

باسمه تعالی

موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی

# کامپیوترهای کوانتومی

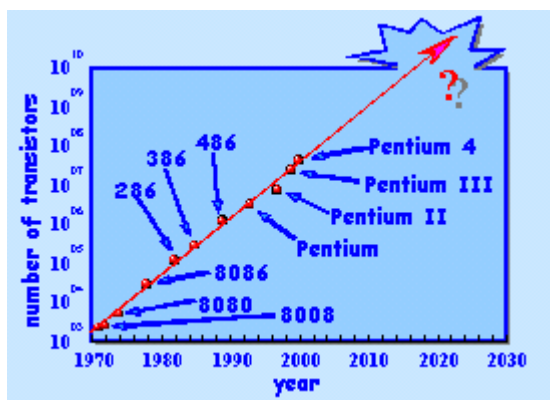
تهیه کننده :

محمد شریف یزدیان

اردیبهشت ۱۳۸۳

(۱-۱) قانون مور و آینده کامپیوتر

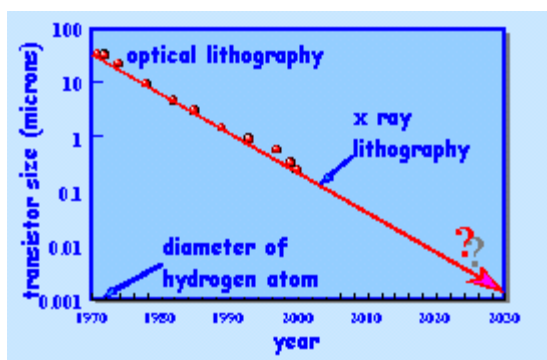
نگاهی به کامپیوتر خود بکنید. کامپیوتر شما نمایش دهنده اوج سالها پیشرفت تکنولوژیکی است که با ایده های اولیه چارلز بابیج (۱۷۹۱-۱۸۷۱) و احتمالا اولین اختراع کامپیوتر توسط مهندس آلمانی کونارد زوسدر ۱۹۴۱ آغاز شد. اتفاقا ، کامپیوتر مدرن بر سرعتی که در برابر شماسست از لحاظ بنیادی با غول ۳۰ تنی اجدادی اش که توسط ۱۸۰۰ لامپ خلا و ۵۰۰ مایل سیم احاطه شده بود، تفاوتی ندارد. همچنین کامپیوترها فشرده تر و در اجرای دستورات بسیار سریعتر شده اند.



در سال ۱۹۶۵ آقای گردان مور از بنیان گزاران اینتل به این نکته اشاره کرد که قدرت پردازش در هر ۱۸ ماه یکبار ۲ برابر یا بیشتر میشود. این روند ۴ دهه است که ادامه دارد. اما آیا دوام خواهد داشت؟ در یک تراشه اساس پردازش اطلاعات، یک ترانزیستور است که مانند یک سویچ کوچک عمل میکند. در سیستم دودویی، اعداد ۰ و ۱ با خاموش و روشن شدن

ترانزیستور نشان داده می شوند. در عین حال هزاران الکترون به کار میروند تا هر ترانزیستور کار کند. هر چه بیشتر سرعت پردازش افزایش می یابد، اندازه ترانزیستور کم می شود. اگر قانون مور ادامه یابد ، آنگاه پیش بینی می شود اندازه هر ترانزیستور

در سال ۲۰۳۰ به اندازه اتم هیدروژن برسد!!



اما این اندازه در عالم کوانتوم قابل ملاحظه است. زیرا می تواند باعث خطا در محاسبه شود. حال، به جای اینکه به این مساله به عنوان یک مانع نگاه شود، می توان به منظور یک روش جدید در انجام محاسبات از فیزیک کوانتوم استفاده کرد که این روش، بر مبنای

طبیعت موجی ذرات کوانتومی، ما را در معرض توان محاسباتی جدید و بسیار جالبی قرار می دهد.

## ۲) تاریخ مختصری از کوانتوم کامپیوترها

نخستین ایده از کوانتوم کامپیوترها در سالهای ۱۹۷۰-۱۹۸۰ توسط فیزیک دانان و دانشمندان کامپیوتری همچون چارلز بنت از مرکز تحقیقاتی توماس واتسون IBM، پول بنیوف از آزمایشگاه بین المللی آرگونه در ایالت ایلینویز، دیوید دوچ از دانشگاه آکسفورد، و ریچارد فینمن از مرکز تکنولوژی کالیفرنیا (Caltech). ایده وقتی مطرح شد که دانشمندان در حال بررسی محدودیت های بنیادی محاسبات بودند. آنها متوجه شدند که اگر تکنولوژی بر قانون مور دوام آورد، مدارهای بسته تا اندازه یک اتم آب میروند. در اینجا این سوال مطرح می شود که آیا نوع جدیدی از کامپیوتر میتواند درست شود در حالی که بر پایه فیزیک کوانتوم باشد.

فینمن در سال ۱۹۸۲ با ساخت یک مدل جزیی سعی کرد اولین تلاش برای یافتن پاسخ این سوال ارائه کند. به طوری که یک سیستم کوانتومی می تواند برای استفاده در محاسبات استفاده شود. او همچنین نشان داد که یک ماشین چگونه می تواند یک سیستم کوانتومی را شبیه سازی کند. به دیگر سخن، یک فیزیک دان این توانایی را دارد که آزمایشات فیزیک کوانتوم را داخل یک کامپیوتر شبیه سازی کند.

بعدها در سال ۱۹۸۵، دوچ دریافت که تاکید فینمن می تواند به یک استفاده وسیع از کوانتوم کامپیوترها منجر شود و یک مقاله منتشر کرد که در آن نشان می داد که هر پدیده فیزیکی می تواند در کوانتوم کامپیوتر مدل شود. در نتیجه کوانتوم کامپیوتر ظرفیتهای بسیار بالاتر از یک کامپیوتر کلاسیک دارد. بعد از انتشار این مقاله، تحقیقات برای استفاده از چنین ماشینی آغاز شد.

بعد از آن آنچه بدست آمد فقط تعدادی مسایل ریاضی پیچیده بود. تا اینکه در سال ۱۹۹۴ (( شور)) یک پیشنهاد از مقاله ای ارائه کرد که در آن یک الگوریتم استفاده کوانتوم کامپیوتر گفته شده بود. در آن مسایل مهم تئوری اعداد از جمله فاکتورگیری را حل میکرد. او نشان داد که چگونه مجموعه عملیات ریاضی طراحی شده برای کوانتوم کامپیوتر می توانست اجرا شود. و برای فاکتورگیری اعداد بسیار بزرگ بسیار سریعتر از کامپیوترهای معمولی عمل میکرد. با این نمایش، کوانتوم کامپیوتر به یک جاذبه بزرگ برای پایگاههای علمی همه دنیا تبدیل شد.

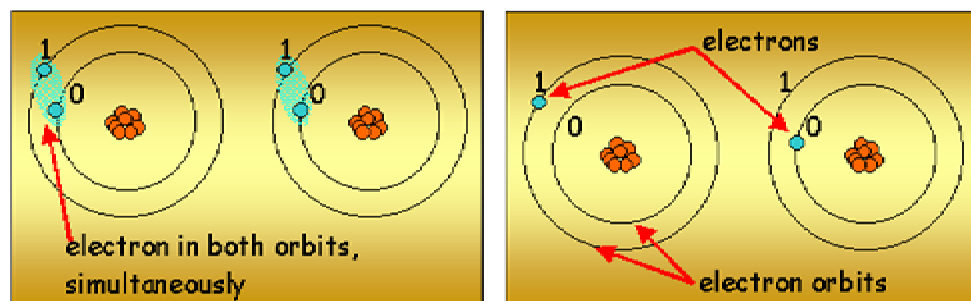
## ۳) معرفی

### ۳-۱) خاصیت دوگانه موج - ذره

معمولا ما فکر می کنیم که الکترون، اتم و مولکول ها ذره هستند. در حالی که هر کدام از این اجزا می توانند مثل موج رفتار کنند. این حالت اول بار در سال ۱۹۲۰ توسط لوئیس دی برگلی پیشنهاد شد. این ایده اینگونه ابداع شد: آزمایشات توماس یانگ در سالهای ۱۸۰۰ نشان میدهد که نور همچون موج عمل می کند. اما در سال ۱۹۰۵ توضیحات انیشتین در مورد فوتو الکتریک نشان می دهد که نور همچون ذرات است. در سال ۱۹۲۳ دی بروگلی پیشنهاد خاصیت موج ذره دوگانه را داد به طوری که همه ذرات منجمله الکترون ها را شامل می شد. بعد در سال ۱۹۲۶ داویسون و گرمر یافتند که الکترونیایی که از یک کریستال نیکل به بیرون پراکنده میشوند ، طوری رفتار می کنند گویی که آنها موج هستند. بعد از آن اتم ها، نوترون ها ، و حتی مولکول ها رفتاری موج گونه به ثبت رسید. موجها به ما می گویند که ذرات را کجا می توان یافت. این خاصیت دوگانه موج-ذره در محاسبه کوانتومی به طریق زیر مورد استفاده قرار می گیرد: موجی در فضا پخش می شود. مخصوصا یک موج می تواند در یک زمان در دو جای مختلف پخش شود. یعنی یک ذره در یک زمان در دو مکان باشد. این مفهوم (( موقعیت فوق العاده )) (Superposition Principle) نامیده می شود. یعنی آنکه ذره می تواند در حالت دو مکان باشد.

### ۳-۲) بیت ها و Qubit ها

به طور قراردادی واحد پایه ای اطلاعات در کامپیوتر ، بیت است که از **Binary Digit** میآید . یک بیت مقدار ۰ یا ۱ را ذخیره می کند

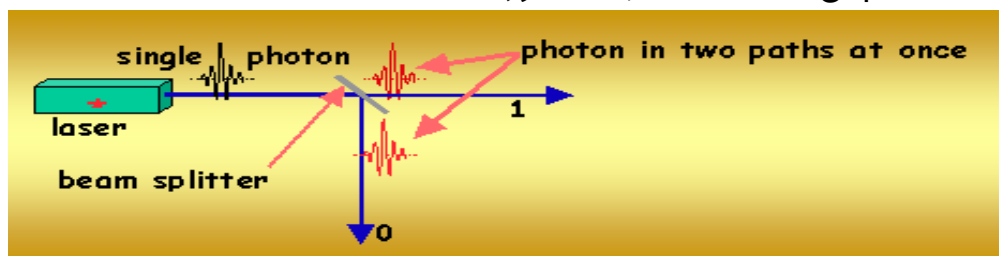


ما می توانیم بیت را با استفاده از ۲ مدار الکترون در یک اتم نشان دهیم. در اکثر اتمها الکترونهای زیادی در هر مدار هستند. ولی ما فقط در مورد مداری بحث می کنیم که بیرونی ترین الکترون منفرد را داشته باشد. شکل فوق، دو اتم را که عدد دودویی ۱۰ را به تصویر کشیده است نشان می دهد. مدار داخلی عدد صفر را نشان می دهد و مدار خارجی ۱ را. مکان الکترون عدد ذخیره شده توسط اتم را نشان میدهد. در این حالت یک توانایی جدید برای اتمها باز می شود. الکترونها خاصیت موجی دارند که به الکترون منفرد اجازه میدهد تا در دو مدار به طور همزمان باشد. به زبان دیگر، الکترون می تواند موقعیت فوق العاده در ۲ مدار داشته باشد.

شکل چپ دو اتم را نشان می دهد که هر کدام یک الکترون منفرد در موقعیت فوق العاده دومدار دارند. هر یک از اتمها نماینگر عدد دودویی ۰ و ۱ به طور همزمان می باشند. (یعنی ۴ عدد ۰۱۰۱۱۰۰ را همزمان نشان می دهد).

برای تمیز دادن این نوع جدید ذخیره داده ها از بیتهای مرسوم، آن را کیوبیت ( برگرفته از **Quantum Bit** ) می نامیم. هر اتم در شکل بالا یک کیوبیت است. نکته این است که یک کیوبیت می تواند در موقعیت فوق العاده ۲ عدد (۰ و ۱) را همزمان ذخیره کند. حالت موقعیت فوق العاده امکان بسیاری از محاسبات را همزمان می دهد. و امکان عمل به آنچه ((محاسبات موازی کوانتوم)) مینامیم میدهد.

مثالی دیگر از کیوبیت یک فوتون است (یعنی یک ذره نوری) که در حال حرکت در دو مسیر ممکن می باشد. تصور کنید وقتی که یک فوتون با پرتو شکافنده ( Beam splitter که توضیح آن در ادامه آمده است) برخورد میکند. وقتی یک فوتون منفرد با پرتو شکافنده برخورد میکند، فوتون به موقعیت فوق العاده دو مسیر انعکاس و عبور تبدیل میشود. یکی برای عدد دودویی ۰ و دیگر ۱. فوتون در موقعیت فوق العاده دو مسیراست پس نشاندهنده ۰ و ۱ به طور همزمان است.



۳-۳ محاسبات موازی کوانتوم

در یک بیت حافظه، یکی از اعداد ۰ یا ۱ در ۲ بیت یکی از اعداد ۰۰، ۰۱، ۱۰، ۱۱ را می توان ذخیره کرد.

بنا به آنچه بحث شد، با خاصیت موقعیت فوق العاده کیوبیتها اجازه میابند، که ۰ و ۱ را همزمان ذخیره کند. ۳ کیوبیت ۸ عدد و ۳۰۰ کیوبیت  $10^{90}$  عدد را همزمان ذخیره میکند که این از تعداد کل اتمهای جهان بیشتر است. این قدرت کوانتوم کامپیوترهاست. فقط با ۳۰۰ فوتون (یا یون) تعداد کل اتمهای جهان را ذخیره میکند و روی آنها به طور همزمان و موازی محاسبه انجام میدهد.

<i>qubits</i>	<i>stores simultaneously</i>	<i>total number</i>
1	(0 and 1)	$2^1 = 2$
2	(0 and 1)(0 and 1)	$2 \times 2 = 2^2 = 4$
3	(0 and 1)(0 and 1)(0 and 1)	$2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$
:	:	:
300	(0 and 1)(0 and 1).....(0 and 1)	$2 \times 2 \dots \times 2 = 2^{300}$

## ۴) شبیه ساز نوری

### ۴-۱) الگوریتم جستجوی گراور (Grover's Search Algorithm)

الگوریتمهای کوانتومی برای کاربردهای متفاوتی هستند. مهمترین آنها الگوریتم ((شور (Shor)) است که برای فاکتورگیری اعداد به کار می آید. بعدی الگوریتم (( دوچ-جوزا (Deutsch-Jozsa)) است که برای تمیز دادن انواع تابعها ست و الگوریتم ((گراور)) که برای جستجو است. آخری برای نمایش دادن راحت ترین است. همچنین به ما تداخل (Interference) و موازات (Parallelism) که دو بخش اصلی همه الگوریتمهای کوانتومی هستند را نمایش میدهد.

فرض کنید که شما می خواهید آس پیک را در دسته ورقی پیدا کنید. به طور متوسط چند ورق را باید جابجا کنید؟

جواب این گونه است. ممکن است نزدیک به ابتدای دسته باشد و یا ممکن است که در اواخر دسته شما باشد در نتیجه شما به طور میانگین  $26 = 52/2$  بار باید امتحان کنید. یعنی قانون کلی این است که در یک کامپیوتر معمولی برای  $N$  مورد، باید  $N/2$  بار امتحان کنید.

در حالی که طبق الگوریتم گراور  $\sqrt{N}$  بار امتحان لازم است تا بتوان بخش مورد نظر را پیدا کرد. این کار در مقادیر بالا سرعت را افزایش می دهد. مثلا برای یافتن یک شخص خاص ( در بین  $6\ 000\ 000\ 000$  نفر) که با الگوریتمهای معمولی  $3\ 000\ 000\ 000$  بار امتحان را باعث میشود، فقط  $8000$  امتحان را می خواهد!!

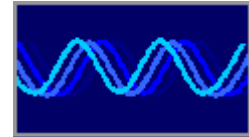
شبیه ساز نوری ما این پدیده را توضیح خواهد داد. که برای راحتی فهم جستجو در  $\epsilon$  مورد انتخاب شده.

### ۴-۲) تداخل امواج (Interference of Waves)

وقتی که یک سنگ درون دریاچه می افتد، موجهای رو به بیرون به اطراف می روند. حال اگر دو سنگ در یک فاصله کم بیافتد، موجهای ساخته شده سرانجام همدیگر را قطع میکنند. هنگام تداخل موجها چگونه رفتار می کنند؟

ممکن است دو قله با هم تداخل کنند و یک قله بلندتر بوجود آورد یا دو قسمت عمیق با هم تداخل کنند و یک قسمت عمیقتر به وجود آورد که به این حالتها تداخل

سازنده (Constructive Interference) گویند. اما اگر قسمت قله یکی با قسمت عمیق دیگری تداخل کند امواج همدیگر را خنثی می کنند که به آن تداخل مخرب (Destructive Interference) گویند.



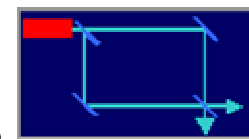
### ۳-۴) پرتو شکافنده (Beam Splitter)

پرتو شکافنده در اصل یک آینه است که لایه بازتابی بسیار نازکی دارد. در نتیجه همه نور منعکس نمی شود و مقداری عبور می کند. یک پرتو شکافنده معمولی ۵۰٪ نور را عبور میدهد و بقیه را بازتاب می کند. قراردادن پرتو شکافنده در برابر ۲ پرتو در حالت ۴۵ درجه باعث انسجام (اتحاد) آنها می شود.



### ۴-۴) شبیه ساز جستجوی کوانتومی

وقتی یک فوتون منفرد با پرتو شکافنده تداخل میکند، پرتو به دو بخش تقسیم میشود (یک بخش بازتاب و دیگری عبور کرده). پس می توان گفت که فوتون در حالت موقعیت فوق العاده است (Super position). این خاصیت در زیر برای شبیه سازی جستجوی کوانتومی به کار آمده است.

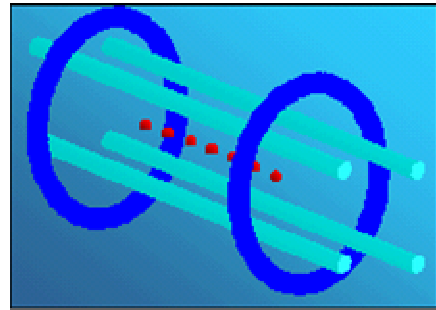


نکته مهم این است که یک فوتون در این حالت ۴ مسیر را همزمان طی می کند به طوری که در یک سیر ۴ داده را بررسی می کند.

## ۵) انواع سیستم های کیوبیت:

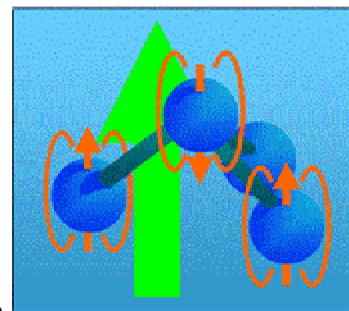
در زیر چند سیستم که از آنها به عنوان کیوبیت استفاده می شود آورده شده:  
۵-۱) تله های یونی (Ion Traps):

یون اتمی است که یک الکترون کم یا اضافی دارد. می توان از میدانهای الکتریکی یا مغناطیسی برای به دام انداختن هر یک از یونهای شارژ شده استفاده کرد. تله یونی خطی، که در شکل نشان داده شده است، دارای ۴ الکتروود میله ای است که بوسیله جریان الکتریسیته AC با ولتاژ ۱ کیلووات و فرکانس در حد چند مگاهرتز تغذیه می شود. این باعث محصور کردن یونها در امتداد خط مرکزی می شود. دو حلقه انتهایی با الکتریسیته شارژ شده اند تا از فرار یونها از دو سر دستگاه جلوگیری کنند. برای آماده کردن و بررسی از لیزر که به دقت تنظیم و فوکوس شده استفاده می شود.



الکترون بیرونی هر یون طوری دستکاری شده که در ۲ مدار اتمی قرار داشته باشد. هر یون نشان دهنده یک کیوبیت است. وقتی که یک یون فوتونهای یک لیزر را پراکنده می کند، خود منعکس می شود. این حرکت انعکاس توسط بقیه یونها احساس می شود. این حرکت انعکاسی هم ارز باس داده ها (Data Bus) در کامپیوترهای کلاسیک است.

۵-۲) تشدید مغناطیسی هسته ای (NMR):  
Nuclear Magnetic Resonance

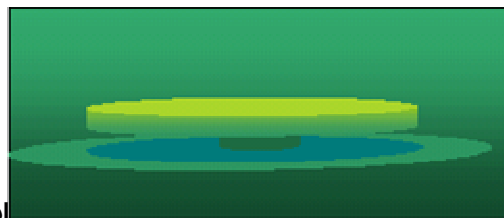


هسته یک اتم میتواند گشتاور مغناطیسی داشته باشد. به طوری که مثل یک آهنربای دائمی بسیار کوچک عمل کند. هسته یک رفتار غیر عادی از

خود در یک میدان مغناطیسی قوی بزرگ نشان می دهد. با توجه به خصلت کوانتومی آن، درجهت یا در خلاف جهت میدان مغناطیسی احاطه کننده، گشتاور مغناطیسی هسته منطبق شده به صف در می آید. جهتابی هسته تحت تاثیر ۲ مقدار بارز است پس نمایشگر یک کیوبیت است. مثل دو آهنربا هسته های مجاور بر هم اثر می کنند. این باعث می شود که یک هسته کیوبیت، هسته کیو بیت مجاور خود را کنترل کند. محاسبات کوانتومی بوسیله استفاده از میدانهای رادیو فرکانسی که باعث جابجایی و تعویض گشاورهای هسته می گردند، اطلاعات خروجی اندازه گیری میدانهای رادیو فرکانسی در اثر نوسانات گشتاورها بوجود می آیند، بدست می آید.

بزرگترین کوانتوم کامپیوتر ساخته شده تا الان یک ۷ کیوبیتی است که با NMR کار می کند. متأسفانه محدودیت های تکنولوژیکی، ساخت این واحدها را تا ۱۰ کیوبیت ناممکن می کند. هر چند NMR تاکنون برای نشان دادن توانایی کارکرد یک کامپیوتر کوانتومی سودمند بوده است.

### ۵-۳) نقطه های کوانتومی (Quantum Dots):



استفاده از تکنیکهای پیشرفته لیتوگرافی، علامت زدن ذرات ریز کوانتوم را در نیمه رساناها ممکن کرده است. هر نقطه که به کوچکی 30nm (۳۰ برابر یک اتم) است، می تواند یک الکترون منفرد در لایه های مختلف انرژی را محدود کند. در نتیجه نقطه های کوانتومی مثل اتمهای بزرگ ساختگی رفتار خواهند کرد و می توانند به عنوان کیوبیت استفاده شوند. یک کاربرد صورتی می تواند به نقطه های کوانتومی منفرد دسترسی داشته باشد که با از پرتوهای لیزر فوکوس شده، که می تواند به الکترونی بین دو لایه انرژی مجزا را با هم تعویض و جابجا کند که به معنی در موقعیت فوق (super position) العاده قرار دادن دو لایه می باشد. اثر مورد انتظار در بین کیوبیتها، در میدانهای نوری و الکتریکی رخ خواهد داد.

### ۵-۴) بقیه سیستمهای کیوبیت:

به نظر می رسد که هر سیستمی که پدیده کوانتومی را نمایش میدهد به عنوان کاندیدای محاسبات کوانتومی معرفی شده است. موارد زیر هم شامل می شوند اما به این موارد محدود نمی شوند.

## حفره QED (Cavity Quantum Electrodynamics):

در حفره الکترو دینامیک کوانتومی، اتمها به شدت با فوتونهای به دام افتاده در آینه های بی نهایت باز تابنده، در تعامل هستند. ساخت دریچه های منطقی کوانتومی (Quantum logic gates) بوسیله گیر انداختن اتم ها در میدانهای نوری ممکن است.

## نورهای غیر خطی (Nonlinear Optics):

در حالت عادی فوتونها با هم تعامل ندارند. اما اگر دو پرتو از یک جسم غیر خطی عبور کند، فوتونهای یک پرتو بر فوتونهای دیگر اثر می کنند. یکی از موادی که در حال حاضر مورد بررسی میباشد ابری از اتمهای سرد است که با استفاده از میدانهای دیگر به صورت شفاف در آمده است.

## نورهای خطی (Linear optics):

ابزارهای نوری خطی (آینه ها و پرتو شکافنده ها) و فوتونهای منفرد، می توانند برای اجرای الگوریتمهای کوانتوم به کار آیند. شرایط مربوط به گیر انداختن فوتونها را می توان با اندازه گیری های خاصی بوجود آورد. یکی از اشکالات این سیستم این است که حالت صحیح فقط بعضی وقتها پدید می آید، پس محاسبات باید چند بار تکرار شوند.

## SQUIDها (Superconducting Quantum Interference Devices):

دستگاههای تداخلی کوانتومی ابر رسانایی

شکافهای کوچکی در حلقه فلزی ابر رسانه ایجاد می شود که به جزیره موسوم است. در این شیوه کیوبیت، شارژ الکتریکی جزیره است. مقدار الکترونیایی که از شکافها می گذرند، توسط میدانهای الکتریکی و مغناطیسی خارجی کنترل می شود.

## ۶) زمینه تحقیقات در آینده:

پردازش اطلاعات کوانتومی ، از زمان ابداع تا کنون پیشرفت های زیادی داشته. از جمله ساخت کامپیوتر های کوانتومی<sup>۲</sup> یا<sup>۳</sup> کیوبیتی که بعضی محاسبات ساده ریاضی یا دسته بندی اطلاعات را میتواند انجام دهند.

هر چند موانع زیادی تا ساخت یک کوانتوم کامپیوتر قابل رقابت با کامپیوترهای دیجیتال پر قدرت امروز وجود دارد. در بین این موانع، تصحیح خطاها (error correction) ، تجزیه پرتوها (decoherence) ، و طراحی سخت افزاری، از بزرگ ترین این موانع هستند. تصحیح خطاها به خودی خود تعریف شده است، ولی چه خطاهایی باید رفع شوند؟ پاسخ این است، آن خطاهایی که از تجزیه پرتوها منجر می شوند، و یا خطاهای که در اثر تمایل یک کامپیوتر کوانتومی به خراب شدن پیش می آسد و آن وقتی است که از حالت کوانتومی به حالت عدم انسجام کشید می شود. البته این حالت وقتی پیش می آید که با محیط اطراف در برخورد و یا تعامل قرار می گیرد. این برخوردها بین محیط و کیوبیتها اجتناب ناپذیر است، و باعث از دست دادن اطلاعات ذخیره شده یا محاسبات در کوانتوم کامپیوتر می شود.

قبل از این که هر کوانتوم کامپیوتری توانایی حل مسایل را داشته باشد، محققان باید راهی پیدا کنند که تجزیه فوتونها و بقیه پتانسیلهای ایجاد خطا به حداقل برسد. تئوری تصحیح خطاهای کوانتومی ، در سال ۱۹۹۵ ارائه شدو پیشرفت کرد تا آنکه کامپیوترهای کوانتومی کوچک ساخته شدند و انتظار ساخت کوانتوم کامپیوترهای بزرگ می رود.

مهمترین ایده در این زمینه، کاربرد تصحیح خطا در مرحله انسجام است، که به معنی بیرون کشیدن اطلاعات و کم کردن خطاها در سیستم های کوانتومی بدون اندازه گیری خود سیستم است. در سال ۱۹۹۸ محققان در MIT و آزمایشگاه بین المللی لوس آلاموس زیر نظر ریموند لافلوم موفق شد یک کیوبیت را در امتداد ۳ اسپین هسته ای پخش کند. او این عمل را در هر یک از مولکولهای حلال مایعی از آلانین (Alanine) یاتریکلرو اتیلن انجام داد. او با استفاده از NMR موفق به انجام این عمل شد. این آزمایش مهم است زیرا پخش اطلاعات در واقع به عنوان مانعی در خراب شدن تلقی می گردد. مکانیک کوانتومی به ما می گوید اندازه گیری مستقیم وضعیت یک کیوبیت باعث

تخریب و ضعیفیت فوق العاده (SuperPosition) می شود و آنرا مجبور می کند که ۰ یا ۱ بشود. روش پخش کردن اطلاعات به محققین اجازه می دهد تا از خاصیت در هم بافتگی (entanglement) استفاده کرده بتوانند تعامل بین حالات و وضعیتهای را مطالعه نمایند. این امر به منزله بررسی و تجزیه و تحلیل غیر مستقیم اطلاعات کوانتوم محسوب می شود. به جای آنکه یک اندازه گیری مستقیمی را انجام دهند، محققین حرکتهای دورانی هسته ها را مقایسه کردند تا ببینند آیا تفاوت جدیدی بین آنها ایجاد شده است یا نه ؟ آنها این امر را بدون آنکه نیازی به درک خود اطلاعات باشد انجام دادند.

این تکنیک به آنها این توانایی را داد که بتوانند خطاها را در مرحله انسجام نوری رفع کنند، و در نتیجه به یک مرحله بالاتر در انسجام در سیستمهای کوانتومی رسیدند. این عمل امیدها را برای رسیدن به کوانتوم کامپیوتر بیشتر کرد. تحقیقات برای رفع خطاها در کوانتوم کامپیوتر با گروههایی در کالتک، مایکروسافت، لوس آلاموس و السور ادامه دارد. تاکنون فقط تعداد کمی از خاصیتهای کوانتوم کامپیوتر آشکار شده است. تعداد بیشتر مستلزم تست تئوری هاست. برای انجام این امر باید دستگاههایی ساخته شوند که توانایی انجام محاسبات کوانتوم را داشته باشند.

سخت افزارهای کوانتوم کامپیوتر هنوز دوران طفولیت را طی می کنند. اما طی آزمایشات بسیار، تشدید هسته ای مغناطیسی (NMR) به پر کاربردترین جز در ساخت سخت افزار کوانتومی تبدیل شده است. به طوری که در سال ۱۹۹۹ گروهی از آزمایشگاه بین المللی لوس آلاموس و MIT، آزمایشات تشریحی را در زمینه کوانتوم کامپیوتر ارائه کردند که در آن از تکنولوژی NMR استفاده شده بود.

تحقیقات در حال حاضر به دنبال تسخیر راههایی برای از بین بردن اثرات مخرب تجزیه نور به منظور ساختن یک سخت افزار بهینه است. همچنین استفاده از الگوریتمهای کوانتوم کامپیوترها برای استفاده از قدرت فوق العاده آنها مورد نظر است. قاعدتا رسیدن به این اهداف بستگی به چگونگی رفع خطاها و الگوریتمها دارد. که گروههایی بر روی این موارد در حال تحقیق هستند. تا امروز طراحی ها درگیر سه نوع کیوبیت: تله های یونی، QED ها، و NMR بوده است. این مدلها علی رغم موفقیتهای نسبی در آزمایشات دارای محدودیتهای تکنولوژیکی جدی هستند. کامپیوترهای که با تله یونی کار می کنند دارای محدودیت در سرعت هستند. به خاطر فرکانس لرزشی اجزا در درون تله. به خاطر تبدیل سیگنالها به نویز در درون واحدهای دارای NMR و تضعیف سیگنالها تعداد کیوبیتها کم

می شود. حفره QED از بقیه امیدوار کننده تر است هر چند که تاکنون با تعداد کمی کیوبیت ساخته شده است. آینده معماری سخت افزار کوانتوم بسیار متفاوت با آنچه ما امروز میدانیم خواهد بود، هر چند این تحقیقات باعث شده تا این بینش را بیابیم که موانعی که قرار است در آینده برداشته شود، چه خواهد بود.