

# Tieteen popularisointi

## Kvanttipiirit

Esa Kivirinta

esakiv (at) gmail.com

---

Materiaali on tarkoitettu lukion fysiikan sähkömagnetismin oppitunneille lisämateriaaliksi sekä yleisesti lukion suorittaneille.

Materiaalissa käydään läpi yleisesti kvanttipiirien toimintaa ja käyttökohteita. Lisäksi kerrotaan kvanttioptiikan tutkimuksesta sekä yleisesti että erityisesti Oulun yliopistossa.



# Transistorit

Normaalien prosessorien ja erityisesti transistorien valmistaminen tarvitsee kvanttimekaniikan ymmärtämistä. Kvanttimekaniikka tutkii kaikkein pienimpien hiukkasten vuorovaikutuksia. Puolijohdeet, joiden pohjalle nykyinen digitaalitekniikka on rakennettu, vaatii puolijohdeiden atomirakenteen tarkkaa laskennallista ymmärtämistä. Tämä atomirakenne ja siellä liikkuvien elektronien mekaniikka on lähes täysin niin sanotun klassisen sähkömagnetismin ulkopuolella ja vaatii modernia kiinteän aineen fysiikkaa, joka on osa kvanttimekaniikkaa. Ensimmäiset digitaaliset tietokoneet kuitenkin käyttivät transistorien sijasta tyhjiöputkia, joita voi käsitellä täysin klassisella sähkömagnetismilla.

Sähköpiireissä kvanttimekaniikkaa vaatii mm. **Casimir-ilmiö**, joka on tärkeä osa modernia puolijohdepiiri- ja nanoteknologiaa. Se kuvaa toisiaan hyvin lähellä olevien johtavien metallilevyjen, tai johtavan metallin ja eristemateriaalin, välille syntyviä voimia. Tässä ilmiössä johtavan metallilevyn sähkökenttä muuttaa materiaalien atomien perustiloja niin että levyjen välille syntyy joko hylkivä tai puoleensavetävä vuorovaikutus. Näitä voimia ei jälleen pysty selittämään klassisella sähkömagnetismilla, jonka perusteella näiden materiaalin välillä kuuluisa olla vain hyvin heikko ns. Van der Waals -voima.

Uusimpien transistorien koot alkavat lähestyä yksittäisten atomien ja molekyylien kokoja. Koska transistorit täytyy rakentaa atomeista, niiden koko on absoluuttinen alaraja. Tämän takia perinteisten tietokoneiden laskentatehon eksponentiaalinen kasvu tulee pysähtymään pian, ellei tähän ongelmaan löydetä täysin uudenlaista ratkaisua. Yksi mahdollinen osittainen ratkaisu voisi olla kvanttietokoneet, joissa bittien sijaan laskenta tapahtuisi kubiteilla. **Kubitti** voi saada arvot 0 ja 1 kuten transistorin bittikin, mutta toisin kuin bitti se on ennen laskun suorittamista kummassakin arvossa yhtäaikaaisesti eli se on ns. **superpositiossa**. Vasta kubittia mitatessa se asettautuu jompaankumpaan arvoon. Tämä ero johtaa merkittävästi suurempaan laskentatehoon.

# Kvanttipiirit

Kvanttitietokoneet teoriassa pystyvät laskemaan tietyn tyyppisiä ongelmia merkittävästi nopeammin kuin perinteiset tietokoneet. Tällaisia ongelmia ovat esimerkiksi datan löytäminen todella nopeasti valtavasta tietokannasta tai monimutkaisten yhtälöiden ratkaiseminen hetkessä. Toisin sanoen kvanttipiireistä hyötyvät eniten ongelmat eli laskut, joissa on hyvin suuri määrä mahdollisia lopputuloksia mutta vain yksi tai muutama oikea ratkaisu. Eräs todennäköinen käyttökohteita on tekoälyt kuten esimerkiksi itseajavat autot. Kvanttitietokoneet eivät kuitenkaan pysty korvaamaan perinteisiä tietokoneita täysin, koska suuri osa laskuista ei ole tällaisia, kuten esimerkiksi videon lataaminen, purkaminen ja toistaminen näytöllä. Suurin osa tulevista käyttökohteista tulevat esille todennäköisesti vasta sen jälkeen, kun kvanttikoneet ovat saapuneet yleisesti käytettäviksi.

Vaikka edellä kuvatut kvanttitietokoneet eivät ole vielä täysin saavutettavissa, ensimmäiset teolliset askeleet näitä kohti on jo otettu. Yhdysvalloista kotoisin oleva **D-Wave Systems** -yritys on valmistanut tietokoneita, joissa koneen arkkitehtuuriin on lisätty kvanttimekaanisesti käyttäytyviä piirejä. Kyseiset piirit ovat ilmeisesti tyypistettyjä versioita tutkittaviin kubitteihin verrattuna. Kuitenkin näillä koneilla on ilmeisesti saatu hyvin positiivisia tuloksia, jotka osoittavat että kvanttitietokoneet pystyvät ratkaisemaan oikein aseteltuja ongelmia huomattavasti nopeammin kuin perinteiset tietokoneet. Lisäksi **IBM** on alkanut tarjota asiasta kiinnostuneille mahdollisuutta ohjelmoida ja käyttää 50-100 kubitin kokoista kvanttitietokonetta, kuitenkin ilmeisesti vain 5 kubittia kerrallaan. Projekti on avoin suurelle yleisölle ja sen tarkoitus on tuoda ihmisille mahdollisuus tutustua teknologiaan, kun se muuten olisi vain saatavilla tieteentekijöille ja insinööreille.

# Tutkimus

Oulussa kvanttipiireihin liittyvä tutkimus tapahtuu teoreettisen fysiikan laitoksella. Tarkemmin ottaen tutkimus keskittyy niin kutsuttuihin **kvanttioptiikkaan** ja **optomekaniikkaan**, joista kumpikin keskittyy tutkimaan sähkömagneettista säteilyä eli fotonien käyttäytymistä säteilynpaineen avulla. **Säteilynpaineella** kuvataan sitä hyvin pientä painetta, joka kohdistuu kaikkiin kiinteisiin pintoihin sähkömagneettisten kenttien kuten valon vaikutuksesta. Vaikka Oulussa tehtävässä tutkimuksessa hyödynnetään mikroaaltoja näkyvän valon sijaan, voidaan silti käyttää termiä kvanttioptiikka. Kuten laitoksen nimestä voi päätellä, tutkimus on teoreettista eli kvanttioptisten ilmiöiden analyttisten ratkaisujen etsimistä sekä numeeristen ratkaisujen mallintamista tietokoneilla. Itse piirien rakentaminen ja ilmiöiden testaaminen tapahtuu muualla, mm. Aalto-yliopiston kylmälaboratoriossa.

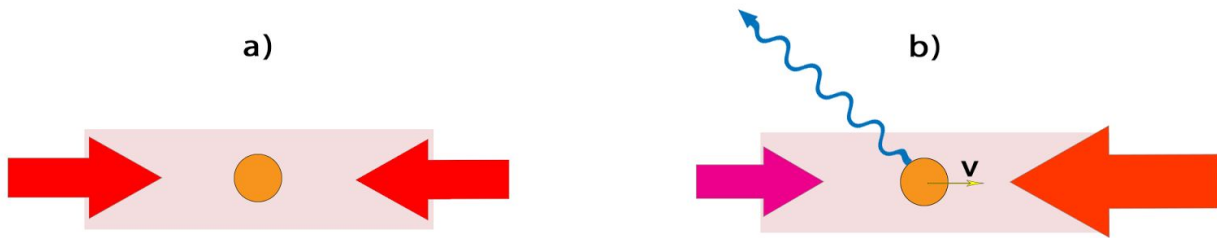
Yleensä tutkimuksen kohteena on yksittäinen **kubitti**. Kubitti tarkoittaa **kaksitilajärjestelmää** eli sähköisessä piirissä olevaa elementtiä, jolla on kaksi mahdollista energiatilaa. Erytisemmin tällaisen kubitin mahdollistava komponentti on ns. **Josephsonin liitos**, joka on nimetty fyysikko Brian David Josephsonin jälkeen. Kyseisessä liitoksessa on mahdollista havaita **Josephsonin ilmiö**, jossa saadaan aikaan supravirta eristekerroksen yli. **Suprajohde** on johdin, jonka ominaisvastus on kadonnut, ja supravirta on ilman vastusta kulkevaa virtaa. Ilmiö on todella mielenkiintoinen, koska Josephsonin liitos itsessään ei ole suprajohdava eikä liitoksen eri puolilla olevissa johtimissa ole jännitettä.

Oulusta valmistuneiden tutkimuspapereiden tulokset käsittelevät yleensä numeeristen mallien tehokkuutta, mittausmenetelmien ja tarkkuuden kehittämistä sekä yksittäisiä kubittien ominaisuuksia. Yleisesti tarkoituksena on kuvata jotain tiettyä suuretta numeerisella mallilla kuten esimerkiksi atomien elektronien energiatasoja, kun atomeita ionisoidaan lasereilla tai yksittäisillä fotoneilla. Kokeiltua mallia voidaan verrata oikeaan dataan sekä muihin aiempiin malleihin. Valitettavasti näiden aiheiden tarkempi käsittely vaatii hyvin pitkällistä fysiikan koulutusta ja tutustumista kvanttimekaniikkaan.

Päämotivaatio nykyiselle kvanttioptiikan tutkimukselle on tietenkin aiemmin mainitut kvanttietokoneet, joiden tutkimiseen ja kehittämiseen on lisätty rahoitusta viime vuosina huomattavasti. Toinen motivaatio kvanttioptiikan tutkimukselle kvanttietokoneiden lisäksi on äärimmäisen herkkien mittauslaitteiden ja menetelmien kehitys niin tutkimuksen kuin teollisuudenkin käyttöön.

Kvanttioptiikan tutkimuksesta on jaettu neljä fysiikan Nobelpalkintoa vuosina 1997, 2001, 2005 ja 2012. Vaikka tutkimusala on suurelle yleisölle lähes tuntematon, tutkijoiden piireissä sitä selvästi pidetään erittäin tärkeänä. Merkittäviä tutkimustuloksia alalta on mm. Doppler- eli laserjäähdyttäminen, kvanttilomittuminen, kvanttiteleportaatio sekä kvanttiportti. **Kvanttilomittumisessa** kaksi kvanttimekaanisesti toimivan järjestelmän tilaa on yhteydessä niin että niiden käyttäytyminen täytyy käsitellä yhdessä välimatkasta riippumatta. **Kvanttiteleportaatiossa** yksittäiset hiukkaset voidaan siirtää täysin muuttumattomina lomittumisen ansiosta paikasta toiseen, vaikkakin korkeintaan vain valonnopeudella. **Kvanttiportti** on vastine normaalien sähköpiirien logiikkaportteille, joskin

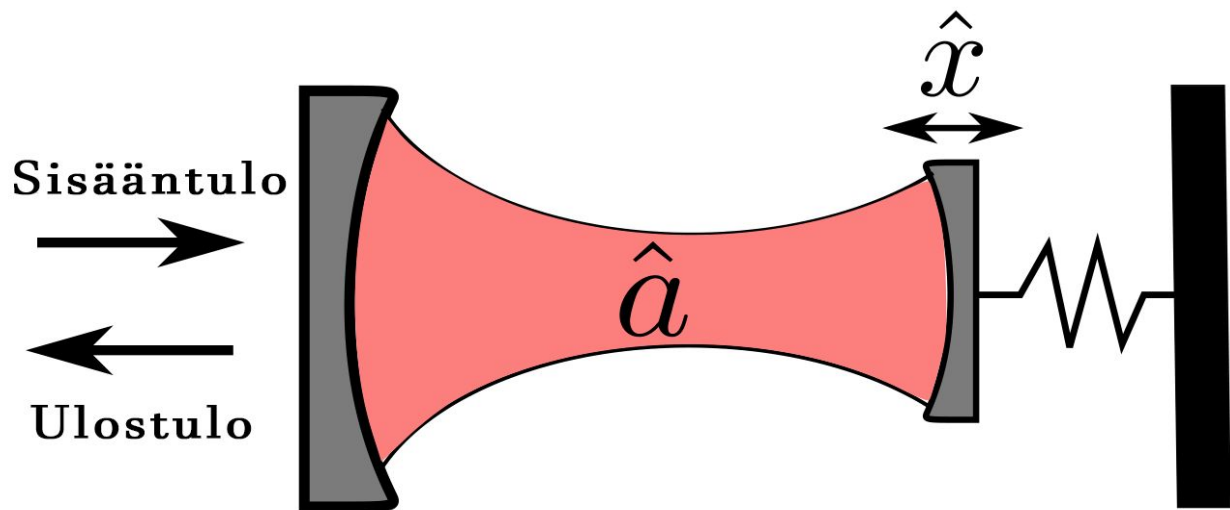
kvanttiporttien toiminta on ilmeisesti reversiibeli eli käännettävä, eli laskentaoperaatio voidaan palauttaa alkuperäiseen arvoonsa.



Kuva 1. **Doppler-jäähdytys** on kvanttioptinen ilmiö, jossa ionisoituneet atomit viilenevät, kun ne vangitaan laserien väliin.

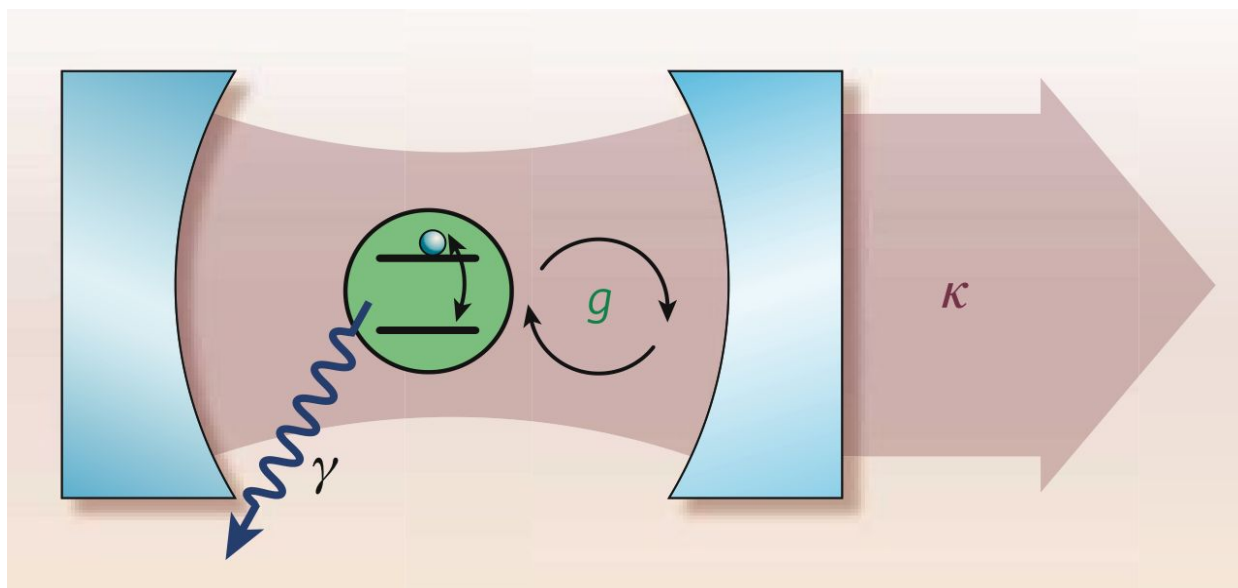
- Oranssi pallo on ionisoitunut atomi ja punaiset viivat lasereita, joiden aallonpituus on sama. Aallonpituutta vastaava energia on hieman matalampi kuin atomin joidenkin elektronien siirtymäenergia.
- Kun atomi liikkuu johonkin suuntaan se menettää liike-energiaansa, sillä nyt liikkumasuunnassa oleva laser on punasiirtymän takia matalammalla aallonpituudella ja sen takia jotkin atomin elektronit virittäytyvät. Purkautuessaan elektronit emittoivat fotonin, jolloin liike-energia laskee. Koska lämpötila on vain suuren atomijoukon liikettä, vangitun aineen lämpötila laskee.

Kuva: Esa Kivirinta



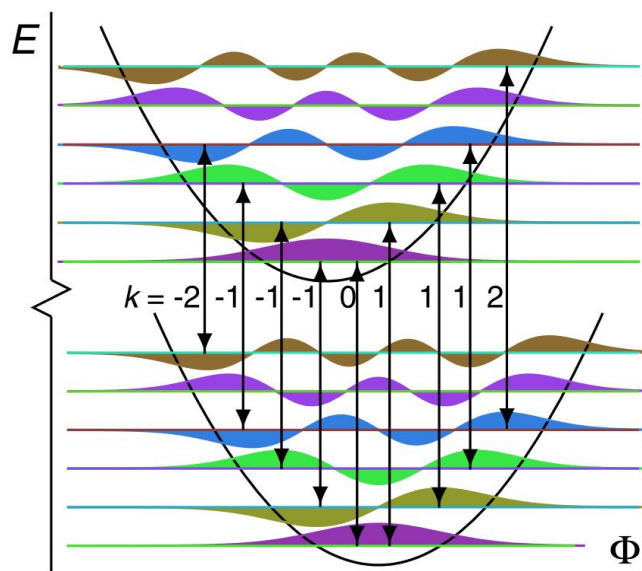
Kuva 2. Yleinen optomekaaninen tutkimusjärjestely jossa mekaanisen värähtelijän liike  $x$  on liitetty fotonitilaan. Kahden peilin välissä olevaa fotonitilaa  $\hat{a}$  ajetaan lasereilla samanvaiheisella amplitudilla. Mitattava suure on ulostuleva optinen spektri.

Kuva: A. Nunnenkamp, K. Borkje, S. M. Girvin: Single-photon Optomechanics, *10.1103/PhysRevLett.107.063602*



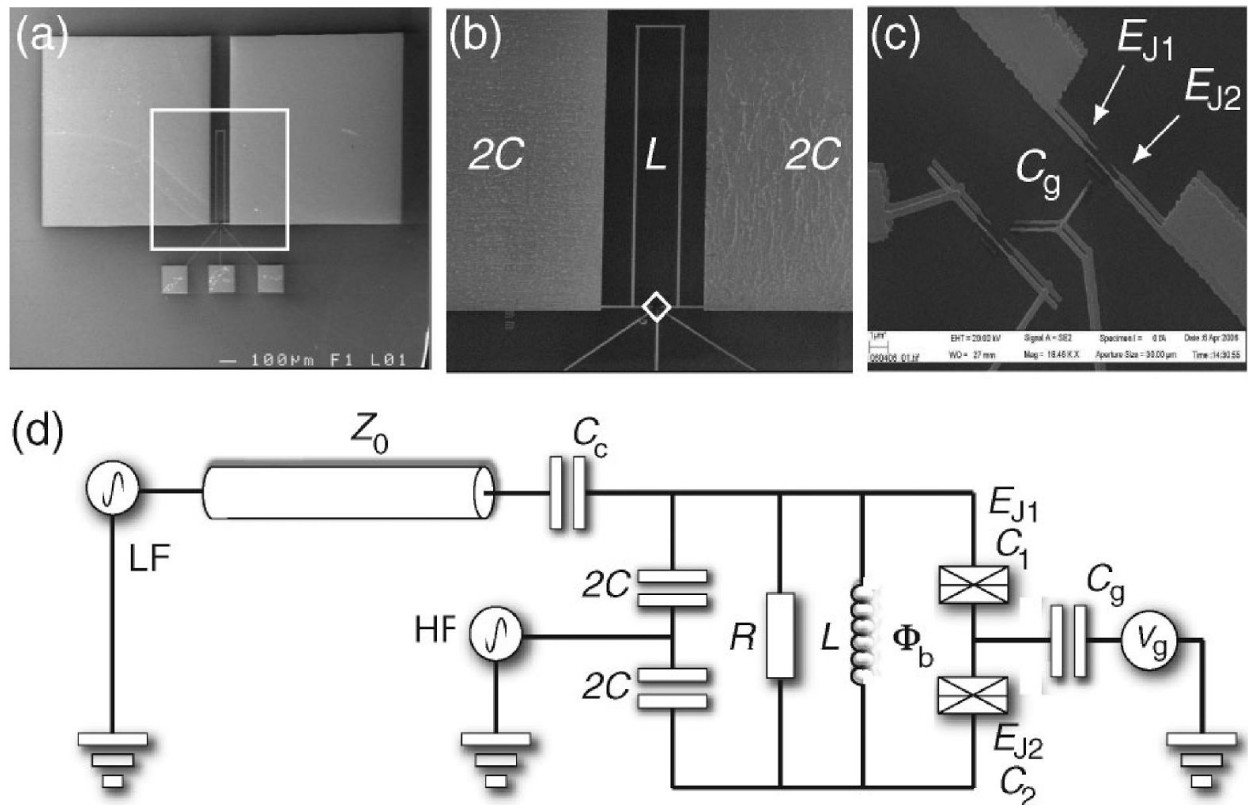
Kuva 3. Toinen yksinkertainen esimerkki optomekaanisesta tutkimusjärjestelystä. Kahden peilin väliin on vangittu vaaleanpunaisella taustalla merkitty fotonitila. Elektronia on merkitty sinisellä pallolla, joka pystyy täyttämään yhden kahdesta mahdollisesta energiatilasta. Atomin ja fotonin vuorovaikutusta kuvaa vakio  $g$ , fotonien katoamisesta johtuvaa energiahäviötä kuvaa vakio  $\kappa$ , ja vakio  $\gamma$  on atomin vuorovaikutuksia muiden kuin vangitun fotonitilan kanssa.

Kuva: R. J. Schoelkopf & S. M. Girvin: Wiring up quantum systems, *Nature* 451, 664-669(7 February 2008)



Kuva 4. Malli nanokokaisen keinotekoisin molekyylin matalimpien ominaisenergiatilojen siirtymistä. Ominaisilat aaltofunktoineen on kuvattu varjostetuilla alueilla. Voimakkaimmat siirtymät on nimetty värähdyskvantin  $k$  mukaisesti.

Kuva: David Gunnarsson, Jani Tuorila, Antti Paila, Jayanta Sarkar, Erkki Thuneberg, Yuriy Makhlin, ja Pertti Hakonen: Vibronic Spectroscopy of an Artificial Molecule, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.256806>



Kuva 5. Kuvassa tutkimuksessa käytetty kvanttimekaaninen piiri, jonka on tarkoitus simuloida keinotekoista kaksiatomista molekyyliä. Huomaa komponenttien suuret kokoerot. Kuva samasta lähteestä kuin kuva 4. (a) Kuvassa näkyy kaksi suurta kondensaattoria, kokoluokka on satoja mikrometrejä. (b) Tarkennus a-kohdasta kondensaattorien välistä, missä suurin osa muista komponenteista sijaitsee. (c) Kuvassa kaksi hyvin pientä Josephsonin liitosta, kokoluokka yksi mikrometri. (d) Piirikaavio keinotekoisesta molekyylistä kytkettynä heijastusmittauslaitteistoon.

Kuva: David Gunnarsson, Jani Tuorila, Antti Paila, Jayanta Sarkar, Erkki Thuneberg, Yuriy Makhlin, ja Pertti Hakonen: Vibronic Spectroscopy of an Artificial Molecule, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.256806>