

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Numeeriset kvanttivirhekorjausmenetelmät kvanttikommunikaatioon

Akatemiatutkija Matti Silveri, Nano- ja molekyyllisysteemien tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto
Professori Mikko Möttönen, Teknillisen fysiikan laitos, Aalto-yliopisto

Tiivistelmä: Kvanttivirheenkorjaus on menetelmä kvanttivirheiden aiheuttamien muutoksien tunnistamiseen ja alkuperäisen kvanttitilan ja kvantti-informaation palauttamiseen. Virheenkorjauksen avulla voidaan pidentää kubittien elinaikoja sekä laskea kvanttiporttien virhetasoja, jolloin pystytään tekemään entistä monimutkaisempia ja hyödyllisempiä kvanttilaskuja sekä lähettämään pidemmälle ja luotettavammin kvanttialattuja viestejä. Yleisimmät virhekorjausmenetelmät on rakennettu ideaalisten virhemallien pohjalle, jotka soveltuvat tilanteisiin, joissa kubitit ovat heikosti kytkettyneitä ympäristöönsä tai tarkasteltavat aikaskaalat ovat pitkäkähköjä. Lisäksi perustavanlaatuinen avoin kysymys on ollut, että, mitkä ovat kvanttivirheenkorjausmenetelmien toimintarajat suhteessa esimerkiksi lyhyisiin aikaskaaloihin tai ympäristön kytkentävoimakkuuksiin. Tässä hankkeessa käytimme numeerisia menetelmiä sekä suurteho-laskentaa ja selvitimme tavallisten kvanttivirhekorjausmenetelmien toimintarajat, joka on uusi perustavanlaatuinen teoreettinen tieteellinen tulos. Käytännöllisesti katsoen toimintarajat ovat onneksi niin laveat, että ne eivät tule rajoittamaan nykyisten tai tulevien kvanttilaitteiden toimintaa. Tällä hetkellä kvanttiprosessoreita on käytössä tutkimusryhmien omien laboratorio-laitteiden lisäksi ns. online-kvanttitietokoneina. Esimerkkejä tällaisista ovat yhdysvaltalainen/kansainvälinen IBM-Q-palvelu ja suomalainen VTT:n ja IQM:n Helmi-kvanttitietokone, jotka ovat vapaasti käytettävissä tutkimuskäyttöön. Hankkeen toisessa osassa käytimme näitä online-kvanttitietokoneita testaamaan perusvirheenkorjausmenetelmien sekä itse kvanttitietokoneiden käytäntöä. Kokeellisen osion tavoite oli tuottaa kuva virhekorjausmenetelmien sekä itse kvanttitietokoneiden todellisesta toimintakyvystä. Online-koneiden käyttörajapinnat ovat toimivia. Virhekorjausalgoritmit vaativat matalia kvanttiporttien virhetasoja. Testatuissa online-kvanttitietokoneissa kontrolloitujen kaksi-kubitti-kvanttiporttien korkeahkot virhetasot mahdollistivat vain virhekorjausmenetelmien erillisten osa-alueiden testaamisen. Loppupäätelmänä todetaan, että virhekorjausmenetelmät ovat tärkeä sekä kvanttilaskennan ja -kommunikaation osa-alue, joka vaaditaan, että voidaan saavuttaa seuraavan teknologisen sukupolven virhekorjatut ja vikasietoiset laskenta- ja viestintäsovellukset. Samoin kvanttiporttivirhetasojen parantuessa ja kubittilukumäärän kasvaessa online-kvanttitietokoneet tulevat olemaan tärkeä alusta kvanttiohjelmistojen, -ohjelmoinnin ja algoritmien kehittämiseksi ja testaamiselle.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihe 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

1. Johdanto

Kvanttitekniologia: Nykyisten informaatioteknologioiden toimintaperiaate pohjautuu klassiseen sähkömagnetismiin. Kvanttitekniologia perustuu suoraan kvanttimekaniikkaan ja kvanttimekaanisten ominaisuuksien hallintaan. Keskiössä ovat siis lomittuminen, superpositio ja interferenssi. Kvanttitekniologiat ovat nopeassa kehitysvaiheessa sillä kokeelliset tekniikat ovat kypsyneet siten, että teknologiajätit, startup-yritykset sekä julkiset tutkimuslaitokset ovat rinnan intoutuneet kehittämään kvanttitekniologioita, erityisesti kvanttiprosessoreita ja kommunikaatiosovelluksia. Panostusten tähtäimessä on täysin uudenlainen laskentateho ja -sovellukset niin molekyyli- ja lääkekehitykseen, materiaalitieteeseen, koneoppimiseenkin kuin salattuun viestintäänkin. Suomessa kvanttitekniologioiden alalla toimii yliopistojen ja tutkimuslaitosten tutkimusryhmiä, Aalto-yliopiston johtama Suomen Akatemian Kvanttitekniologian huippuyksikkö sekä kvanttitekniologia-yrityksiä. Teknologinen tutkimuskeskus VTT on marraskuussa 2022 aloittanut ensimmäisen suomalaisen 5 kubitin kvanttitietokoneen koekäytön.

Kvanttivilheet: Kaikkia niitä prosesseja, jotka satunnaisesti muuttavat joko kubitin tai kubittien toimintaa ohjaavien kvanttiporttien toimintaa, kutsutaan kvanttivilheiksi. Tyypiesimerkkejä ovat kubitin tai sen vaiheen kääntövirhe. Tähän asti kvantti-informaation kehityksessä on keskitytty vähentämään kvanttivilheitä passiivisesti eli käyttämällä entistä parempia rakenteita, materiaaleja ja valmistusmenetelmiä. Passiiviset menetelmät ovat olleet tehokkaita sillä esimerkiksi suprajohtavien kubittien elinajat ovat pidentyneet yli 5 kertalukua reilussa 20 vuodessa: vuonna 1999 kvanttielinaika oli 1 ns ja nyt vuonna 2022 jo noin 300 μ s.

Kvanttivilheenkorjaus on aktiivinen, ns. software-pohjainen, menetelmä kvanttivilheiden aiheuttamien muutoksien tunnistamiseen ja alkuperäisen kvanttililan palauttamiseen. Virheenkorjauksella voidaan pidentää kubittien elinaikoja passiivisia menetelmiä pidemmälle, jolloin pystytään tekemään entistä monimutkaisempia ja hyödyllisempiä kvanttilaskuja sekä lähettämään pidemmälle ja luotettavammin kvanttisalattuja viestejä. Kvanttivilhekorjauksessa tavoitellaan hyvin matalia virhetasoja, jotta voidaan lopulta saavuttaa niin sanottu vikasetoinen kvanttilaskenta, jolloin pysytään ohjelmoimaan pitkiä algoritmeja ja murtamaan esimerkiksi RSA-salaus.

Kvanttivilheenkorjaukseen tunnetaan monia eri menetelmiä. Esimerkiksi sen sijaan, että hyödynnettäisiin vain yhtä kubittia kvantti-informaation alustana, kvanttivilhekorjauksessa käytetään lomittunutta kolmen kubitin tilaa, josta voidaan tunnistaa ja palauttaa yhden kubitin kääntövirheet. Yksinkertaisimmat sekä kubitin kääntö- että vaihevirheen korjaavat menetelmät koostuvat viidestä lomittuneesta fyysisestä kubitista.

Kvanttivilhekorjauksen käyttökohteet: Kvanttivilhekorjausmenetelmistä puhuttaessa kontekstina on yleensä kvanttiprosessorit, joissa virhekorjausta käytetään kvantti-informaation suojelemiseen, jotta voitaisiin suorittaa pidempiä ja tehokkaampia kvantti-algoritmeja. Toinen virhekorjauksen erinomainen sovelluskohde on kvanttisalaus ja -kommunikaatio. Kvanttisalaus (kvanttimekaaninen salausavaimen toimitus, quantum key distribution) perustuu taas siihen, että mittauksella on aina vaikutus kvanttimekaaniseen viestiin ja tällöin mahdollinen salakuuntelu tai muuten epäluotettavat kommunikaatiokanavat voidaan aina paljastaa. Kvanttikommunikaatiossa ja kvanttisalauksessa yleisesti ottaen lähetetään fotoneja ja niihin koodattuja kvanttimekaanisia tiloja. Tällaisessa kvanttikommunikaatiossa ongelmana on fotonien häviöt eli toisin sanoen signaalin väheneminen. Fotonihäviöt aiheuttavat sen, että kommunikaatiokanavan kantama jää lyhyeksi tai kommunikaation onnistumistodennäköisyys matalaksi. Tähän yhtenä hyvänä ratkaisuna on kvanttivilheenkorjaus, jolloin ei lähetetäkään vain yksittäisiä fotoneja vaan usempien fotonien muodostamaan tilaan koodattua kvantti-informaatiota, josta pystytään korjaamaan fotonien häviövirheet. Virheenkorjauksella ja ns. väliasematekniikalla kvanttikommunikaation kantama voidaan kasvattaa 100 km:stä aina mannerten välisiin etä-

syyksiin asti.

Kvanttitietokoneiden käytäntö: Tällä hetkellä kvanttiprosessoreita on käytössä tutkimusryhmien omien laboratoriolaitteiden lisäksi ns. online-quanttitietokoneina. Esimerkkejä tällaisista ovat yhdysvaltalainen/kansainvälinen IBM-Q-palvelu ja suomalainen VTT:n Helmi-quanttitietokone, jotka ovat vapaasti ja ilmaiseksi käytettävissä testi- ja tutkimuskäyttöön. Online-koneet ovat tärkeitä alustoja kvanttitietokoneiden käytännön, esimerkiksi kvanttiohjelmoinnin, - algoritmien ja kvanttiohjelmistokehityksen, tutkimukseen.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Hankkeen tutkimuskysymykset voidaan jakaa kolmeen kolmeen ryhmään.

1. Tunnetut virhekorjausmenetelmät perustuvat ideaalisille ja yksinkertaisille virhemalleille

- (a) Milloin ideaaliset virhemallit eivät enää ole päteviä?
- (b) Milloin tunnetut virhekorjausmenetelmät eivät enää toimi?

Yleisimmät virhekorjausmenetelmät on rakennettu ideaalisten virhemallien pohjalle, jotka soveltuvat tilanteisiin, joissa kubitit ovat heikosti kytkeytyneitä ympäristöönsä tai tarkasteltavat aikaskaalat ovat pitkäköjä. Lisäksi perustavanlaatuinen avoin kysymys on ollut, että mitkä ovat kvanttivirhekorjausmenetelmien toimintarajat suhteessa esimerkiksi aikaskaaloihin tai ympäristön kytkentävoimakkuuksiin. Koska virhekorjaus tähtää ultramataliin ja vikasietoisien kvanttilaskennan sallimiin virhetasoihin, on tärkeä tietää, että tuottavatko ideaaliset virhemallit joitain ennalta tuntemattomia, mutta pieniä virhelähteitä, jotka voisivat hankaloittaa erittäin matalien virhetasojen saavuttamista.

2. Virhekorjausmenetelmien toteuttaminen ja testaaminen kvanttitietokoneilla

- (a) Mitkä ovat nykyisten kvanttitietokoneiden toiminnalliset rajoitteet ja potentiaali suhteessa kvanttivirhekorjausmenetelmien toteuttamiseen?
- (b) Mikä on yleisesti ottaen online-quanttitietokoneiden ja kvanttiohjelmoinnin tämänhetkinen taso ja käytäntö kansainvälisesti ja kansallisesti?

Tässä hankkeessa olemme halunneet käyttää online-quanttitietokoneita testaamaan perusvirhekorjausmenetelmien sekä itse kvanttitietokoneiden käytäntöä. Kokeellisen osion tavoite on tuottaa kuva virhekorjausmenetelmien sekä itse kvanttitietokoneiden todell-

lisestä toimintakyvystä

3. Parempien virhekorjausmenetelmien kehittäminen

(a) Analyttiset menetelmät

(b) Numeeriset menetelmät sisältäen koneoppiminen

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli kehittää tutkimuskysymyksiensä 1 ja 2 pohjalta saamiemme tietojen avulla entistä parempi, uusia virhekorjauskoodeja käyttäen sekä analyttisiä, matemaattisiin rakenteisiin pohjautuvia, että puhtaasti laskennallisia esimerkiksi kone-oppimiseen pohjautuvia menetelmiä.

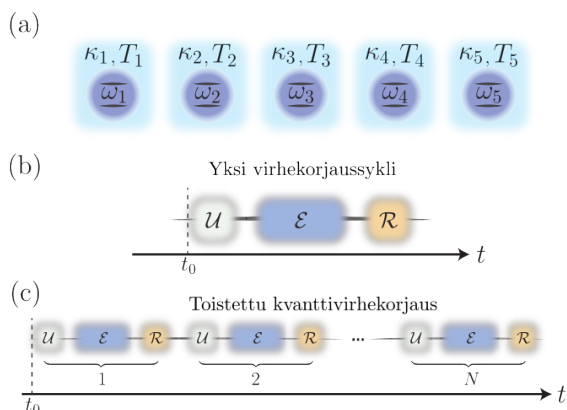
3. Aineisto ja menetelmät

Hankkeessa käytimme kolmen tyyppisiä menetelmiä: 1. Numeerista simulointia kubittijoukon aikakehityksen selvittämiseen, 2. Teoreettisia ja analyttisiä menetelmiä kvanttivirhekorjauskoodien ja kubittijoukon aikakehityksen analysointiin, 3. Online-quanttietietokoneiden ohjelmointia eli ns. kvanttinumeriikkaa.

1 Numeeriset menetelmät: Ympäristön aiheuttamia virheitä kubittijoukolle mallinsimme kahdelle eri mallilla: Lindblad-aikakehitysyhtälö ja stokastinen Liouville-yhtälö. Tavallinen Lindblad-yhtälö edustaa yksinkertaistettua ja idealisoitua ympäristön virhemallia. Se kuvaa kubiteille tapahtuvat virheet satunnaisina kubitin virityksinä ja virityksen purkautumisina. Virityks- ja virityksen purkautumisvirheet tapahtuvat todennäköisyyksillä, jotka riippuvat ympäristön kytkennän voimakkuudesta ja ympäristön lämpötilasta.

Stokastinen Liouville-yhtälö kuvaa kubittijoukon ja ympäristön aikakehitystä numeerisesti tarkasti huomioiden virityks- ja virityksen purkautumistapahtumien lisäksi myös ympäristön ja kubittijoukon keskinäiset korrelaatiot ja lomittumisen ja siitä johtuvan dekoherenssin. Nimensä mukaisesti stokastinen Liouville-yhtälö sisältää stokastisen eli kohinaan pohjautuvan aikakehitysosan. Tämä aiheuttaa sen, että lopputuloksen saadakseen stokastisen yhtälön tuottamaa kubittijoukon aikakehitystä on keski-arvoistettava monien kohinarealisaatioiden yli, mikä tekee menetelmästä numeerisesti raskaan. Tämän vuoksi aikaisemmin on pystytty kuvaamaan vain kahden kubitin tarkkaa aikakehitystä. Hankkeessa pystyimme laajentamaan menetelmän viidelle kubitille, mikä on merkittävä tekninen saavutus. Tärkeimpiä numeerisen mallintamisen innovaatioitamme oli siirtää aikaisemmat numeeriset ohjelmat tehokkaammalle C++-kielelle sekä käyttää Krylov-aliavaruusmenetelmää ja Magnus-ekspansiota kvanttimekaanisen monen kubitin aikakehityksen numeeriseen toteuttamiseen. Lisäksi hyödynsimme CSC:n tehokkaita Mahti- ja Puhti-supertietokoneita rinnakkaislaskentaan.

2. Teoreettiset ja analyttiset menetelmät: Hankkeessa tutkimme kolmen, neljän ja viiden



Kuva 1: (a) Viiden kubitin systeemi, jossa kukin kubitti on kytkeytynyt omaan ympäristöönsä. (b) Virhekorjausjakso, joka koostuu koodaus-operaatiosta, vapaasta vuorovaikutuksesta ympäristön kanssa sekä virheiden havainnointi- ja korjaus-osiosta. (c) Toistettu virhekorjaus sisältää peräkkäin N yksittäistä virhekorjausjaksoa.

den kubitin virhekorjauskoodeja. Pääfokus oli viiden kubitin virhekorjauskoodissa sillä se on ns. täydellinen virhekorjauskoodi, joka pystyy korjaamaan sekä virityks- että virityksen

purkautumisvirheet eli toisin sanoen sekä bitin että vaiheen kääntövirheet. Tunnetaan myös esimerkiksi seitsemän ja yhdeksän kubitin virhekorjauskoodit, jotka pystyvät korjaamaan nämä samat virheet, mutta ne vaativat enemmän kubitteja. Viittä isomman kubittimäärän tarkka numeerinen simulointi olisi ollut numeerisesti todennäköisesti liian raskasta. Viiden kubitin virhekorjauskoodin loogiset tilat ovat:

$$|0_L\rangle = (|00000\rangle + |00110\rangle + |01001\rangle - |01111\rangle - |10011\rangle + |10101\rangle + |11010\rangle + |11100\rangle) \sqrt{8}$$
$$|1_L\rangle = (|01100\rangle - |00011\rangle - |00101\rangle - |01010\rangle - |10000\rangle + |10110\rangle + |11001\rangle + |11111\rangle) \sqrt{8}$$

Loogiset tilat ovat vahvasti lomittuneita tiloja, ja huomionarvioista on myös se, että jokaisen yksittäisen kubitin keskimääräinen miehitysluku on $\frac{1}{2}$, mikä mahdollistaa viritysvirheiden korjaamisen.

Eri virhemallien tuottamaa aikakehitystä ja virhekorjauskoodin tuottamaa virhetasoa analysoimme ns. kanavafideliteetin kautta, joka on vakiintunut kvanttivirhekorjauksen metriikka. Tutkimme sekä yhtä virhekorjausjaksoa (kuva 1b) että toistettua virhekorjausta (kuva 1c). Yksi virhekorjausjakso koostuu kvantti-informaation koodauksesta, ympäristön vuorovaikutuksesta, että virheen havainnointista ja korjauksesta. Toistetussa virhekorjauksessa yksittäistä virhekorjausjaksoa toistetaan peräkkäin N kertaa.

Tutkimuksessa laajensimme aikaisemmin johdettuja analyttisiä yhden-kubitin tuloksia viiden kubitin tilanteelle selittääksemme lyhyen aikavälin dekoherenssia. Lisäksi sovelsimme analyttisiä menetelmiä monen kappaleen kvanttimekaniikasta ja avointen kvanttisysteemien teoriasta ymmärtääksemme ja analysoidaksemme havaittuja numeerisia tuloksia.

3. Kvanttinumeriikka kvanttietokoneilla: Kokeellisessa osuudessa hyödynsimme sekä IBM-Q-palvelun kvanttietokonetta että VTT:n ja IQM:n Helmi-kvanttietokonetta.

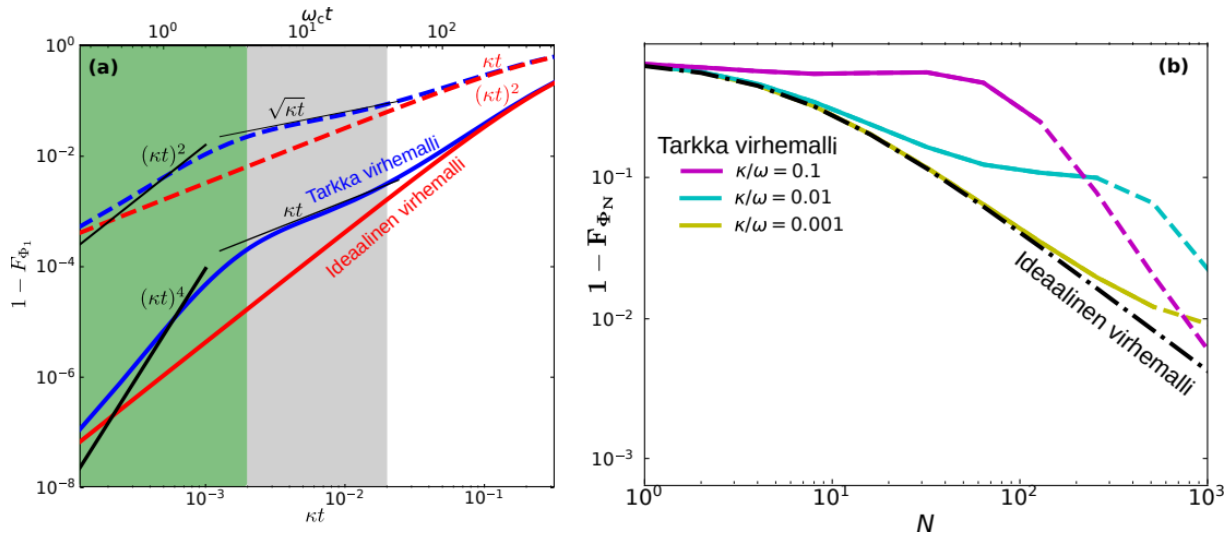
IBM-Q-palvelusta käytimme `ibmq_lima`-prosessoria. Siinä on viisi suprajohtavaa transmon-kubittia aseteltuna T-geometriaan. Keskimääräinen yhden kubitin kvanttiporttinvirhe (X-portti) on noin 0.0003 ja keskimääräinen kahden kubitin kvanttiporttinvirhe (CNOT-portti) on noin 0.01. Kubittien T_1 ja T_2 ajat ovat keskimäärin noin 100 μs ja noin 130 μs , poislukien yksi huonosti toimiva kubitti, jossa molemmat ajat olivat noin 20 μs .

Helmi-kvanttietokone on VTT:n ja IQM:n kehittämä suomalainen kvanttietokone, joka avattiin pilottivaiheen projekteille hankeen loppuvaiheessa marraskuun alussa 2022. Helmi-koneessa on viisi suprajohtavaa transmon-kubittia X-geometriassa. Laitteen kvanttiporttinvirhetasoa tai T_1/T_2 -aikoja ei ole julkistettu.

Helmi-koneessa transmon-kubitteja voi kontrolloida käyttäen yhden kubitin kvanttiportteja ja vierekkäisten kubittien välisiä CZ-kvanttiportteja. Koneita ohjelmoidaan käyttäen Python-ohjelmointikielen päälle rakennettua Qiskit-ympäristöä.

4. Tulokset ja pohdinta

Tutkimuskysymys 1



Kuva 2: (a) Yhden virhekorjausjakson virhetaso jakson aikavälin funktiona. Kuvassa vertaillaan ideaalista (punainen) ja tarkkaa (sinen) virhemallia. Harmaa alue korostaa aikaväliä, jolloin tavallinen virhekorjaus ei ole tehokasta. Vihreä alue korostaa virhekorjaukselle erityisen suosiollista aluetta. (b) Toistetun virhekorjauksen virhetaso suhteessa virhekorjausjakson lukumäärään kiinnitettyllä aikavälillä. Kuvassa vertaillaan tarkan virhemallin poikkeavuutta ideelista virhemallista eri ympäristön kytkennän voimakkuuden suhteen $\kappa/\omega=0.001, 0.01, 0.1$.

Kysymykseen siitä, mitä ovat tavallisten virhekorjauskoodien toimintarajat, saavutimme selkeät vastaukset. Ensinnäkin tarkasteltaessa virhekorjauskoodien toimintaa yhden virhekorjausjakson tapauksessa (kuva 1b ja kuva 2a) havaitsimme, että kun aikaväli koodauksesta virheiden havainnointiin ja korjaukseen on lyhyempää kuin noin $30/\omega_c$, jossa ω_c on ympäristön fluktuatioiden korkein kulmataajuus, niin tällöin ideaaliset virhemallit ja siten myös niiden päälle rakennetut virhekorjauskoodit eivät enää toimi halutulla tavalla (kuva 2a harmaa korostus). Itseasiassa osoittautuu, että aikavälillä $3/\omega_c < t < 30/\omega_c$ (harmaa alue) kvanttivirheiden esiintymistodennäköisyys aikayksikkö kohti on niin suurta, että viiden kubitin virhekorjaus ei pysty korjaamaan niitä tarvittavalla tehokkuudella. Poikkeama johtuu ympäristön ja kubittisysteemin välisen korrelaation eli kvanttimekaanisen lomittumisen aiheuttamasta voimakkaasta dekoherenssista. Mielenkiintoinen havainto on myös, että ultralyhyillä aikavälillä eli kun $t < 3/\omega_c$ (vihreä alue) ympäristön käyttäytyminen muuttuu jälleen, mutta nyt suosiolliseksi virhekorjaukselle. Analyyttisten mallien avulla voidaan todeta, että ympäristön ja kubittien lomittumiseen pohjautuva malli riittää selittämään virhekorjauskoodien käytöksen aina noin $t < 30/\omega_c$ asti, jonka jälkeen virittymistapahtumat alkavat olla määräävä virhelähde.

Toiseksi tarkasteltaessa toistetun virhekorjauksen toimintaa (kuva 2b) tutkimme virhekorjauksen toimintaa eri vahvuisille ympäristön kytkennöille. Päähavainto on, että virhekorjaus toimii, kun kytkennän voimakkuus κ on heikompi kuin noin 10 % kubitin ominaistaajuudesta ω (sininen ja keltainen viiva kuvassa 2b) ja toiston taajuus on vähemmän kuin $\omega/2\pi$. Jälleen havaitsemme, että kun toistojen lukumäärä on suuri virhekorjaus alkaa toimia hyvin suosiollisesti (katkoviivat). Tämän saavuttamiseen tarvittaisiin niin nopeita kvanttiportteja, että se tuskin on käytännöllisesti mahdollista.

Tutkimuskysymys 2: Kvanttitietokoneilla pyrimme testaamaan kolmen tai neljän kubitin virhekorjausmenetelmiä sisältäen loogisten kubittien alustamisen, virheiden havainnoinnin ja virheiden korjaamisen. Positiivinen huomio oli, että, kvanttitietokoneiden ohjelmointi- ja käyttöliittymät (Qiskit) ovat kohtuullisen hyvin kehittyneitä ja käyttökelpoisia, ainakin, jos on taustaa kvanttifysiikassa ja suurteholaskennassa. Negatiivinen huomio oli, että molempien testattujen online-quanttitietokoneiden kvanttiporttien virhetasot olivat liian korkeita, jotta olisimme voineet kunnolla suorittaa edes yksittäistä virhekorjausjaksoa puhumattakaan siitä, että olisimme voineet demonstroida virhekorjauksen hyötyjä käytännössä.

Yleisesti ottaen kvanttialgoritmin fideliteetti skaalautuu kuin F^{DN} , jossa F on yksittäisen kvanttiportin virhefideliteetti, D on algoritmin pituus porttien lukumäärässä ja N on kubittien lukumäärä. Suorittaaksemme yksittäisen virhekorjausjakson havaitsimme, että kvanttitietokoneen pitää suorittaa noin 40-50 kahden-kubitin kvanttiporttia alimmalla konetasolla. Tällöin noin prosentin virhetaso (ibmq_lima-prosessori) tuottaa koko algoritmille suuren jopa 40-50 % virheen, joka peittää alkuperäisen algoritmin kokonaisuudessaan. Helmi-quanttitietokone oli marras-joulukuussa 2022 vasta testikäytössä. Pilottivaiheesta johtuvien kalibroitontiongelmiä takia emme vielä päässeet kunnolla testamaan muutamaa kvanttiporttia pidempiä algoritmeja.

Loppupäätelmänä tutkimuskysymykseen 2 voimme todeta, että kubittilukumäärän rinnalla kvanttiporttien virhetasot ovat yhtä tärkeä, ellei jopa tärkeämpi, mittari kvanttiprosessoreiden käytettävyydelle.

Tutkimuskysymys 3: Havaitsimme (kuva 2), että kun ympäristön ja kubitin välinen kytkentä κ on kohtuullisen voimakasta ja virhekorjausjakson aikaväli t lyhyt, niin virheiden tapahtumistodennäköisyys jakson aikana skaalautuu kuin \sqrt{t} . Tässä alueessa ei toimi virhekorjauskoodi, joka pystyy korjaamaan vain yhden virheen kubittia kohti. Tällöin päättelemme, että tarvitaan koodi, joka pystyy korjaamaan vähintään kaksi virhettä jaksoa kohti. Kubittikoodeissa tällaisen toteuttamiseen tarvitaan vähintään 11 fysikaalista kubittia, mikä on jo kohtuullisen iso resurssi. Toinen vaihtoehto, joka on mahdollisesti selkeästi vähemmän resursseja kuluttava, on niin sanotut bosoniset koodit, joissa virhekorjaus tapahtuu käyttäen harmonisten värähtelijöiden kvanttitiloja. Aikaresurssien takia näiden tarkemman tutkimisen joutuimme jättämään valitettavasti tulevien hankkeiden tehtäväksi.

5. Loppupäätelmät

Kvanttivilhekorjaus on menetelmä, jolla voidaan oleellisesti laskea kubittien ja kvanttiporttien virhetasoa. Virhekorjaus on myös kriittinen osa-alue rakennettaessa ja tavoiteltaessa seuraavan teknologisen sukupolven virhekorjattuja ja vikasietoisia kvanttilaskenta- ja kvanttikommunikaatiosovelluksia. Hankkeessa tutkittiin teoreettisin ja numeerisin menetelmin kvanttilvirhekorjauksen toimintarajoja suhteessa nopeisiin aikaskaaloihin ja voimakkaaseen ympäristökytkentään. Tuloksena saimme uudet perustavanlaatuiset toimintarajat, jotka käytännöllisyyden kannalta ovat onneksi sen verran laveat, etteivät ne tule rajoittamaan nykyisten eikä tulevien kvanttilaitteiden kehitystä. Näemme, että kehitettyjä numeerisia menetelmiä voidaan soveltaa myös tutkimaan muita tilanteita, joissa monen kubitin joukkio kytkeytyy voimakkaasti ympäristöönsä. Yksi esimerkki tällaisesta tilanteesta on aaltoputki, jota voidaan käyttää yhdistämään kvanttilaitteita toisiinsa koherentisti. Se on eräänlainen keskimatkan kvanttiväylä.

Hankkeen toisessa osiossa tutkimme online-quanttitietokoneiden ja virheenkorjauksen käytäntöä. Kvanttitietokoneiden käyttörajapinnat ja ohjelmistot ovat kohtuullisen kehittyneitä ja hyvin käyttökelpoisia ainakin sellaisille käyttäjille, joilla on taustaa suurteholas-

kennasta ja kvanttifysiikasta. Kubittilukumäärän rinnalla kvanttiporttien virhetasot ovat yhtä tärkeä mittari kvanttiprosessoreiden käytettävyydelle.

Tiivistäen, mitä matalammat ovat kvanttiporttien virhetasot, sitä pidempiä kvanttialgoritmeja voidaan prosessoreilla suorittaa. Kvanttiporttinvirhetasojen parantuessa ja kubittilukumäärän kasvaessa online-kvanttitietokoneet tulevat olemaan tärkeä alusta kvanttiohjelmistojen, -ohjelmoinnin ja algoritmien kehittämiseksi ja testaamiseksi.

Kvanttiteknologiassa on kaksi osa-aluetta: kvanttilaitteet eli kvantti-hardware sekä kvanttiohjelmistot eli kvantti-software. Kvanttilaitteet sisältävät kubitit, kvanttiprosessorit ja esimerkiksi kvanttianturit sekä kaikkien näiden valmistamiseen ja kontrollointiin liittyvän osaamisen, tekniikat ja tuki-infrastruktuurit. Kvanttiohjelmistot laajasti ottaen sisältää osaamisen, joka liittyy algoritmeihin, ohjelmointiin, ohjelmistokehitykseen, kvanttifysiikkaan ja matematiikkaan. Matkalla kvanttitekniikoiden laajempaa ja täysivaltaista hyödyntämistä on tärkeä huomata, että molemmat nämä osa-alueet tarvitsevat osaamista, koulutusta ja tutkimusta.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Pääjulkaisu:

Aravind P. Babu, Tuure Orell, Vasilii Vadimov, Wallace Teixeira, Mikko Möttönen, Matti Silveri, Quantum error correction under numerically exact open-quantum-system dynamics, lähetetty 9.12.2022 arvioitavaksi Physical Review Letters -lehteen, preprint Arxiv, (2022).

Muita julkaisuja:

Matti Silveri ja Tuure Orell, Many-qubit protection-operation dilemma from the perspective of many-body localization, Nature Communications 13, 5825 (2022).