



UNIVERSITATEA
BABEŞ-BOLYAI
FACULTATEA DE FIZICĂ
ŞCOALA DOCTORALĂ DE
FIZICĂ



REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Proiectarea qubiţilor de tip
fluxonium - caracterizare numerică
şi analitică

Pioraş-Ţimbolmaş Larisa-Milena

Conducător ştiinţific:

Prof. Dr. Vasile Chiş

Cluj-Napoca

2025

Abstract

Qubiții supraconductori joacă un rol foarte important în dezvoltarea calculului cuantic, unde controlul, coerența și rezistența la zgomot sunt factorii cheie când vine vorba de performanță. Qubitul denumit fluxonium are un profil energetic distinctiv cu nivele de energie ușor reglabile prin aplicarea unui flux magnetic extern. Această ajustabilitate permite manipularea precisă a stărilor cuantice, dar dependența sa de câmpurile magnetice externe face ca qubitul să fie vulnerabil la fluctuații globale ale câmpului magnetic. O modalitate de a depăși acest obstacol este modificarea arhitecturii qubitului de tip fluxonium, astfel încât să fie redusă influența zgomotului de câmp magnetic, păstrând totodată proprietățile utile ale acestuia. Lucrarea prezentată în această teză se concentrează pe arhitectura gradiometrică a qubitului fluxonium, care reduce semnificativ efectul zgomotului magnetic global.

Această teză explorează qubitul gradiometric fluxonium și relația sa cu arhitectura standard a fluxoniumului. Demonstrăm că designul gradiometric poate fi mapat direct pe circuitul convențional al fluxoniumului, reducând semnificativ sensibilitatea acestuia la fluxuri magnetice globale. Deși designul gradiometric folosește simetria pentru a suprima fluctuațiile fluxurilor magnetice globale, nu oferă performanțe constante mai bune decât fluxoniumul standard în ceea ce privește timpii de relaxare ai fluxoniumului standard. În marea parte a spațiului de parametri, ambele arhitecturi se comportă similar, anând timpul de relaxare limitat de alte surse dominante de zgomot, precum pierderile dielectrice, quasiparticulele și imperfecțiunile introduse în timpul fabricației. Totuși, am identificat regiuni promițătoare în spațiul de parametri unde fluxoniumul gradiometric prezintă un avantaj clar, având timpi T_1 mai lungi, și în același timp satisfăcând constrângerile practice referitoare la frecvență, anarmonicitate și shift dispersiv.

Am elaborat un model general pentru determinarea Hamiltonianului aplicabil circuitelor cu multiple ochiuri de circuit, extinzând înțelegerea matematică a unor astfel de circuite superconductoare. Folosind atât analiza teoretică cât și numerică, analizăm comportamentul qubiturilor de tip fluxonium și gradiometric fluxonium pe un interval larg de parametri. Analiza include atât cazul sistemelor necuplate cât și cazul sistemelor cuplate la rezonatorul de citire. Studiul comparativ oferă o înțelegere mai profundă a spectrului de energie și caracteristicilor de coerență. Explorăm cum variațiile parametrilor

circuitului influențează comportamentul și performanța qubitului, revelând trade-off-urile necesare în procesul de proiectare al acestuia.

Prin înțelegerea modului în care diferite elemente ale circuitului și configurațiile sale afectează comportamentul qubitului, cercetătorii pot face alegeri de proiectare mai informate, care duc la o mai bună stabilitate și control. Rezultatele din această lucrare contribuie la efortul continuu de a crea qubiți supraconductori mai stabili în condițiile practice necesare procesoarelor cuantice reale. Prin învățarea a ce funcționează și ce nu funcționează la nivelul circuitului, putem ști în ce moduri putem dezvolta arhitecturi mai robuste și mai ușor de scalat.

Cuprinsul tezei de doctorat

1	Introduction	1
2	About quantum computation - core principles and theoretical structure . . .	6
2.1	Quantum states	6
2.2	Bits vs. Qubits	7
2.3	Bloch sphere representation	8
2.4	Measurement	9
2.5	Qubit implementations	10
2.6	Gates	12
2.7	Quantum simulations	12
2.8	Quantum computer	13
3	Superconducting qubits	14
3.1	Superconductivity	14
3.2	The Josephson junction	15
3.3	Circuit quantization	16
3.4	The Harmonic Oscillator	21
3.5	Circuit QED	23
3.6	Anharmonicity	23
3.7	Noise	24
3.8	The Phase Qubits	25
3.9	Charge Qubits	26
3.9.1	The Cooper Pair Box	26
3.9.2	The Transmon Qubit	27
3.9.3	The Xmon	27
3.10	Flux Qubits	27
3.10.1	The Flux Qubit	28
3.10.2	The Fluxonium	28
3.11	Hybrid qubits	29
3.11.1	The Unimon	29
3.11.2	The Gatemon	29
3.11.3	The $0 - \pi$ qubit	30

3.11.4	The quantronium	30
3.12	Bosonic qubits	31
3.12.1	The Kerr-cat qubit	31
4	Evaluation of the Fluxonium qubit	32
4.1	Theoretical model - Uncoupled Case	33
4.2	Analysis and optimization - Uncoupled Case	36
4.2.1	Fluxonium parameters	37
4.2.2	Anharmonicity	38
4.2.3	Wavefunctions	42
4.2.4	Matrix elements	45
	Charge matrix elements	46
	Flux matrix elements	47
4.2.5	Coherence	48
	Capacitive loss	51
	Inductive loss	54
	Quasiparticle loss	56
	Total coherence time	60
4.3	Theoretical model - Coupled Case	63
4.4	Analysis and optimization - Coupled Case	69
4.4.1	Frequency	72
4.4.2	Dispersive shift and anharmonicity	73
4.4.3	Coherence	77
5	Evaluation of the Gradiometric Fluxonium qubit	81
5.1	Theoretical model - Uncoupled Case	82
5.2	Analysis and optimization - Uncoupled Case	86
5.3	Theoretical model - Coupled Case	88
5.4	Analysis and optimization - Coupled Case	93
6	The multi-loop Fluxonium	97
7	State identification and numerical sorting of the energies of the system	103
7.1	State identification methods	104

7.1.1	Eigenstates proximity	105
7.1.2	State identification based on the expected values	110
7.1.3	State identification based on the resonator frequency	113
7.1.4	State identification based on the Hilbert space truncation	113
8	Conclusions	115
8.1	Outlook	116

Cuprinsul rezumatului

0.1	Despre Calculul Cuantic	8
0.2	Qubitul Fluxonium	11
0.3	Qubitul Fluxonium gradiometric	12
0.4	Arhitectura multi-loop	13
0.5	Identificarea și etichetarea stărilor	14
0.6	Concluzii și perspective	16

0.1 Despre Calculul Cuantic

Acest capitol oferă o prezentare a principiilor fundamentale care stau la baza calculului cuantic, comparând informația clasică cu cea cuantică și explică cum se diferențiază fundamental qubiții de biții clasici. La baza teoriei cuantice se află starea cuantică, în care este conținută informație despre toate proprietățile măsurabile ale unui sistem. Stările cuantice sunt exprimate într-un spațiu matematic numit spațiu Hilbert și pot fi de două feluri, stări pure, descrise printr-o singură funcție de undă și stări mixte, reprezentate de matricea de densitate. (apar atunci când un sistem interacționează cu mediul [1, 2].

Spre deosebire de biții clasici care au două stări 0 și 1, qubiții pot exista într-o superpoziție a ambelor stări. Măsurarea face ca această superpoziție să se colapseze în una dintre stările de bază. Când sunt implicați mai mulți qubiți, aceștia pot deveni entanglați, ceea ce înseamnă că stările lor individuale sunt inseparabile una de alta [1, 3].

Pentru a vizualiza stările qubiților, este introdusă sfera Bloch, care este o reprezentare geometrică unde fiecare punct de pe sferă corespunde unei stări pure unice. Abilitatea qubitului de a rămâne într-o stare coerentă suficient de mult timp pentru a putea fi efectuate operații depinde de un echilibru între "timpul de poartă" (timpul necesar pentru aplicarea operațiilor) și timpul de coerență (cât timp qubitul își păstrează proprietățile cuantice) [4]. Calculul cuantic de înaltă fidelitate depinde de un "timp de poartă" foarte scurt în raport cu timpi lungi de coerență.

Măsurarea cuantică, spre deosebire de măsurarea clasică, este probabilistică și invazivă. Actul de măsurare nu doar că oferă un rezultat probabilistic, dar alterează și starea cuantică. Măsurătorile pot fi proiective, colapsând complet starea, sau cuantice "non-demolition" (QND) [1], unde informațiile sunt extrase fără a distruge complet starea cuantică.

Unele dintre implementările existente ale qubiților sunt qubiții cu ioni capturați [5], care se bazează pe atomi încărcăți electric, izolați și controlați în vid prin câmpuri electromagnetice. Aceștia oferă un timp de coerență lung, dar au "timp de poartă" mic și de asemenea probleme de scalabilitate. Qubiții bazați pe defecte în diamant [6] utilizează defecte dintr-o rețea cristalină, oferind avantajul operării la temperatura camerei și un timp de coerență lung, dar având provocări de fabricație. Subiectul acestei teze sunt qubiții superconductori [7], care sunt fabricați din circuite electrice mezoscopice care funcționează aproape de temperatura de zero absolut. Aceștia pot fi ușor proiectați,

cuplați și citiți, dar necesită temperaturi extrem de scăzute și au în continuare timpi de coerență mai scurți comparativ cu alte platforme.

Elementele de bază ale circuitelor cuantice sunt porțile cuantice. La fel ca porțile logice clasice, porțile cuantice manipulează qubiții utilizând transformări unitare. Porțile pe un singur qubit (cum ar fi Pauli-X sau Hadamard) și porțile pe doi qubiți (cum ar fi CNOT) permit controlul asupra sistemelor cuantice și permit executarea algoritmilor cuantici [8]. Simulările cuantice utilizează un sistem cuantic controlabil pentru a imita comportamentul altui sistem cuantic. Aceste simulări pot fi analogice, în care Hamiltonianul simulatorului reflectă sistemul țintă sau digitale, în care metodele bazate pe porți modelează orice sistem cuantic utilizând un set universal de porți cuantice [9].

Computerul cuantic este un dispozitiv care folosește superpoziția și entanglementul cuantic pentru a efectua calcule exponențial mai rapid decât computerele clasice în anumite domenii de probleme. Inspirat de viziunea lui Feynman [10], computerul cuantic promite descoperiri revoluționare în criptografie, studiul medicamentelor și modelarea sistemelor complexe. Cu toate acestea, în ciuda avansurilor continue, opinia experților rămâne precaută cu privire la termenul de realizare a unor computere cuantice universale și scalabile complet.

După cum am menționat mai sus, qubiții superconductori sunt unele dintre cele mai utilizate platforme cuantice, utilizate de mari companii de tehnologie precum Google și IBM. Popularitatea lor provine din scalabilitatea, controlabilitatea și capacitatea de a proiecta Hamiltonianul, făcându-i ideali pentru implementarea și manipularea operațiilor asupra qubiților. Aceste circuite sunt construite din materiale superconductoare răcite aproape de temperatura de zero absolut, unde acestea prezintă rezistență electrică zero și blochează câmpurile magnetice, reducând pierderea de informație datorată interacțiunii cu mediul. Cel mai important element de circuit este joncțiunea Josephson [11], un element neliniar și nondissipativ care face operațiile cuantice posibile. Acest element introduce anharmonicitate în sistem pentru a preveni excitarea qubitului pe stările energetice superioare nedorite. Acest lucru permite izolarea și utilizarea celor mai joase două nivele care formează qubitul.

Cuantificarea circuitului este folosită pentru a descrie aceste circuite supraconductoare în regimul cuantic. Plecând de la electrodinamica clasică, sistemul este analizat folosind variabile precum sarcina și fluxul, care sunt apoi promovate la operatori cuan-

tici. Această abordare permite construirea Hamiltonianului care descrie comportamentul circuitului. [12].

Una dintre cele mai mari provocări pentru qubiții superconductorii este zgomotul (pierderea energiei). Printre sursele principale de zgomot se află pierderile datorate quasiparticulelor. Acesta provine din perechile de Cooper rupte, cauzând relaxare energetică și fluctuații de frecvență. Un alt tip de zgomot este cel capacitiv provenind din pierderile dielectrice din materiale datorate defectelor. Un al treilea tip important de zgomot este zgomotul inductiv dat de impuritățile magnetice [13].

Qubiții superconductorii sunt clasificați pe baza principiilor lor fundamentale de operare, qubiți de fază, de sarcină, de flux, hibridi și bosonici fiecare având puncte forte dar și limitări proprii. Qubiții de fază operează folosind diferența de fază superconductoare într-o joncțiune Josephson. Când sunt fluxul exterior aplicat este aproape de o cantă de flux magnetic, se formează două gropi simetrice de potențial, permițând utilizarea celor două stări de energie cele mai joase pentru calculul cuantic. Deși qubiții de fază sunt suficient de neliniari, au timpi scurți de coerență și probleme de scalabilitate [14].

Qubiții de sarcină, exemplificați Cooper Pair Box și Transmon (care este o versiune protejată de zgomotul de sarcină a Cooper Pair Box) [15, 16], sunt sensibili la zgomotul de sarcină. Xmon este realizat pe baza transmonului, oferind o scalabilitate și conectivitate mai bune datorate structurii coplanare, dar încă au timp mic de coerență datorită materialelor și "cross-talkului" în circuite mari [17].

Qubiții de flux folosește curenții care circulă într-o buclă de circuit pentru a codifica informația cuantică în stările fluxului magnetic. Aceștia sunt foarte sensibili la zgomotul de flux[18]. Fluxoniumul abordează aceste probleme prin introducerea unei suprainductanțe pentru a suprima zgomotul de fază și a îmbunătăți coerența [19]. Variantele precum fluxoniumul gradiometric și galmonium îmbunătățesc și mai mult rezistența la zgomot și simplifică fabricația [20, 21].

Qubiții hibridi combină elemente din diferite arhitecturi pentru a îmbunătăți performanța. Unimonul, de exemplu, aduce împreună caracteristici de sarcină și flux într-un design simplu care reduce cele două surse de zgomot importante (sarcină și flux) [22].

Qubiții bosonici, cum ar fi qubitul Kerr-cat, stochează informația cuantică în

stările unui rezonator neliniar. Această arhitectură utilizează superpoziția cuantică e stărilor coerente, numite cat states, pentru a proteja qubitul de erorile prin care se inversează faza (“phase-flip errors”) [23].

0.2 Qubitul Fluxonium

Qubitul fluxonium se remarcă printre qubiții superconductorii datorită timpului de coerență destul de mare în condițiile actuale, flexibilității în design și rezistenței la zgomotul de sarcină. Acesta este construit dintr-o mică joncțiune Josephson, șuntată de o inductanță mare, formată dintr-un sir lung de joncțiuni Josephson mai mari. Această configurație creează o suprainductanță care izolează sistemul de fluctuațiile de sarcină. Energiile fundamentale ale sistemului sunt energia Josephson E_J , energia inductivă E_L și energia capacitivă E_C [19].

Modelarea teoretică începe cu tratarea qubitului ca un sistem izolat, descris prin diferența de fază superconductoare în joncțiune. Cuantificarea circuitului implică introducerea operatorilor de flux și sarcină, rezultând un Hamiltonian cu componente armonice și neliniare. Pentru tratamentul termenului neliniar Josephson, se folosesc polinoame Laguerre în calculul elementelor de matrice.[24].

Pentru optimizare, cele trei energii au fost variate în intervale realiste din punct de vedere experimental. Au fost identificate regiuni ale spațiului de parametri care prezintă atât coerență ridicată, cât și o anarmonicitate mare. Anarmonicitatea, esențială pentru izolarea stărilor qubitului, crește odată cu scăderea E_C , dar face qubitul mai vulnerabil la zgomotul de flux.

Elemente de matrice pentru operatorii de sarcină și flux arată cum tranzițiile între stările qubitului sunt influențate de designul circuitului. Un E_C mic suprimă tranzițiile de sarcină, dar crește sensibilitatea la flux. Dimpotrivă, creșterea lui E_C sporește probabilitățile de tranziție, dar în detrimentul sensibilității la decoerență.

Analiza coerenței ia în considerare pierderile capacitive, inductive și cele datorate cuasiparticulelor. Pierderile capacitive sunt minime pentru valori mici ale lui E_C , în timp ce pierderile inductive devin dominante la valori mari ale lui E_L . Timpul total de relaxare este calculat prin însumarea contribuțiilor individuale, evidențiind modul în care fiecare mecanism de pierdere influențează diferite regiuni ale spațiului de parametri.

În cazul în care fluxoniumul este cuplat la un rezonator de citire, sistemul devine

mai complex, dar permite citirea “non-demolition” cu ajutorul “shiftului dispersiv”. O analiză detaliată a circuitului duce la un Hamiltonian care captează interacțiunile qubit-rezonzator. Numărul de excitații în fluxonium incluse în simulări afectează semnificativ precizia cu care obținem valorile energiei. Convergența a fost atinsă la aproximativ 50 de excitații în qubit.

”Shifturile dispersive” au fost evaluate și s-a constatat că depind puternic de valoarea lui E_C și de tăria cuplajului. Shifturile prea mici limitează rezoluția cu care starea este citită, în timp ce shifturile prea mari pot scoate sistemul din regimul dispersiv, riscând pierderi de energie prin efectul Purcell (pierderea energiei sistemului prin intermediul rezonatorului de citire).

0.3 Qubitul Fluxonium gradiometric

Qubitul fluxonium gradiometric reprezintă o versiune îmbunătățită a fluxoniumului standard, concepută pentru a reduce sensibilitatea la câmpurile magnetice uniforme. Spre deosebire de designul clasic cu o singură buclă, această versiune utilizează două bucle simetrice. Atunci când ambele bucle sunt supuse aceluiași câmp magnetic, efectele se anulează la nivelul joncțiunii Josephson. Astfel, qubitul devine aproape imun la zgomotul magnetic global, fiind de până la două ordine de mărime mai puțin sensibil. Sistemul răspunde doar la diferențele de flux magnetic dintre bucle, și nu la valoarea globală a acestuia.

Această caracteristică este foarte utilă în arhitecturile hibride, precum cele care combină qubiți supraconductori cu qubiți de spin sau moleculari, unde câmpurile magnetice sunt folosite pentru a controla componentele în materialele care nu sunt supraconductoare.

Pentru o funcționare ideală, cele două bucle ar trebui să fie perfect identice și aliniată. În practică, acest lucru este greu de realizat, iar mici diferențe de arie sau orientare introduc un dezechilibru. Totuși, acest dezechilibru generează un gradient de flux care stă la baza principiului gradiometric.

Din punct de vedere teoretic, comportamentul sistemului se reduce în continuare la un singur grad de libertate, la fel ca în cazul fluxoniumului standard. Hamiltonianul se deduce într-un mod similar, cu unele modificări care țin cont de simetria circuitului. Prin această abordare, se poate arăta că, în cazul unei simetrii perfecte a buclelor, sistemul

devine complet imun la câmpurile magnetice uniforme. Dacă există însă un dezechilibru, qubitul simte un flux efectiv proporțional cu diferența de flux și scalat prin inductanțele buclelor. Acest fapt permite maparea Hamiltonianului pe Hamiltonianul fluxoniumului fără a pierde caracteristicile esențiale ale fluxoniumului.

Simulările efectuate în pentru sistemul decuplat confirmă echivalența dintre designul standard și cel gradiometric. Frecvențele qubitului coincid atunci când simetria buclelor este păstrată. Parametrii cheie influențează ambele arhitecturi în mod identic, inclusiv frecvențele de tranziție, anarmonicitatea și elementele de matrice.

În prezența unui rezonator, designul gradiometric începe să se diferențieze de fluxoniumul standard. Doar una dintre bucle este cuplată direct la rezonatorul de citire, cealaltă fiind cuplata indirect. Această asimetrie introduce mici diferențe în spectrul energetic, în special în zonele numite "avoided crossings" (atunci când două stări energetice ale sistemului cuantic se apropie, dar interacțiunea dintre ele le schimbă energia astfel încât nu se ating, ci se separă ușor), și afectează valorile shiftului dispersiv și timpilor de relaxare. Shiftul dispersiv, în special, prezintă diferențe clare între cele două arhitecturi. Cu toate acestea, în ansamblu, performanțele celor două rămân comparabile în marea parte a intervalelor calculate. Simulările indică existența unor regiuni ale spațiului de parametri în care timpul de relaxare este superior, respectând totodată constrângerile impuse de frecvență, anarmonicitate și deplasarea dispersivă.

0.4 Arhitectura multi-loop

Arhitectura bazată pe fluxonium, conținând mai multe bucle de circuit extinde designul original prin adăugarea unor bucle suplimentare, fiecare străbătută de un flux magnetic extern distinct. Se creează astfel posibilitatea de a regla fin răspunsul qubitului la câmpurile magnetice, suprimând mai eficient zgomotul de flux. Un exemplu reprezentativ este fluxoniumul gradiometric, care utilizează simetria dintre două bucle pentru a anula fluctuațiile uniforme ale câmpului magnetic. Acest tip de arhitectură stabilizează qubitul.

Analiza acestor configurații complexe a necesitat dezvoltarea unui cadru matematic extins. Abordarea începe prin identificarea arborelui parțial de acoperire minimă (Minimum Spanning Tree) al circuitului[25]. Folosind MST-ul ca bază, gradele de libertate ale sistemului sunt reduse, variabilele redundante sunt eliminate iar dinamica cir-

cuitului este simplificată la minimumul de variabile necesare.

Lagrangianul este construit apoi prin combinarea contribuțiilor elementelor capacitive, inductive și elementelor conținând joncțiuni Josephson. Scris sub formă matricială, acesta include un termen cinetic, un termen de energie potențială și un termen neliniar generat de joncțiunile Josephson. Fluxurile magnetice externe sunt introduse în sistem printr-o matrice de cuplaj, însă, pentru a optimiza analiza, efectele acestora sunt redistribuite și izolate în partea neliniară a Hamiltonianului (partea care conține joncțiunile Josephson). Această deplasare a fluxului, exprimată ca vector, indică modul în care fiecare buclă este influențată de fluxul său magnetic extern aplicat ei.

Un alt pas esențial constă în eliminarea cuplajelor nedorite dintre diferitele moduri ale circuitului. Acest lucru se realizează prin redefinirea variabilelor de flux cu ajutorul unei matrice de transformare, care rotește sistemul într-un nou set de coordonate. În această bază transformată, părțile armonice ale circuitului devin complet decuplate, comportându-se ca niște oscilatori armonici independenți.

Cu toate aceste elemente definite, Hamiltonianul sistemului este construit printr-o transformare Legendre. În Hamiltonianul obținut se poate distinge clar între partea armonică și cea neliniară, permițând o cuantificare riguroasă. Forma finală include termeni de energie cinetică și potențială, precum și termeni cosinus pentru fiecare joncțiune Josephson.

Această formulare flexibilă permite modelarea oricărui număr de bucle. Prin ajustarea numărului de bucle și a valorilor fluxurilor externe, același cadru poate reproduce atât modelul fluxonium standard, cât și arhitectura gradiometrică. Această formulare oferă un instrument general, adaptabil la diverse configurații de circuite cuantice.

0.5 Identificarea și etichetarea stărilor

În sistemele bazate pe qubitul fluxonium, în special atunci când acesta este cuplat la un rezonator, etichetarea corectă a stărilor cuantice este esențială. Fără o identificare consecventă și precisă, operațiile de control devin instabile, iar datele experimentale pot deveni nesigure sau chiar înșelătoare. Deoarece acești qubiți prezintă un spectru neliniar și interacționează cu rezonatorul, o simplă aproximare cu două nivele nu mai este suficientă. Stările se amestecă, evoluează odată cu fluxul extern și interacționează cu rezonatorul, ceea ce face clasificarea clară dificilă.

Diagonalizarea Hamiltonianului complet oferă doar valorile de energie și vectorii proprii, dar nu transmite nicio informație despre natura stărilor. Acest lucru face dificilă corelarea teoriei cu experimentul, mai ales când nivelele de energie se apropie sau se intersectează. În astfel de cazuri, apar stări hibridizate.

Pentru a rezolva această problemă, au fost explorate mai multe metode. O primă strategie s-a bazat pe apropierea față de stările proprii necuplate. Această metodă funcționează rezonabil în regim de cuplaj slab, unde hibridizarea este redusă și fiecare nivel de energie al sistemului complet corespunde cu aproximație unui produs tensorial între stările qubitului și cele ale rezonatorului. Însă această abordare eșuează rapid atunci când cuplajul devine puternic sau când nivelele sunt prea apropiate, în special în regiuni cu "avoided crossings", unde ordinea energetică poate să nu mai reflecte structura fizică reală a stărilor.

O altă metodă implică calculul valorilor așteptate ale unor operatori precum numărul de fotoni din rezonatorul de citire sau excitații ale qubitului. Acest lucru oferă o estimare utilă asupra modului în care fiecare stare se manifestă în subsistemele qubitului și rezonatorului. Pe măsură ce sistemul hibridizează, aceste valori se abat de la numere întregi, dar, în cazul rezonatorului, rotunjirea acestor valori oferă în continuare indicii relevante asupra comportamentului dominant.

O metodă suplimentară se bazează pe faptul că frecvența rezonatorului este constantă. Deoarece rezonatorul se comportă precum un oscilator armonic, nivelele de energie ar trebui să fie echidistante. Etichetarea se face pas cu pas, comparând diferențele dintre niveluri și corelându-le cu frecvența rezonatorului. Această metodă este utilă pentru identificarea stărilor, dar își pierde din fiabilitate atunci când apare hibridizarea sau când cuplajul devine puternic.

Cea mai robustă metodă s-a dovedit a fi cea bazată pe trunchierea spațiului Hilbert. Ideea de bază este simularea sistemului cu un număr mic de fotoni permiși, etichetarea clară a stărilor în această configurație simplă, și creșterea treptată a dimensiunii spațiului Hilbert. La fiecare pas, stările proprii noi sunt comparate cu cele anterioare, folosind suprapunerea funcțiilor de undă. Stările cu suprapunere slabă sunt considerate ca aparținând unui număr mai mare de fotoni. Deși mai costisitoare din punct de vedere computațional, această abordare face față cu succes zonelor cu "avoided crossings" și variațiilor parametrilor, menținând stabilitatea etichetării chiar și în regiunile dens pop-

ulate ale spectrului.

0.6 Concluzii și perspective

Această lucrare a avut ca scop proiectarea unor qubiți supraconductori mai stabili, mai ușor de controlat și mai scalabili. A fost prezentată arhitectura fluxoniumului gradiometric, un qubit proiectat special pentru a fi mai puțin sensibil la câmpurile magnetice uniforme, datorită unei structuri simetrice cu două bucle. Comparativ cu fluxoniumul standard, designul gradiometric reduce semnificativ sensibilitatea la fluctuații magnetice globale, păstrând în același timp caracteristicile esențiale ale fluxoniumului precum frecvența de tranziție și anharmonicitatea în limite compatibile cu experimentele actuale.

Asemenea fluxoniumului clasic, au fost explorați parametri fizici precum energia Josephson, energia capacitivă și energia inductivă, pentru a înțelege modul în care acestea influențează comportamentul qubitului, inclusiv frecvența, anharmonicitatea și relaxarea. Totodată, a fost dezvoltată o metodă de identificare și etichetare clară a stărilor de energie, aspect esențial în simulările numerice extinse, unde condițiile se pot schimba semnificativ.

Un alt rezultat important a fost formularea unei expresii generalizate pentru Hamiltonian în circuite cu mai multe bucle, contribuind astfel la posibilitatea de extindere a dispozitivelor cuantice.

Fluxoniumul gradiometric, prin sensibilitatea sa selectivă la gradientele de flux magnetic și rezistența la variații magnetice globale, se remarcă drept un candidat promițător pentru integrarea cu sisteme magnetice, precum rețele de spin sau magneți moleculari. În paralel, metodele numerice și strategiile de etichetare propuse în această lucrare pot fi perfecționate pentru a susține funcționarea dinamică a procesoarelor cuantice, cu posibilitatea de a urmări și ajusta stările în funcție de condițiile externe

Bibliografie selectată

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 10th anniversary edition edition, 2010.
- [2] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Quantum Mechanics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020.
- [3] R. P. Feynman. *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III, Chapter 3: Probability Amplitudes*. Addison-Wesley, 1965.
- [4] J. M. Chow. *Quantum Information Processing with Superconducting Qubits*. PhD thesis, Yale University, 2010.
- [5] R. I. Thompson, T. J. Harmon, and M. G. Ball. The rotating-saddle trap: a mechanical analogy to rf-electric-quadrupole ion trapping? *Canadian Journal of Physics*, 80:12, 2002.
- [6] Huijin Park, Junghyun Lee, Sangwook Han, Sangwon Oh, and Hosung Seo. Decoherence of nitrogen-vacancy spin ensembles in a nitrogen electron-nuclear spin bath in diamond. *npj Quantum Information*, 8:95, 2022.
- [7] P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, and W. D. Oliver. A quantum engineer’s guide to superconducting qubits. *Appl. Phys. Rev.*, 6:021318, 2019.
- [8] J. J. García Ripoll. *Quantum Information and Quantum Optics with Superconducting Circuits*. Cambridge University Press, 2022.
- [9] I. M. Georgescu, S. Ashhab, and Franco Nori. Quantum simulation. *Rev. Mod. Phys.*, 86:153–185, Mar 2014.

- [10] Richard P. Feynman. Simulating physics with computer. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6/7), 1982.
- [11] B. D. Josephson. Possible new effects in superconductive tunnelling. *Phys. Lett.*, 1(7):251–253, 1962.
- [12] M. H. Devoret. Quantum fluctuations in electrical circuits. In *Quantum Fluctuations: Lecture Notes of the Les Houches Summer School*. 1997.
- [13] L. B. Nguyen, Y.-H. Lin, A. Somoroff, R. Mencia, N. Grabon, and V. E. Manucharyan. High-coherence fluxonium qubit. *Phys. Rev. X*, 9:041041, 2019.
- [14] Frederick W. Strauch. *Theory of Superconducting Phase Qubits*. PhD thesis, University of Maryland, College Park, 2004.
- [15] V. Bouchiat, D. Vion, P. Joyez, D. Esteve, and M. H. Devoret. Quantum coherence with a single cooper pair. *Physica Scripta*, T76:165–170, 1998.
- [16] Jens Koch, Terri M. Yu, Jay Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, Alexandre Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Charge-insensitive qubit design derived from the cooper pair box. *Phys. Rev. A*, 76:042319, 2007.
- [17] J. M. Martinis and M. R. Geller. Fast adiabatic qubit gates using only σ_z control. *Phys. Rev. A*, 90:022307, 2014.
- [18] J. S. Birenbaum. *The C-Shunt Flux Qubit: A New Generation of Superconducting Flux Qubit*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2014.
- [19] V. E. Manucharyan, J. Koch, L. I. Glazman, and M. H. Devoret. Fluxonium: Single cooper-pair circuit free of charge offsets. *Science*, 326:113, 2009.
- [20] D. Gusenkova, F. Valenti, M. Spiecker, S. Günzler, P. Paluch, D. Rieger, L. M. Pioraș-Tîmbolmaș, L. P. Zârbo, N. Casali, I. Colantoni, A. Cruciani, S. Pirro, L. Cardani, A. Petrescu, W. Wernsdorfer, P. Winkel, and I. M. Pop. Operating in a deep underground facility improves the locking of gradiometric fluxonium qubits at the sweet spots. *Appl. Phys. Lett.*, 120:054001, 2022.

- [21] D. Rieger, S. Günzler, M. Spiecker, P. Paluch, P. Winkel, L. Hahn, J. K. Hohmann, A. Bacher, W. Wernsdorfer, and I. M. Pop. Granular aluminium nanojunction fluxonium qubit. *Nat. Mater.*, 22:194–199, 2023.
- [22] E. Hyppä, S. Kundu, C. F. Chan, A. Gunyhó, J. Hotari, D. Janzso, K. Juliusson, O. Kiuru, J. Kotilahti, A. Landra, W. Liu, F. Marxer, A. Mäkinen, J.-L. Orgiazzi, M. Palma, M. Savytskyi, F. Tosto, J. Tuorila, V. Vadimov, T. Li, C. Ockeloen-Korppi, J. Heinsoo, K. Y. Tan, J. Hassel, and M. Möttönen. Unimon qubit. *Nat. Commun.*, 13:6895, 2022.
- [23] A. Grimm, N. E. Frattini, S. Puri, S. O. Mundhada, S. Touzard, M. Mirrahimi, S. M. Girvin, S. Shankar, and M. H. Devoret. Stabilization and operation of a kerr-cat qubit. *Nature*, 584:205–209, 2020.
- [24] W. C. Smith, A. Kou, U. Vool, I. M. Pop, L. Frunzio, R. J. Schoelkopf, and M. H. Devoret. Quantization of inductively shunted superconducting circuits. *Phys. Rev. B*, 94:144507, 2016.
- [25] A. Petrescu, H. E. Türeci, A. V. Ustinov, and I. M. Pop. Fluxon-based quantum simulation in circuit qed. *Phys. Rev. B*, 98:174505, 2018.

Lista de publicații

Publicații în reviste ISI legate de teză

1. Daria Gusenkova, Francesco Valenti, Martin Spiecker, Simon Gnzler, Patrick Paluch, Dennis Rieger, **Larisa-Milena Pioraș-Țîmbolmaș**, Liviu P Zârbo, Nicola Casali, Ivan Colantoni, Angelo Cruciani, Stefano Pirro, Laura Cardani, Alexandru Petrescu, Wolfgang Wernsdorfer, Patrick Winkel, Ioan M Pop, *Operating in a deep underground facility improves the locking of gradiometric fluxonium qubits at the sweet spots*, Applied Physics Letters, 120, 054001, 2022
AIS = 0.891 IF = 4.0
2. **Larisa-Milena Pioraș-Țîmbolmaș**, Levente Mathé, Liviu P Zârbo, *Circuit-QED for multi-loop fluxonium-type qubits*, Photonics, 2025
AIS = 0.369 IF = 2.1

Alte publicații ISI

1. Levente Mathé, Onyenegecha C.P., Farcaș A.A., **Pioraș-Țîmbolmaș L.M.**, So-laimani M. Hassanbadi H., *Linear and nonlinear optical properties in spherical quantum dots: Inversely quadratic Hellmann potential*, Physics Letters A, 397, 2021
AIS = 0.483 IF = 2.707
2. I. Perhaița, L.E. Mureșan, S. Garabagiu, L.P. Zârbo, G. Borodi, C. Morari, **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, O. Pană, A. Nicoară, *Structural and electrical charge transport properties in oxygen-deficient $PbTiO_{3-\delta}$ ceramics*, J Aust Ceram Soc, 2023
AIS = 0.232 IF = 1.823

Preprinturi - trimise pentru publicare

T. Murariu*, **Pioraş-Țimbolmaş L.M.***, C. Tudoran, C. Tripon, L. Buimaga-Iarinca, L. Zarbo and C. Morari, *Using microcontrollers for optimal counting of single-photon pulses*

M. Buga, T. Murariu, **Pioraş-Țimbolmaş L.M.**, C. Tripon, L. Buimaga-Iarinca and C. Morari, *A DFT Study on Hydrogen Diffusion Across Zinc Surfaces at Low Coverage*

* contribuție egală

Participări la conferințe, /Workshopuri/Școli

Prezentări orale

1. **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, L.P. Zârbo, *Quantum simulation using fluxonium qubits*, High Impedance Quantum Circuits, Varzo, Italia, 6-10 August, 2019
2. **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, L.P. Zârbo, A. Petrescu, *Decoherence in superconducting circuits based on fluxonium architecture*, VCQ 2021, Summer school, Quantum sensing and imaging, Viena, Austria, 6-10 Septembrie 2021
3. **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, L.P. Zârbo, *Decoherence in fluxonium based superconducting circuits*, International Conference on Processes in Isotopes and Molecules, Cluj-Napoca, Romania, 22-24 Septembrie 2021
4. **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, *Quantum hardware prototypes*, Online Event, World Quantum Day, 14 Aprilie 2022
5. L.P. Zârbo, **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, *Optimizing Fluxonium type devices*, SiUCs-QUCOS QuantERA workshop, Institut de Fisica d'Altes Energies, Barcelona, Spania, 23-24 Februarie 2023
6. **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, L.P. Zârbo, *Circuit QED with fluxonium*, Spring School on Superconducting Qubit Technology (SQT), Benasque, Spania, 11-21 Aprilie 2023
7. **L.M. Pioraş-Țimbolmaş**, L.P. Zârbo, *Fluxonium Qubits for Quantum Computing*, Internațional conference on advanced scientific computing ICASC, Cluj-Napoca, Romania, 18-20 October 2023

8. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, *Optimization of the Fluxonium Qubit*, Workshop World Quantum Day 2024, IFIN-HH, Bucuresti, Romania, 15-18 Aprilie 2024
9. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, *Strengthening and Entangling Global Quantum Roots (SEGQuRo)*, Delft, Olanda, 2-9 Iunie 2024
10. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, *Fine-tuning fluxonium qubit devices for enhanced performance*, Rocam (10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS), Bucuresti, Romania, 15-18 July 2024

Prezentări poster

1. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, *Superconducting qubits for analog quantum simulations of spin lattice models*, 12th International Conference on Processes in Isotopes and Molecules, Cluj-Napoca, Romania, 25-27 September, 2019
2. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, *Superconducting qubits for analog quantum simulation - The readout*, Workshop on Quantum Information Theory and Thermodynamics at the Nanoscale, Al Hoceima, Maroc, 2 - 6 Martie 2020
3. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, A. Petrescu, *Qubits based on the fluxonium architecture* - International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC), Lisabona, Portugalia, 10-15 Iulie 2022
4. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, *Optimizing devices based on the Fluxonium architecture*, Spring School on Superconducting Qubit Technology (SQT), Benasque, Spania, 11-21 Aprilie 2023
5. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, *Exploring the terrain of noise in superconducting qubits*, Processes in Isotopes and Molecules, Cluj-Napoca, Romania, Septembrie, 2023
6. **L.M. Pioraș-Țîmbolmaș**, L.P. Zârbo, *Noise topography in superconducting qubits*, The European Summer School in Quantum Science and Technology, Durbach, Germania, 17-22 Septembrie 2023

Alte școli/participări la evenimente

1. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, Summerschool NanoQI, San Sebastian, Spania, 22.07.2019 - 26.07.2019
2. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, Springschool on Quantum Information Theory and Thermodynamics at the Nanoscale, Al Hoceima, Maroc, 24.02.2020 - 28.02.2020
3. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, RonaQCI workshop, Timisoara, Romania, 12.10.2023 - 14.10.2023
4. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, RonaQCI workshop, Craiova, Romania, 30.10.2024 - 01.11.2024
5. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, RonaQCI workshop, Cluj-Napoca, Romania, 10.02.2025 - 11.02.2025

Listă cu alte activități conexe subiectului

1. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, *Organizator World Quantum Day Romania 2022*, Eveniment online - World Quantum Day - 14.04.2022
2. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, *Mentor - Hackathon de Calcul Cuantic pentru elevi de liceu și studenți - World Quantum Day 2023*, Hackathon-ul a inclus un bootcamp, sesiuni de învățare și pregătire, o sesiune de mentorat și un campionat de Calcul Cuantic bazat pe programul creat de Quarks Interactive - World Quantum Day - 24.03.2023-01.04.2023
3. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, *Mentor - Hackathon de Calcul Cuantic organizat de Quarks Interactive și Quantum Speed- World Quantum Day 2024*, 14.04.2024

Prizes

1. **L.M. Pioraș-Țimbolmaș**, *Câștigătoare a Programului de Burse ANIS*, Scopul Programului de Burse ANIS este de a stabili un parteneriat între industrie și mediul academic pentru a sprijini tinerii educatori și cercetători în transferul cunoștințelor în domeniul tehnologiilor emergente, București, Noiembrie 2023

Trainings

1. *Training for QKD industry adoption*, RonaQCI, Diploma de participare (tyXmL2YVW9), 2024
2. *Training for future quantum internet*, RonaQCI, Diploma de participare (yGtXJ7LTpW), 2025

Finanțări și granturi

Director de proiect

1. **Proiect de mobilitate**, *PN-IV-P2-2.2-MC-2024-0575* Program 5.2 Resurse Umane, Subprogram 5.2.2 - Mobilități, Karlsruhe, Germany, November-December 2024

Expert cheie

1. **QUTECH-RO**, *PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0338/79PCCDI/2018*: “*Developing Quantum Information and Quantum Technologies in Romania*”
2. *PN-IV-P1-PCE-2023-0987*: “*Towards a Theory of Non-Hermitian Superconductivity: Mean-field Approximations, Impurity Effects and Quantum Processing*”

Asistent de cercetare

1. **RoNaQCI**, *Romanian National Quantum Communication Infrastructure - Digital Europe Programme, European Union, Code DIGITAL-2021-QCI-01, Contract 101091562/08.12.2022*
2. **TDIH**, *Transilvania Digital Innovation Hub project. European Union, Project acronym: TDIH. Project code 101083508 TDIH, DIGITAL-2021-EDIH-01*

3. *Controlling the electronic properties in heterostructures based on ferroelectric perovskites: from theory to applications, Proiecte Complexe de Cercetare de Frontieră project PN-III-P4-ID-PCCF-2016-0047*
4. **Nucleu**, *MCID through the Nucleu Program within the National Plan for Research, Development and Innovation 20222027, project PN 23 24 01 04*
5. **CONSOL-ITIM**, *Programme 1 - Development of the National Research and Development System, Subprogramme 1.2 - Institutional Performance - Funding Projects for Excellence in RDI, Contract No. 37PFE/30.12.2021*

Activități didactice

1. *Cadru didactic asociat - Fizică generală*, Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, Departamentul de fizică și chimie, Cluj-Napoca, Romania, Octombrie 2020 - Iulie 2022
2. *Cadru didactic asociat - Informatică pentru fizicieni*, Universitatea Babeș-Bolyai, Facultatea de Fizică, Cluj-Napoca, Romania, Octombrie 2020 - Iulie 2022
3. *Cadru didactic asociat - Bazele informației cuantice*, Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, Facultatea de Automatică și Calculatoare, Cluj-Napoca, Romania, Octombrie 2022 - Iulie 2025
4. *Cadru didactic asociat - Mecanică Cuantică I*, Universitatea Babeș-Bolyai, Facultatea de Fizică, Cluj-Napoca, Romania, Octombrie 2024 - Februarie 2025