6.4.2019]. Saatavilla: <https://medium.com/quantum-bits/what-s-the-difference-between-quantum-annealing-and-universal-gate-quantum-computers-c5e5099175a1>

McGeoch, C. & Wang, C. 2013. *Experimental Evaluation of an Adiabatic Quantum System for Combinatorial Optimization*. Teoksessa Franke, H. Heinecke, A. Palem, K. V. Upfal, E. Computing Frontiers Conference, CF'13. Ischia, Italia, 14-16.5.2013. ACM Conference on Computing Frontiers. S. 23:1-23:11. ISBN 978-1-4503-2053-5

Merzbacher, E. 1998. *Quantum Mechanics*. 3. painos. New York, NY: John Wiley & Sons. 655 s. ISBN 0-471-88702-1.

Microsoft Quantum Team. 2018. *Understanding how to solve problems with a quantum computer*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 25.4.2019]. Saatavilla: <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2018/04/24/understanding-how-to-solve-problems-with-a-quantum-computer/>

Monroe, C., Meekhof, D. M., King, B. E & Wineland, D. J. 1996. A "Schrodinger Cat" Superposition State of an Atom. *Science*. Vol 272:5265. S. 1131-1136. ISSN 1095-9203.

Möttönen, M. 2019. Ryhmänjohtaja, Quantum Computing and Devices. Aalto-yliopisto. Haastattelu 10.5.2019.

O'Regan, G. 2008. *A Brief History of Computing*. Lontoo, Yhdistynyt Kuningaskunta: Springer Science Business Media. 244 s. ISBN 978-1-84800-083-4.

Ponnath, A. 2006. *Difficulties in the Implementation of Quantum Computers*. 6 s. Lähdekokoelma: Cornell University.

Popkin, G. 2017. *Quantum computer simulates largest molecule yet, sparking hope of future drug discoveries*. Science. [Verkkouutinen]. [Viitattu 7.4.2019]. Saatavilla: <https://www.sciencemag.org/news/2017/09/quantum-computer-simulates-largest-molecule-yet-sparking-hope-future-drug-discoveries>

Raz, R. & Tal, A. 2018. *Oracle Separation of BQP and PH*. Electronic Colloquium on Computational Complexity. 22 s. ISSN 1433-8092.

Rosenbrock, H. 1960. *An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function*. The Computer Journal. Vol. 3:3. S. 175-184. ISSN 0010-4620

Side, M. & Erol, V. 2017. *Applying Quantum Optimization Algorithms for Linear Programming*. Istanbul, Turkki: Computer Engineering Department, Okan University. 5 s.

Simonite, T. 2012. *The CIA and Jeff Bezos Bet on Quantum Computing*. [Verkkouutinen]. [Viitattu: 7.4.2019]. Saatavilla: <https://www.technologyreview.com/s/429429/the-cia-and-jeff-bezos-bet-on-quantum-computing/>

Temme, K. & Gambetta, J. 2019. *Researchers Put Machine Learning on Path to Quantum Advantage*. IBM Research Blog, 13.3.2019. [Blogiteksti]. [Viitattu: 7.5.2019]. Saatavilla: <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/03/machine-learning-quantum-advantage/>

Woodward, A. 2013. *Is It Quantum Computing or Not?* Scientific American Quest Blog, 17.5.2013. [Blogiteksti]. [Viitattu: 7.4.2019]. Saatavilla: <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/is-it-quantum-computing-or-not/>

10. Kuvalähteet

Kuva 1. Petričić, D. 1998. Teoksessa Gerschenfeld, N & Chuang, I. Quantum Computing with Molecules. Scientific American. Vol. 278:6. S. 66-71. S. 69