

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

Ostvarivanje kvantnih računala upotrebom sustava ionskih zamki

Niko Mađar

Voditelj: *Prof. dr. sc. Dubravko Horvat*

Zagreb, travanj, 2012

0. Sadržaj

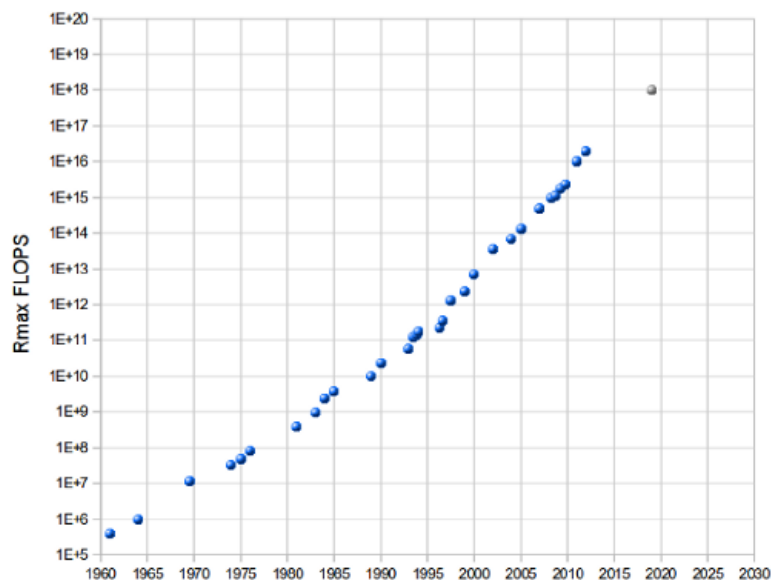
0. Sadržaj	2
1. Uvod	3
1.1. Povijesni razvoj	3
1.2. Pojmovi u kvantnom računanju	3
2. Ostvarivanje sustava ionskih zamki	4
2.1. Uvod u kvantne sustave	4
2.2. Linearna Paul zamka	4
2.3. Gibanje unutar ionske zamke	5
2.4. Elementi kvantnih računala	7
2.5. Operacije sa 1 i 2 qubtnim sustavima	7
2.6. Očitavanje	10
3. Zaključak	12
4. Literatura	13
5. Sažetak	14

1. Uvod

1.1. Povijesni razvoj

Napredak računalne tehnologije na prvi pogled čini se nezaustavljivim. Svakim danom čujemo nove vijesti kako su znanstvenici i inženjeri ostvarili sve brža i efikasnija računala. No, kako smo već duboko zakoračili u 21. stoljeće moramo se pitati gdje je granica klasičnoj tranzistorskoj tehnologiji.

Već od ranih godina računalne znanosti pretpostavljalo se da će se broj tranzistora koji se mogu smjestiti na jednu pločicu silicija svake dvije godine udvostručiti. (Moore-ov zakon). Taj rapidni napredak činio se sasvim dovoljnim za tadašnje potrebe i predviđanja budućnosti. No, kako smo danas već vrlo blizu toj čarobnoj granici, moramo tražiti nova rješenja za unaprjeđivanje i ubrzavanje računalnih sustava.



Slika 1. Moore-ov zakon
(predviđanje do 2020. godine.)

Zaokupljeni tim vrlo važnim tehničkim ograničenjem znanstvenici i inženjeri tražili su moguća rješenja, a među one koji se čine obećavajućim svrstava se i ideja kvantnih računala koja je zasnovana na teoriji kvantne mehanike.

Kvantna mehanika je sama po sebi vrlo mlada ali je već u kratko vrijeme od kada je formirana čovječanstvu uvelike pomogla da pomakne granice mogućeg i formiramo nove ideje za tehnička rješenja koja su se prije činila nemogućim.

Osnovna ideja koja je potrebna za razumijevanje kvantnih računala je činjenica da kada se spustimo na razinu subatomske čestice stvari više nisu tako čiste kao nule i jedinice. Riječ je o fenomenu koji elektronu u elektronskom omotaču atoma omogućuje da bude ne samo u pozitivnom ili negativnom stanju, već da bude u oba stanja istovremeno. Koliko god se to činilo nemogućim to je realnost subatomskog svijeta.

Do danas je formirano više načina na koje bi mogli iskoristiti tu bizarnost kvantnog svijeta, a jedna od tih je upravo sustav ionskih zamki.

1.2. Pojmovi u kvantnom računanju

Qubit – kvantni bit, analogan klasičnom bitu uz dodatak da osim što jednoznačno može biti u stanjima 0 i 1, može također biti u oba stanja istovremeno.

Koherentnost (sustava) – svojstvo sustava da zadrži informacije unutar određenog vremenskog roka bez ikakvih gubitaka

Kvantna isprepletenost – dvije čestice odvojene nakon fizičke interakcije mogu biti opisane istim kvantno mehaničkim definicijama (stanjima), koja su neodređena važnim faktorima kao što su pozicija, momentum, spin i polarizacija.

Kvantno stanje – set matematičkih varijabli koje u potpunosti opisuju neki kvantni sustav

2. Ostvarivanje sustava ionskih zamki

2.1. Uvod u kvantne sustave

Kako bi smo mogli ostvariti kvantno računalo potreban nam je vrlo specifičan okoliš. Moramo biti u stanju izvesti mnogobrojne operacije nad qubit-ovima (kvantnim bitovima) prije nego što njihova stanja ili izgube koherenciju ili njihove međusobne fazne veze propadnu, a one su upravo ono što čini kvantne računske operacije tako moćnima. Interakcija između kvantnih stanja i okoline nam se može učiniti kao ne premostiva prepreka jer prijeti životnom vijeku kvantnog sustava.

Svaki pokušaj izgradnje kvantnog računala nas zbog toga vodi u neželjenu poziciju da sustav istovremeno mora imati slabe odnose sa okolišem (kako bi spriječili gubitak koherencije), biti lako dostupan izvana, te da stanja moraju imati jake međusobne interakcije ili u protivnom nećemo biti u stanju njima manipulirati, implementirati kvantne algoritme i iščitavat rezultate u prihvatljivom vremenskom roku. Kako možemo udovoljiti sve te kontradiktorne zahtjeve?

Kako bi udovoljili sve navedene zahtjeve predložena je ideja ionskih zamki od strane Ignacio Ciraca i Peter Zollera (1995). Kao što samo ime implicira ideja je da se nabijene čestice zatoče u ograničen prostor koristeći magnetna i električna polja. Varijacija jedne takve zamke nazvana linearna radijsko-frekvencijska kvadrupolna zamka (eng. **RFQ** – radio-frequency quadrupole) ili linearna Paul zamka koristi vremensko promjenjiva električna polja kako bi se ioni držali u željenoj poziciji (kao kuglice na lančiću). Ti nam zatočeni ioni služe kao fizički qubitovi našeg kvantnog računala. Imobilizirani od strane polja i zatočeni u okolišu u kojem vlada super vakuum efektivo su izolirani od okoline. Međutim, individualne ione možemo adresirati precizno definiranim laserima. Pomoću tih lasera

možemo inicijalizirati računalo, kontrolirati stanja qubitova tijekom izvođenja logičkih operacija i iščitavati rezultate nakon završetka operacija. Interakcija između samih nabijenih čestica regulirana je Coulombovom silom.

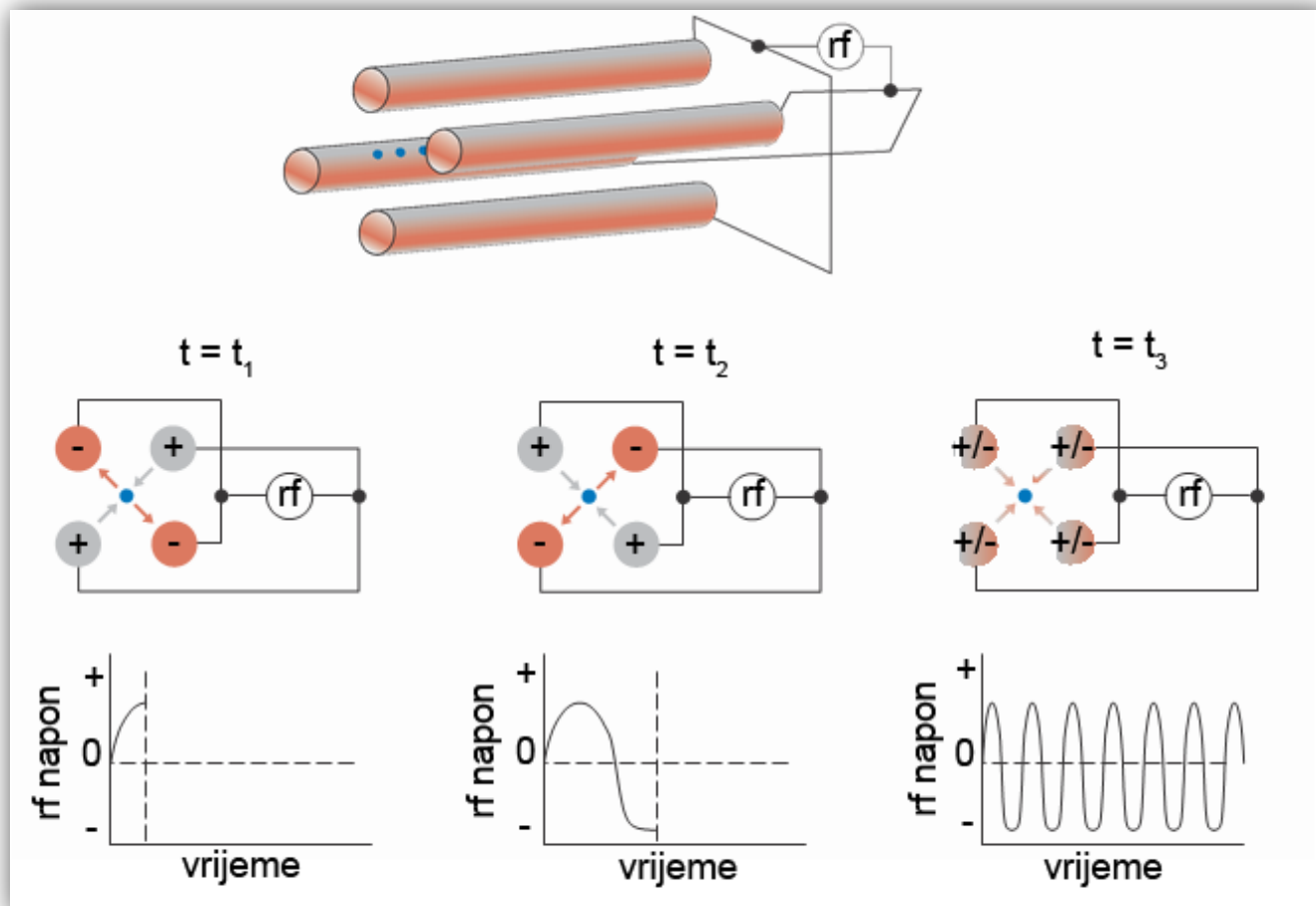
U nastavku ćemo razmotriti detaljnu implementaciju linearne Paul zamke.

2.2. Linearna Paul zamka

Kako bi razumjeli linearnu **RFQ** zamku zamislimo pozitivno nabijen ion koji lebdi u prostoru okružen sa četiri beskrajno duga vodiča (prikazano na slici 2). Na jedan par nasuprotnih vodiča dovedemo pozitivni naboj a na drugi par negativni naboj (ovisno o nekom arbitražnom 0-potencijalu). Pozitivno nabijen ion osjeća odbojnu silu prema pozitivno nabijenom paru vodiča te ga ta sila gura prema središtu zamke. Istovremeno ion osjeća privlačnu silu prema negativno nabijenom paru vodiča te ga to gura prema van.

Ako sada zamijenimo polaritet naboja, ion će se kretati u suprotnom smjeru. Ako tu izmjenu radimo dovoljno brzo „teški“ ion će biti previše trom da bi izmijenio kretanje i prilagodio se brzim izmjenama električnog polja. Zbog nemogućnosti praćenja brzih izmjena električnog polja ion će reagirati na prosjek vrijednosti električnog polja u nekom vremenu. Ako polaritet vodiča mijenjamo frekvencijom od nekoliko megahertza tako što primijenimo radio-frekvenciju(rf) i ako namjestimo amplitudu na pravi iznos, onda ćemo generirati prosječnu vrijednost električnog polja koja je harmonični pseudopotencijal čiji je minimum lociran u osi zamke. Značenje tog efekta je da će ion biti poguran na dno pseudopotencijala i time u teoriji biti zatočen zauvijek u neposrednoj blizini središta.

Kako bi mogli ostvariti selekciju iona koje stavljamo u zamku koristimo njihove mase tako što dodamo pozitivnu istosmjernu struju na rf



Slika 2. Linearna Paul zamka

naboj. Tako postižemo da ioni izvan određene granične mase osjećaju manji utjecaj sile te bivaju izbačeni iz zamke od strane odbojne sile prouzročene istosmjernom strujom. Na taj način možemo odabrati qubitne ione koje želimo zadržati, a izbaciti nepoželjne kao što su na primjer rezidualni ioni nekog plina koji je možda prisutan u vakuumu zamke.

Još uvijek nam preostaje činjenica da se ioni mogu slobodno gibati po središnjoj osi paralelno uz vodiče. Kako bi to spriječili na krajeve zamke dodamo par „krajnjih elektroda“ na koje dovedemo istosmjerni električni potencijal. Takvo stvoreno polje zatvara ione unutar tri dimenzije. Nakon toga smanjimo energije (temperaturu) iona i tako ih natjeramo da leže u središtu osi zamke gdje su potencijali okolnih polja u svom minimumu. Ohlađeni ioni se nalaze u središtu

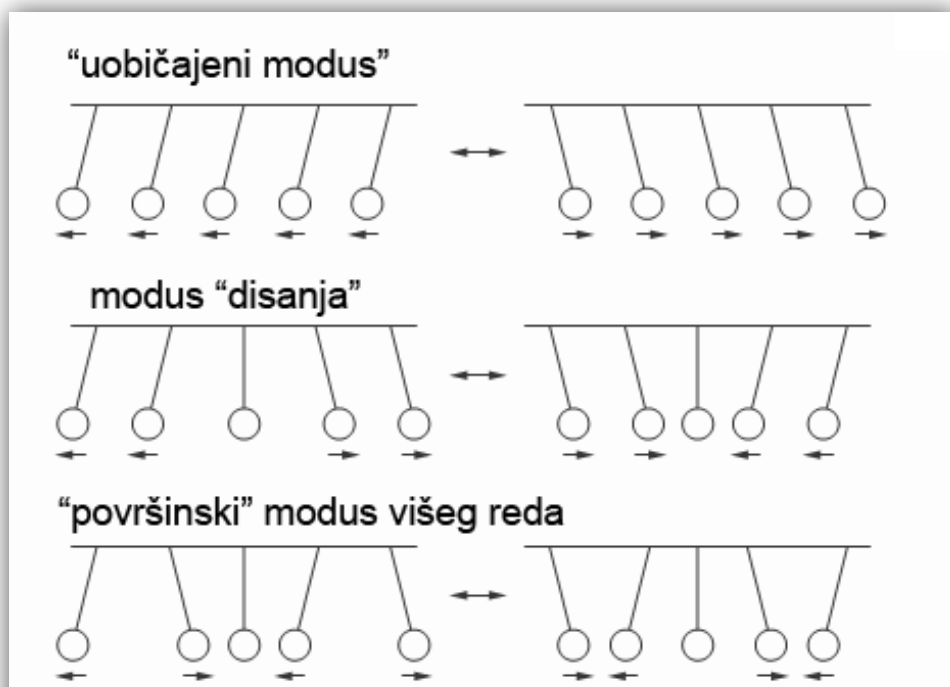
zamke, a odbojna Coulombova sila između iona djeluje tako da ih poravna u niz sa pravilnim razmacima.

2.3. Gibanje unutar ionske zamke

Kombinacija rf (izmjenične) i dc (istosmjerne) struje rezultira kompleksnim radijalnim gibanjem zatočenih iona. Međutim to gibanje je u potpunosti opisano setom diferencijalnih jednačbi zvanih „Mathieu's Equations“. Izračunom tih jednačbi dobivamo dijagram stabilnosti, pomoću kojeg možemo ocijeniti efektivnost zamke, uzimajući pri tome u obzir nekoliko važnih faktora kao što su amplitude rf i dc komponenata, iznos rf, masa iona i veličina zamke.

Sve dok vrijednosti kritičnih operacijskih parametara zadržavamo unutar određenih granica neki ion će ostati zatočen unutar osi uređaja. Također, veličina obnavljajuće sile pseudopotencijala koja drži ione u radijalnom smjeru ostat će direktno proporcionalna udaljenosti iona od središta (to je ujedno oznaka harmoničnog potencijala). Drugim riječima, dobrom aproksimacijom ioni će prolaziti kroz harmonijske oscilacije u radijalnom smjeru sa frekvencijom ω_r (ili frekvencijom ω_x i ω_y u x i y smjerovima). Ova gibanja se nazivaju sekundarnim gibanjima.

Gibanje iona može postati nepravilno ako minimum pseudoslučajnog potencijala nije centriran unutar same zamke. Takva ne centriranost se može dogoditi zbog asimetričnosti u izradi zamke ili zbog malih površina dc potencijala na vodičima. Nevezano uz razlog, ne centriranost će za rezultat imati ione koji leže van središta zamke. Ti ioni će doživljavati nagle oscilacije. Te oscilacije i druga mikro gibanja uzrok su zagrijavanja iona. Mikro gibanja možemo potisnuti tako što na neke od vodiča dodamo kompenzirajući dc napon. To će prouzročiti ponovno poravnavanje iona u stvarnom središtu polja.



Slika 3. Vibracijski modusi

Kako bi smo približili kako izgledaju vibracijska gibanja unutar niza iona u harmoničnom potencijalu zamislimo niz dobro povezanih penduluma. Vibracijska gibanja utječu na sve ione istovremeno. Ako pokrenemo bilo koji od iona, svi ostali u nizu će se također početi gibati. Isto tako ako uhvatimo jedan ion i zaustavimo ga svi ostali ioni u nizu će se također zaustaviti.

- „Uobičajeni“ modus (modus centra mase) u kojem se svi ioni prvo gibaju u jednom smjeru pa onda u drugom ima najnižu frekvenciju (najnižu energiju) svih modusa. Osnova ideje Ciraca i Zollera je korištenje uobičajenog modusa za vezanje dvaju qubita zajedno u jednu zamku.*
- Idući po iznosu frekvencije (energije) je modus "disanja". Za neparan broj penduluma srednji se ne giba. Ovaj modus je manje osjetljiv na zagrijavanje prouzrokovano eksternim šumom te je također iskorišten kako bi se vezali qubitovi unutar zamke.*
- "površinski" modus višeg reda je kao što samo ime govori je modus višeg reda. Drugim riječima ioni se također mogu gibati u trodimenzionalnom prostoru. Za N zatočenih iona postoji $3N$ vibracijskih modusa.*

Uz sva dosadašnja kretanja ion ili važnije, niz iona će također vibrirati u smjeru osi. Ta vibracija odvijat će se harmonično jer dc napon na krajevima „krajnjih elektroda“ stvara harmonični potencijal uzduž osi zamke. Te vibracije su slične nizu penduluma međusobno povezanih oprugama. Vibracija jednog iona će pokrenuti druge ione da također vibriraju uzduž osi zamke. (vidi sliku 3.). No, za razliku od klasičnog penduluma vibracije iona su kvantizirane, tj.

amplituda vibracije ovisi o broju kvanta (phonona*) uzduž vibracijske osi.

***phonon je kolekcija uzbuđenja unutar periodičnog, elastičnog aranžmana atoma ili molekula u materiji**

Za N iona u zamci, postoji $2N$ aksijalnih vibracijskih modusa za gibanja koja se odvijaju poprečno od osi same zamke. Svaki od modusa ima specifičnu frekvenciju vibracije. Najniža frekvencija (najniža energija) vibracije naziva se „uobičajeni“ modus. U njemu ioni osciliraju naprijed nazad uzduž osi zamke. Taj modus je istaknut u originalnom prijedlogu ionske zamke (Cirac i Zoller) zbog toga što svi ioni sudjeluju u „uobičajenom“ modusu oscilacije. To nam daje mogućnost da dodamo (ili oduzmemo) kvant energije gibanju jednog iona (tako što vršimo interakciju sa njim), a da istovremeno utječemo na sve ione u nizu. Svaka dva qubita neovisno o udaljenosti između njih zbog tog razloga mogu biti isprepleteni i tako obavljati logičke operacije.

***drugi sustavi ostvarivanja kvantnih računala koriste više frekvencijske moduse kako bi isprepleli dva ili više qubita. Ti modusi imaju kompleksnije vibracijske uzorke i relativno veće razine uzbuđivanja od „uobičajenog modusa“. Čak i niz izuzetno ohlađenih iona će vibrirati u kompleksnim oblicima različitih modusa. Taj problem adresiran je u odjeljku koji se bavi hlađenjem iona.**

2.4. Elementi kvantnih računala

1994. godine potaknuti uspjehom ionskih zamki u području visoko preciznih mjerenja, Cirac i Zoller su predložili da se **RFQ** ionske zamke koriste u kvantnim računalima zbog mogućnosti da obavljaju duge sekvence preciznih operacija, koje su upravo potrebne za takve sustave. Niz iona zatočenih unutar simetrijske osi zamke bi predstavljali kvantni registar računala. Svaki ion bi bilo moguće adresirati usko fokusiranim laserom, inicijalizirati ga na neko arbitražno stanje, manipulirati ga i na posljetku iščitati rezultate na njemu provedenih operacija. Najvažnija prednost

ionskih zamki je mogućnost dugoročne izolacije iona od okoliša. Ta prednost nam omogućuje održavanje koherentnosti sustava tijekom dužeg vremenskog perioda.

2.5. Operacije sa 1 i 2 qubtnim sustavima

Definirajmo logička qubitna stanja $|0\rangle$ i $|1\rangle$, njih mora sadržavati svako kvantno računalo. No, moramo naglasiti da oznake 0 i 1 u ovim izrazima nemaju nikakvu numeričku vrijednost, već se koriste samo kako bi ilustrirali o kojem se stanju radi. Sa $|0\rangle$ označit ćemo bazno stanje (stanje najniže energije), a stanje uzbuđenosti koje ima dugi životni vijek sa $|1\rangle$. Također želimo imati mogućnost obavljanja jedinične pretvorbe nad jednim qubitom, te mogućnost rotacije u Hilbertovom* prostoru na neku arbitražnu superpoziciju $|0\rangle$ i $|1\rangle$ stanja.

***matematički koncept Hilbertovog prostora generalizira ideju Euklidskog prostora. Proširuje metode vektorske algebre i aritmetike iz dvodimenzijanskog prostora u trodimenzijanski sa ograničenim brojem dimenzija. Hilbertov prostor je apstraktni vektor prostora koji posjeduje strukture unutrašnjeg produkta koji omogućava da se mjere duljine u kutovi. Također Hilbertovi prostori moraju biti potpuni, te tako omogućiti utvrđivanje postojanja dovoljnog broja granica u prostoru koje onda dozvoljavaju korištenje aritmetike u izračunima.**

Za obavljanje takvih radnji nad qubitom ion izložimo laseru specifične amplitude, frekvencije i trajanja. Ako pretpostavimo da se ion nalazi u baznom stanju, laser će potaknuti valnu funkciju elektrona ciljanog iona da pređe u superpoziciju baznog i uzbuđenog stanja (na taj način silimo elektron da prođe kroz dio Rabijeve oscilacije). Ako, na primjer, ion osvijetlimo takozvanim π -pulsom valna funkcija elektrona će proći kroz pola perioda Rabijeve oscilacije i ostaviti elektron u uzbuđenom stanju. Takav qubit zarotirao bi se iz $|0\rangle$ u $|1\rangle$ stanje. No, ako je puls prepolovljen (takozvani $\pi/2$ puls), ion će biti ostavljen u

podjednako težinskoj superpoziciji oko baznog stanja. Qubit bi se rotirao u $1/\sqrt{2}(|0\rangle + |1\rangle)$ stanje.

Laserske pulsove možemo koristiti kako bi ostvarili interakciju na pojedinom qubit (i tako uzбудiti njegovo stanje, ili promijeniti stupanj slobode).

No, kako bi ostvarili interakciju sa cijelim nizom iona istovremeno možemo koristiti dodatni laserski puls kojim uzbudimo vibracijske moduse zamke. Taj proces se može smatrati kao mijenjanje eksternog stupnja slobode qubita. Stanje niza qubitova j u zamci dan je sljedećim izrazom:

$$|q_1, q_2, \dots, q_j\rangle |n\rangle$$

Prvi ket $|q_1, q_2, \dots, q_j\rangle$ odnosi se na logička stanja qubitova, gdje je $q_j = 0$ ili 1 . Drugi ket $|n\rangle$ odnosi se na „uobičajeni“ modus vibracijskog stanja i vrijednost n -a, recimo $0, 1, 2, \dots$ označava broj

phonona unutar „uobičajenog“ modusa (napomena: niz qubitova može inicijalno biti u nekom drugom modusu, ali se ovdje ograničavamo na „uobičajeni“ modus).

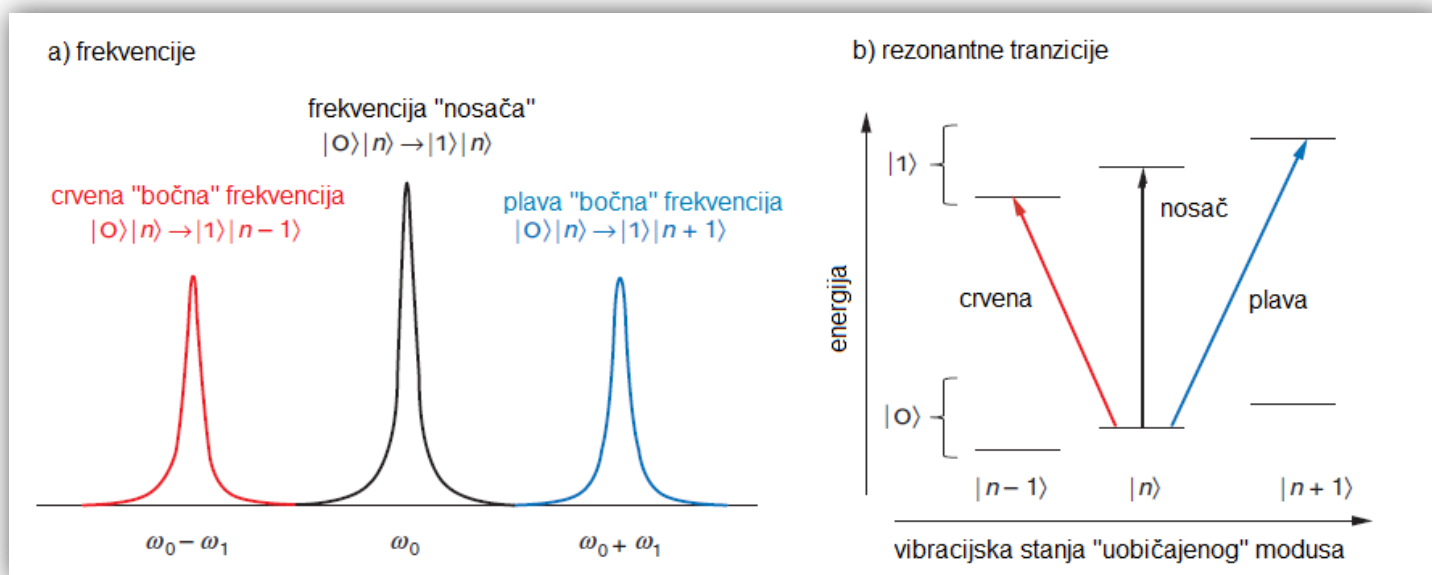
Dakle, u stanju:

$$|q_1, q_2, \dots, q_j\rangle |0\rangle$$

Ioni ne vibriraju jer nema phonona unutar „uobičajenog“ modusa. Dok, u:

$$|q_1, q_2, \dots, q_j\rangle |1\rangle$$

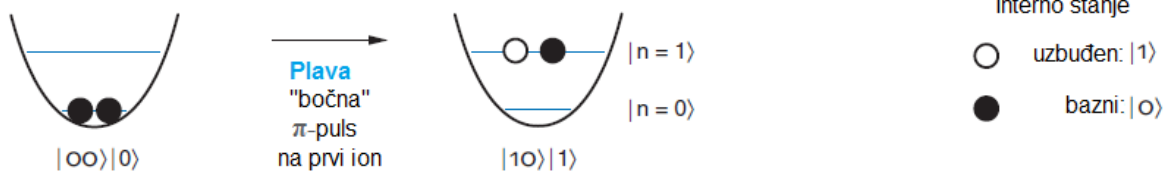
„uobičajeni“ modus sadrži jedan phonon i svi ioni se njišu uzduž osi zamke. „Uobičajeni“ modus možemo shvatiti kao sabirnicu koja veže različite ione zajedno. Kako bi bolje razumjeli vezanje uočimo prvo da je frekvencija tranzicije (ω_0), frekvencija između $|0\rangle$ i $|1\rangle$ stanja, te da je



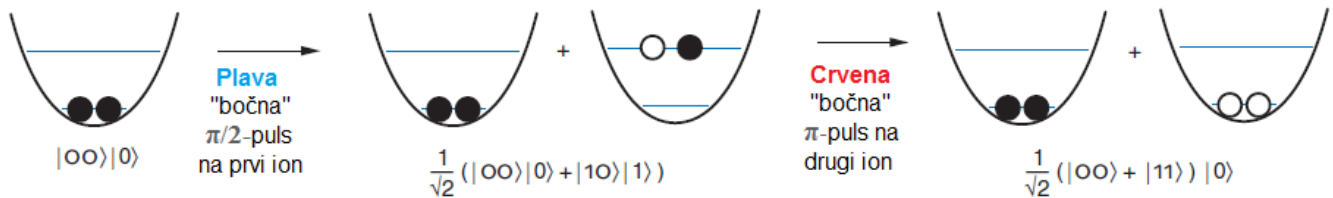
Slika 4. Spektar frekvencija

- Ionska zamka prirodno veže električno uzbuđenje nekog iona sa njegovim vibracijskim gibanjem. Svaka električna tranzicija na rezonantnoj frekvenciji ω_0 (nazivamo ju još i „nosač“) je zbog toga praćena „bočnim“ tranzicijama. Prikazane su dvije „bočne“ frekvencije najbliže „nosaču“: crvena „bočna“ frekvencija je niske energije sa frekvencijom $(\omega_0 - \omega_1)$ i plava „bočna“ frekvencija više energije sa frekvencijom $(\omega_0 + \omega_1)$. Laser dovoljno uske valne duljine može vršiti interakcije sa ionom preko specifičnih „bočnih“ frekvencija ili preko „nosača“**
- Interakcija sa specifičnim qubitom (ionom) preko „bočnih“ tranzicija promijeniti će interno stanje qubita i istovremeno eksterno stanje svih drugih qubitova u zamci. To će postići ili povećanjem broja phonona u „uobičajenom“ stanju za 1 (uzbuđivanje na plavoj „bočnoj“ frekvenciji) ili smanjivanjem broja phonona za 1 (uzbuđivanje na crvenoj „bočnoj“ frekvenciji).**

a) Vezanje dva qubita korištenjem "uobičajenog" modusa



b) ispreplićanje dvaju qubitova



Slika 5. Korištenje "uobičajenog" modusa za ispreplitanje dva qubita

Vibracijsko stanje istaknuto je položajem iona na prečkama ljestvi unutar harmonijskog potencijala. U ovom dijagramu električno bazno stanje iona označeno je crnom kuglicom; uzbuđeno stanje iona označeno je bijelom kuglicom.

- a) Pretpostavimo da su dva qubita inicijalizirana u stanje $|00\rangle|0\rangle$. Adresiranjem prvog qubita π -pulsom, laserom kalibriranim na plavu „bočnu frekvenciju“, uzбудit ćemo ion i on će preći u stanje $|10\rangle|1\rangle$. Prvi ion je u uzbuđenom stanju dok je drugi ostao u električnom baznom stanju. No, pošto „uobičajeni“ modus utječe na sve ione, oba iona će biti uzbuđeni na vibracijsko stanje $|n=1\rangle$.
- b) Dva qubita mogu biti isprepletena tako što prvi qubit obasjamo sa $\pi/2$ -pulsom, laserom kalibriranim na plavu „bočnu“ frekvenciju. Ioni su smješteni u superpoziciju stanja $1/\sqrt{2}(|00\rangle|0\rangle + |10\rangle|1\rangle)$. Ako sad drugi ion obasjamo π -pulsom, lasera kalibriranog na crvenu „bočnu“ frekvenciju, on može apsorbirati foton samo ako je dostupna dodatna energija iz vibracijskog stanja. Zbog toga je drugi ion uzbuđen samo ako je uzbuđen i prvi ion (ostaje u baznom stanju ako je prvi ion bio u baznom stanju). Dvo-ionski sustav zbog toga pokazuje jaku korelaciju, što je po Bohru, definira isprepletenost. Krajnji rezultat operacije je isprepleteno stanje $1/\sqrt{2}(|00\rangle + |11\rangle)|0\rangle$.

frekvencija „uobičajenog“ modusa vibracije ω_1 puno manja od ω_0 . Slično slučaju kad su dva harmonična oscilatora vezana, energija spektra iona rezonira ne samo sa frekvencijom „nosač“ (ω_0), već i sa „bočnim“ frekvencijama $\omega_0 \pm \omega_1$ (vidi sliku 4.).

Sada, uzmimo na primjer proces kojim želimo dva iona staviti u isprepleteno stanje. Pretpostavimo da su ioni inicijalno u $|00\rangle|0\rangle$ stanju. Kada bi smo sada adresirali prvi ion sa laserskim π -pulsom obadva iona bi prešla u uzbuđeno stanje. Taj efekt nastaje zbog toga što uzbuđenje u „uobičajenom“

modusu utječe na oba iona i tako dvo-qubitno stanje prelazi u $|10\rangle|1\rangle$. Ako sad umjesto π -pulsom prvi qubit adresiramo sa $\pi/2$ -pulsom (vidi sliku 5.), oba qubita će preći u superpoziciju dva stanja:

$$1/\sqrt{2}(|00\rangle|0\rangle + |10\rangle|1\rangle).$$

Nakon toga drugi ion (koji je još uvijek u baznom stanju) adresiramo sa π -pulsom kalibriran na crvenu „bočnu“ frekvenciju. Energija lasera je preniska kako bi pobudila skakanje iz baznog u uzbuđeno stanje, ali će se prijelaz ipak dogoditi

ako je moguće uzeti dodatne energije iz „uobičajenog“ stanja. Rezultat ovoga je da su svi phononi uklonjeni iz kvantnog registra na kraju operacije te se stvara dvo-qubitno isprepleteno stanje:

$$1/\sqrt{2}(|00\rangle + |11\rangle|0\rangle).$$

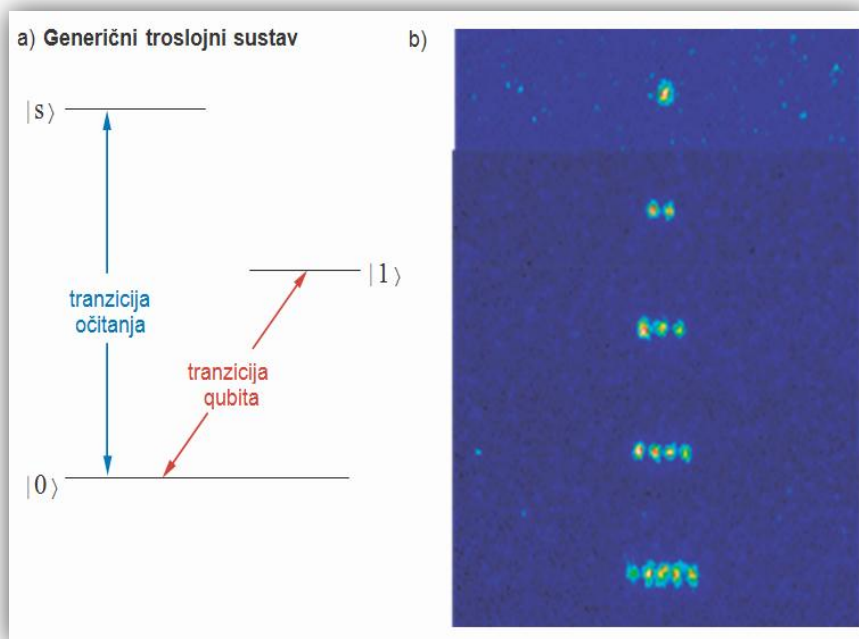
Sustav više ne možemo opisivati kao pojedinačnog iona koji se nalazi u baznom ili uzbuđenom stanju. Rezultat mjerenja jednog iona usko je vezan za stanje drugog iona. Primijetimo da ovaj proces funkcionira i ako između ova dva iona ubacimo nekoliko drugih iona jer je uzbuđenje zajedničko svim ionima u „uobičajenom“ stanju.

2.6. Očitavanje

Na kraju kvantnih kalkulacija, individualni qubitovi unutar kvantnog registra biti će u određenim stanjima. Ta stanja moramo moći očitati uz visok postotak točnosti. Jedan od moćnijih alata za očitavanje koristi se fenomenom kvantnih skokova. Tehnika očitavanja može biti lako objašnjena ako promotrimo generičnu shemu iona prikazanih na slici 6.

Ion ima dva stanja koja identificiramo kao logičko qubitno $|0\rangle$ i $|1\rangle$ stanje. No, ioni korišteni u kvantnim izračunima također imaju uzbuđeno stanje kratkog životnog vijeka $|s\rangle$ koje je dohvatljivo iz $|0\rangle$ stanja putem laserskog pobuđivanja. Kada laser tjera $|0\rangle \rightarrow |s\rangle$ tranziciju kroz duži vremenski period ioni postaju fluorescentni i emitiraju velike količine fotona. Ako to stanje nije dohvatljivo jer je ion bio u $|1\rangle$, onda neće biti fluorescentnosti. Detekcija fluorescentnog signala nam dakle govori

da je qubit u $|0\rangle$ stanju, te možemo zamijetiti „skokove“ iona između $|0\rangle$ i $|1\rangle$ stanja koja su distinktna zbog jačine svoje fluorescentnosti. Ovakav tip očitavanja će u potpunosti uništiti informacije sadržane u qubitovima te je prvenstveno namijenjen za demonstraciju. Pretpostavimo da je ion u superpoziciji jednakih $|0\rangle$ i $|1\rangle$ stanja, sad ispitajmo laserom stanje qubita. Kao rezultat nećemo dobiti originalno stanje qubita. Kada bismo htjeli ispitati odnos dvaju stanja u superpoziciji morali bi mjerenje obaviti više puta te rezultatima pristupiti statistički.



Slika 6. Očitavanje putem kvantnih skokova

- Ilustrirana je generična troslojna shema iona u zamci. Qubitna stanja $|0\rangle$ i $|1\rangle$ tipično predstavljaju bazno i uzbuđeno stanje. Stanje $|s\rangle$ je kratkog životnog vijeka i vezano je za bazno stanje. Ako je ion u baznom stanju, neki niži može tjerati $|0\rangle \rightarrow |s\rangle$ tranziciju mnogo puta u sekundi i ion će postati fluorescentan. Ako ion „skoči“ u $|1\rangle$ stanje, neće biti fluorescentnosti. Dakle, prisutnost ili nedostatak velike količine fluorescentnog signala otkriva nam stanje qubita.*
- Ova slika pokazuje niz kalcijevih iona koji su laserski ohlađeni na temperaturu blizu apsolutne nule. Razmak između iona je otprilike $30\ \mu\text{m}$. Otprilike 10^8 fotona je apsorbirano i emitirano svake sekunde dok laser ozračuje ion. Fotonski flux lako je moguće otkriti sa CCD kamerom. Fluorescentnost je zapravo dovoljno svijetla da je vidljiva golim okom, osim što je kod kalcija*

Ako želimo zadržati kvantni karakter stanja iona na kraju kalkulacije možemo postupiti na drugi način. Razmotrimo ion položen u visoko kvalitetnu optičku šupljinu koja je usklađena sa rezonancijom interne tranzicije iona. Ako je ion u $|1\rangle$ stanju emitirat će se foton, a ako je u $|0\rangle$ stanju neće se dogoditi emitiranje fotona. Ako je ion u superpozicijskom stanju, foton u optičkoj šupljini će završiti u superpoziciji između stanja kada je jedan foton u šupljini i kada nema fotona u šupljini. Tim načinom kvantno stanje iona ili atoma može biti preneseno na foton. To stanje bi moglo biti preneseno kroz optička vlakna u drugu zamku, pa opet u drugu zamku, itd.

3. Zaključak

U zadnjih nekoliko godina predložen je veliki broj sustava koji bi mogli postići kvantno računanje. Na primjer: laserski hladene ionske zamke, nuklearna magnetna rezonancija, kvantna elektrodinamika šupljine, supervodljivi uređaji, kvantne točke, te uređaji čvrstog stanja zasnovani na siliciju.

Iz preliminarne istraživanja nekoliko skupina iz cijelog svijeta, ustanovljeno je da su ionske zamke dostatne za držanje i manipuliranje malih količina qubitova. Iako pet do deset qubitova ne čini bilo kakvo korisno računalo, ovi brojevi nam daju do znanja da je vrijedno nastaviti sa njihovim istraživanjem. Ionske zamke biti će vrlo moćan alat za daljnje istraživanje (npr. mogućnost ispreplitanja velikih brojeva qubitova). Istraživanja će nam pomoći da prepoznamo fizičke probleme koji moraju biti otklonjeni kako bismo postigli povećanje računalne snage.

Također moramo očekivati da će mnoge tehnologije koje se trenutno koriste za istraživanje kvantnog računanja biti zastarjele u korist nekih noviji i boljih. Jedna od takvih ideja je multipleksiranje ionskih zamki tako da postignemo veliki broj qubitova, te da imamo posebnu zamku sa određenim brojem qubitova koja ima ulogu centralnog procesora. Nakon implementiranja neke kvantne kalkulacije qubitovi bi bili poslani u nekoliko spremišnih zamki i tako omogućili daljnje učitavanje qubitova u zamke.

Nedavni radovi nam također predviđaju mogućnost prenošenja internih kvantnih stanja niza iona u zamci na niz fotona koji se nalaze u visoko preciznoj šupljini. Kvantne informacije bi se onda prenosile optičkim vlaknima u sekundarnu šupljinu i ponovno učitavale u niz u nekoj drugoj zamci. Ovakav razvoj će se sigurno nastaviti i omogućiti će nam da istražimo kvantno računanje daleko naprednije od današnjih sustava.

Kako se bližimo realizaciji malog kvantnog procesora tako nam vremenske performanse nekog sustava postaju sve važnije. Općenito vremenske performanse u ionskim zamkama su vrlo obećavajuće. Manipulacije nad kvantnim registrima mogu se obavljati u mikrosekundama, dok je štetne utjecaje okoliša moguće zaobići u milisekundama. Vrijeme koherencije je također obećavajuće jer je ograničeno životnim vijekom gornjeg qubitnog stanja (npr. 1 sekunda za kalcijeve ione). No, to vrijeme je moguće još dalje unaprijediti i to odabirom iona kao što su na primjer ytterbium ili odabirom stabilnih baznih stanja super finih razina koje onda koristimo kao logička qubitna stanja.

Sve u svemu kvantna računala se ne čine više kao znanstvena fikcija. Samo je pitanje vremena kada će postati uobičajena pojava naše svakodnevnice, a kad se pojave promijenit će svijet svojom brzinom i mogućnostima.

Važno je istaknuti da unatoč revolucionarnim napredcima u zadnjih 50 godina, fundamentalni principi računala nisu se promijenili. Današnje najbrže računalo funkcionira na istim pravilima kao i ENIAC. Kvantno računanje, međutim predstavlja promjenu paradigme procesiranja informacija. Iako moguće buduće kvantno računalo možda neće ni naličiti ionskim zamkama, iskustvo i znanje koje sada steknemo biti će od fundamentalne važnosti za razumijevanje te nove paradigme. Za neke znanstvenike važno je razviti kvantno računalo kako bi mogli probiti zaštitne kodove, što je uistinu izazovan i zahtjevan cilj. Ali, za većinu ostalih znanstvenika obavljanje istraživanja (o kojima recimo Erwin Schrödinger i Albert Einstein nisu ni mogli sanjati) i stjecanje dubokih spoznaja „neshvatljivog“ kvantnog svijeta nudi mnogo više nagrada. Moguće je da će se dogoditi pogreške i neuspjesi. Na primjer moguće je da će se problem koherencije ispostaviti kao nepremostiva prepreka. U svakom slučaju budućnost nudi uzbudljiva vremena za svijet računala.

4. Literatura

- i. Autor: Michael H. Holzcheiter
Naziv publikacije: Los Alamos Science, number 27
Naziv poglavlja: Ion-Trap Quantum Computation
Godina izdanja: 2002.
Link: <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00783367.pdf>
- ii. Naziv: Google demonstrates quantum computer image search
Autor: Paul Marks
Datum: 11.12.2009.
Link: <http://www.newscientist.com/article/dn18272-google-demonstrates-quantum-computer-image-search.html>
- iii. Naziv: Quantum Computer
Link: http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computer
- iv. Naziv: Quantum gate
Link: http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_gate
- v. Naziv: Quantum Computing
Datum zadnje aktualizacije: 1.5.2012.
Link: <http://explainingcomputers.com/quantum.html>
- vi. Naziv: Trapped ion quantum computer
Link: http://en.wikipedia.org/wiki/Trapped_ion_quantum_computer
- vii. Naziv: ion trap quantum computing
Autorica: Miranda Marquit
Datum objave: 12.5.2009.
Link: <http://phys.org/news161348276.html>
- viii. Naziv: U-M develops scalable and mass- producible quantum computer chip
Datum objave: 14.12.2005.
Izvor: University of Michigan
Link: <http://phys.org/news9063.html>
- ix. Naziv: The Usefulness of NMR Quantum Computing
Autor: Warren S. Warren
Datum i naziv publikacije: 12.9.1997. Science Magazine
Link: <http://www.sciencemag.org/content/277/5332/1688.full>

5. Sažetak

Koje su granice računala izgrađenih na klasičnim tranzistorskim tehnologijama? Kao što je predvidio Moore-ov zakon približavamo se granici kada nećemo moći smjestiti više tranzistora na jedan silikonski čip. Kako bi izbjegli problem sve većeg broja tranzistora na sve manjem području čipa, a ipak povećali procesorsku snagu, znanstvenici su formirali teoriju kvantnog računala. Sama teorija je obećavajuća i mnogi je vide kao budućnost računala. Za realizaciju samo kvantnog računala osmišljen je veliki broj tehnika.

Jedna od njih je tehnika ionskih zamki. Kod ove metode unutar elektromagnetskih polja zarobimo nekoliko iona. Te ione onda pomoću različitih interakcija (frekvencijama magnetnih polja i laserima) možemo manipulirati. Pomoću lasera ione postavimo u nama poželjno početno stanje te ponovno putem lasera izazovemo promjenu koja će za posljedicu imati izvršavanje naše željene kvantne kalkulacije. Kako bi očitali podatke a da ne narušimo njihovu postojanost i preciznost primjenjujemo metodu kvantnog tuneliranja. Pomoću te tehnike očitavamo rezultate naše kalkulacije.

Rad sa takvim ionskim zamkama je vrlo zahtjevan i podložan je rigoroznim uvjetima. Svi parametri ovog zatvorenog sustava moraju biti u visokom postotku preciznosti, inače riskiramo gubitak koherencije i time gubitak podataka. Sustavi kvantnih računala su vrlo obećavajući i sigurno imaju svoje mjesto u budućnosti procesiranja informacija. No, kako bi se realizirali takvi sustavi trebat će nam još mnogo godina istraživanja i eksperimentiranja.