



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

**TECNOLOGIE HARDWARE PER CALCOLATORI
QUANTISTICI: UNA RASSEGNA BIBLIOGRAFICA**

Relatore: Carlo Fantozzi

Laureando: Riccardo Dalle Palle

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 21/03/2023

INDICE

<i>1. INTRODUZIONE</i>	5
1.1. I computer classici	5
1.2. La storia del computer quantistico.....	6
<i>2. CALCOLATORE QUANTISTICO</i>	8
2.1. Principi della computazione quantistica	8
2.2. Decoerenza	8
2.3. Il qubit.....	9
2.4. Qubit multipli.....	10
2.5. Sfera di Bloch	10
2.6. Componenti principali del computer quantistico	11
2.6.1. Porte logiche quantistiche	12
2.6.2. Memoria quantistica.....	13
2.6.3. Processore quantistico (QPU)	13
2.6.4. Sistemi di controllo	13
2.6.5. Rilevazione e correzione di errori	14
2.7. Simulatore quantistico	14
<i>3. IMPLEMENTAZIONE del QUBIT</i>	15
3.1. Condizioni per la realizzazione.....	15
3.2. Trappole ioniche	17
3.2.1. Come intrappolare uno ione	17
3.2.2. Requisiti per l'implementazione	20
3.2.3. Problematiche.....	21
3.3. Atomi neutri in reticoli ottici	21
3.4. Oscillatore armonico.....	22
3.4.1. Apparato fisico	22
3.4.2. Problematiche.....	23
3.5. Fotoni ottici.....	23

3.5.1. Panoramica.....	23
3.5.2. Problematiche.....	24
3.6. Superconduttori.....	25
3.6.1. Implementazione.....	25
3.6.2. Stato attuale.....	26
3.7. Risonanza magnetica nucleare.....	27
3.7.1. Implementazione.....	27
3.7.2. Problematiche.....	28
3.8. Altre tecnologie	28
3.8.1. Risonanza magnetica nucleare a stato solido	28
3.8.2. Punti quantici	29
3.8.3. Spin nei semiconduttori.....	30
3.8.4. Atomi vibrazionali	30
4. <i>CONCLUSIONI</i>	32
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	33

1. INTRODUZIONE

1.1. I computer classici

La creazione di un macchinario che semplificasse le operazioni di calcolo è sempre stato un obiettivo delle società umane fin dall'antichità. L'uomo, infatti, in tutte le epoche ha usato strumenti di calcolo più o meno complessi: dall'abaco, usato dai babilonesi e sumeri per l'esecuzione di semplici calcoli matematici, alla macchina di Anticitera, usata per calcolare il calendario e la posizione dei corpi celesti. Nel 1642 Blaise Pascal realizzò la prima calcolatrice meccanica, nota come *pascalina*, strumento che consentiva l'addizione e sottrazione tra numeri composti da un massimo di 12 cifre.

Questo lento cammino verso i giorni nostri ha avuto un'importante accelerazione nel corso dell'ultimo secolo. Nel 1936, dalla mente di Alan Turing nacque la “*macchina di Turing*” [1], il primo modello teorico di quello che noi oggi definiamo computer programmabile, modello che aprì la strada allo sviluppo del moderno computer iniziata con Eniac.

Da allora la creazione di nuovi computer e la potenza hardware hanno mostrato un ritmo di crescita straordinario. Nel 1965, Gordon Moore formulò [2] la celebre legge di Moore che descrive il ritmo di tale crescita:

” La complessità di un microcircuito, misurata ad esempio tramite il numero di transistor per chip, raddoppia ogni 18 mesi (e quadruplica quindi ogni 3 anni). ”

Questa legge, tuttavia, non sarà valida per sempre. La riduzione delle dimensioni dei transistor arriverà a dei limiti fisici al di sotto dei quali si genererebbero effetti parassiti indesiderati di natura quantistica, rendendo quindi quasi impossibile proseguire il percorso di miniaturizzazione. Sicuramente l'informatica non potrà fermare la sua corsa, ma è certo che non potrà più basare il suo modello di business e di sostenibilità sulla linearità della legge di Moore. Questo ha in realtà aperto la strada ad un cambio di paradigma, poiché ora si sta cercando di utilizzare i principi della meccanica quantistica per raggiungere una capacità di elaborazione superiore a quella dei computer convenzionali, senza dover necessariamente ridurre le dimensioni dei circuiti elettronici.

1.2. La storia del computer quantistico

Nasce così l'approccio teorico al computer quantistico che, anziché essere basato sui bit classici che possono essere solo 0 o 1, sfrutta quelli che vengono chiamati qubit, l'unità base dell'informazione quantistica, non più codificata da 1 o 0 solamente, ma dallo stato quantistico in cui si trova un atomo o una particella, che può assumere valore "0", "1", o entrambi "0" e "1" simultaneamente.

Già nei primi anni '80 si iniziò a parlare dei computer quantistici, quando nel 1982 R. Feynman teorizzò [3] l'esistenza di quelli che oggi vengono chiamati "*simulatori quantistici*", dispositivi non basati più sulla fisica classica ma su meccanismi quantici. I simulatori quantistici, nell'idea di Feynman, sono dispositivi speciali progettati per fornire informazioni su problemi fisici specifici, in quanto, nella sua visione la natura non risponde alle leggi della fisica classica, ma a quelle quantistiche.

Partendo da queste teorie, nel 1985, il fisico britannico David Deutsch riuscì a dimostrare che il computer quantistico è in grado di risolvere problemi in modo molto più efficiente rispetto ai computer classici [4].

Nel 1994 Peter Shor pubblicò l'algoritmo per la fattorizzazione degli interi in tempo polinomiale, un problema che si ritiene ancora oggi non abbia una soluzione efficiente su un computer classico. Shor invece dimostrò come questo problema possa essere risolto in un tempo polinomiale su un computer quantistico [5].

Questi vantaggi risultano già abbastanza rilevanti da far preferire un computer quantistico a un computer classico, inoltre si presume che la computazione classica non sarà mai in grado raggiungere risultati paragonabili a quelli dei futuri computer quantistici. Tuttavia, per la realizzazione di computer quantistici ci sono ancora da affrontare grandi difficoltà, tra cui le criticità legate alla manipolazione controllata di atomi, la loro interconnessione e comunicazione, nonché lo sviluppo di algoritmi ottimizzati per l'esecuzione su un computer quantistico. La sfida maggiore per la computazione quantistica sarà quindi trovare soluzioni per rendere vantaggiosa ed economicamente sostenibile la costruzione su larga scala di computer quantistici.

2. CALCOLATORE QUANTISTICO

2.1. Principi della computazione quantistica

Come già accennato in precedenza, il funzionamento del computer quantistico è basato sulle leggi della meccanica quantistica [6]. In estrema sintesi, le proprietà principali su cui si basa il quantum computing possono essere ricondotte a due proprietà quantistiche del qubit:

- il “*principio di sovrapposizione*”, che nella fisica quantistica rappresenta l’esistenza simultanea di tutti gli stati possibili di una particella o entità fisica prima della misurazione dello stato stesso.
- la “*correlazione quantistica*” (entanglement), che indica il legame esistente tra due o più particelle o, nel nostro caso specifico, due o più qubit; secondo tale principio, due o più particelle diventano collegate tra di loro in modo che lo stato di una particella non possa essere descritto indipendentemente dallo stato delle altre particelle a cui è collegata.

2.2. Decoerenza

La decoerenza è un fenomeno fisico che si verifica quando un sistema quantistico, che è in uno stato di sovrapposizione quantistica, interagisce con l'ambiente circostante, causando la transizione a uno stato classico. La più minuscola variazione della temperatura del sistema, ad esempio, può causare la perdita della sovrapposizione, vanificando quindi qualsiasi misurazione o risultato di calcolo che

potrebbero essere prodotti dai qubit interessati. Sfortunatamente, la decoerenza è un processo molto difficile da controllare e le varie soluzioni fino ad ora adottate risultano tutte particolarmente complesse ed onerose da implementare. La soluzione a questo problema rappresenta uno dei principali ostacoli per la costruzione di computer quantistici stabili e funzionanti su larga scala [7].

2.3. Il qubit

L'unità fondamentale del computer classico è il bit, il quale può avere due possibili stati: "0" e "1". Nel computer quantistico l'unità fondamentale è invece il quantum bit o qubit [8]. Il qubit può valere "0", "1" o simultaneamente "0" e "1". Matematicamente un qubit può essere rappresentato [9] come

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,$$

dove α e β sono dei numeri complessi che descrivono la probabilità di ottenere gli stati $|0\rangle + |1\rangle$ tali per cui

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

Detto in altri termini, lo stato di un qubit è un vettore unitario dello spazio degli stati hilbertiano di dimensione 2 in cui gli stati speciali $|0\rangle$ e $|1\rangle$ formano una base ortonormale detta base computazionale, per cui un qubit può essere rappresentato tramite un vettore del tipo

$$\psi = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}.$$

Questi stati intermedi del qubit, che implicano una coesistenza degli stati classici 0 e 1 in determinate proporzioni, vengono chiamati "*sovrapposizioni di stati*" e possono essere interpretati come situazioni di incertezza sullo stato interno del qubit, sul cui valore non abbiamo garanzie assolute ma solo una probabilità che questo possa essere 0 oppure 1.

Il qubit, fisicamente, viene rappresentato con un sistema fisico che possiede due livelli, come la polarizzazione di un singolo fotone, lo spin di una particella o lo stato neutro o di eccitazione in cui si può trovare un atomo (nel capitolo 3 descriveremo nel dettaglio alcune delle tecnologie attualmente più promettenti).

2.4. Qubit multipli

Un qubit multiplo è un insieme di due o più qubit che possono essere correlati tra loro in modo quantistico. Questa correlazione quantistica tra i qubit rappresenta uno dei fenomeni più interessanti e potenti della computazione quantistica [8, pp. 68-70]. Per esempio, un numero generato da due bit può avere un solo valore tra i quattro possibili {00, 01, 10, 11}. Allo stesso tempo, un sistema di due qubit può essere in una sovrapposizione di tutti e quattro i possibili stati:

$$\psi = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle.$$

Questa condizione assume un significato notevole se si pensa alla progressione matematica: 2 qubit possono avere ben 4 stati quantistici in contemporanea, 4 qubit 16 stati, 16 qubit 256 stati e così via, potendo arrivare a quantità che nessuno strumento elettronico attualmente è in grado di avvicinare minimamente. In questo modo, rispetto ad un computer classico che elabora input differenti separatamente, un computer quantistico può lavorare in parallelo elaborando più input contemporaneamente.

2.5. Sfera di Bloch

Considerando che il bit può essere rappresentato classicamente come un interruttore con i suoi due stati “acceso” e “spento”, in che modo possiamo rappresentare il qubit in modo altrettanto efficace? Un’utile rappresentazione geometrica del qubit esiste e viene chiamata Sfera di Bloch, ovvero una sfera di raggio unitario della quale i due poli rappresentano rispettivamente i due stati fondamentali. In pratica, si può rappresentare un qubit disegnando una sfera di raggio unitario e tracciando un raggio dal centro della sfera a qualsiasi punto sulla sua superficie. Questo raggio rappresenta lo stato del qubit. dove quando punta verso il nord della sfera, lo stato del qubit è "0" e quando punta verso il sud, lo stato del qubit è "1". In tutti le altre posizioni, con il raggio che spazia sulla superficie della sfera, si può definire lo stato relativo del qubit in base agli angoli formati dal raggio rispetto all’asse verticale della sfera e alla sua proiezione sul piano che la attraversa orizzontalmente.

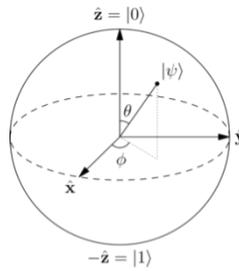


Figura 1. Sfera di Bloch. Fonte: Glosser.ca, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

2.6. Componenti principali del computer quantistico

Dopo aver parlato dell'unità fondamentale dell'informazione, e alcuni dei principi che regolano il funzionamento di un computer quantistico, andremo a definire e descrivere brevemente i componenti hardware da cui sono costituiti: porte logiche, memoria, processore (QPU), sistemi di controllo e misurazione e strumenti di rilevazione e correzione errori [10].

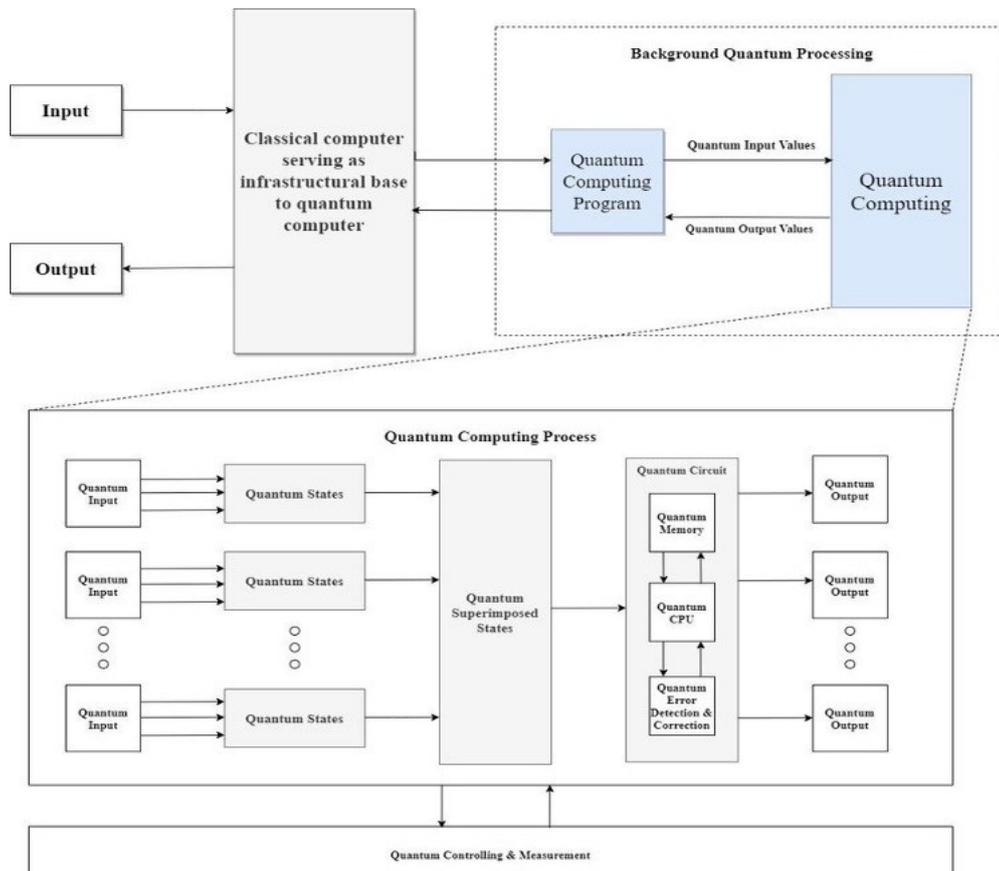


Figura 2. Schema base dei componenti di un computer quantistico. Fonte [8, p. 73].

2.6.1. Porte logiche quantistiche

La funzione di una porta quantistica in un computer quantistico è quella eseguire operazione sullo stato dei qubit e su circuiti che operano con un piccolo numero di qubit; queste porte sono quindi l'analogo delle porte logiche dei computer convenzionali che operano sul bit.

Analizziamo ora come si potrebbero realizzare due porte logiche semplici relative a un qubit singolo: la porta identità e quella NOT. Nel caso di un bit la porta identità mantiene semplicemente inalterato lo stato del bit mentre la porta NOT ne inverte lo stato (da 0 a 1 o da 1 a 0). Anche nel caso del qubit la porta identità mantiene inalterato l'informazione contenuta al suo interno, ma come si potrebbe realizzare una porta NOT per un qubit? Mentre nel caso classico si può semplicemente scambiare gli stati, cosa accadrebbe invece alla sovrapposizione degli stati nei qubit? A causa delle proprietà della meccanica quantistica, tutte le porte quantistiche devono essere lineari. Ciò significa che se avevamo lo stato iniziale $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, lo stato ottenuto dalla porta NOT sarebbe $\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$. Un modo conveniente per rappresentare le porte quantistiche è dato dalle matrici. Se per esempio definiamo la porta NOT come la matrice

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

allora l'azione della porta NOT può essere scritta come

$$|\psi'\rangle = X |\psi\rangle = X \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix}.$$

Le porte quantistiche devono avere le seguenti proprietà.

- Essere reversibili, a differenza di alcune porte classiche (ad esempio la porta OR).
- Essere rappresentate da matrici unitarie.
- Ogni gate deve essere applicato solo allo stesso numero di qubit (porte a un qubit, porte a due qubit, ...).

Le porte quantistiche di Toffoli [11] e Fredkin sono porte a tre qubit, reversibili e rappresentabili da matrici unitarie e sono essenziali nel mondo dei computer quantistici in quanto ogni circuito quantistico può essere decomposto in un set di porte di Toffoli

o Fredkin, spesso a costo di dover utilizzare un bit ausiliario. Nel capitolo tre parleremo in dettaglio della realizzazione fisica di alcune porte logiche.

2.6.2. Memoria quantistica

Una memoria quantistica è un dispositivo che può memorizzare informazioni quantistiche per un periodo di tempo relativamente lungo, mantenendone la coerenza quantistica. In particolare, le memorie quantistiche sono utilizzate per la memorizzazione di qubit che poi saranno utilizzati durante l'esecuzione di algoritmi quantistici. Mentre la memoria classica salva le informazioni solo come stati "0" e "1", nella memoria quantistica i qubit che vengono salvati possono essere in uno stato di sovrapposizione, cioè in una combinazione di più stati contemporaneamente, e possono essere correlati tra di loro.

Tuttavia, la memoria quantistica presenta alcune sfide tecniche che devono essere affrontate per renderla una realtà pratica. Uno dei principali problemi è la decoerenza, già discussa all'inizio del secondo capitolo, che rende difficile mantenere le informazioni in modo stabile per un periodo sufficientemente lungo.

2.6.3. Processore quantistico (QPU)

Un processore quantistico è un tipo di processore che utilizza le proprietà quantistiche della materia per effettuare calcoli. In un processore quantistico, i qubit sono manipolati mediante operazioni quantistiche, come ad esempio la rotazione di fase e la porta logica di Hadamard, che consentono di eseguire calcoli paralleli su più stati di qubit contemporaneamente. Questo comporta un enorme vantaggio in termini di velocità di elaborazione, in quanto il numero di calcoli eseguiti in parallelo aumenta esponenzialmente con il numero di qubit utilizzati.

2.6.4. Sistemi di controllo

Un appropriato sistema di controllo è necessario per la manipolazione degli stati quantici, lettura e processi di correzione degli errori. Uno dei compiti più importanti a cui questi sistemi sono addetti è la preparazione del sistema quantistico, come la realizzazione della misura per estrarre il valore delle informazioni contenute nella memoria.

2.6.5. Rilevazione e correzione di errori

Come si evince dal nome, questo componente si occupa di localizzare e correggere gli errori che possono verificarsi durante le operazioni delle porte logiche quantistiche, causati da fenomeni di decoerenza quantistica. Per mitigare questa problematica, più qubit fisici vengono fatti interagire con l'obiettivo di mantenere stabile nel tempo un unico stato quantistico su cui sia possibile agire in modo non distruttivo. Un insieme di qubit fisici con questa caratteristica viene definito qubit logico. Il qubit logico è un'entità teorica corrispondente alla reale unità di informazione quantistica che un processore quantistico è in grado di controllare. In un qubit logico le informazioni vengono archiviate in modo ridondante così da consentire ai ricercatori di controllare e correggere gli errori nei dati. I futuri computer quantistici potrebbero quindi eseguire calcoli utilizzando qubit logici, controllando e correggendo eventuali errori che tendono a verificarsi nei qubit fisici al loro interno.

2.7. Simulatore quantistico

A causa della grande difficoltà nella realizzazione di un computer quantistico, negli ultimi tempi si sta puntando molto sullo sviluppo anche dei così detti “*simulatori quantistici*” [12]. I simulatori quantistici sono dispositivi speciali progettati per fornire informazioni su problemi fisici specifici che consentono lo studio di un sistema quantistico in modo programmabile. A differenza dei computer quantistici, che si suppone che non diventeranno realtà per almeno un decennio, i simulatori quantistici sono quasi realtà e potrebbero vedere la luce nel giro di pochi anni, almeno secondo un report del U.S. National Academy of Sciences [13]. Un esempio di come i simulatori quantistici possano essere usati è nella simulazione di complessi problemi di chimica, fisica e biologia.

Inoltre, proprio come successo con i computer classici usati inizialmente per progettare computer più potenti, anche i simulatori quantistici potrebbero essere la chiave per accelerare lo sviluppo di un computer quantistico.

3. IMPLEMENTAZIONE del QUBIT

In questa sezione andremo a fare una rassegna di quelle che oggi sono considerate alcune delle più promettenti tecnologie per realizzare un qubit e che in futuro probabilmente permetteranno la creazione di un computer quantistico su larga scala. Prima di fare questo, però, analizzeremo quali sono le condizioni da rispettare per la realizzazione di un buon computer quantistico.

3.1. Condizioni per la realizzazione

Come abbiamo già detto in precedenza, un computer quantistico deve essere ben isolato dal mondo a causa della fragilità del qubit; allo stesso tempo i qubit devono poter essere accessibili così da poterli manipolare ed eseguire i calcoli necessari. Per poter effettuare operazioni logiche su un computer quantistico, è essenziale che il qubit mantenga la sua coerenza per l'intero periodo necessario. Questa condizione rappresenta un requisito fondamentale per la realizzazione di un computer quantistico.

Il primo a proporre una lista di criteri, per la scelta di un sistema fisico adatto ad implementare un computer quantistico, fu il fisico teorico David P. DiVincenzo nella sua ricerca pubblicata nel 2000 e intitolata “The Physical Implementation of Quantum Computation”, nella quale espose quelli che oggi vengono chiamati “*criteri di DiVincenzo*” [14]. I criteri di DiVincenzo sono costituiti da cinque più due condizioni: le prime cinque sono necessarie per l'implementazione di un computer quantistico,

mentre le due condizioni aggiuntive sono necessarie per implementare la comunicazione quantistica.

I cinque requisiti fondamentali per la computazione quantistica sono:

1. *Possibilità di scalare e avere qubit ben definiti*: per la creazione di un computer quantistico è necessario un sistema che contenga una collezione di qubit. Questo criterio richiede che, perché il qubit sia ben definito, il sistema fisico permetta di identificare due stati ben distinti, ad esempio la polarizzazione orizzontale o verticale di un fotone, oppure lo stato di eccitazione di un atomo. In genere, le variabili continue, come ad esempio la posizione di una particella su una linea, non sono considerate rappresentazioni adeguate degli stati quantistici. Questo perché, per ridurre gli effetti della decoerenza, è preferibile utilizzare delle simmetrie che limitino la dimensione nello spazio a due.
2. *Preparazione affidabile dello stato iniziale del computer quantistico*: tutti i modelli di computer classici o quantistici sono basati sull'eseguire operazioni su stati mantenuti da bit o qubit e misurarne i risultati, una procedura che è strettamente dipendente dallo stato iniziale del sistema. Infatti, eseguire qualsiasi tipo di calcolo senza la possibilità di determinare lo stato iniziale del circuito è privo di significato, e questo è proprio quello che viene richiesto da questo criterio, ovvero riuscire a preparare un qubit in uno stato ben definito. Nel caso di computer quantistici, per semplificarne l'implementazione, è sufficiente essere in grado di preparare ripetutamente un particolare stato quantistico con grande precisione. Successivamente, una porta logica quantistica NOT può essere utilizzata per convertirlo in uno stato di input desiderato. Inoltre, è estremamente importante che il tempo di inizializzazione di uno stato sia relativamente corto comparato al tempo di un'operazione di calcolo di una porta logica.
3. *Lungo tempo di decoerenza*: come detto all'inizio del paragrafo la decoerenza cambia gli stati dei qubit, rendendo impossibile qualsiasi tipo di calcolo. È quindi importante avere un lungo tempo di decoerenza. Secondo DiVincenzo deve essere almeno lungo quanto il tempo di un'operazione di una porta

logica, in quanto secondo le sue analisi è il tempo necessario al sistema ad avere un sistema di correzione degli errori efficiente.

4. *Disponibilità di un insieme universale di porte logiche*: è un set di porte logiche a cui è possibile poter ricondurre ogni operazione quantistica. Poiché ogni trasformazione unitaria può essere ottenuta combinando operazioni a singolo qubit e porte CNOT, la priorità è concentrarsi sulla realizzazione di sole queste due tipologie di porte. La porta NOT controllata, detta comunemente CNOT, è una porta quantistica che opera su un registro quantistico costituito da 2 qubit, dove il secondo qubit (il qubit target) viene invertito se e solo se il primo qubit (il qubit di controllo) è 1.
5. *Disponibilità di un sistema di misura specifico per i qubit*: finalmente siamo arrivati alla fine della computazione e il dato ha bisogno di essere letto: questo richiede la capacità di poter misurare in maniera accurata lo stato quantistico dei qubit. Sfortunatamente un sistema in grado di avere una misura estremamente accurata risulta difficile da implementare. Tuttavia, è possibile usare sistemi di misura più semplici ed eseguire misure ripetutamente, così da poter avere un sistema più preciso. Ad esempio, un sistema di misura con accuratezza del 90%, se eseguito tre volte raggiunge una precisione del 97%, risultato facilmente verificabile mediante il calcolo della probabilità.

3.2. Trappole ioniche

Ora introduciamo i computer quantistici a trappola ionica [9, pp. 309-321]. Questa tecnologia è basata sulla manipolazione di ioni precedentemente intrappolati da un campo elettrico, attraverso dei laser. Per molti anni è stato considerato come uno dei candidati più promettenti per realizzare un computer quantistico su larga scala, soprattutto per le eccellenti proprietà di coerenza. Tuttora la ricerca sta andando avanti a pieno ritmo, nonostante le aspettative siano state leggermente ridimensionate.

3.2.1. Come intrappolare uno ione

Esistono differenti metodi che possono essere utilizzati per intrappolare un atomo, che hanno caratteristiche diverse nel caso la particella da catturare sia carica o neutra.

La scelta migliore è quella di utilizzare particelle cariche impiegando buche di potenziale per intrappolare gli ioni. Utilizzando metodi basati sulle particelle neutre, potremmo correre un rischio maggiore di perderle, il che richiederà l'implementazione di procedure aggiuntive per garantire la stabilità dello stato. Un fattore importante da tenere in considerazione per trappole cariche è il teorema di Earnshaw. Questo teorema afferma che oggetti, quali cariche puntiformi, non possono essere intrappolati da soli potenziali elettrostatici in tre dimensioni, ma sono necessari di conseguenza campi elettrici e magnetici statici o campi elettrici variabili nel tempo.

La più usata trappola per ioni è la trappola di Paul.

Trappola di Paul

La storia della computazione quantistica con ioni intrappolati iniziò nel 1953, quando Wolfgang Paul propose quella che ora viene comunemente chiamata trappola di Paul [15], nonostante il suo primo reale utilizzo nel campo della computazione quantistica risalga al 1995, quando il primo schema di implementazione per una porta quantica C-NOT fu proposta da Ignacio Cirac e Peter Zoller [16].

La trappola di Paul si basa sul principio della “sella ruotante”. In questo meccanismo, una pallina posta su una sella è intrappolata nella direzione longitudinale, dove la sella è rialzata, ma può facilmente scappare lateralmente. Tuttavia, se la sella viene montata su un palo rotante, ogni volta che la pallina tenta di scappare lateralmente, la posizione della sella è già cambiata e la pallina si trova nuovamente di fronte alla parte rialzata della sella, rimanendo così intrappolata in tutte le direzioni.

L'analogo di una sella nel caso di campi elettrici è un cosiddetto campo quadrupolare, realizzato attraverso una configurazione di quattro elettrodi con segno alternato del potenziale. Questo tipo di campo viene creato tramite una variazione periodica dei segni del potenziale, il che provoca la "rotazione" della sella. La configurazione del campo quadrupolare forma una trappola dinamica in cui una carica può rimanere ferma: in questo modo si possono intrappolare e studiare piccoli oggetti come gli ioni. Ovviamente però dobbiamo creare un computer quantistico e intrappolare un solo ione non sarebbe sufficiente. La buona notizia è che abbiamo già la tecnologia per intrappolare molti ioni e metterli insieme in una matrice monodimensionale, chiamata catena di ioni.

In figura 3, è mostrato come possa essere realizzata una trappola di Paul composta da quattro ioni. L'apparato fisico è composto da quattro elettrodi cilindrici: due degli elettrodi a vertici opposti vengono messi a terra mentre i due cilindri restanti vengono posti ad un voltaggio oscillante con i segmenti accoppiati rendendo costante il potenziale che li attraversa; così facendo si ottiene un campo elettrico variabile nel tempo. Nella figura sono inoltre rappresentati i laser usati per eseguire le operazioni e leggere gli stati atomici.

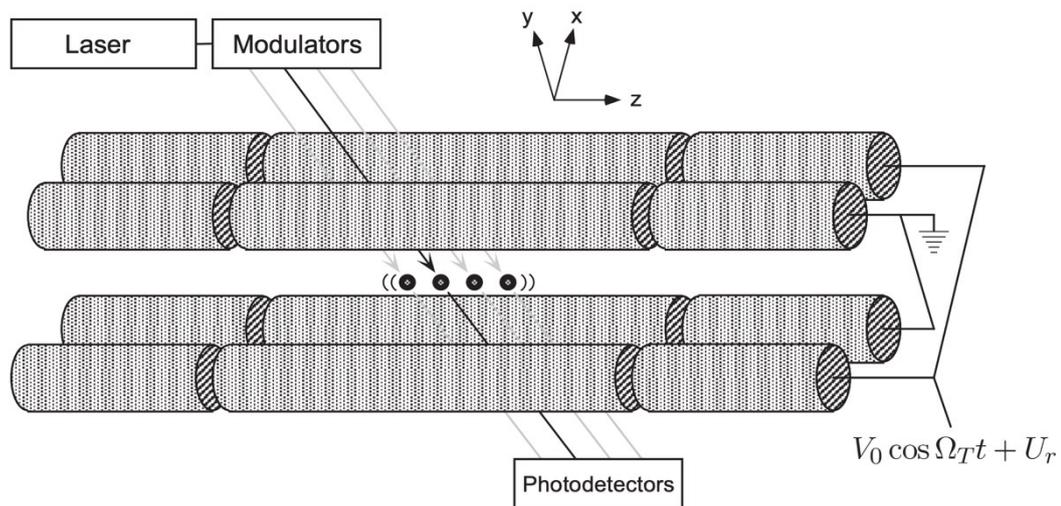


Figura 1. Schema di una trappola ionica (non in scala), raffigurante quattro ioni intrappolati al centro di elettrodi cilindrici. Fonte: [9].

Raffreddamento

Una volta posizionato all'interno di una trappola di Paul, uno ione non è immediatamente utilizzabile a causa delle condizioni in cui viene intrappolato. Normalmente, gli ioni generati attraverso l'irradiazione di una fonte di gas ionizzabile con un fascio di elettroni, una volta intrappolati possiedono un'energia cinetica elevata che li fa oscillare all'interno della trappola. Questo moto incontrollato rappresenta una sfida per il controllo accurato dello ione, poiché i laser usati per manipolare i qubit potrebbero riscaldare e sfasare eccessivamente gli ioni, per cui è necessario abbassare la temperatura degli ioni al fine di ridurre l'energia cinetica fino al punto in cui il loro movimento nello spazio risulti "quantizzato". Per ottenere la temperatura richiesta, si utilizza una tecnica di raffreddamento chiamata "raffreddamento Doppler" che prevede di irradiare lo ione con un fascio laser a una frequenza inferiore a quella di risonanza. In questo modo gli ioni in movimento verso il fascio laser assorbono i fotoni

più facilmente perché "vedono" una frequenza più alta, vicina alla risonanza, mentre quelli che si allontanano vedono una frequenza più bassa, ancora più lontana dalla risonanza. Ciò fa sì che gli ioni assorbano la luce dal laser a cui si stanno avvicinando e l'impulso dato dall'assorbimento dei fotoni li farà rallentare.

3.2.2. Requisiti per l'implementazione

Nonostante non siano ancora noti tutti i criteri per il funzionamento di un computer quantistico, i criteri di DiVincenzo, di cui abbiamo già parlato ampiamente, sono comunque generalmente accettati come i più completi al momento e un computer quantistico realizzato tramite ioni intrappolati sembra essere in grado di soddisfarne buona parte.

- Qubits: qualunque stato quantico a due livelli può essere considerato un qubit. Nel caso di uno ione è possibile avere uno stato eccitato e uno stato non.
- Inizializzazione: Un qubit può essere preparato usando un processo chiamato pompaggio ottico, una tecnica utilizzata per "pompate" gli elettroni in un atomo per portarlo da un livello di energia inferiore a uno più alto.
- Misurazione: misurare un qubit salvato in uno ione è abbastanza semplice. Tipicamente, lo ione viene colpito ripetutamente con un laser: nel caso sia in uno stato eccitato lo ione collassa, e un fotone viene rilasciato. Nel caso lo ione si trovi nell'altro stato, allora non interagisce con il laser e nessun fotone è emesso. Contando il numero di fotoni è possibile misurare con molta accuratezza lo stato dello ione.
- Implementazione porta CNOT e gate singolo: il primo schema di implementazione di una porta CNOT è stato presentato da Ignazio Cirac e Peter Zoller nel 1995. Nello stesso anno, al NIST è stata realizzata la prima porta sperimentale [17].
- Decoerenza: le fluttuazioni dei campi elettrici e magnetici che si verificano nelle vicinanze della trappola hanno un effetto sugli ioni, provocando transizioni casuali tra gli stati di energia. Tecnicamente questi rumori di sottofondo sono quasi inevitabili, tuttavia è possibile controllarli efficacemente in modo da non riscaldare o sfasare eccessivamente gli ioni, almeno per la durata dell'esperimento.

3.2.3. Problematiche

Sfortunatamente anche un computer realizzato mediante trappole ioniche ha degli svantaggi. L'aspetto più critico di questa tecnologia è la scalabilità dell'hardware (un problema che in realtà accomuna tutte le implementazioni fisiche di computer quantistici) che richiede un'architettura più complessa per mantenere il controllo dei qubit per sistemi atomici sempre più grandi. Risulta, infatti, difficile isolare gli ioni tra loro al crescere del numero di qubit perché l'intera catena di ioni può assorbire l'energia dei fotoni emessi durante la misurazione. Inoltre, sempre al crescere della lunghezza della catena di ioni, il tempo di decoerenza diminuisce. Tuttavia, al momento molte soluzioni sono state proposte per risolvere alcuni dei problemi, come per esempio, la possibilità di creare catene di ioni multiple, con la capacità di spostare o muovere gli ioni tra una catena e l'altra [18], oppure si potrebbero creare multipli sottosistemi di qubit collegati in un sistema più grande attraverso canali di comunicazione quantistici [19] [20].

Inoltre, tra gli svantaggi di questo modello rientrano tutte le difficoltà viste prima legate alla creazione di stati iniziali coerenti per tutta la durata dell'esperimento. Per garantire la coerenza, gli ioni devono essere raffreddati a temperature estremamente basse. Tuttavia, le tecniche necessarie per questo processo, sebbene esistenti, sono poco pratiche da implementare.

3.3. Atomi neutri in reticoli ottici

Un altro approccio per la realizzazione dei qubit è quello di usare atomi neutri [21], una soluzione molto simile a quella degli ioni intrappolati, ma invece di usare atomi ionizzati e sfruttare la loro carica per mantenerli intrappolati vengono usati laser e, proprio come è intuibile dal nome, atomi neutri.

Come con le trappole ioniche, vengono usati laser per la manipolazione dei qubit, la loro lettura, e anche per mantenere i qubit a basse temperature prima del loro utilizzo. Gli atomi sono intrappolati all'interno di "cristalli di luce" mediante una trappola magnetico-ottica. Questa trappola è costituita da una zona di campo magnetico uniforme in cui gli atomi neutri vengono intrappolati, mentre un fascio di luce laser

intenso viene applicato per creare una sorta di potenziale di trappola, generando una forza che spinge gli atomi verso la regione di massima intensità della luce. Grazie alla flessibilità nella scelta della geometria dei fasci laser, è possibile creare strutture spaziali personalizzate, come cristalli tridimensionali, in cui possono essere intrappolati milioni di atomi che agiscono come qubit. Tuttavia, il principale ostacolo attuale è la difficoltà di implementazione di porte quantistiche che coinvolgono due o più qubit. Questo perché, mentre gli ioni interagiscono elettrostaticamente, l'interazione tra atomi neutri è assente o praticamente nulla. Nel 2018 però, è stato realizzato un sistema composto da 50 atomi, in cui l'interazione tra i qubit poteva essere controllata aggiustando lo spazio tra gli atomi [22].

Il vantaggio principale degli atomi neutri, comparati con le trappole ioniche, è nel loro potenziale di poter costruire array multidimensionali e quindi avere un maggior potenziale riguardo la scalabilità.

3.4. Oscillatore armonico

Prima di continuare con la descrizione di altri sistemi, vediamo ora l'implementazione di un semplice oscillatore armonico [9, pp. 283-286]. Alcune nozioni ci saranno utili nel seguente paragrafo quando descriveremo qubit realizzati con fotoni ottici.

3.4.1. Apparato fisico

Nel mondo classico un oscillatore elementare può essere rappresentato da una massa legata ad una molla, che si muove oscillando e trasformando l'energia potenziale elastica in energia cinetica e viceversa. Tale sistema fisico presenta un parametro di energia continuo, tuttavia, in ambito quantistico, l'energia può assumere soltanto valori discreti. Un esempio di oscillatore armonico semplice quantistico consiste in una particella confinata all'interno di una buca di potenziale parabolica. In una radiazione elettromagnetica intrappolata in una cavità, l'energia può essere solo un multiplo di $\hbar\omega$, dove ω è la frequenza della radiazione. In particolare, un qubit con oscillatori armonici è costituito da un oscillatore armonico quantistico che può assumere due stati di energia diversi, rappresentati dai due possibili valori del qubit ($|0\rangle$ e $|1\rangle$), e che può

essere manipolato tramite impulsi di microonde. La differenza di energia tra i due stati del qubit è determinata dalla frequenza di oscillazione dell'oscillatore armonico quantistico. Questa frequenza può essere manipolata tramite impulsi di microonde, che possono essere utilizzati per far oscillare il qubit tra i suoi due stati di energia. I qubit in questione avranno una durata limitata che dipenderà da fattori fisici, come ad esempio la qualità della cavità. È possibile aumentare tale durata rendendo le superfici interne più riflettenti. Inoltre, per applicare trasformazioni unitarie, è sufficiente permettere al sistema di evolvere nel tempo.

3.4.2. Problematiche

La più naturale scelta per rappresentare i qubit sono gli autostati di energia della hamiltoniana [9, p. 285]. Purtroppo, nella computazione quantistica, non è sempre possibile determinare lo spettro degli autovalori di un operatore unitario. Infatti, nonostante si conosca il modo di realizzarlo mediante porte quantistiche, per molti problemi risolti dagli algoritmi quantistici, la conoscenza degli autovalori è analogo a conoscere la soluzione del problema stesso. Inoltre, questi qubit possono anche presentare alcune limitazioni, come la sensibilità alle fluttuazioni termiche e alla rumorosità dell'ambiente circostante, che possono causare errori nel controllo e nella lettura del qubit.

3.5. Fotoni ottici

Un altro metodo per realizzare un qubit è quello della polarizzazione dei fotoni [9, pp. 309-323]. I fotoni sono particelle non cariche, e non interagiscono molto tra di loro, o con la maggior parte della materia, motivo per cui è possibile considerare tale metodo come uno dei pochi in cui la decoerenza affligge relativamente poco lo stato del sistema quantistico. Inoltre, possono essere trasmessi per grandi distanze attraverso la fibra ottica e manipolare fasci di fotoni è relativamente semplice.

3.5.1. Panoramica

Parliamo ora di cosa sono i singoli fotoni, come possono rappresentare stati quantistici e le componenti sperimentali usate per manipolare fotoni.

I fotoni possono rappresentare i qubit nella seguente maniera: come visto in precedenza per un semplice oscillatore armonico, l'energia della radiazione elettromagnetica confinata all'interno una cavità è quantizzata in termini di $\hbar\omega$. Una cavità può contenere una sovrapposizione di zero o un fotone, e questa potrebbe essere considerata una semplice rappresentazione di un qubit. Per aumentarne l'efficienza e aumentare la resistenza ai disturbi, è vantaggioso adottare una rappresentazione alternativa che prevede l'uso di due cavità, ognuna avente energia totale di $\hbar\omega$. In questa rappresentazione, lo stato di un qubit è definito in base alla posizione del fotone: se si trova nella cavità ($|01\rangle$) o nella cavità ($|10\rangle$). Tale rappresentazione è nota come “*dual-rail*”.

Un modo per generare fotoni singoli in laboratorio è quello di attenuare l'output di un laser. Per la manipolazione esistono già tre dispositivi già ben conosciuti: gli specchi, gli sfasatori e i divisori di fascio. Gli specchi sono capaci di deviare la propagazione dei fotoni tramite la riflessione, e in genere ciò avviene con una bassissima percentuale di perdita, approssimativamente dello 0.01%. Gli sfasatori, invece, sono composti da blocchi di materiali trasparenti con indice di rifrazione n diverso da quello del vuoto n_0 . Infine, i divisori di fascio consistono in frammenti di vetro parzialmente argentati che, grazie alla loro proprietà riflettente, deviano una parte del fascio luminoso (pari a una frazione R) e ne lasciano passare la restante quantità (ovvero $1-R$). In laboratorio è possibile creare un divisore di luce collegando due prismi con uno strato sottile di metallo. L'angolo θ del divisore viene definito come il coseno di R , ed è usato per rappresentare la quantità di luce riflessa, e non la sua orientazione spaziale.

Infine, un altro componente essenziale sono i mezzi Kerr, i quali presentano un'interessante proprietà in cui l'indice di rifrazione è direttamente proporzionale all'intensità della luce che li attraversa (I). Questo fenomeno è noto come effetto Kerr:

$$n(I) = n + n_2 I$$

Usando solo una parte degli strumenti appena descritti, quindi divisori di fascio, sfasatori e mezzi di Kerr, sappiamo che è possibile creare qualsiasi porta; infatti, siamo in grado sia di generare porte a qubit singolo, che una porta CNOT.

3.5.2. Problematiche

La creazione e la misurazione dei fotoni sono relativamente facili, e con l'uso di sfasatori e divisori di fasci è possibile creare porte a singolo qubit senza incontrare grandi difficoltà. Purtroppo, ottenere l'interazione tra i fotoni è una sfida molto difficile, rendendo quindi molto difficile un'implementazione di porte logiche a più qubit. Sebbene non siano quindi molto adatti alla computazione quantistica, i fotoni sono invece molto utili nell'ambito della comunicazione ottica. I qubit ottici potrebbero quindi avere un ruolo importante nella trasmissione di informazione quantistica, come ad esempio nel caso della crittografia quantistica, anziché essere impiegati nella computazione vera e propria.

3.6. Superconduttori

I qubit basati su superconduttori sono tra gli approcci più promettenti per la realizzazione di computer quantistici [9, p. 343]. Non sorprende che, negli ultimi anni, questa tecnologia venga utilizzata da note aziende tecnologiche nella loro ricerca per aprire la strada all'era quantistica, ad esempio IBM e Google. La caratteristica fisica principale che permette la realizzazione di questi computer quantistici è, come si può intuire dal nome, la superconduttività, ovvero un fenomeno quantistico che si verifica quando un materiale raggiunge temperature molto basse; possiamo usare i circuiti superconduttori come sistemi quantistici che possiamo controllare a piacimento.

Superconduttività

Per capire come i qubit con superconduttori funzionano, dobbiamo prima spiegare perché alcuni materiali vengono chiamati superconduttori. Un materiale è superconduttore se al di sotto di una certa temperatura critica, la sua resistenza elettrica si riduce a zero. In un superconduttore, gli elettroni di conduzione possono scorrere senza essere soggetti a dissipazione della propria energia, a differenza di quello che avviene in un normale conduttore, nel quale una parte di energia è dissipata per effetto Joule.

3.6.1. Implementazione

Esistono approcci differenti per implementare qubit basati su superconduttori. Un primo approccio è quello di usare circuiti microelettronici di superconduttori. Infatti, all'interno dei superconduttori, sono presenti coppie di elettroni, chiamate coppie di Cooper [23], che attraverso potenziali elettrostatici siamo in grado di confinare all'interno di box micrometrici. I due stati di un qubit possono essere rappresentati dai due stati di carica differenti che un box può assumere. Il loro stato viene controllato mediante una giunzione Josephson [24]: tale giunzione prevede che due box siano separati da un sottile isolante, e che attraverso il fenomeno fisico dell'effetto tunnel la coppia di Cooper sia in grado di attraversare tale strato, così da passare da un box all'altro. In un altro approccio un flusso magnetico viene applicato ad un anello superconduttore. I due stati del qubit sono rappresentati dalle direzioni opposte delle correnti circolanti nell'anello: uno stato è quindi rappresentato dal senso orario della corrente e l'altro dal senso antiorario. Con entrambi gli approcci è possibile utilizzare impulsi di microonde o campi magnetici esterni (impulsi Rabi) per realizzare porte logiche quantistiche. Inoltre, per leggere lo stato del qubit, è possibile utilizzare tecniche di misurazione quantistica come la misura di carica. Per creare una coppia di qubit è invece possibile connettere due qubit attraverso un circuito elettronico intermediario, anche se al momento le porte quantistiche a più qubit risultano molto lente. Un'altra tecnica è quella di usare una stessa cavità in cui andiamo a inserire due qubit; tuttavia, anche questa soluzione risulta molto lenta.

3.6.2. Stato attuale

I qubit a superconduttore sono attualmente una tecnologia da non sottovalutare per l'implementazione dei computer quantistici, nonostante al momento ci siano ancora alcune problematiche che impediscono loro di diventare la tecnologia dominante. Primo fra tutto, ovviamente, è che dobbiamo mantenere i circuiti a temperature bassissime prossime allo zero Kelvin.

Per quanto riguarda i criteri di DiVincenzo, i lunghi tempi di coerenza richiesti dal terzo criterio sono stati piuttosto difficili da raggiungere, in quanto i circuiti superconduttori sono sensibilmente più grandi rispetto ad altri sistemi, motivo per cui la loro interazione con l'ambiente risulta difficile da controllare. Mentre per quanto

riguarda la lentezza delle porte a qubit multipli ci sono aziende che stanno lavorando a una soluzione, e una di queste è Google.

La produzione dei circuiti superconduttori può avvenire mediante l'utilizzo dei medesimi processi impiegati per la fabbricazione dei circuiti integrati e dei microchip destinati ai computer tradizionali, motivo per cui la scalabilità di questi sistemi non dovrebbe essere un grosso problema. La difficoltà principale sorge quando si devono interconnettere molti qubit all'interno della stessa cavità: in questo caso potrebbero iniziare ad avere divari energetici simili.

3.7. Risonanza magnetica nucleare

La risonanza magnetica nucleare (NMR) è stato uno dei primi approcci per l'implementazione di un computer quantistico [9, pp. 324-336] [25]. Questa tecnica, molto utilizzata in campo medico a scopi diagnostici, sfrutta dei campi magnetici per manipolare lo spin del nucleo di un atomo all'interno di una molecola.

3.7.1. Implementazione

In questo caso l'hardware è formato da un liquido con al suo interno un elevato numero di molecole (più di 10^8): questo è necessario per avere un segnale accettabile per la misurazione. Il tutto è immerso in un forte campo magnetico statico. Il qubit è identificato con lo spin del nucleo di un atomo interno ad una molecola. La manipolazione del sistema viene realizzata con le tecniche tipiche della risonanza magnetica nucleare, grazie alle quali siamo in grado di invertire lo spin dei nuclei atomici mediante campi magnetici oscillanti. (impulsi Rabi). Le interazioni tra gli spin dei nuclei atomici vicini sono alla base delle porte logiche a più qubit. L'output misurato mediante NMR è una media di tutti degli spin di tutte le molecole.

Lo spin del nucleo di un atomo interno ad una molecola in un liquido è un sistema quantistico molto robusto, nel senso che è ben protetto dai campi magnetici esterni dal guscio elettronico degli altri atomi che compongono la molecola. Questo si traduce in un tempo di decoerenza molto lungo (dell'ordine del secondo) che permette alla computazione di essere realizzata.

Finora grazie a questa tecnica è stato raggiungere un certo numero di risultati:

- realizzate varie porte logiche a due qubit,
- realizzata la porta logica di Toffoli,
- implementata la trasformata di Fourier quantistica [26],
- fattorizzati i numeri 15 e 25 con l'algoritmo di Shor [27].

3.7.2. Problematiche

Nell'utilizzo dell'NMR per il calcolo quantistico sorgono due problemi. Concettualmente, una singola molecola potrebbe essere un ottimo computer quantistico, ma come può essere vero per un insieme di molecole? In particolare, l'output di una misurazione NMR è una media su tutti i segnali della molecola; l'output medio di un insieme di computer quantistici può essere significativo?

Il secondo problema riguarda la temperatura a cui la risonanza magnetica nucleare è tipicamente utilizzata; infatti, a temperatura ambiente l'energia degli spin è molto minore dell'energia $k_B T$ (l'energia termica media di una particella in un sistema termodinamico a temperatura T). Ciò significa che lo stato iniziale degli spin è quasi completamente casuale. Il calcolo quantistico tradizionale richiede che il sistema sia preparato in uno stato iniziale ben definito, motivo per cui questo sistema non è tra i più adatti per l'implementazione di computer quantistici.

La tecnica è inoltre affetta da una terza problematica che sembra insormontabile: la scalabilità. È stato stimato che con le tecniche di Risonanza Magnetica Nucleare a stato liquido non è possibile lavorare con registri di memoria quantistici superiori ai 10 qubit.

3.8. Altre tecnologie

3.8.1. Risonanza magnetica nucleare a stato solido

Le tecniche di manipolazione sviluppate con la Risonanza Magnetica Nucleare [9, p. 50] a stato liquido hanno aperto la strada per la realizzazione della computazione attraverso la risonanza a stato solido. I qubit con risonanza magnetica nucleare a stato solido sono un tipo di qubit che utilizzano nuclei atomici all'interno di un cristallo. In

un sistema NMR a stato solido, il cristallo contenente i nuclei atomici viene posizionato all'interno di un magnete superconduttore. Un impulso a radiofrequenza viene applicato al cristallo per eccitarne i nuclei atomici, facendoli oscillare tra i due stati di spin. Per invertire la direzione di spin dei nuclei atomici viene applicato un secondo impulso. La rilevazione del segnale NMR durante questo processo consente di determinare lo stato quantistico del qubit. Il vantaggio rispetto alla NMR a stato liquido è una maggiore scalabilità, un maggiore tempo di decoerenza e una maggiore interazione a cui sono soggetti i qubit che si traduce in minore tempo per l'implementazione delle porte logiche quantistiche; è quindi possibile effettuare un numero maggiore di operazioni prima della perdita dell'informazione quantistica immagazzinata. Un esempio di implementazione di qubit a NMR a stato solido è descritto nell'articolo "Quantum computation with nuclear spins in diamond" [28].

3.8.2. Punti quantici

I punti quantici [29] sono strutture fabbricate con i semiconduttori, in cui i potenziali elettrostatici confinano elettroni. Solitamente la dimensione di questi punti quantici risulta compresa fra i 10 nanometri ed un micron. Al fine di far occupare agli elettroni il più basso stato di energia disponibile è necessario lavorare con temperature estremamente basse: come ormai abbiamo potuto notare questa risulta una caratteristica comune alla maggior parte delle tecnologie attualmente disponibili per implementare i qubit. Il più semplice qubit è rappresentato da un singolo elettrone situato in un punto quantico. Applicando sia un campo magnetico che un campo elettrico (dipende dalla configurazione utilizzata) al punto quantico, siamo in grado di controllarne diversi parametri, come il numero di elettroni al suo interno e il loro spin. Le interazioni quantistiche tra due qubit vengono realizzate attraverso la manipolazione della barriera elettrostatica tra due punti quantici, tramite il gating. La modalità "on-off" di interazione tra due qubit corrisponde all'abbassamento o all'innalzamento di questa barriera. In linea di principio la scalabilità può essere ottenuta mediante la creazione di array di punti quantici. Nonostante ciò, la principale sfida di questa tecnologia è rappresentata dalla molteplicità di processi di decoerenza che si verificano in questi dispositivi. Infatti, le ricerche su questa tecnologia sono concentrate principalmente sulla risoluzione di tale problema.

3.8.3. Spin nei semiconduttori

Chiamato anche “computer quantistico di Kane”, il computer quantistico basato sullo spin nei semiconduttori è una proposta avanzata da Bruce Kane nel 1998 [30, p. 133]. L'intenzione di Kane era quella di creare un ibrido fra computer quantistici realizzati con risonanza magnetica nucleare e punti quantistici. L'idea è di mettere atomi di fosforo all'interno di una matrice di silicio distanziati approssimativamente di 20nm. Il qubit è rappresentato dallo spin del nucleo di un singolo atomo di fosforo. Il principale vantaggio di questa tecnologia è un tempo di decoerenza lunghissimo, dell'ordine dei 10^{18} secondi a temperature estremamente basse. Gli spin nucleari non interagiscono significativamente con altri nuclei a distanza di 20nm, così ci è facile eseguire operazioni a qubit singolo, ma per realizzare un computer quantistico necessitiamo anche di eseguire operazione a più qubit. Questo compito è affidato allo spin degli elettroni. Quindi, la presenza di elettroni circostanti consente ai qubit di interagire tra loro. Le operazioni logiche vengono realizzate mediante gli impulsi Rabi. Anche se nel 2020 Andrea Morello ha dimostrato che è possibile controllare lo spin dei nuclei anche con campi elettrici meglio che con campi magnetici [31]. La realizzazione di tale computer dipenderà principalmente dai futuri perfezionamenti delle tecnologie per la manipolazione di circuiti elettronici al silicio.

3.8.4. Atomi vibrazionali

Alcuni studi hanno indagato le dinamiche di coerenza ed entanglement di qubit vibranti. I qubit con atomi vibrazionali sono una forma di qubit quantistico che utilizzano la vibrazione di atomi o molecole per rappresentare lo stato quantistico. In questo tipo di qubit, l'energia di vibrazione degli atomi o delle molecole viene utilizzata come stato quantistico. Gli atomi o le molecole che vengono utilizzati per la rappresentazione dei qubit sono solitamente confinati in una cavità ottica, in modo da poter essere controllati e manipolati in modo preciso. La loro vibrazione viene controllata attraverso l'utilizzo di impulsi laser, che possono essere utilizzati per manipolare la fase e l'ampiezza della vibrazione. Ora consideriamo un singolo qubit di ioni intrappolati all'interno di una cavità perfetta e successivamente lo usiamo per costruire un sistema composto da due di tali sottosistemi, considerati identici e non

interagenti. Come risultato generale, scopriamo che la vibrazione del qubit può portare a un prolungamento della coerenza iniziale sia nel sistema a qubit singolo che in quello a due qubit. Tuttavia, nonostante questa preservazione della coerenza, il decadimento dell'entanglement tra i due qubit è accelerato dal moto vibrazionale dei qubit [32]. Al momento sono stati realizzati pochi studi sull'utilizzo di questa tecnica, e attualmente non è ritenuta come una probabile futura implementazione del qubit.

4. CONCLUSIONI

Con i computer quantistici probabilmente siamo di fronte a quello che potrebbe essere uno dei più significativi progressi nella storia del progresso tecnologico, un avanzamento che potrebbe cambiare radicalmente la nostra vita di tutti i giorni, come d'altronde già successo in passato con i computer classici.

La ricerca sui computer quantistici sta procedendo a grandi passi e sta aprendo nuove possibilità in molti campi, dalla crittografia alla medicina fino alla ricerca di nuovi materiali. Un po' alla volta gli studiosi hanno smesso di chiedersi se la macchina quantistica sia effettivamente realizzabile, iniziando a domandarsi invece, quando e come questo strumento diverrà di uso comune. Tuttavia, ci sono ancora molti ostacoli da superare per realizzare computer quantistici su larga scala e che siano in grado di superare i computer classici in modo significativo.

In questi anni molte sono state le possibili implementazioni proposte per lo sviluppo dei futuri computer quantistici, però come abbiamo visto nel corso dei precedenti capitoli, ci vorrà ancora molto lavoro prima che i computer quantistici possano essere utilizzati a livello commerciale e raggiungere la loro piena potenzialità. Ancora molte sono le sfide associate a questa tecnologia, tra cui la fragilità dei qubit, la difficoltà di mantenere la coerenza quantistica, la necessità di sviluppare nuovi algoritmi e la difficoltà di integrare i computer quantistici con i sistemi esistenti. Saranno necessarie nuove scoperte in fisica quantistica, tecnologia dei materiali, progettazione di circuiti e programmazione quantistica. Nonostante ciò, ci si aspetta che i computer quantistici diverranno realtà nella prossima decade e saranno in grado di affrontare problemi che i computer classici non possono risolvere.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Turing, A.M. (1937), On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. Proceedings of the London Mathematical Society, s2-42: 230-265. <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>.
- [2] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.," in IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter, vol. 11, no. 3, pp. 33-35, Sept. 2006, doi: 10.1109/N-SSC.2006.4785860.
- [3] Feynman, R.P. Simulating physics with computers. Int J Theor Phys 21, 467–488 (1982). <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
- [4] Deutsch David, 1985, Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 97–117, doi: 10.1098/rspa.1985.0070
- [5] P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, USA, 1994, pp. 124-134, doi: 10.1109/SFCS.1994.365700.
- [6] Dirac Paul, The Principles of Quantum Mechanics, Oxford University Press, 1930.
- [7] M. Schlosshauer, Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics, American Physical Society, pp. 1267-1305, 2005.
- [8] Gill, SS, Kumar, A, Singh, H, et al. Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions. Softw: Pract Exper. 2022; 52(1): 66- 114. doi: 10.1002/spe.3039

- [9] M. A. Nielsen e I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [10] Laszlo Gyongyosi and Sandor Imre. 2019. A Survey on quantum computing technology. *Comput. Sci. Rev.* 31, C (Feb 2019), 51–71. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.11.002>
- [11] Toffoli, T. (1980). Reversible computing. In: de Bakker, J., van Leeuwen, J. (eds) *Automata, Languages and Programming. ICALP 1980. Lecture Notes in Computer Science*, vol 85. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-10003-2_104
- [12] Simson L. Garfinkel and Chris J. Hoofnagle. 2022. *ACM TechBrief: Quantum Computing and Simulation*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.
- [13] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. *Quantum Computing: Progress and Prospects*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/25196.
- [14] DiVincenzo, D.P. (2000), The Physical Implementation of Quantum Computation. *Fortschr. Phys.*, 48: 771-783. doi: 0.1002/1521-3978(200009)48:9/11%3C771::AID-PROP771%3E3.0.CO;2-E
- [15] W. Paul e H. Steinwedel, Ein neues Massenspektrometer ohne Magnetfeld, *Zeitschrift Naturforschung Teil A*, pp. 448-450, 1953.
- [16] Cirac, JI, and P Zoller. “Quantum Computations with Cold Trapped Ions.” *Physical review letters* vol. 74,20 (1995): 4091-4094. doi:10.1103/PhysRevLett.74.4091
- [17] Blinov, B.B., Leibfried, D., Monroe, C. et al. Quantum Computing with Trapped Ion Hyperfine Qubits. *Quantum Information Processing* 3, 45–59 (2004). <https://doi.org/10.1007/s11128-004-9417-3>
- [18] J. Chiaverini, R. B. Blakestad, J. Britton, J. D. Jost, C. Langer, D. Leibfried, R. Ozeri, and D. J. Wineland. 2005. Surface-electrode architecture for ion-

- trap quantum information processing. *Quantum Info. Comput.* 5, 6 (September 2005), 419–439.
- [19] Duan, L.-M & Blinov, Boris & Moehring, D. & Monroe, Christopher. (2004). Scalable trapped ion quantum computation with a probabilistic ion-photon mapping. *Quantum Information & Computation.* 4. 165-173. 10.26421/QIC4.3-1.
- [20] Blinov, B., Moehring, D., Duan, L . et al. Observation of entanglement between a single trapped atom and a single photon. *Nature* 428, 153–157 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02377>
- [21] Henriët, Loïc and Beguin, Lucas and Signoles, Adrien and Lahaye, Thierry and Browaeys, Antoine and Reymond, Georges-Olivier and Jurczak, Christophe, Quantum computing with neutral atoms, *Quantum*, Verein zur Forderung des Open Access Publizierens in den Quantenwissenschaften, 2020.
- [22] Bernien, H., Schwartz, S., Keesling, A. et al. Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator. *Nature* 551, 579–584 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature24622>
- [23] Nave, Carl R. (2006). "Cooper Pairs". *Hyperphysics*. Dept. of Physics and Astronomy, Georgia State Univ.. Retrieved 2008-07-24; Kadin, Alan M. (2005). "Spatial Structure of the Cooper Pair". *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 20 (4): 285.
- [24] Josephson, B. D. (1974). The Discovery of Tunneling Supercurrents. *Science*, 184(4136), 527–530. <http://www.jstor.org/stable/1738909>
- [25] Vandersypen, Lieven & Chuang, Isaak. (2004). NMR Techniques for Quantum Control and Computation. *Reviews of Modern Physics.* 76. 10.1103/RevModPhys.76.1037.
- [26] Weinstein, Y S et al. "Implementation of the quantum Fourier transform." *Physical review letters* vol. 86,9 (2001): 1889-91. doi:10.1103/PhysRevLett.86.1889

- [27] Vandersypen, L., Steffen, M., Breyta, G. et al. Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance. *Nature* 414, 883–887 (2001). <https://doi.org/10.1038/414883a>
- [28] Wrachtrup, J., Kilin, S.Y. & Nizovtsev, A.P. Quantum computation using the ¹³C nuclear spins near the single NV defect center in diamond. *Opt. Spectrosc.* 91, 429–437 (2001). <https://doi.org/10.1134/1.1405224>
- [29] Harvey, S. Quantum Dots/Spin Qubits. *Oxford Research Encyclopedia of Physics*. Retrieved 12 Mar. 2023, from <https://oxfordre.com/physics/view/10.1093/acrefore/9780190871994.001.0001/acrefore-9780190871994-e-83>.
- [30] Kane, B. A silicon-based nuclear spin quantum computer. *Nature* 393, 133–137 (1998). <https://doi.org/10.1038/30156>
- [31] Asaad, S., Mourik, V., Joecker, B. et al. Coherent electrical control of a single high-spin nucleus in silicon. *Nature* 579, 205–209 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2057-7>
- [32] Ali Morteza pour, Ghasem Naeimi, Rosario Lo Franco, Coherence and entanglement dynamics of vibrating qubits, *Optics Communications*, Volume 424, 2018, Pages 26-31, doi: 10.1016/j.optcom.2018.04.044.