

Teksti: Lauri Lehman

Kuvat: Laura Loukola, Mitol Meerna, Jarno Niklas Alanko, D-Wave

KVANTIT HORISONTISSA

Kvanttikoneoppiminen yhdistää kaksi tämän hetken kuuminta tietojenkäsittelytieteen tutkimussuuntaa. Mitä on kvanttitietotekniikka ja onko koneoppimisen tulevaisuus kvanttietokoneissa?



Itseohjaavat autot, juoksemaan oppivat robotit, ihmisen päihittäminen Go-pelissä. Siinä pieni osa saavutuksista, joita tekoälyksi kutsuttu ala on tuottanut muutaman viime vuosikymmenen aikana. Edistyneimmät mallit pystyvät päihittämään ihmisen esimerkiksi vaikkapa esineiden tunnistamisessa, kunhan mallille syötetään ensin tarpeeksi esimerkkejä oppimateriaaliksi.

Näiden edistysaskeleiden voidaan katsoa olevan karkeasti kahden seikan ansiota: koneoppimismenetelmät, erityisesti syvät neuroverkot, ovat kehittyneet ratkaisemaan uudentyyppisiä ongelmia ja toisaalta tiedon varastointi- ja prosessointimenetelmät ovat kehittyneet siten, että koneoppimisalgoritmeja voidaan kouluttaa valtavilla tietomäärillä. Tutkimus aiheen ympärillä on nykyään hyvin vilkasta, ja tulemme varmasti näkemään mielenkiintoisia tekoälysovelluksia myös lähitulevaisuudessa.

Jos katse suunnataan kauemmaksi nykyhetkestä, mihin suuntaan tekoälyn kehitys etenee seuraavien vuosikymmenien aikana? Monet haaveilevat niin kutsutun vahvan tekoälyn luomisesta. (On toki myös niitä, joita ajatus pelottaa.) Tällainen tekoäly ei enää tekisi vain tarkkaan rajattuja tehtäviä, joihin se on koulutettu, kuten nykyiset tekoälysovellukset, joista käytetään joskus termiä ”heikko” tekoäly. Vahva tekoäly oppisi uusia kykyjä samaan tapaan kuin ihminen ja kykenisi mahdollisesti kommunikoidaan samoin kuin ihminen. Tällä hetkellä on täysin avoin kysymys, onko vahvaa tekoälyä mahdollista luoda tai miten tällainen tekoäly toimisi.

Toinen, hieman realistisempi kehityskulku on kvantti-ilmiöiden hyödyntäminen koneoppimisessa. Kvanttitietokoneet ovat uudentyyppisiä laskentalaitteita, joilla pystytään saavuttamaan huimia harppauksia tiettyjen ongelmien ratkaisunopeudessa. On siten luonnollista, että tutkijat ovat pohtineet kvanttitietokoneiden hyödyntämistä myös koneoppimisessa.

Kvanttimekaniikka on jopa hieman mystinen fysiikan ala, joka hämmentää niin maallikoita kuin alan asiantuntijoitakin. Kvanttimekaniikassa pätevät varsin erilaiset lait jokapäiväisessä elä-

mässä, mutta se on tarkin teorianamme luonnosta eikä sen pätevyyttä ole onnistuttu horjuttamaan millään tieteellisillä kokeilla. Yritystä on toki ollut. Itse **Albert Einstein** epäili kvanttimekaniikan perusteita ja näki huomattavasti vaivaa sen kumoamiseen siinä onnistumatta. Aika ajoin fyysikot ovat yrittäneet keksiä tapoja selittää kvanttimekaniikan lakeja arkijärkeen sopivaksi, mutta kerta kerran nämä selitykset on todettu kestäättömiksi.

Nykyään fyysikot ovat suurilta osin taipuneet noudattamaan ohjetta ”ole hiljaa ja laske”. Tällä viitataan siihen tosiseikkaan, että kvanttimekaniikan tuottamat tulokset ovat äärimmäisen tarkkoja ja hyödyllisiä käytännön sovellutuksien kannalta, vaikkamme ymmärtäisi niiden perustaa meitä tyydyttävästi. Kvanttimekaniikka tarjoaa yhtälöt ja kaavat atomitason ilmiöiden ymmärtämiseen, ja sen ansiosta on keksitty esimerkiksi laser-teknologia ja nykyaikainen elektroniikka.

Kvanttifysiikka on auttanut paitsi ymmärtämään atomitason ilmiöitä, myös hallitsemaan ja hyödyntämään niitä eduksemme. Aineen kvanttimekaaniset tilat ovat hyvin hauraita, ja niiden aikaansaaminen vaatii huolellisesti valmisteltuja laboratorio-olosuhteita. Pienetkin ympäristön häiriötekijät kuten säteily voivat aiheuttaa näiden tilojen sekoittumisen. Hieman yllättäen fyysikot ovat kuitenkin havainneet, että kvanttitiloilla voi olla ominaisuuksia, joiden vuoksi niiden luomiseksi kannattaa nähdä vaivaa. Jos nämä tilat nimittäin valjastetaan tietokoneen laskentaytimiksi, tiettyjä laskutoimituksia voidaan suorittaa huomattavasti nopeammin kuin nykyisillä puolijohdetransistoreihin perustuvilla tietokoneilla. Tämä nopeusetu perustuu samoihin kvanttimekaniikan lainalaisuuksiin, jotka tekevät siitä niin vaikeasti ymmärrettävää. Nykyään kvantti-ilmiöiden mahdollisuuksia laskennassa tutkitaan laajasti. Kvanttimekaniikan periaatteilla toimivaa tietokonetta kutsutaan kvanttitietokoneeksi.

Edellä mainitut koneoppimismenetelmät ovat osoittautuneet hyödyllisiksi niin monissa käytännön tehtävissä, että on luonnollista kysyä, olisiko kvantti-ilmiöistä hyötyä myös koneoppimisen alalla. Tästä kysymyksestä on noussut täysin uusi kvanttikoneoppimisen tutkimusala. Ensimmäiset ideat oppivista kvanttialgoritmeista hei-

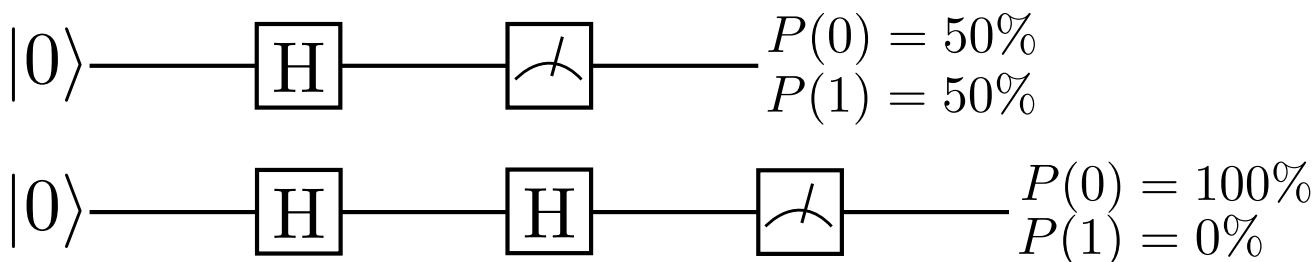
tettiin ilmaan jo 1990-luvulla, mutta kymmenen viime vuoden aikana ala on alkanut saada huomiota pienen tutkijayhteisön ulkopuolella. Tässä artikkelissa esitellään kvanttikoneoppimisen perusteet ja luodaan katsaus tärkeimpiin saavutuksiin, joita alalla on toistaiseksi tehty.

Kvanttilaskennan lyhyt oppimäärä

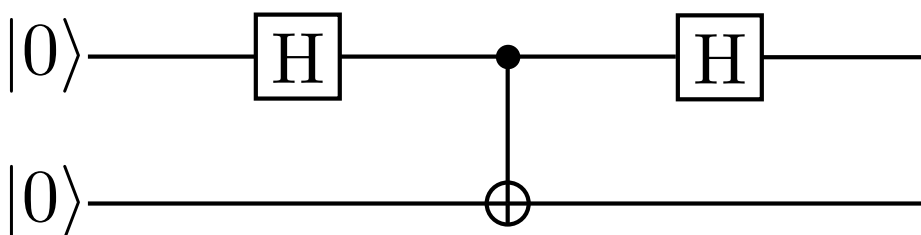
Jotta voi ymmärtää kvanttikoneoppimista, on ensin ymmärrettävä kvanttitietokoneita. Kvanttitietokoneiden toimintaperiaate on varsin erilainen kuin nykyisissä transistoreihin pohjautuvissa tietokoneissa. Ne perustuvat 1900-luvun alkupuolella löydettyihin kvanttifysiikan ilmiöihin, jotka yllättivät tutkijat hämmäntävillä ominaisuuksillaan. Kun mittauksissa päästiin tutkimaan yhä pienemmän mittakaavan ilmiöitä, havaittiin että atomi- ja molekyyllitasolla pätevät hyvin erilaiset lait kuin ne, joihin olemme tottuneet päivittäisessä elämässä. Kun ainetta tarkastellaan tässä mittakaavassa, se käyttäytyy satunnaisella tavalla: samasta kokeesta voidaan saada kaksi eri tulosta, vaikka koejärjestely pysyisi tismalleen samana. Näin voi käydä siis riippumatta siitä, kuinka tarkasti koejärjestely pystytään toistamaan eri suorituskerroilla, ja kuinka hyvin ulkoiset häiriötekijät pystytään eristämään kokeesta.

Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että luonto toimisi tällä tasolla täysin kaoottisesti tai ettemme pystyisi ennustamaan atomitason ilmiöitä lainkaan. Emme pysty ennustamaan yksittäisen kokeen lopputulosta, mutta pystymme ennustamaan esimerkiksi mitatun suureen keskiarvon, jos koe suoritetaan monta kertaa uudestaan samoin koejärjestelyin. Hämmäntävää? Ei huolta, sillä aihe on kiusannut etevimpiäkin fyysikoita sen alkua ajoista lähtien. Toistaiseksi arkijärkeämme tyydyttäviä kvanttifysiikan tulintoja on vähän. Voimme kuitenkin lohdutautua sillä, että näiden ilmiöiden tutkiminen on edistänyt teknistä kehitystä valtavasti ja tuottanut esimerkiksi puolijohteet, joihin nykyisten tietokoneidenkin toiminta perustuu.

Kvantti-ilmiöiden satunnaisuus kuulostaa lupaavan huonoa sovellutuksien kannalta. Jos yksittäisen kokeen tulos vaihtelee satunnaisesti, miten tällaisella periaatteella toimiva laite



Hadamard-portti on kvanttipiirien perusrakennuspalikka. Ylemmässä sekvenssissä syötetään nollakubitti Hadamard-porttiin, minkä jälkeen bitti mitataan. Tuloksena on ykkönen tai nolla 50 %:n todennäköisyydellä. Alemmassa sekvenssissä on vielä toinen Hadamard-portti ennen mittausta. Nyt alla piilevät todennäköisyysamplitudit kumoavat tosiaan ja tulos on nolla 100 %:n todennäköisyydellä, koska Hadamard-portti on itsensä käänteisoperaatio. Jälkimmäinen portti siis mystisesti ”peruu” kolikonheiton.



Tässä kvanttipiirissä sidotaan kahden bitin tila toisiinsa ja sitten irrotetaan ne toisistaan. Piiriin syötetään kaksi nollakubittia vasemmalta. Ensin ylempi Hadamard-portti laittaa ylemmän kubitin superpositioon ykkösen ja nollan välillä. Keskellä oleva kontrolloitu not-portti kääntää alemman bitin, jos ylempi bitti on ykkönen. Jos bittejä havainnoidaisiin heti tämän jälkeen, mahdolliset tilat olisivat 00 ja 11, mutta ei koskaan 01 eikä 10. Nyt jos tiedät yhden bitin tilan, tiedät myös toisen. Tätä ilmiötä kutsutaan lomittumiseksi. Toisen Hadamard-portin jälkeen kaikki neljä tilaa 00, 01, 10 ja 11 ovat yhtä todennäköisiä.

voi olla hyödyllinen oikean vastauksen löytämisessä? Tässä onkin yksi suurimpia eroja nykyisten ja kvanttietokoneiden välillä. Toisin kuin perinteinen tietokone, kvanttietokone joutuu suorittamaan saman laskun useaan kertaan ja pitämään kirjaa jokaisesta suorituksesta. Lopuksi tuloksesta otetaan keskiarvo, ja todennäköisin vaihtoehto määrittelee lopullisen vastauksen. Laskun toistojen lukumäärä määrittyy sen perusteella, kuinka varmoja tuloksen oikeellisuudesta halutaan olla. Perinteisellä tietokoneella lasku suoritetaan yleensä ainoastaan kerran ja vastauksen oletetaan pitävän paikkansa 100 prosentin varmuudella. Pintapuolisesti näyttäisi siis siltä, että kvanttietokone on hitaampi laskija kuin vaikkapa puhelimesi. Tämä ei ole kuitenkaan koko totuus, vaan kvanttiliimiot yllättävät tässäkin outoudellaan.

80- ja 90-luvun taitteessa brittiläinen fyysikko **David Deutsch** pohti, millainen olisi kvanttimekaniikan periaatteilla toimiva laskentakone eli Turingin koneen kvanttiversio. Deutsch myös hahmotteli ensimmäisen kvanttialgoritmin, joka on nopeampi kuin vastaava ”klassinen” algoritmi. Vaik-

ka Deutschin algoritmi oli suunniteltu erityisesti korostamaan kvanttimekaniikan suomia etuja laskennassa, eikä se ratkaissut mitään käytännön ongelmaa, se toi esille kvanttiliimöiden mahdollisuudet laskennassa ja innoitti muita tutkijoita kehittämään uusia kvanttialgoritmeja, joilla pystytään ratkaisemaan myös käytännön ongelmia.

Deutschin mukaan kvanttietokone pystyy suorittamaan useita laskentapolkuja rinnakkain yhden ajon aikana. Tähän perustuu yksinkertaistettuna kvanttialgoritmien nopeus etu klassisiin algoritmeihin verrattuna. Kvanttimekaniikassa laite voidaan asettaa niin kutsuttuun superpositiotilaan, joka on useista poluista koostuvien tilojen yhdistelmä. Suorituksen aikana tietokone käy siis tavallaan läpi nämä kaikki polut. Suorituksen lopussa laitteen tila mitataan, mutta mittauksen tulos on satunnainen kvanttimekaniikan lakien mukaan.

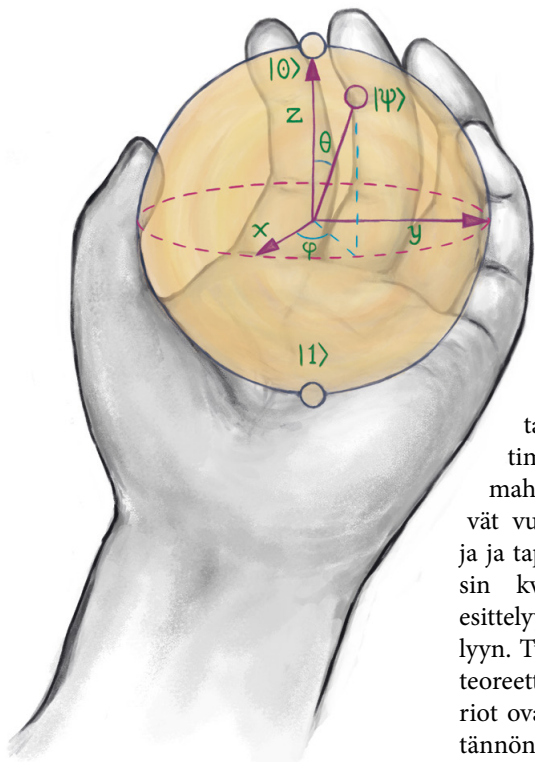
Kvanttialgoritmin suorituksen vaiheet

Aluksi suoritin valmistellaan ensin johonkin alkutilaan esimerkiksi jäädyttämällä. Kun suoritin on saatu

tarpeeksi lähelle toivottua alkutilaa, algoritmin suoritus aloitetaan ja suorittimen annetaan työskennellä ilman, että sitä häiritään mittauksilla. Kvanttimekaniikassa on tärkeää, ettei laskennan tilaa mitata kesken suorituksen, sillä mittaus tuhoaa suorittimelle elintärkeän superpositiotilan, johon kvanttisuorittimen toiminta perustuu.

Laskun valmistuttua suorittimen tila mitataan lopullisen tuloksen saamiseksi. Sama prosessi toistetaan niin monta kertaa, että lopputuloksesta saadaan tyydyttävä varmuus. Suorituksen aikana laite on eristettävä kaikelta ulkopuoliselta vuorovaikutukselta mahdollisimman hyvin. Ulkoisilla häiriötekijöillä on myöskin tapana tuhota suorittimen kvanttimekaaninen superpositiotila.

Nykyään kvanttialgoritmien tutkimus on vakiintunut omaksi tieteenalaksi, joka tuottaa uusia algoritmeja käytännön ongelmien ratkaisuun. Kaikki algoritmit eivät kuitenkaan toimi yhtä hyvin kuin toiset. Kvanttialgoritmin tehokkuus on riippuvainen siitä, kuinka kvanttietokoneen rinnakkaisuutta voidaan hyödyntää. Kvanttialgoritmit voidaan nähdä myös



uutena ikkunana kvanttimaailman erikoiisiin ilmiöihin. Kenties algoritmeja tutkimalla voidaan raottaa hieman salamyllykäsyyden verhoa näiden ilmiöiden ympäriltä.

Koneoppimismenetelmien yleistyttyä ja noustua valtavirtaan tutkijat ovat alkaneet miettimään, olisiko kvanttimekaniikasta hyötyä myös koneoppimisalgoritmien suorittamisessa. Orastavalla tieteenalalla on havaittu, että nämä kaksi menetelmää sopivat varsin hyvin yhteen, ja niiden yhdistäminen voi tuottaa luontaisia synergiaetuja. Näitä etuja ovat esimerkiksi molempien alojen tilastollinen luonne ja se, että molemmissa käsitellään tyypillisesti erittäin suuria tietomääriä.

Oppivat kvantit

Kvanttikoneoppiminen on uusi tieteenala, jossa yhdistyy kaksi haastavaa aihetta, kvanttilaskenta ja tekoälytutkimus. Tämä poikkitieteellisyys aiheutti aluksi haasteita tutkijoille. **Elizabeth Behrman**, yksi alan pioneereista, kuvaa tutkimuksen alkuaikojä *Quantia Magazinessa* seuraavasti: ”Artikkelien julkaisu oli alkuvaiheessa vaikeaa. Mitä ihmettä tämä kvanttimekaniikka on, kysyivät neuroverkkoihin erikoistuneet julkaisut. Mitä on tämä neuroverkko-huuhaa, ihmettelivät fyisiikan julkaisut.” Tilanne on muuttunut Behrmanin kuvaamista ajoista tähän päivään. Kvanttikoneoppimisesta on kirjoitettu jo useita väitöskirjoja, ja kiinnostusta on alkanut löytyä myös akateemisen maailman ulkopuolelta.

Vuonna 2017 Toronton yliopistoon perustettiin ainoastaan kvanttikoneoppimiseen keskittynyt startup-yritysten kiihdyttämö, jonka rahoitukseen osallistuu useita yksityisiä rahastoja. Monet suuret teknologiayritykset kuten Google ja IBM ovat perustaneet omia yksiköitään pohdittamaan kvanttikoneoppimisen mahdollisuuksia. Tutkijat järjestävät vuosittain myös useita työpajoja ja tapaamisia, jotka keskittyvät täysin kvanttikoneoppimisen tulosten esittelyyn ja uusien ideoiden kehittelyyn. Tutkimus ei ole enää ainoastaan teoreettisella tasolla, vaan laboratoriot ovat jo tehneet ensimmäisiä käytännön kokeita. Vielä ollaan kuitenkin kaukana siitä pisteestä, että näkisimme kvanttikoneoppimisen käytännön sovellutuksia arjessamme. Kvantti-ilmiöt ovat pahamaineisen vaikeita hallita laboratoriossa, saati sitten käytännön toimintaympäristöissä, joissa häiriöitä esiintyy jatkuvasti.

Kvanttikoneoppimista on lähestytty tutkimuksissa monilla eri tavoilla. Suoraviivaisimmassa lähestymistavassa kysytään, onko tällä hetkellä tunnetuilla koneoppimisalgoritmeilla kvanttimekaanisia vastineita. Kvantti-algoritmien toivotaan olevan toki nopeampia kuin klassiset versiot, mutta on hyvä huomata, etteivät kvanttimekaniikan ilmiöt itsessään tee laskennasta välttämättä yhtään nopeampaa. Kvantti-ilmiöiden hyödyllisyys riippuu nimittäin täysin ongelmasta, joka niiden on tarkoitus ratkaista. Jotkin ongelmat hyötyvät kvanttietokoneen rinnakkaisesta luonteesta enemmän kuin toiset. Parhaimmillaan voidaan saavuttaa niin kutsuttu eksponentiaalinen nopeushyöty, jossa parhaan klassisen algoritmin suoritus aika on eksponentiaalinen verrattuna saman ongelman ratkaisevaan kvanttialgoritmiin.

Eksponentiaalista kasvun nopeutta havainnollistaa vanha tarina, jossa shakkipelin keksijä myy keksintönsä kuninkaalle sellaisella määrällä riisiä, joka saadaan, kun laitetaan laudan ensimmäiselle ruudulle yksi riisinjyvä ja seuraavalle aina tuplasti enemmän. Kuningas pitää tarjousta edullisena, mutta valtakunta joutuu vararikoon, koska viimeiseen ruutuun tulee noin yhdeksän kvintiljoonaa riisinjyvää.

Eksponentiaalinen kasvu karkaa käsistä erittäin nopeasti.

Kvanttikone voisi pystyä siis käsittelemään tietomääriä, joihin klassinen tietokone hyyytyy. Kvanttialgoritmien mahdollisuudet ovat lupaavia juuri koneoppimisessa, sillä esimerkiksi kuvantunnistuksen tai puheenymmärryksen mallien koulutuksessa käytettävät tietojoukot ovat yleensä valtavia. Kvantisoitujen koneoppimisalgoritmien mahdollisuudet ovat huimat, sillä niiden avulla on mahdollista saavuttaa harppauksia käsiteltävän tiedon määrässä ja nopeudessa. Oppivat mallit pystyisivät ottamaan päätöksissä huomioon entistä enemmän huomionarvoisia tekijöitä ja entistä tarkemmalla tasolla.

Nykyiset koneoppimismallit vaativat usein tiedon karkeistamista ja mukauttamista tiettyyn muotoon. Tämä prosessointi hankaloittaa mallien yleistämistä jonkin rajatun ongelman ulkopuolelle. Kvanttialgoritmien lisääntynyt laskentakapasiteetti voisi mahdollistaa edistyneempiä malleja vaikkapa yhdistelemällä eri lähteistä tulevaa tietoa yhdeksi suureksi tietojoukoksi ja prosessoimalla kaiken suodattamattomana. Algoritmi itsessään osaisi päätellä, mikä tiedosta on olennaista ongelman ratkaisussa.

Kvanttikoneoppiminen on oikeastaan kattotermi, jolla voidaan tarkoittaa montaa eri asiaa. Sellaisia kvantti-algoritmeja, joissa kvanttietokone saa syötteenä tavalliselta tietokoneelta, kutsutaan kvanttiavusteiseksi koneoppimiseksi (engl. *quantum-assisted* tai *quantum-enhanced machine learning*).

Kvanttiavusteisessa koneoppimisessa ratkaistaan klassisesti muotoiltuja (ei-kvanttimekaanisia) ongelmia kvanttialgoritmien avulla. Näillä kvanttialgoritmeilla on toisin sanoen aina olemassa ei-kvanttimekaaninen vastineensa, vaikkapa yllä mainittu dokumenttien haku tietokannasta. Kvanttiavusteisen oppimisen soveltaminen ei eroa merkittävästi muiden kvanttialgoritmien suorittamisesta.

Tällä hetkellä käytettävät kvanttisuorittimet on suunniteltu tiettyä tehtävää varten, sillä yleiskäyttöisiä ja skaalautuvia kvanttisuorittimia ei ole vielä pystytty rakentamaan. Kvanttiavusteisten koneoppimisalgoritmien soveltaminen vaatii siksi yleensä erillisen laitteiston rakentamista tarkoitusta varten.



Kvanttiavusteisen koneoppimisen lisäksi on ehdotettu muunlaisiakin kvanttikoneoppimisen muotoja.

Fysiikan tutkimuksessa luontaisen kehityskulku on ollut algoritmille menevän syötteiden vaihtaminen kvanttimekaaniseksi syötteeksi. Tämä syöte voisi olla itsessään kvanttimekaaninen tila, joka on saatu esimerkiksi jonkin edeltävän laskun tuloksena. Tällaisilla algoritmeilla ei ole välttämättä klassista vastinetta. Nämä algoritmit eivät todennäköisesti ratkaise käytännöllisiä ongelmia kvanttiavusteisten algoritmien tapaan, mutta ne voivat olla erittäin hyödyllisiä fysiikan tutkimuksessa. Esimerkiksi kvanttimekaaniset simulaatiot ovat hankalia ratkaistavia tavallisilla supertietokoneilla. Tulevaisuudessa näitä ongelmia voidaan mahdollisesti ratkaista kvanttietokoneita varten suunniteltujen koneoppimisalgoritmien avulla.

Kvanttikoneoppimisella voidaan tarkoittaa myös tavanomaisten koneoppimismenetelmien soveltamista kvanttimekaniikan ongelmiin. Fysiikan tutkimuksessa koneoppimista on käytetty esimerkiksi kvanttimekaanisen tilan oppimiseen mittauksista ja aineen olomuodon tunnistamiseen. Tämä artikkeli keskittyy kuitenkin ainoastaan niihin tapauksiin, joissa itse algoritmi on kvanttimekaaninen.

Neuroverkkojen esiinmarssi

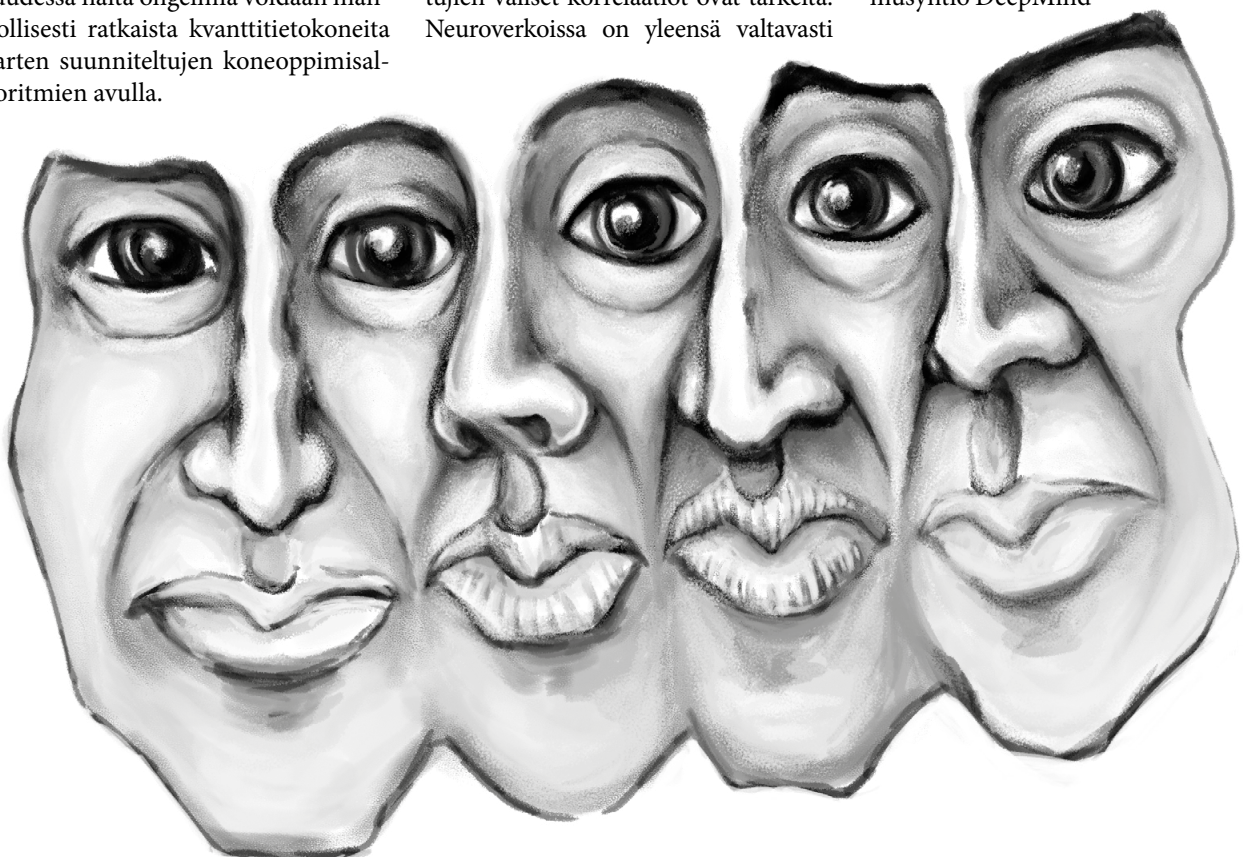
Yksi mielenkiintoisista kvanttikoneoppimisen suuntauksista on neuroverkkojen siirtyminen kvanttimekaaniseksi. Neuroverkot ovat suosittuja koneoppimisalgoritmeja, jotka ovat saaneet inspiraationsa neuronien järjestäytymisestä aivoissa. Ensimmäiset ideat neuroverkkojen käytöstä tiedon prosessoinnissa esitettiin jo 1940-luvulla, mutta vasta 2000-luvulla neuroverkot ovat yleistyneet käytännön ongelmien ratkaisemisessa esimerkiksi teollisuudessa ja ohjelmistotalalla.

Neuroverkot ovat parhaimmillaan epälineaaristen ongelmien ratkaisussa, missä muuttujia voi olla paljon ja muuttujien väliset korrelaatiot ovat tärkeitä. Neuroverkkoissa on yleensä valtavasti

parametreja, joita optimoidaan koulutuksen aikana, mutta juuri sen ansios- ta ne pystyvät ottamaan huomioon hienovaraisia asioita päätöksenteossa. Ne ovat myös melko virheensietokykyisiä, eivätkä pienet häiriöt sisään tulevassa tiedossa siten pilaa lopputulosta, toisin kuin joissakin muissa koneoppimismenetelmissä.

Neuroverkkoja on sovellettu menestyksekkäästi moneen haastavaan ongelmaan kuten kuvantunnistukseen ja autonomisten robottien ohjaamiseen. Neuroverkkojen yhteydessä puhutaan usein syväoppimisesta, sillä monikerroksiset ("syvät") neuroverkot pystyvät oppimaan hyödyllisiä kykyjä, jos niille syötetään tarpeeksi tietoa. Esimerkiksi esineiden tunnistamisessa valokuvas- ta saavutettiin neuroverkoilla vuonna 2012 ihmisen tunnistuskykyä vastaava tarkkuus. (Mainittakoon, että mahdollisten esineiden lukumäärä kokeessa oli melko rajattu.) Kasvontunnistuksessa on sittemmin saatu jopa parempia tuloksia.

Neuroverkkoja on sovellettu myös niin sanottujen autonomisten agenttien toiminnan ohjaamiseen. Autonomiset agentit voivat olla esimerkiksi robotteja tai ohjelmistoja, jotka tekevät itsenäisiä päätöksiä ja kykenevät oppimaan kohtaamistaan tilanteista. Vuonna 2015 Googlen alainen tutkimusyhtiö DeepMind



raportoi tiedelehti *Naturessa* uudentyyppisestä neuroverkosta, joka paransi autonomisten agenttien suorituskykyä selvästi. Yhtiö testasi algoritmin toimivuutta opettamalla sille 50 eri Atari-peliä, joista noin puolessa neuroverkko pystyi päihittämään ihmisen (neuroverkon vahvimmat pelit olivat *Video Pinball*, *Boxing* ja *Breakout*).

Neuroverkkojen lupaavat sovellukset antavat aiheita odottaa, että niiden kvanttimekaaniset versiot voisivat myös olla hyödyllisiä. Kuten aiemmin todettiin, kvanttisuorittimet loistavat erityisesti suurien tietomäärien käsittelyssä, joten kvanttilaskennan ja neuroverkkojen yhdistämisellä voidaan todennäköisesti saavuttaa synergiaetuja. Aiheen tutkimus on siten vilkasta, ja laboratorioissa onkin jo luotu ensimmäiset toimivat prototyypit kvanttimekaanisista neuroverkoista.

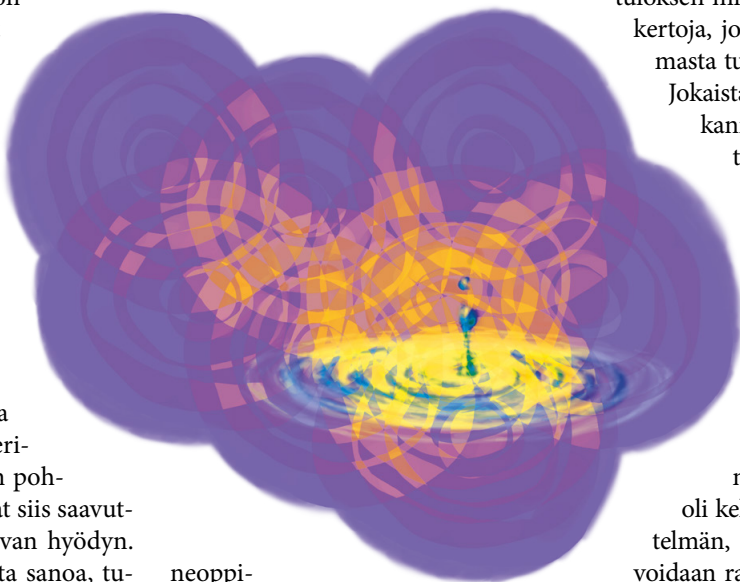
Teoriassa neuroverkot näyttävät lupaavilta sovelluskohteilta kvanttioppimiselle. Monet matriisilaskun operaatiot, joita neuroverkkojen kanssa käytetään, ovat eksponentiaalisesti nopeampia kvanttietokoneella. Periaatteessa neuroverkkoihin pohjautuvat algoritmit voisivat siis saavuttaa kvantti-ilmiöillä valtavan hyödyn. On kuitenkin liian aikaista sanoa, tuleeko kvanttineuroverkoista tulevaisuuden päivittäinen työkalumme vai kenties kuriositeetti, joka ratkaisee vain tiettyjä tarkasti rajattuja ongelmia. Teoreettinen tutkimus aiheesta ottaa vasta ensiaskeliaan, ja esimerkkejä kvanttineuroverkkoja hyödyntävistä algoritmeista on vähän.

Vaikka teoreettista todistusaineistoa kvanttineuroverkkojen kyvyistä on vielä ohuesti, se ei ole estänyt tutkijoita rakentamasta ensimmäisiä kvanttineuroverkkoja laboratoriossa. Maailman ensimmäistä kaupallista kvanttietokoneetta D-Wavea on kokeiltu koneoppimiskäytössä sen ensiversioista lähtien. Vuonna 2009 Googlen **Hartmut Neven** tiimeineen käytti D-Wavea yksikerroksisena kvanttineuroverkkona, joka tunnistaa esineitä kuvista. Se oli kooltaan toki huomattavasti pienempi kuin nykyaikaiset kuvantunnistuksessa käytetyt neuroverkot, mutta se pys-

tyi silti tunnistamaan kolikonheittoa paremmin, onko kuvassa auto.

Nevenin koe havainnollisti, että kvanttikoneoppiminen on mahdollista jo nykyisillä laitteilla. Vaikka tämä alkeellinen kvanttineuroverkko ei pärjannyt suorituskyvyssä tavanomaisille neuroverkoille, tämän eron kurominen umpeen on nyt suurilta osin insinöörien työtä. Heidän ratkaistavanaan on, miten kvanttipiirien kokoa onnistutaan kasvattamaan säilyttäen niiden kvanttimekaaniset ominaisuudet sekä miten näitä piirejä saadaan mahtumaan entistä pienempään tilaan.

Nevenin kokeiden jälkeen D-Wavea on käytetty moniin muihinkin ko-



neoppi-
mistehtäviin.

Vuonna 2017 yhdysvaltalaisen Los Alamosin tutkimuslaboratorion tutkijat raportoivat käyttäneensä D-Waven kvanttikoneetta ihmisten kasvojen tunnistamiseen. He analysoivat matriisihajotelmaan perustuvalla menetelmällä piirteitä, joiden perusteella ihmisten kasvoja pystytään erottelemaan kuvissa. Menetelmä löytää kuvista tavallaan ne ominaisuudet, jotka vaihtelevat eniten ihmisten välillä ja joiden perusteella yksittäisiä ihmisiä on helppointa tunnistaa.

Los Alamosin kokeissa päästiin jo varsin lupaaviin tuloksiin: menetelmän kvanttiversio ylitti kaksi huipputasen algoritmia suoritusnopeudessa, kun kuvien määrä oli kohtalaisen alhainen. Tutkijoilla oli haasteita saada kvanttialgoritmi toimimaan suuremmilla tietojoukoilla, mutta nämä haas-

teet johtuivat D-Waven teknisistä rajoitteista. Vasta laitteen seuraavissa versioissa nähdään tulokset niillä tietomäärillä, joilla kvanttietokoneet todella loistavat.

Mainittakoon, että yllä mainituissa sovelluksissa tarvitaan runsaasti myös tavallista laskentakapasiteettia. Varsinainen kvanttialgoritmi ratkaisee yleensä vain yhden osan ongelmasta ja loppu jää esimerkiksi supertietokoneen harteille. Kvanttialgoritmin osaksi jää kuitenkin ohjelman vaikein osuus, jossa tavalliset supertietokoneet hyittyvät. Kvanttisuorittimien operointi on ainakin tällä hetkellä sen verran haastavaa, ettei niitä ole järkevää käyttää kaikissa laskennan vaiheissa. Suorittimen valmistelu, algoritmin suoritus ja lopputuloksen mittaaminen on suoritettava useita kertoja, jotta kvanttialgoritmin antamasta tuloksesta saadaan varmuus.

Jokaista yhteenlaskua varten ei siis kannata käynnistää kvanttietokoneita, jos saman laskun voi tehdä nopeammin vaikkapa kannettavalla tietokoneella.

Vuonna 2018 Googlen kvanttitekoäly-yksikkö raportoi kahdesta edistysaskeleesta kvanttineuroverkkojen soveltamisessa. Ensimmäisessä tutkimuksessa se oli kehittänyt teoreettisen menetelmän, jolla kvanttineuroverkkoja voidaan rakentaa lähitulevaisuudessa käsillä olevilla laitteilla. Tutkimukseen yksikkö todisti, että sen malli suoriutuu neuroverkoille tyypillisistä luokittelutehtävistä, kuten vaikkapa käsin kirjoitettujen kirjaimien tunnistamisesta kuvasta.

Mielenkiintoista tutkimuksessa on varsinkin se, että neuroverkkoa ei tarvitse tutkimuksen mallissa rakentaa fyysiseksi verkoksi, vaan sen rakenne voidaan muuntaa sarjaksi kvanttioperaatioita. Tämä on erittäin hyödyllistä kvanttipiirien suunnittelun kannalta, sillä näin piirin kokoa ei tarvitse kasvattaa neuroverkon koon kasvaessa. Kunhan kvanttisuoritin kykenee suorittamaan tietyt laskennalliset operaatiot, se voidaan siis valjastaa neuroverkoksi suorittamalla nämä operaatiot sopivassa järjestyksessä. Tutkimus luo näin pohjaa kvanttineuroverkkojen soveltamiselle lähitulevaisuuden kvanttietokoneilla.

Toinen Googlen tutkimus tuo yllättäen huonoja uutisia kvanttineuroverkkojen kannalta. Tavanomaisten neuroverkkojen kouluttamisessa haasteena ovat usein niinkutsutut häviävät tai räjähtävät gradientit. Gradientti on tavallaan kompassi, jonka avulla algoritmi suunnistaa kohti oikeaa ratkaisua suorituksen aikana. Samoin kuin kompassi muuttuu hyödyttömäksi napapiiriä lähestyttäessä, gradientti saattaa olla niin heikko tai jyrkkä, ettei siitä ole hyötyä lopullisen ratkaisun löytämisessä. Tavanomaisille neuroverkoille on kehitetty satunnaisuutta hyödyntäviä menetelmiä algoritmin alkutilan valintaan, jotta gradienttiin liittyviä haasteita voidaan torjua. Googlen tutkijat kuitenkin havaitsivat, etteivät nämä satunnaismenetelmät toimi kvanttialgoritmien kanssa. Sitä vastoin kvanttialgoritmien tapauksessa gradienttiongelmia vain pahenee ratkaistavan ongelman koon kasvaessa.

Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että toivo näiden algoritmien hyödyllisyydestä olisi täysin menetetty. Ajan saatossa klassisille neuroverkoille on keksitty nerokkaita ratkaisuja vastaaviin ongelmiin. Tutkijoiden mukaan kvanttimekaanisille neuroverkoille saatetaan löytää vastaavia ratkaisuja, ja he peräänkuuluttavatkin lisätutkimuksia aiheesta.

Neuroverkot ovat tällä hetkellä yksi lupaavimmista kvanttikoneoppimisen haaroista. Neuroverkkojen suosio jatkuvissa laskentatehtävissä on saanut suurelkin teknologiayhtiöt kiinnostumaan niiden mahdollisuuksista kvanttimekaanisessa laskennassa. Viimeaikaiset tutkimustulokset ovat onnistuneet kuromaan umpeen teorian ja käytännön välistä kuilua kvanttineuroverkkojen soveltamisessa. Monet teoreettiset tulokset tukevat kvanttineuroverkkojen hyödyllisyyttä laskennassa, joten kilpailu sellaisten rakentamisessa pysyy kovana myös lähitulevaisuudessa.

Päästetään ohjat irti?

Kvanttikoneoppimisen tutkimusta on tehty muuallakin kuin neuroverkkojen alueella. Esimerkiksi niin kutsuttua ohjaamatonta koneoppimista (*unsupervised machine learning*) on tutkittu kvanttimekaanisissa koejärjestelyissä. Ohjaamattoman koneoppimisalgoritmin kouluttaminen eroaa ohjatusta algoritmista siinä, ettei sille tarvitse

kertoa erikseen oikeita tuloksia, vaan algoritmi tavallaan päätelee ne itse sille syötetyn tiedon perusteella.

Jos koulutettavana on vaikkapa tekstintunnistussmalli, jonka tehtävänä on tunnistaa aiheita uutisartikkeleista, ohjatun mallin kouluttaminen vaatii tietojoukon, jossa jokaiselle artikkelille on määritelty sen aihe. Ohjaamattomassa koneoppimisessa koulutukseen riittävät pelkät artikkelit, sillä algoritmi osaa itse päätellä, millaiset sanat ja ilmaukset esiintyvät tietyn aiheen artikkeleissa ja siten erotella artikkelit niiden sisällön perusteella. Ohjaamattomalla koneoppimisella voidaan säästää huomattavasti kouluttamiseen tarvittavaa vaivaa, sillä yksittäisten artikkelien luokittelu vaatii yleensä paljon käsityötä, jotta koulutusmateriaalia saadaan tarpeeksi.

Vuonna 2014 Microsoftin kvanttilaskentayksikön tutkijat esittelivät tuloksia eräästä tyypillisimmästä ohjaamattoman koneoppimisen ongelmasta. Klusterointialgoritmit pystyvät löytämään tietojoukoista samankaltaisten tietueiden rykelmiä, joiden perusteella tietueita voidaan kategorisoida. Vaikka algoritmi ei ymmärräkään kunkin kategorian varsinaista merkitystä, se havaitsee, että sen sisällä on kyse samasta asiasta. Microsoftin tutkijat muodostivat kvanttimekaanisia versioita näistä klusterointialgoritmeista ja vertasivat niiden teoreettista suorituskkyä klassisiin algoritmeihin. Heidän tuloksensa viittaavat siihen, että näissäkin algoritmeissa kvanttimekaniikan laeista voi olla laskennallista hyötyä erityisesti tietueiden välisten etäisyyksien laskennassa. Näitä etäisyyksiä lasketaan algoritmin suorituksen aikana jatkuvasti. Laskujen vektoriluonteen takia ne sopivat erityisen hyvin kvanttietokoneen suoritettavaksi.

Microsoftin tutkimuksissa ei löydetty eksponentiaalista nopeushyötyä kvanttialgoritmien käytöstä vaan pienempi, niin kutsuttu polynominen nopeushyöty. Tämäkin voi olla hyödyllistä käytännön sovellutuksissa. Microsoftin tulokset eivät myöskään tarkoita sitä, etteikö eksponentiaalista nopeushyötyä olisi mahdollista saavuttaa joissakin tapauksissa. Klusterointialgoritmien käytännön sovelluksia on lukuisia. Esimerkiksi tähtitieteessä klusterointia on käytetty kaukaisten kvasaarien havaitsemiseen niiden lähtemän valon perusteella. Näissä tut-

kimuksissa käytetyt tietojoukot voivat olla jopa kymmenien teratavujen kokoisia, mikä asettaa haasteita nykyisille supertietokoneille. Ehkäpä tulevaisuudessa avaruuteen katsotaan kvanttimekaanisten linssien läpi.

Tässä artikkelissa mainitut esimerkit edustavat vain osaa kvanttikoneoppimisen tämänhetkisistä saavutuksista. Niiden lisäksi kvanttikoneoppimista on tutkittu lähes kaikilla koneoppimisen aloilla, esimerkiksi vahvistusoppimisessa (*reinforcement learning*) ja pääkomponenttianalyysissa (*principal component analysis*). Onpa sitä käytetty myös vuoden 2016 Yhdysvaltain presidentinvaalien analysoinnissa, NASAn tutkimuksissa sekä hiukkasfysiikassa. Jälkimmäisessä tutkijat käyttivät D-Waven kvanttietokoneita analysoimaan protonien törmäyksiä ja päättämään, esiintyykö niissä jälkiä Higgsin bosonista, fysiikan kenties kuuluisimmasta hiukkasesta.

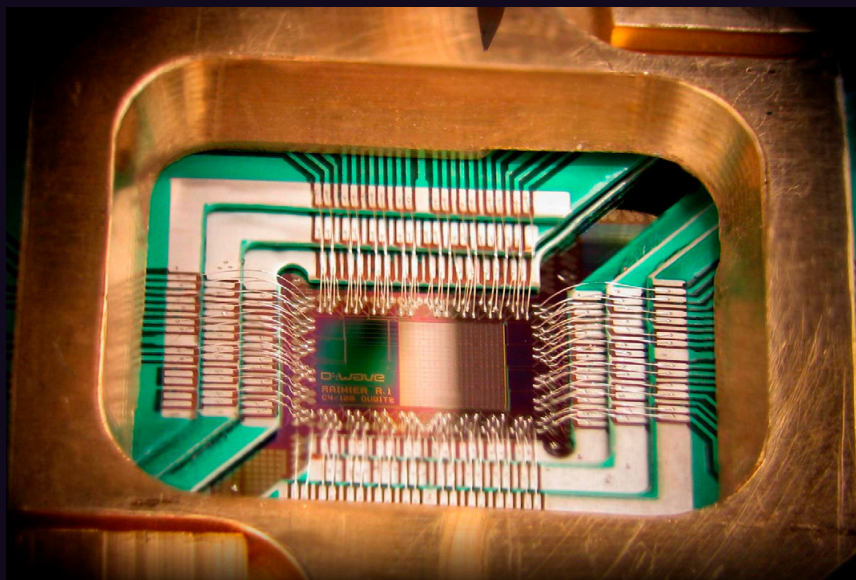
Kvanttikoneoppiminen ei ole enää pelkkää visionäärien villiä kuvitelmaa, vaan menetelmät ovat jo tutkijoiden käytössä, vaikka vielä emme näekään tämän alan käytännön sovellutuksia arjessamme.

Kohti horisonttia

Onko kvanttikoneoppiminen uhka vai mahdollisuus? Monet vakavasti otettavat tekniikan asiantuntijat ovat varoitelleet tekoälyn vaaroista, jos sen kehitystä ei säädellä asianmukaisesti. Mikäli kvanttitekoäly voi saavuttaa harppauksen käsiteltävän tiedon määrässä, onko vaarana, että se tulee ihmisen tapaan tietoiseksi ja alkaa suunnittelemaan maailmanvaltausta?

Ennustaminen jätettäkään muiden huoleksi, mutta nykytiedon valossa tällaiset tuomiopäivän skenaariot ovat pienimpiä huoliamme tekoälyn kehityksessä. Vaikka nykyiset oppivat järjestelmät pystyvät suoriutumaan tietyistä tehtävistä vaikuttavalla tarkkuudella, ne yleistyvät huonosti muihin tehtäviin kuin niihin, joihin ne on varta vasten koulutettu. Vahvaan tekoälyn kohdistuu paljon mielenkiintoa, mutta toistaiseksi kukaan ei ole keksinyt malleja, joihin tällainen yleistekoäly voisi perustua.

Kvanttialgoritmit pystyvät mahdollisesti käsittelemään suurempia määriä tietoa kuin klassiset vastineensa, mutta suurin osa kvanttikoneoppimisen algoritmeista perustuu jo tunnettuihin



D-Waven suunnittelema 128 kubitin kvanttiprosessori eli QPU vuodelta 2009. Prosessori jäähdytetään lähelle absoluuttista nollapistettä, eristetään ulkoisista magneettikentistä ja paketoitetaan siistin mustan 3m x 3m x 3m kotelon sisälle. D-Wave on sittemmin esitellyt 512, 1152, 2048 ja 5000 kubittia sisältävät versiot.

klassisiin koneoppimisalgoritmeihin. Täten ne eivät ratkaise yleistämisen ongelmaa vaan painivat tuttujen ongelmien kanssa, joskin nopeammin ja suuremmassa mittakaavassa. Suurempi huoli kohdistuukin siihen, miten ihmiset soveltavat näitä algoritmeja. Tähän huoleen ei kvanttimekaniikka tarjoa vastauksia, ei ainakaan vielä.

Kvanttikoneoppimisen tulevaisuus kulkee todennäköisesti käsi kädessä kvanttitietokoneiden yleisen kehityksen kanssa. Kvanttialgoritmien käytännön hyödyntäminen edellyttää laajamittaista kvanttitietokonetta, joka pystyy käsittelemään valtavia tietomääriä kerralla menettämättä suorituksen kvanttimekaanista superpositiotilaa. Kvanttitietokoneissa on tehty huimia edistysaskeleita 2000-luvulla, mutta käytännön todisteet niiden ylivoimaisuudesta ovat edelleen kiven alla.

Vaikka kvanttitietokoneen rakentaminen on valtava haaste maailman etevimmillekin tieteentekijöille, se ei ehkä sittenkään ole suurin este kvanttikoneoppimisen soveltamisessa. Sitäkin kiperämpi kysymys on, miten löydetään sellaisia kvanttikoneoppimisen malleja, joilla saavutetaan haviteltu eksponentiaalinen nopeushyöty. Näissä malleissa kvanttimekaniikan ilmiöt tuovat kaikkein suurimman edun laskentanopeudessa, mutta tämäntyyppisiä malleja on löydetty toistaiseksi valitettavan vähän.

Monet käytännön ongelmat näyttävät olevan sellaisia, että niiden ratkai-

suun on olemassa tyydyttävän nopea klassinen algoritmi. Nopeiden algoritmien suunnittelu edellyttää parempaa ymmärrystä siitä, miksi kvanttimekaaniset ilmiöt tuovat nopeusetuja laskennassa. Vaikka tiedetään, että kvanttitietokoneen suorituskyky perustuu kvanttimekaanisiin superpositiotiloihin, tätä tietoa on vaikea soveltaa algoritmien suunnittelussa. Kvanttimekaniikkaan liittyy edelleen tiettyä mystiikkaa, joka estää sen hyödyntämistä täysimittaisesti.

Vaikka kvanttikoneoppiminen on nyt edennyt vakavasti otettavaksi tieteenalaksi, on liian aikaista arvioida, mitkä ovat kvanttikoneoppimisen tärkeimmät sovellutukset tulevaisuudessa. Selvää on, etteivät kvanttitietokoneet tule lähiaikoina yleistymään kannettavien tietokoneiden tai mobiililaitteiden ytiminä. Ensimmäiset käytännön ongelmia ratkaisevat kvanttikoneet rakennetaan palvelinkeskuksiin, joissa koko ei ole este ja toimintaympäristö on hyvin hallittu. Tulevaisuudessa ne saattavat hyödyttää tavallista käyttäjää tuottamalla vaikkapa entistä nopeampia ja tarkempia hakuja valtavista tietomääristä. Yrityksien käyttöön tulee myös uusia palveluja, ja esimerkiksi kuljetusyritys saattaisi käyttää kvanttitietokonetta optimoimaan kuljetusketjujen reitit. Vasta käytäntö tulee kuitenkin näyttämään, missä tehtävissä kvanttikoneoppiminen tuottaa suurimmat hyödyt. 🏠

Kvanttitietokoneita kehitetään myös Suomessa. Aalto-yliopiston kvanttitietokoneprojektin vetäjän **Mikko Möttösen** haastattelu löytyy Skrollista 2018.2. Pdf-lehti maksutta: skrolli.fi/numerot.

Uuden aikakauden alku?

Google väittää laskeneensa kvanttietokoneella jotain, mitä ei voi laskea tämän hetken parhaillakaan supertietokoneilla.

Teksti: Jarno Niklas Alanko

Kuva: Connie Zhou / IBM

Skaalautuvan yleiskäyttöisen kvanttietokoneen rakentaminen on yksi aikamme vaikeimmista insinööriprojekteista. Skeptikot väittävät, ettei se tule koskaan onnistumaan. Tätä mieltä on esimerkiksi Jerusalemin heprealaisen yliopiston ja Yalen professori **Gil Kalai**, jonka mukaan luonnon lait estävät viime kädessä skaalautuvan yleiskäyttöisen kvanttikoneen rakentamisen riittävällä tarkkuudella.

Tekniikka on nyt kehittynyt siihen pisteeseen, että kvanttikoneen käyttäminen saattaa tulla klassista tietokonetta edullisemmaksi joissain erikoistilanteissa. Graalin malja on kuitenkin ollut vielä saavuttamatta – nykyisillä kvanttietokoneilla ei ole pystytty tekemään mitään, mitä ei olisi voitu tehdä järkevissä ajassa normaalilla algoritmilla, käyttäen olemassa olevia massiivisia laskentaresursseja. Kun koittaa se päivä, jolloin kvanttietokone tekee jotain, mitä ei muuten olisi voitu tehdä käytännössä, sanotaan kvanttiylivallan (*quantum supremacy*) alkaneen.

Syyskuussa 2019 alkoi liikkua huhuja, että kvanttiylivalta on saavutettu. NASAn sivuille ilmestyi Googlen tutkimusryhmän artikkeli, jossa suoritettiin kvanttietokoneella operaatio, johon kului vähän päälle kolme minuuttia, kun maailman tehokkaimmalla supertietokoneella olisi kulunut samaan 10 tuhatta vuotta. Artikkelin vedettiin nopeasti pois, mutta vahinko oli jo tapahtunut ja lehdistö tarttui skuuppiin otis. Kun artikkeli ilmestyi lokakuussa Nature-lehdessä, vaitiolosopimukset raukesivat ja tuloksien tarkastelu pääsi kunnolla käyntiin.

Googlen tutkijoiden suorittama koe oli seuraava. Luodaan satunnainen kvanttipiiri, ja ajetaan sitä kvanttietokoneella miljoonia kertoja. Jokainen ajokerta tuottaa satunnaisen bittijonon piirille ominaisesta jakaumasta. Koetta voidaan simuloida myös klassisella tietokoneella, mutta siihen kuluu eksponentiaalisesti enemmän aikaa. Googlen tutkijat tarkistivat, että pienistä kvanttipiireistä saadut tulokset noudattivat oikeaa jakaumaa simuloimalla

piiriä klassisella tietokoneella. Suurimpien piirien tuloksia ei kuitenkaan pystytty vahvistamaan oikeaksi siksi, että se käy liian raskaaksi klassiselle tietokoneelle – kokeen tarkoituksena oli tehdä jotain, mitä klassisella tietokoneella ei voi tehdä. Epäsuoraa todistusaineistoa tulosten oikeellisuudesta kuitenkin on. Tutkijat julkaisivat kaikki tulokset, jotta ne voidaan ehkä joskus tulevaisuudessa tarkistaa tehokkaammilla klassisilla tietokoneilla.

Skeptikkojen vastaisu

Googlen tulos oli kova isku skeptikoille mutta ei lopullinen sana väittelyssä. Kvanttikisassa myös mukana oleva teknologiajätti IBM laskee, että se pystyisi suorittamaan Googlen kokeen kahdessa ja puolessa päivässä maailman suurimmalla supertietokoneella. Tässä supertietokoneessa on 250 petatavua kovalevytilaa, jolla voitaisiin simuloida koko Googlen koneen kvanttitilaa. Kvantti-algoritmien johtavan teoreetikon **Scott Aaronsonin** mukaan IBM:n laskelmat pitävät todennäköisesti paikkansa. Googlen tutkijat olivat ilmeisesti jättäneet huomiotta näin massiivisen kovalevytilan olemassaolon.

Kvanttiylivalta ei ehkä siis vielä alkanutkaan! Kuitenkin jos Googlen kokeen kvanttipiiriä kasvatettaisiin edes vähän, niin suurimmankin olemassa olevan supertietokoneen kovalevytila loppuisi kesken. Skeptikot voivat silti edelleen väittää, ettei koeasetelma tule kestäämään piirin koon kasvua, mutta tilanne on käymässä epäilijöille vähintäänkin tukalaksi.

Gil Kalain mielestä Googlen tutkimusryhmän tarjoama todistusaineisto on riittämätöntä, ja tulokset tulevat osoittautumaan vääriksi lähemmässä tarkastelussa. Uusia kokeita lienee tulossa lähiaikoina. Joutuvatko skeptikot ennen pitkää myöntämään olleensa väärässä? Tuleeko seuraava läpimurto kenties IBM:ltä? Entä mitä tekevät Intel ja Microsoft? Teknojäntien nokittelusta riittänee viihdettä vielä vuosiksi. Skrolli seuraa tilannetta. 📖



IBM Q -kvanttilaskentakeskus.