

## Kvanttitietokone D-Wave Systemsin tapaan<sup>1</sup>

*Pekka Manninen*

kehityspäällikkö, tutkimuksen palvelut, CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy  
dosentti, Helsingin yliopisto  
pekka.manninen@csc.fi

### Johdanto

Kvanttitietokoneen on määrä hyödyntää kvanttimekaniikan eriskummallisen maailman ilmiöitä luomaan perinteistä digitaalista prosessoria nopeampi kvanttiprosessori tietyn tyyppisten laskentaongelmien nopeaan ratkaisuun. Digitaalisten tietokoneiden bitin (0 tai 1) korvaa kvanttibitti eli kubitti (qubit), joka voi olla 0 ja 1 samaan aikaan eli kahden tilan *superpositiossa*. Kvanttilaskennassa tarvitaan superposition lisäksi kubitien *lomittamista*, eli ns. haamuvaikutusta: kubitit ovat korreloituneita keskenään tavalla, joka on uniikkia kvanttisysteemeille ja jolla ei ole analogiaa makroskooppisessa maailmassa. Yhden kubitin tila voidaan kytkeä toisen kubitin superpositiotilaan siten, että toisen kubitin superpositiotilan ”romauttaminen” puhtaan tilaan kiinnittää välittömästi toisen kubitin arvon.

Kvanttitietokone on muutaman viime vuoden aikana muuttunut haaveilusta ja tutkimuksesta aidoiksi kaupalliseksi tuotteiksi ja niiden tuotekehitykseksi. Toiteusmalleja on useita ja kilpajuoksu näiden välillä on meneillään. Esimerkiksi IBM on julkistanut viiden kubitin porttimallin (gate model) mukaisen Q-kvanttitietokoneen ja Microsoft kehittää ns. topologisen mallin mukaista StationQ-kvanttitietokonetta. Kolmas malli, joka ehkä lupaa vähiten, mutta on teknisesti helpoiten toteutettavissa, on adiabaattinen malli. Tä-

män pohjalta kanadalainen D-Wave Systems on julkistanut kaupallisen kvanttitietokoneen jo muutama vuosi sitten.

Joka tapauksessa ala on yhä alkumetreillään niin teknologian kuin ohjelmointimalliensakin suhteen. Onkin osuva analogia verrata kvanttitietokoneiden nykytilaa klassisiin tietokoneisiin 1950-luvulla.



### D-Waven lähestymistapa

D-Waven kvanttitietokone perustuu ns. kvanttijähdytykseen (quantum annealing). Sen perustana on useam-

<sup>1</sup>Kirjoituksen kuvat ovat D-Wave Systemsin, joka on antanut luvan niiden käyttämiseen.

man tutkimusryhmän vuosituhanen vaihteessa julkaissut artikkelit adiabaattisesta kvanttijähdytyksestä kvanttietokoneen pohjana.<sup>2</sup>

Adiabaattinen kvanttijähdytys etsii monimutkaisen faasiavaruuden minimin hyödyntämällä kvanttimekaniikan lainalaisuuksia. Tätä voidaan havainnollistaa ajatteleamalla ilmakuvaa vuoristoisesta alueesta (monimutkaista faasiavaruutta kuvaamassa) ja kysymällä, mikä laaksoista on matalin (eli missä energia on minimissään). Kvanttisysteemi voidaan viritellä kaikkien ratkaisujen superpositioon, ja romauttamalla superpositio riittävän hitaasti eli adiabaattisesti systeemi jää minimienergiaa vastaavaan tilaan. Kvanttietokone siis suorittaa otannan kaikista laaksoista (tiloista) samanaikaisesti, siinä missä klassinen algoritmi etsii syvintä laaksoa (tilaa) vertaamalla niitä yksi kerrallaan.

### Teknologinen toteutus

D-Wave on myynyt kolmea eri laitteistosukupolvea, ensin 512 kubitin, sitten 1000 kubitin (D-Wave 2X) ja nykyisin 2000 kubitin (D-Wave 2000Q) kvanttietokoneita. D-Waven koneissa kubitti muodostetaan toisiinsa liitetyillä suprajohtavilla kvanttiinterferenssilaitteilla (superconducting quantum interference device, SQUID). Ne ovat pieniä renkaita, joissa virta voi kulkea myötä- tai vastapäivään, tai molempiin suuntiin samaan aikaan. D-Waven kubitissa siis toiseen suuntaan kulkeva virta vastaa tilaa 1 ja toiseen suuntaan tilaa 0 ja superpositio tilojen välillä (1 ja 0 samaan aikaan) saavutetaan siis laittamalla virta kulkemaan molempiin suuntiin samaan aikaan.

Jotta SQUIDit saadaan suprajohtavaan tilaan, ne täytyy jäähdyttää alle 15 mK:n lämpötilaan. Jotta superpositiotilat sekä kubittien välinen lomittuminen säilyisivät, prosessori täytyy suojata ulkoisilta sähkö- ja magneettikentiltä sekä säteilyltä tarkasti.

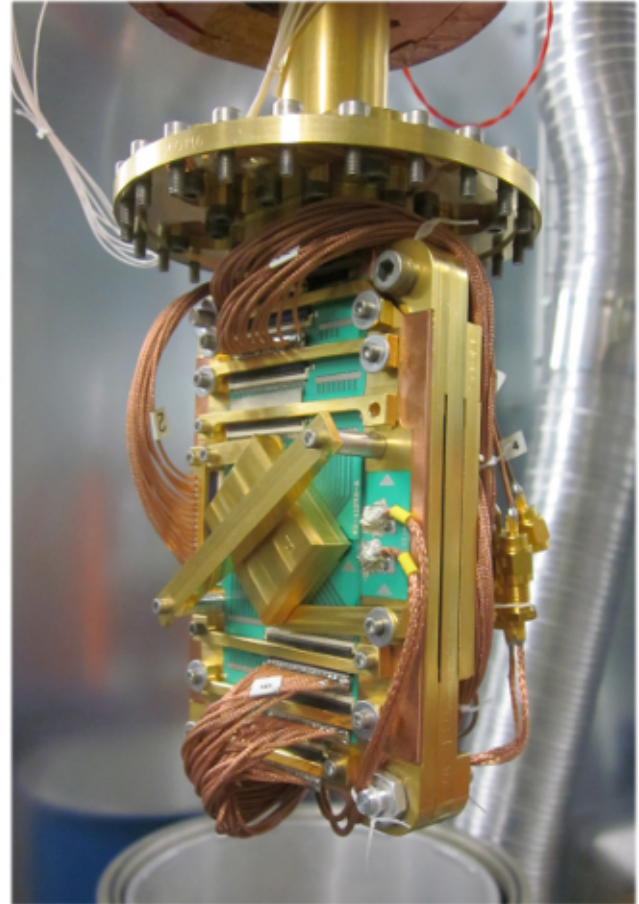
D-Waven koneessa kaikki kubitit eivät ole lomittuneita kaikkien toisten kubittien kanssa suoraan, vaan kone perustuu kahdeksan keskenään lomitetun kubitin yksikkökoppeihin, jotka ovat löyhemmin kytköksissä toisiinsa. Periaatteessa kuitenkin koko kvanttiprosessori on viritettävissä lomitettuun tilaan, ja tämä voidaan myös todentaa.

### Ohjelmointimalli

D-Waven kvanttietokoneessa yksi prosessorisykli palauttaa minimitalan Ising-mallin kaltaiselle kvanttisysteemille

$$H(\sigma) = \sum_i a_i \sigma_i^Z + \sum_{i < j} b_{ij} \sigma_i^Z \sigma_j^Z,$$

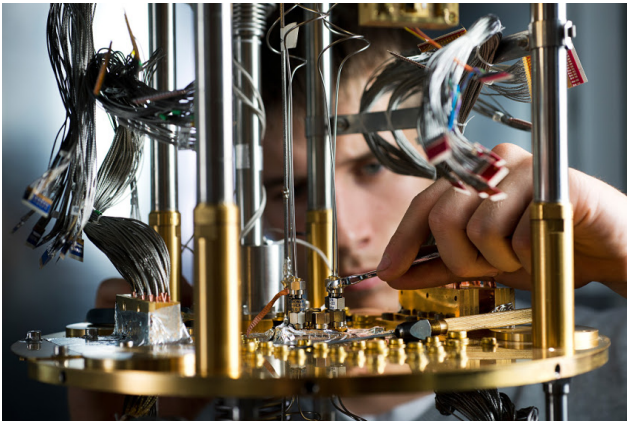
missä D-Waven koneen tapauksessa  $\sigma^Z$  eivät ole spinejä (kuten Ising-mallissa), vaan kubitin tila (“ylös”, eli virta kiertää tiettyyn suuntaan tai “alas”, virta kiertää vastakkaiseen suuntaan),  $\{a_i\}$  kunkin kubitin painokerroin (vrt. magneettikenttä Ising-mallissa, tässä säädettävissä) ja  $\{b_{ij}\}$  kubittien  $i$  ja  $j$  vuorovaikutuksen voimakkuus (jälleen säädettävissä). Kvanttiprosessori viritetään kaikkien mahdollisten tilojen superpositioon (kaikki  $\sigma_i$ :t ovat samaan aikaan 0 ja 1) ja systeemi relaksoidaan adiabaattisesti.



D-Waven koneen ohjelmoija siis kontrolloi kubittien painokertoimia **a** ja kytkentävahvuuksia **b**. Kun ne on määritetty, kvanttietokone palauttaa yhdellä laskentasyklillä vektorin **q** ( $q_i = 0$  tai  $1$ ), joka minimoi edellä mainitun funktion. D-Waven nykyisessä arkkitehtuurissa näitä binäärimuuttujia voi siis parhaimmillaan olla jo 2000. Käytännössä tarvitaan useampaa fyysistä kubittia esittämään yhtä loogista muuttujaa, joten ongelmien koko on jonkin verran tätä rajoittuneempi. Itse ohjelmointi tapahtuu kirjastorajapinnan läpi, vaikkapa C- tai Python-ohjelmointikieltä käyttäen, ja ohjelmaa ajetaan tavallisessa tietokoneessa, kvanttiprosessorin toimiessa apuprosessorina.

<sup>2</sup>Ks. esim. T. Kadowaki and H. Nishimori, Physical Review E 58 (1998).

Kvanttitietokone siis ratkaisee rajoitteettoman neliöllisen binäärioptimointiongelman (quadratic unconstrained binary optimization problem, QUBO) yhdessä prosessorisyklissä, aiemmin keskusteltuja kvanttimekaanisia ilmiöitä hyödyntäen – prosessori on siis kaikissa  $2^{2000}$ :ssa ( $O(10^{602})$ ) mahdollisessa tilassa yhtä aikaa, ja tunneloitumista ja kubittien lomittumista hyödyntäen tila lokalisoituu pienintä energiaa vastaavaan konfiguraatioon yhdessä prosessorisyklissä. Tavallisella tietokoneella menisi näiden tilojen läpikäymiseen yksi kerrallaan ja vertaamiseen (eli minimin löytämiseen) astronominen määrä aikaa, vaikka kone olisi kuinka nopea tahansa.



Siinä, missä tavallisen tietokoneen perusoperaatiot ovat aritmeettisiä, D-Waven koneen perusoperaatio on siis edellä mainittu minimointitehtävä. Toisin sanoen jokainen kvanttitietokoneella laskettava ongelma onkin esitettävä minimointitehtävänä! Hieman karkeistaen voidaan ajatella seuraavasti: jos haluamme normaalilla tietokoneella laskea minimointitehtävän, tarvitsemme numeerisen algoritmin (vaikkapa liittogradienttimenetelmän, joka on lineaarialgebraa) ja lopulta yhteen- ja kertolaskuja, ja implementoida tämän tietokoneohjelmaksi. Jos puolestaan haluamme laskea yhteenlaskun kvanttitietokoneella, on se esitettävä monen välikerroksen kautta minimointitehtävänä.

Onkin ilmeistä, että D-Waven tietokoneelle soveltuvat ongelmat ovat luonteeltaan optimointitehtäviä itsessään, ja muuta sillä ei kannata edes yrittää. Toki sen kaltaisia tehtäviä sitten tieteellisessä laskennassa riittääkin.

## Optimointiongelmiä

D-Waven koneella tehtyjä tieteellisten ongelmien ratkaisuja on julkaistu jo jonkin verran. Joissakin tapauksissa kone pystyy peittoamaan klassisen tietokoneen NP-kovien ongelmien ratkaisussa selvästi, kuten Googlen tutkijoiden D-Waven 1000 kubitin koneella havaitsema  $10^8$ -kertainen tehoero kvanttimekaanisessa Ising-ongelmassa verrattuna tavallisella tietokoneella ajettuun kvantti-Monte-Carlo -algoritmiin.<sup>3</sup> Tämä tapaus on toki ideaali D-Waven tietokoneelle (koska Ising-hamiltoniaani on koneen “äidinkieli”) ja muodostaa tavallaan ylärajan, kuinka paljon nykyinen kvanttitietokone voi olla klassista tietokonetta nopeampi.

Joissakin tapauksissa lupauksia NP-kovan optimointiongelman polynomiaalisesta (linearisesta) ratkaisusta on havaittu, mutta koneen kubittimäärä ei ole ollut vielä riittävä peittoamaan klassista tietokonetta ainakaan kovin merkittävästi. Näitä ovat mm. Volkswagenin tutkijoiden tekemä liikennevuon optimointi<sup>4</sup>, jossa tehokkaimmaksi malliksi toistaiseksi osoittautui klassisen ja kvanttitietokoneen yhteistyö.

D-Waven koneen voi kuitenkin perustellusti odottaa tuottavan polynomiaalisessa ajassa ratkaisun likipitäen kaikkiin NP-täydellisiin optimointiongelmiin. Haasteeksi jää ongelman esittäminen QUBO:na sekä nykyisen koneen kubittien lukumäärän ja kytkettävyyden riittävyys.

Suomessa ei – ainakaan toistaiseksi – ole D-Waven kvanttitietokonetta, mutta Tieteen tietotekniikan keskus CSC on järjestänyt työpajan D-Waven koneen ohjelmoinnista lokakuussa 2016 (vastaava järjestetään lokakuussa 2017 uudelleen<sup>5</sup>), jossa osallistujat ovat päässeet käsiksi Kanadassa sijaitsevaan kvanttitietokoneeseen. Suomalaiset tutkijat ovat myös kehittäneet algoritmeja D-Waven koneelle mm. koneoppimisen ja graafiteorian alalla. Nämä tulokset ovat kuitenkin vielä julkaisemattomia.

Kvanttitietokonealgoritmit ovat todellinen *terra incognita*; jokainen onnistunut lasku kvanttitietokoneella on tällä hetkellä julkaisun arvoinen tieteellinen löydös. Panostamalla kompetensseihin kvanttitietokoneiden “ohjelmistojen” alalla voitaisiin luoda Suomeen kansainvälisesti kilpailukykyistä tutkimusta. Kvanttitietokone kun kuitenkin on täällä jo tänään ja hyvinkin suurella todennäköisyydellä se on tullut jäädäkseen.

<sup>3</sup>Lue lisää: <https://research.googleblog.com/2015/12/when-can-quantum-annealing-win.html>

<sup>4</sup>Lue lisää: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2017/03/the-beginnings-of-a-quantum-leap.html>

<sup>5</sup>Ks. <https://www.csc.fi/web/training>