

Petzin palautuskuvaus avoimille one-to-all-mallin kvanttisysteemeille

Juha Torvinen^{1,2}

¹⁾ Fysiikan osasto, PL 3 (Fabianinkatu 33), FIN-00014 Helsingin yliopisto

²⁾ CSC – Tieteen tietotekniikan keskus oy, PL 405 (Keilaranta 14), 02101 Espoo

Kvanttitekniologian sovelluksien, kuten kvanttilaskennan myötä kiinnostus erilaisia kvantti-informaatioteorian löytöjä kohtaan on lähtenyt räjähdysmäiseen kasvuun. Kaupallisesti näistä sovelluksista menestynein lienee kvanttilaskenta, jonka nousu yhdeksi puhutuimmista ja rahoitetuimmista tutkimuskohteista on aiheuttanut kvantti-informaatioteorian tutkimukselle uuden kulta-ajan. Vuosikymmeniä sitten kynällä ja paperilla tuotetuille tuloksille löydetään jatkuvasti lisää mielenkiintoisia ja fysikaalisesti mielekkäitä toteutuksia, joista myös tämän seminaarin takana oleva tutkimus on saanut alkunsa.

Petzin palautuskuvaus on matemaattinen työkalu, jolla pyritään löytämään tehokas operaatio kvanttitilojen koherenssin palauttamiselle. Kvanttisysteemit eivät ole koskaan täysin eristettyjä, ideaalisia systeemejä ja etenkin fysikaalisissa tilanteissa niiden kvanttitilat tapaavat menettää kvanttiominaisuutensa eli koherenssinsa hyvin nopeasti. Yleensä tämänkaltaisen dekoherenssiprosessi on tarkkailtua systeemiä suuremman ympäristön aiheuttama ilmiö, ja ympäristön vaikutuksen johteesta puhutaankin avoimista kvanttisysteemeistä. Avoin systeemi jaetaan yleensä karkeasti kahdeksi alisysteemiksi, eli pääsysteemiksi ja ympäristöksi, jotka voidaan vielä jakaa omiksi alisysteemeikseen. Avoimet kvanttisysteemit voidaan ymmärtää kutakuinkin analogiseksi klassisen termofysiikan avoimen systeemin kanssa, mutta ehtona onkin nyt, että ympäristön kanssa vaihtuu energiaa ja informaatiota. Unkarilaisen Dénes Petzin vuonna 1986 ehdottama palautuskuvaus on lupaava kandidaatti aseeksi ympäristön aiheuttamaa dekoherenssiä vastaan. Lyhyesti selitettynä, kuvaus pyrkii hyödyntämään tietoa systeemin ominaisuuksista vastaprosessin luontiin, joka pystyisi kumoamaan alkuperäisen dekoherenssin vaikutukset täysin, tai edes osittain.

Tämä seminaari esittelee Petzin palautuskuvauksen peruseräilyä ja käsittelee sen hyötyjä ja haittoja. Lisäksi tutustumme kuvauksen soveltamiseen kvanttilaskennan parissa, johon käytämme kandidaatintutkimani tuloksia, sekä vuoden 2025 kesällä Tieteen tietotekniikan keskuksella tuotettuun tutkimukseen pohjautuvia tuloksia. Tuloksien yhteydessä on käytetty one-to-all-mallia, jossa yksi kvanttisysteemi, tässä kubitti eli kvanttibitti, on kytkettynä ympäristöön, joka koostuu monesta kubitista. Kiinnostuksen kohteena näissä systeemeissä on lähes aina pääsysteemi, joka on kytkettynä ympäristöön, sillä vuorovaikutusmallin tarkoitus on kuvailla nimenomaan pienemmän systeemin kokeamaa dekoherenssiä. Tällä mallilla on iso ja historiallinen rooli dekoherenssin tutkimisessa, joten motivaatio sen käytölle on ilmeinen. Lisäksi kubittien käyttö auttaa motivoimaan tutkimusta kvanttilaskennan kautta. Tuloksina käsitellään ensin yksinkertaistettua one-to-one-mallia, jossa yksi kubitti toimii ympäristönä ja toinen dekoherenssin alaisena pääsysteeminä. Lisäksi esitellään yleistetty monen kubitin malli, jossa yksi kubitti on liitetty vaihtelevasti erikokoisiin kubittiympäristöihin.

Simulaatiot toteutettiin antamalla vuorovaikutuksen kubittien välillä tapahtua jonkin aikaa, jonka jälkeen etsittiin paras mahdollinen palautus tilanteeseen nähden kokeilemalla erilaisia palautuksia parametrien variaatiolla. Tuloksien perusteella one-to-one-mallille voidaan löytää aina Petzin palautuskuvaus, joka lähes täydellisesti palauttaa systeemin alkuperäiseen tilaansa, etenkin puhtaiden tilojen tapauksessa. Jatkotutkimuksessa on kuitenkin löydetty suurempien ympäristöjen malleja, joille Petzin käyttö on huomattavasti monimutkaisempaa. Tämä johtuu esimerkiksi itse kuvauksen rakenteen heikkouksista, sekä suurempien ympäristöjen aiheuttamasta voimakkaasta dekoherenssistä. Seminaarin tulokset ovat osana myös käynnissä olevaa tutkimusta Helsingin yliopistolla Quantum Fields, Gravity and Information -ryhmässä.