



## Pienuus, kylmyys ja nopeus tieteessä - kvanttietokoneista atomilasereihin

Päivi Törmä



**Mihin tiede on menossa? Tämä kuulostaa vaikeasti vastattavalta kysymykseltä. Mutta itse asiassa tieteen ja teknologian kehityksessä on hyvin helposti nähtävissä tiettyjä suuntia: ollaan menossa kohti pienuutta, kylmyyttä ja nopeutta. Pienuuden saavutukset ovat tuttuja jokaiselle: esimerkiksi yhä pienemmät integroidut piirit, jotka antavat meille yhä nopeampia tietokoneita. Nopeus ja pienuus liittyvätkin usein yhteen. Sen sijaan kylmyyden saavutukset ovat vähemmän jokapäiväisiä: jäädyttämällä ainetta muutamien asteiden tai asteiden osien päähän absoluuttisesta nollapisteestä on päästy näkemään kvanttimekaniikan ilmiöitä, joita on ennustettu jo miltei sata vuotta sitten, mutta joiden havaitseminen on mahdotonta korkeammissa lämpötiloissa.**



Tietokoneiden kehitys on ällistytävän hyvin seurannut niin sanottua Mooren lakia. Gordon Moore ennusti kuusikymmentäluvun alussa, että komponenttien määrä yhdellä integroidulla piirillä - ja siten myös sen suorituskyky - kaksinkertaistuu puoleltoista vuoden välein.



Vaikka Mooren laki on lähinnä fiksu arvaus eikä mikään luonnonlaki, se on kuitenkin pitänyt paikkansa jo neljäkymmenen vuoden ajan. Jos tämä kehitys eli komponenttien pakkaaminen yhä tiheämpään jatkuu vielä viidestä kymmeneen vuotta, aletaan olla yksittäisten atomien mittakaavassa. Silloin kvantti-ilmiöt astuvat uudella tavalla kuvaan. Tämän luultiin olevan päätepuysäkki tietokoneiden kehitykselle, sillä kvantti-ilmiöihin liittyvä epävarmuus ja kohina voivat olla haitallista tietokoneen toiminnalle. Mutta vuonna 1994 tämä käsitys kumoutui täysin. Peter Shor AT&T:n Bellin laboratorioista esitti kuuluisan tekijöihinjakoalgoritminsa, jonka nopeus perustuu nimenomaan atomitasoon kvantti-ilmiöiden hyödyntämiseen [1]. Tekijöihinjakoalgoritmi herätti runsaasti huomiota, koska sen avulla voisi murtaa RSA - julkisen avaimen salakirjoitusmenetelmällä suojattua tietoa, eli se olisi merkittävä tietoturvaauha. Tämän huomion siivittämänä kvantti-tietokoneen idea teki läpimurron tieteen maailmassa.



Shorin esittämä algoritmi aloitti kokonaisen uuden tutkimusalan, joka nyt, yli kuusi vuotta myöhemmin kasvaa edelleen. Mikä sitten on niin mullistavaa kvanttietokoneessa? Se on tiettyissä ongelmassa fundamentaalilla tavalla nopeampi kuin tavallinen, niin sanottu klassinen tietokone. Fundamentaallilla tavalla tarkoittaa sitä, että kvanttietokone horjuttaa tietojenkäsittelyopin teorioita siitä, mikä on vaikea ongelma ja mikä helppo (niin sanotut kompleksisuusluokat). Hyvin yksinkertaistaen, kvanttietokoneen nopeus perustuu kvanttimekaniikan superpositioperiaatteeseen, siihen että kvanttisysteemi voi yhtä aikaa olla kahdessa tai useammassa eri tilassa; tätä on perinteisesti havainnollistettu kuuluisalla Schrödingerin kissalla. Samaa tapaan kvanttietokone on monen luvun superpositiotilassa, ja suorittaa siten laskutoimituksen kaikille näille luvuille yhtä aikaa kuin eräänlainen rinnakkaiskone.



Kvanttietokoneen hurjia lupauksia ei kuitenkaan vielä ole onnistuttu realisoimaan. Vuonna 1995 toteutettiin NIST:ssä (National Institute for Science and Technology) Coloradossa ensimmäinen kahden bitin kvanttietokone sähkömagneettisilla kentillä vangituja ioneja käyttäen [2,3], nyt ollaan jo seitsenässä bitissä. Tätä bittimäärystä pitää hallussaan NMR eli ydinmagneettinen resonanssi -tekniikka [4] (Los Alamos National Laboratory, USA).




Ehdotuksia kvanttietokoneen toteutustavaksi on tullut monelta fysiikan alalta, mutta millään niistä ei ole vielä päästy kymmenien tai satojen bittien systeemeihin, jotka alkaisivat jo olla hyödyllisiä. Kvanttietokoneen ideoimissa ja toteutuksessa olisikin tilaisuus merkittävään tieteelliseen ja jopa teknologiseen läpimurtoon.




Kvanttietokone ei toteutuessaan olisi pelkkä teknologinen innovaatio, vaan se on jo pelkkänä ideana vaikuttanut maailmankuvaamme, aivan kuten kvanttimekaniikka itse tämän vuosisadan alussa horjutti determinististä maailmankuvaa. Nimittäin tähän asti informaation on ajateltu olevan abstrakti käsite, joka ei riipu sen käsittelemiseen rakennetun koneen toteutustavasta. Kvanttietokoneen idea on kuitenkin nyt osoittanut tämän käsityksen vääräksi: prosessorin toteutuksen perustuminen kvanttifysiikkaan klassisen fysiikan sijasta voi muuttaa vaikean ongelman helpoksi.







## Kylmydestä




Yhä pienempiin ja pienempiin mittakaavoihin eteneminen voi siis johtaa esimerkiksi kvanttietokoneeseen. Mitä kylmyys sitten tuo, mitä löydetään ja saavutetaan menemällä mataliin lämpötiloihin? Teknillisen korkeakoulun Kylmälaboratorion ainutlaatuiset saavutukset ja kylmyyden maailmanennätykset ovat varmasti suomalaisten tieteenyävien tiedossa. Näissä kokeissa on jäähdetty nesteitä. Viime vuosina maailmalla on saatu uusia erittäin merkittäviä tuloksia myös kaasujen jäähdyttämässä.




Kaasujen jäähdyttämisen asteen miljoonasosien päähän absoluuttisesta nollapisteestä on mahdollistanut laserjäähdystekniikka, josta jaettiin vuoden 1997 fysiikan Nobelin palkinto. Kylmillä kaasuilla on saatu aikaan mm. Einsteinin ja Bosen miltei kahdeksan vuosikymmentä sitten ennustama kondensaatti.



Ensimmäinen kaksidimensioinen kondensaatti on muuten saatu aikaan Suomessa, Simo Jaakkolan tutkimusryhmässä Turun yliopistossa.




Kylmien atomikaasujen sovellutuksista on ensimmäisenä mainittava atomilaser. Sitä voitaisiin käyttää samoin kuin tavallista valolaseria: mittaukseen, operaatioihin, materiaalien ja komponenttien valmistukseen - se vain olisi tuhat kertaa tarkempi! Atomilaser ei ole tulevaisuuden utopiaa samalla tavoin kuin kvanttietokone, vaan atomilaserin ensiversiot toimivat jo [5]!




Jännittävin haaste atomikaasujen jäähdytyksessä on tällä hetkellä fermioni-tyyppisten atomien jäähdytys. Ne voidaan nimittäin riittävän alhaisissa lämpötiloissa saattaa suprajohdavaan tilaan, ja tämä mahdollistaisi kenties joidenkin suprajohdavuuden avointen kysymysten selvittämisen. Itse olen tutkinut juuri tätä aihetta: yhdessä Peter Zollerin (Innsbruckin yliopisto) kanssa esitimme tavan havaita atomien suprajohdavuus, ja tämä tutkimus herätti huomiota aina *Science*-lehteä myöten (Editor's choice) [6].


## Nopeudesta




Kun tarkastellaan tieteen kehitystä kohti pienuutta, kylmyyttä ja nopeutta, on mielenkiintoista kysyä, mitkä ovat tämän kehityksen rajat. Pienuuden rajoja ei ole vielä päästy testaamaan, mutta kylmyyden raja on tiedossa: absoluuttinen nollapiste eli -273 Celsius-astetta. Ja suurin mahdollinen nopeus on tietenkin valon nopeus, 300 miljoonaa metriä sekunnissa.




Nopeutta tarvitaan nykymaailmassa nimenomaan tietojenkäsittelyssä ja tiedonvälityksessä. Elektroniikka ja sähköinen sekä langaton tiedonvälitys ovat jo mahdollistaneet varsin hyviä tiedonsiirtonopeuksia, mutta miksi tyytyä hyvään, jos voi valita parasta? Tiedonvälityksessä onkin siirrytty viime vuosikymmenen aikana yhä enemmän siihen parhaaseen, eli *valoon*. Valokuitua asennetaan maailmalla useita kilometrejä sekunnissa ja tämä optinen tietoverkko tulee olemaan perusta tulevaisuuden verkottuneelle maailmalle ja taloudelle.



Optisessa tiedonvälityksessä on kuitenkin tällä hetkellä yksi rajoite: valo on kyllä nopeaa, mutta se on myös villiä ja vapaata. Eli sen prosessointi on vaikeaa - *optisia kytkimiä ja transistoreita* on vaikea valmistaa.



Valoa on myös vaikeaa vangita paikalleen halutuksi ajaksi, eikä *optisten muistien* toteuttamiseksi ole vielä löydetty ratkaisevaa ideaa. Siksi optisten tietoverkkojen osana käytetään vielä tällä hetkellä perinteistä elektroniikkaa, joka on valon nopeuden ja kaistanleveyden antamaan potentiaaliin verrattuna hidasta. Ratkaisu optisten kytkimien ja muistien kehittämiseen saattaa löytyä uusista epälinearisista materiaaleista. Teknillisessä korkeakoulussa on alkamassa tähän liittyviä tutkimushankkeita.



Tietoliikenneverkkojen muuttuminen täysin optiseksi saattaa kenties olla ratkaiseva tekijä yhä suuremman tiedonsiirtokapasiteetin luomisessa. Tämä mahdollistaa tietenkin joukon e-alkuisia asioita: *e-mail, e-commerce, e-business, e-learning, e-elämä...* mikä sitten on näiden asioiden merkitys ihmiselle, meneekin jo yksinkertaisen fysiikan kompetenssialueen ulkopuolelle.



## Laskennallista tiedettä



Kvantti-ilmiot ovat monimutkaisia ja usein niiden kokeellinen testaaminen on vaikeaa ja kallista, koska vaaditaan matalia lämpötiloja ja suurta tarkkuutta tutkittavan systeemin manipuloinnissa ja mittauksessa. Tietokonesimulaatioilla on siten keskeinen rooli kvantti-ilmioiden ymmärtämisessä ja niiden soveltamisessa teknologiaan.



Kvantti-ilmioiden herkkyydestä johtuu myös, ettei useinkaan riitä tuntee vain itse ilmiötä. Yhtä oleellista on selvittää, miten ympäristön epätoivotut häiriöt, pienetkin sellaiset, vaikuttavat ilmiöön jota halutaan käyttää esimerkiksi kvanttitietokoneen rakentamisessa. Myös näiden lukuisten häiriötekijöiden simuloinnissa laskennallisen tieteiden menetelmät ovat tärkeitä.



Uusien ideoiden ja teknologisten komponenttien toimivuus ja vaikutus "oikeassa ympäristössä" - esimerkiksi uudet optiset komponentit suurissa tietoverkoissa - on myös usein äärimmäisen monimutkainen kysymys, jonka selvittämiseksi on turvaututtava laskennallisiin menetelmiin.

#### VIITTEET:



[1] P. Shor, Proceedings of 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, IEEE Comput. Soc. Press, p.124 (1994).

[2] Teoreettinen idea: J.I. Cirac and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. 74, 4091 (1995); kokeellinen toteutus: C. Monroe, D.M. Meekhof, B.E. King, W.M. Itano, and D.J. Wineland, Phys. Rev. Lett. 75, 4714 (1995).

[3] Uusimmat tulokset ioniloukku-quanttitietokoneesta: C.A. Sackett, D. Kielpinski, B.E. King, C. Langer, V. Meyer, C.J. Myatt, M. Rowe, Q.A. Turchette, W.M. Itano, D.J. Wineland, and C. Monroe, Nature 404, 256 (2000).



[4] E. Knill, R. Laflamme, R. Martinez, and C.-H. Tseng, Nature 404, 368 (2000).

[5] I. Bloch, M. Köhl, M. Greiner, T.W. Hänsch, and T. Esslinger, "Optics with an Atom Laser Beam", Phys. Rev. Lett. 87, 030401 (2001).

[6] P. Törmä and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. 85, 487 (2000); Editor's choice in Science 289, 697 (2000).



#### AIHEESTA ENEMMÄN:

Yleistä tietoa kvantti-informaatiosta sekä kirjallisuusviitteitä löytyy esimerkiksi artikkeleista A. Steane, Rep.Prog. Phys. 61, 117 (1998) ja D.P. DiVincenzo, Nature 393, 113 (1998) sekä Oxfordin yliopiston kotisivuilta osoitteesta <http://www.qubit.org/>.



*Kirjoittaja on dosentti ja Suomen Akatemian vanhempi tutkija Laskennallisen tekniikan laboratoriossa Teknillisessä korkeakoulussa ja 1.10.2001 alkaen professori Fysiikan laitoksella Jyväskylän yliopistossa. Kirjoitus perustuu esitelmään Tieteen päivillä 2001.*

