

## KVANTTILASKENTAA LUKIOLAISILLE

**Elina Palmgren**, *Helsingin yliopisto*

**Tapio Rasa**, *Helsingin yliopisto*

**Antti Laherto** *Helsingin yliopisto*

**S**uuren yleisön keskuudessa kvanttifysiikka on tunnettu pahamaineisen vaikeana mutta myös uteliaisuutta herättävänä fysiikan osa-alueena. Kynnyskysymyksenä aiheeseen tutustumiselle lienee sen vaatima matematiikka: Jotta aihepiiriin pääsee kaivautumaan pintaa syvemmälle, sen ilmiöitä pitää tottua käsittelemään matematiikan keinoin – ja tarvittavaan matematiikkaan pääsee kiinni yleensä vasta korkeakouluopinnoissa. Lukiotasolla kvanttifysiikkaa käsitellään kvalitatiivisesti, mutta aihepiirin käsittelyssä päästään hädin tuskin raapaisemaan sata vuotta sitten kehitettyjä teorioita. Sama tilanne vaikuttaa olevan monen muunkin maan fysiikan toisen asteen koulutuksessa (Stadermann et al., 2019).

Uusimassa lukion opetussuunnitelmassa (LOPS, 2019) fysiikan viimeinen valtakunnallinen opintojakso nostaa aiempaa voimakkaammin esiin kvanttifysiikan teknologiset sovellukset sekä kvanttirakenteet. Opetussuunnitelman tulkinta on tietenkin opettajien, koulujen ja oppikirjojen tekijöiden käsissä, mutta uusi muotoilu antaa aiempaa enemmän mahdollisuuksia sisällyttää lukio-opetukseen myös edistyneempiä kvanttifysiikan teemoja.

Kvanttifysiikan aihepiiriä voidaan lukiotasolla lähestyä esimerkiksi tietotekniikan ja kvanttilaskennan kautta. Toteutimme opetuskokeilun, joka hyödynsi tätä lähtökohtaa ja esitteli lukiolaisille kvanttifysiikan peruskäsitteitä sekä kvalitatiivisella että kvantitatiivisella tasolla. Tässä jutussa kerromme opetuskokeilusta ja sen taustoista sekä käymme läpi kokeilusta saatuja tuloksia ja niiden mahdollista hyödyntämistä kvanttifysiikan opetuksessa.

### KVANTTILASKENTA: TULEVAISUUDEN ALA

Opetuskokeilu toteutettiin Erasmus+ -projektin ”I SEE” yhteydessä. Projektin tarkoituksena ei sinänsä ollut tarkastella kvanttifysiikan opetusta, vaan tutkia mahdollisuuksia yhdistää ns. tulevaisuusajattelun taitojen opetusta luonnontieteiden opetukseen lukiotasolla. Tulevaisuusajattelun taidot ovat kykyä ennakoida, rakentaa ja arvioida mahdollisia, toivottavia ja todennäköisiä tulevaisuusskenaarioita (ks. esim. Levrini et al., 2021). Tulevaisuusajattelussa on tärkeää osata suhtautua epävarmuuteen, kyseenalaistaa oletuksia ja tunnistaa vaikutusmahdollisuuksia. Viime aikoina tällaisten taitojen merkitys on havaittu laajasti eri koulutusasteilla: tulevaisuusajattelun taidot näkyvät esimerkiksi uusimmissa lukion opetussuunnitelman perusteissa (LOPS, 2019) ja Helsingin yliopiston juuri alkaneessa opetussuunnitelmatyössä.

I SEE -kurssien konteksteiksi valittiin luonnontieteellisiä aihepiirejä, jotka ovat tulevaisuuden kannalta relevantteja sekä tieteellis-teknologisesti että yhteiskunnallisesti. Opetuskokeilujen aihepiireiksi valikoituneet teemat olivat ilmastomuutos, hiilensidonta, tekoäly ja kvanttilaskenta.

Kvanttilaskenta sopii tulevaisuusteemaisen kurssin aiheeksi erinomaisesti, koska se tarjoaa potentiaalisesti mahdollisuuksia globaalien ongelmien ratkaisemiseen, mutta saattaa synnyttää myös uhkakuvia. Näin ollen se tarjoaa runsaasti tilaisuuksia niin tieteellisten, teknologisten kuin sosiaalistenkin näkökulmien pohdintaan. Lisäksi se on omiaan herättämään opiskelijoiden mielenkiinnon. Erityisen kutkuttavan aihepiirin kvanttilaskennasta tekee se, ettemme tunne sen täyttä potentiaalia; vasta aika näyttää, mihin kaikkeen se voi yltyä.

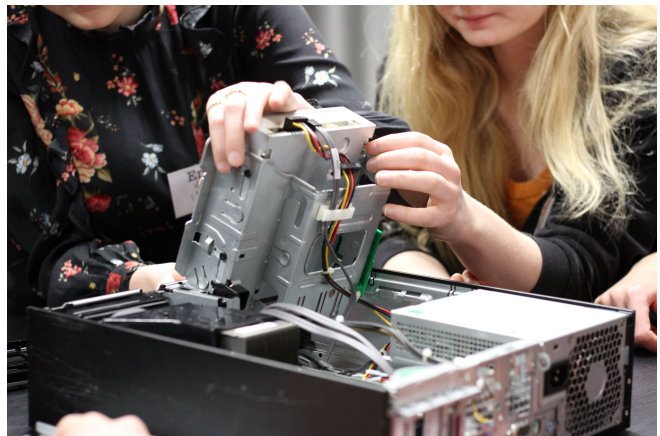
## OPETUSKOKEILU

Kvanttilaskentakurssi toteutettiin projektin yhteydessä kahdesti Suomessa ja kerran Italiassa. Keskitymme tässä kirjoituksessa pääasiassa ensimmäiseen suomalaiseen opetuskokeiluun keväältä 2018. Tällöin kurssi pidettiin kahden viikonlopun ja yhden illan mittaisena Helsingin yliopiston Tiedekulmassa. Kurssia mainostettiin opettajien kautta lukiolaisille, joista valittiin ilmoittautumisjärjestyksessä 10 nais- ja 12 miesopiskelijaa. Opiskelijoiden iät vaihtelivat 16 ja 19 vuoden välillä ja mukana oli osallistujia kaikilta kolmelta lukion vuosiluokalta sekä yksi yhdeksäsluokkalainen.

Kurssin sisältö yhdisteli kvanttifysiikka- ja tulevaisuusnäkökulmia. Kurssilla keskusteltiin tietotekniikan kehityksestä ja ennustamisen haasteista, opiskeltiin luovan ja systeemisen ajattelun taitoja ja harjoiteltiin erilaisia skenaariorakentamisen tapoja. Kurssin punaisena

lankana toimivat opiskelijoiden ryhmätyöt, joita he työstivät läpi kurssin ja joissa heitä pyydettiin kehittelemään tietotekniikkaan tai kvanttilaskentaan pohjaava ratkaisunsa johonkin globaaliin ongelmaan. Näin kurssin aikana syntyi joukko tulevaisuusskenaarioita, jotka esiteltiin juhlavassa loppuseminaarissa: opiskelijat eläytyivät 2040-luvulle ja kertoivat tarinan siitä, kuinka olivat itsekin osallistuneet globaalin haasteen ratkaisuun kvanttilaskennan avulla.

Itse kvanttilaskentaa lähestyttiin kurssilla klassisen laskennan kautta. Aiheeseen perehtymisen alkoi historiallisella katsauksella tietokoneiden ja laskentateknologian kehitykseen. Tätä kautta opiskelijoille esiteltiin myös perusajatus informaation esittämisestä binäärilukujen avulla. Lisäksi opiskelijat tutustuivat tavallisten



pöytätietokoneiden komponentteihin ja tietokoneen toimintalogiikan peruskäsitteisiin, kuten loogisiin portteihin ja yksinkertaisiin algoritmeihin.

Klassiseen laskentaan ja tietokoneiden historialliseen kehitykseen perehdyttiin ensimmäisenä kurssiviikonloppuna. Osalle opiskelijoista aiheet olivat ennalta tuttuja, mutta läheskään kaikki eivät olleet ennen esimerkiksi nähneet, miltä tietokone näyttää sisältä.

Toisena kurssiviikonloppuna opiskelijat pääsivät tutustumaan kvanttimekaniikan logiikkaan,

jota havainnollistettiin yksinkertaisen kaksitasosysteemin<sup>1</sup> avulla. Samassa yhteydessä opiskelijat johdateltiin huomaamaan, että kaksitasosysteemi sopii hyvin edellisenä viikonloppuna esitellyn binäärisen informaation esitykseksi. Koska kyseessä kuitenkin on kvanttifysiikka, oman lisämausteensa esitykseen toivat superpositio ja todennäköisyystulkinta, jotka selitettiin käsitteinä opiskelijoille.

Opiskelijoiden kanssa keskusteltiin kvanttiteokoneiden mahdollisista sovelluksista, ja klassisen ja kvanttilaskennan eroavaisuuksia pohdittiin erityisesti laskentatehon kannalta. Kvanttiohjelmointiin tutustuttiin yksinkertaisimpien kvanttiporttien ja -algoritmien kautta (monimutkaisimpana esimerkkinä Deutschin algoritmi) ja opiskelijat pääsivät kokeilemaan kvantti-algoritmin rakentamista IBM Quantumilla (quantum-computing.ibm.com).

## OPETUSKOKEILU

Kurssin jälkeen kaikki opiskelijat haastateltiin. Osana haastatteluja opiskelijoita pyydettiin ratkaisemaan kvalitatiivinen kvanttifysiikan tehtävä, joka oli sovellettu oppikirjasta McIntyre et al. (2012, s. 19–20). Tehtävässä pyydettiin opiskelijoita päättämään mittaustodennäköisyyksiä kahdessa eri tilanteessa: tehtävän ensimmäisessä osassa tarkastellaan superpositiossa olevaa kaksitasotilaa ja toisessa osassa kahden eri hiukkaslajin sekatilaa. Lopuksi opiskelijoilta kysyttiin, mitä eroja tilanteissa heidän mielestään oli. Tehtävä sisälsi kaikki kurssin oleellimmat kvanttimekaaniset käsitteet (tila, mittaustodennäköisyys, romahtaminen, superpositio) ja sen avulla haluttiin testata, kuinka hyvin opiskelijat olivat ymmärtäneet ne.

Näiden haastattelujen pohjalta yleiskuvaksi jäi, että kvanttiaihepiirin osaaminen vaihteli opiskelijoiden välillä voimakkaasti. Osalle tehtävä vaikutti olevan hyvin helppo, mutta osa ei tahtonut saada ajatuksesta kiinni. Vaikutelma oli, että osa opiskelijoista olisi tarvinnut enemmän aikaa asioiden sulatteluun. Toisaalta myös opiskelijoiden lähtötasot vaihtelivat paljon sekä fyysikassa, matematiikassa että tietotekniikassa, koska mukana oli opiskelijoita eri vuosiluokilta ja erilaisista lukioista. Yleisesti ottaen lukion toisen ja kolmannen vuoden opiskelijat pärjäsivät haastattelukysymyksessä keskimääräistä paremmin.

Haastatteluissa huomattiin myös, että opiskelijoiden oli vaikeaa yhdistää kvanttiasioita ja tulevaisuusteemoja, vaikka siltaa näiden välille yritettiin kurssilla rakentaakin. Epäilemme tämän johtuvan ainakin osittain siitä, että kvanttilaskennan käytännön sovellukset ovat edelleen tulevaisuuden skenaarioita, eikä kurssilla siksi voitu puhua sovelluksista muuten kuin teoreettisella tasolla. Osittain tästä syystä “I SEE”-projektin italialaiset partnerit päättivät omalla kurssillaan korvata Deutschin algoritmin käsittelyn kvanttiteleportaatiolla. He ovat analysoineen teleportaatioaktiiviteettia tuoreessa artikkelissaan Satanassi et al. (2021)

## TEKNOLOGISIA UTOPIOITA JA DYSTOPIOITA

Haastatteluaineistojen tarkempi analyysi (Rasa et al., 2022) paljasti, että opiskelijat kokivat erityisesti tulevaisuusteeman pohtimisen antoisana ja reflektoivatkin tulevaisuusajattelunsa muutuneen kurssin myötä. Haastattelujen mukaan opiskelijoiden ajatukset tulevaisuudesta muuttuivat kahtalaisesti: yhtäältä tulevaisuus nähtiin

<sup>1</sup> Ensi alkuun käsiteltiin kuvitteellisia kvanttilioita, joiden voitiin mitattaessa havaita olevan väriltään joko punaisia tai sinisiä ja muodoiltaan joko kolmioita tai neliötä. Kun peruslogiikka oli tullut opiskelijoille tutuksi, väri ja muoto korvattiin elektronin spinin komponenteilla.

epävarmempana ja arvaamattomampana, mutta toisaalta myös myönteisempänä. Sama ilmiö havaittiin opiskelijoiden ajatuksissa teknologisesta kehityksestä ja sen vaikutuksesta joko yleisesti tai kvanttilaskennan tapauksessa. Opiskelijat käyttivätkin ilmaisuja kuten “mitä vain voi tapahtua”, “pitää oppia ajattelemaan luovasti” tai “tiedän vielä vähemmän kuin ennen mitä tulevaisuudessa tapahtuu”. Toiset opiskelijat kertoivat, että “aiemmin ei tajunnut, että maailma edelleen muuttuu ja että kaikkea ei vielä tiedetä”. Moderni fysiikka haasteellisudessaan tarjosikin kurssilaisille näköalan tieteellisen tiedon horisonttiin.

Tämä tulevaisuuden avoimuuden tarkastelu on pedagogisesti kiinnostava ilmiö. Tulevaisuutta käsittelevä kasvatus, samoin kuin kvanttifysiikka, vaatii niin opettajalta kuin opiskelijaltakin heittäytymistä epävarmalle alueelle, mikä voidaan kokea positiivisestikin. Osa opiskelijoista esimerkiksi liitti tulevaisuuden epävarmuuteen mahdollisuuden toimijuudelle: jos kaikkea ei tiedetä, niin silloin omasta osaamisesta voi olla hyötyä. Samoin jos tulevaisuus ei ole ennalta määrätty, asioihin voi vaikuttaa. Opiskelijat painottivat kuitenkin, etteivät kokeneet voivansa vaikuttaa maailmaan yksinään: kurssi olikin lisännyt toiveikkuutta osoittamalla, että muutkin ikätoverit pohtivat suuria kysymyksiä esimerkiksi kestävyysaasteista.

Kuten aiemmin mainittiin, kvanttilaskennan liittäminen yleisiin tulevaisuuspohdintoihin oli osalle opiskelijoista haastavaa. Vaikka jotkut opiskelijat näkivät kvanttilaskennan mahdollisuuksien ja riskien kautta (“joko edistää tai pahentaa asioita, ei voi tietää”) ja osa taas analogioiden avulla (“tulevaisuus on vähän niin kuin kvanttipiiri, pitää ajatella eri tavalla”), toiset opiskelijat kokivat tulevaisuusajatteluun ja kvanttilaskentaan liittyvät kurssiaktiviteetit lii-

an erillisinä. Kvanttilaskenta onkin haastava konteksti yhteiskunnallisesti relevantille tie-deopetukselle abstraktiutensa ja verrattain vähäisen tuttuutensa vuoksi. Osa opiskelijoista tuntui kuitenkin hahmottavan jatkumon tieteellisen osaamisen, teknologisten sovelluksien ja niiden yhteiskunnallisten vaikutusten välillä.

## MITÄ KOKEILUSTA JÄI KÄTEEN?

Kokemustemme perusteella kvanttifysiikan kvantitatiivinen käsittely lukiotasolla on mahdollista ja antoisaa. On kuitenkin hyvä huomata, että opetuskokeilussamme opiskelijajoukko oli hyvin valikoitunut, eivätkä kokemuksemme välttämättä yleisty koskemaan kaikkia fysiikkaa pidemmälle opiskelevia lukiolaisia. Uskomme kuitenkin, että kvanttifysiikan ja -laskennan keskeisimpien käsitteiden kuten superposition ja mittaustodennäköisyyden oppiminen kvalitatiivisella tai semi-kvantitatiivisella tasolla on kaikkien lukiolaisten ulottuvissa. Kvanttifysiikan tuominen tiiviimmin osaksi lukion fysiikan opetusta vaatisi kuitenkin todennäköisesti opettajien täydennyskoulutusta, koska teemat ovat monilta osin täysin uusia fysiikan aineenopettajille: harva opettaja on opintojensa aikana ehtinyt tutustua esimerkiksi kvanttilaskentaan. Lisäksi kvanttifysiikan oppimista ja opettamista olisi tärkeää tutkia lisää, jotta löydettäisiin parhaat keinot tehdä vaikea aihepiiri helpommin lähestyttäväksi opiskelijoille.

Opetuskokeilumme toisen kohteen, tulevaisuusajattelun taitojen, hyödyntäminen lukion luonnontiedeopetuksessa vaatii niin ikään lisätutkimusta. Tähän mennessä voidaan varmuudella sanoa, että tulevaisuusajattelun taitojen integroiminen luonnontiedeopetukseen onnistuu ainakin tiettyjen teemojen (esimerkiksi ilmastomuutoksen) kohdalla erinomaisesti ja että ne voivat tarjota opiskelijoille voimaannuttavia toimijuuden kokemuksia maailmassa, josta on

tullut entistä arvaamattomampi. Tätä tutkimusta jatketaan ”Fedora”-projektissa (fedora-project.eu).

**Kaikkien “I SEE” -kurssien opetusmateriaalit ovat vapaasti ladattavissa projektin verkkosivuilta ([iseeproject.eu](http://iseeproject.eu)).**

*Haluamme kiittää kaikkia “I SEE” -projektin partnereita, opetuskokeilun suunnitteluun ja datan analysointiin osallistuneita sekä ennen kaikkea kurssille osallistuneita opiskelijoita!*

## Lähteet

Levrini, O., Tasquier, G., Barelli, E., Laherto, A., Palmgren, E., Branchetti, L., & Wilson, C. (2021). *Recognition and operationalization of Future-Scaffolding Skills: Results from an empirical study of a teaching-*

*learning module on climate change and futures thinking.* Science Education, 105(2), 281–308.

McIntyre, D. H., Manogue, C. A., & Tate, J. (2012). *Quantum mechanics: A paradigms approach.* Boston: Pearson.

Opetushallitus 2019. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019. Helsinki.

Rasa, T., Palmgren, E., & Laherto, A. *Futurising science education: students’ experiences from a course on futures thinking and quantum computing.* Instr. Sci. (2022).

Satanassi, S., Ercolessi, E., & Levrini, O. (2022). *Designing and implementing materials on quantum computing for secondary school students: The case of teleportation.* Physical review physics education research, 18(1).

Stadermann, H. K. E., van den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). *Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic.* Physical review physics education research, 15(1).

