

Quantum hardware

Ewa Borsuk, Józef Borsuk

Wydział Fizyki Matematyki i Informatyki, Politechnika Krakowska im. Tadeusza
Kościuszki

22.06.2018

Quantum hardware

Kwantowy komputer musi spełniać specjalne wymagania dotyczące:

- Przechowywania danych

Quantum hardware

Kwantowy komputer musi spełniać specjalne wymagania dotyczące:

- Przechowywania danych
- Izolacji

Quantum hardware

Kwantowy komputer musi spełniać specjalne wymagania dotyczące:

- Przechowywania danych
- Izolacji
- Odczytu

Quantum hardware

Kwantowy komputer musi spełniać specjalne wymagania dotyczące:

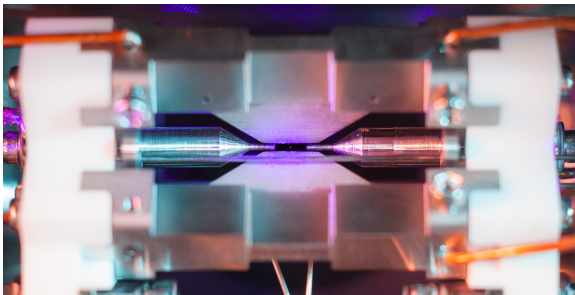
- Przechowywania danych
- Izolacji
- Odczytu
- Bramek

Quantum hardware

Kwantowy komputer musi spełniać specjalne wymagania dotyczące:

- Przechowywania danych
- Izolacji
- Odczytu
- Bramek
- Precyzji

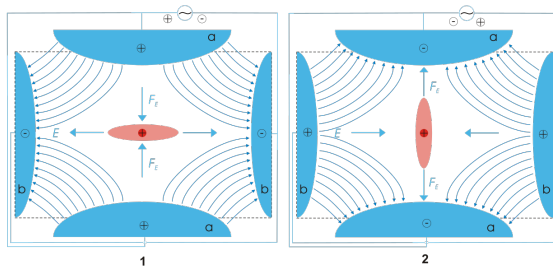
Pułapka jonowa



Rysunek : Pułapka jonowa

Podejście to zaproponowali Ignacio Cirac i Peter Zoller, które zostało zrealizowane przez grupę Dave'a Winelanda w Narodowym Instytucie Standaryzacji i Technologii.

Pułapka jonowa



Rysunek : Kwadripolowa pułapka Paula

Pułapka jonowa

Stan kwantowy każdego jonu jest liniową kombinacją dwóch stanów: stanu podstawowego $|g\rangle$ i stanu wzbudzonego $|e\rangle$

$$a|g\rangle + be^{i\omega t}|e\rangle \quad (1)$$

Taki koherentny stan może się utrzymać w czasie porównywalnym do czasu życia stanu wzbudzonego.

Pułapka jonowa

Jony są bardzo dobrze odseparowane z powodu występującej między nimi siły Coulomba.

Gdy laser oświetla jony, każdy kubit w stanie podstawowym $|g\rangle$ pochłania i emituje światło lasera.

Światło lasera o częstotliwości ω skupiając się na n -tym jonie wywołuje tzw. oscylacje Rabi'ego pomiędzy stanem podstawowym a wzbudzonym.

Odpowiednie dobranie czasu impulsu lasera i jego fazy umożliwia zastosowanie dowolnej jednokubitowej transformacji. Laser działając na stan $|g\rangle$ może przygotować każdą liniową kombinację $|g\rangle$ i $|e\rangle$.

Pułapka jonowa

Problem: jak uzyskać oddziaływanie pomiędzy dwoma kubitami?

Jon absorbuje lub emituje foton - następuje jego odrzut.

Efekt Mössbauera

Zjawisko absorpcji i emisji wraz z odrzutem jonu.

Wydzielona energia, równa różnicy energii obydwu stanów, rozdziela się pomiędzy energię emitowanego kwantu gamma i energię kinetyczną odrzutu emitującego atomu.

Pułapka jonowa

Drgania własne najniższej częstotliwości ν są drganiami środka masy oscylujących jonów.

Laser o częstotliwości $\omega - \nu$ oświetla n -ty jon.

Dla odpowiedniego impulsu lasera stan $|e\rangle_n$ przechodzi w stan $|g\rangle_n$, a środek masy przechodzi ze stanu $|0\rangle_{cm}$ do stanu $|1\rangle_{cm}$. Powstaje fonon.

$$|e\rangle_n |0\rangle_{cm} \rightarrow |e\rangle_n |0\rangle_{cm} \quad (2)$$

$$|e\rangle_n |0\rangle_{cm} \rightarrow -i |g\rangle_n |1\rangle_{cm} \quad (3)$$

Pułapka jonowa

Tracimy bit informacji, który oryginalnie był zawarty w stanie n -tego jonu, ale wędruje on do stanu ruchu wszystkich innych jonów.

Na stan ruchu m -tego jonu ($m \neq n$) miał wpływ wewnętrzny stan n -tego jonu, więc nastąpiła pomiędzy nimi interakcja.

Ostatecznie należy przenieść informację z fononu do wewnętrznego stanu wybranego jonu. Drganie środka masy powinno przejść do stanu podstawowego $|0\rangle_{cm}$.

Wnęka QED

Stworzony przez grupę Jeffa Kimble'a na Caltech.
Proces polega na uwięzieniu neutralnych atomów we wnęce optycznej/rezonansowej.

Informacja kwantowa może być przetrzymywana jako wewnętrzny stan atomów, ale w tym przypadku atomy oddziałują, ponieważ łączą się w drganiach własnych pola elektromagnetycznego we wnęce.

Przez przeprowadzenie przesunięć przez pulsujący laser możemy dokonać przesunięcia w jednym atomie, które jest uwarunkowane stanem wewnętrznym innego atomu.

Wnęka QED

Inną możliwością jest stworzenie kubitu, nie jako wewnętrznego stanu jonu, lecz w polaryzacji fotonu. Wtedy uwięziony atom może być użyty jako pośrednik, który zmusza jeden foton do oddziaływania z drugim.

W swoim eksperymencie grupa Kimble'a przedstawiła działanie dwufotonowej kwantowej bramki, w której polaryzacja kołowa jednego z fotonów wpływa na fazę drugiego fotonu:

$$\begin{aligned} |L\rangle_1 |L\rangle_2 &\rightarrow |L\rangle_1 |L\rangle_2 \\ |L\rangle_1 |R\rangle_2 &\rightarrow |L\rangle_1 |R\rangle_2 \\ |R\rangle_1 |L\rangle_2 &\rightarrow |R\rangle_1 |L\rangle_2 \\ |R\rangle_1 |R\rangle_2 &\rightarrow e^{i\Delta} |R\rangle_1 |R\rangle_2 \end{aligned}$$

Wnęka QED

$|L\rangle$ i $|R\rangle$ oznaczają stany fotonu z lewoskrętną i prawoskrętną polaryzacją kołową. By uzyskać tę interakcję, jeden foton jest utrzymany we wnęce, gdzie polaryzacja $|L\rangle$ nie wpływa na atom, ale polaryzacja $|R\rangle$ wpływa mocno.

Drugi foton przechodzi przez wnękę, i tak samo dla drugiego fotonu jedna z polaryzacji lepiej oddziałuje z atomem.

Pakiet falowy drugiego fotonu otrzymuje przesunięcie $e^{i\Delta}$ tylko jeśli oba fotony mają polaryzację $|R\rangle$.

Ponieważ zmiana fazy jest uwarunkowana polaryzacją obu fotonów, jest to nietrywialna dwukubitowa kwantowa bramka.

NMR

Trzecim schematem sprzętu, który prześcignął znacznie możliwości pułapki jonowej i wnęki QED jest schemat stosujący technologię jądrowego magnetycznego rezonansu (ang. nuclear magnetic resonance - NMR). Jony są bardzo dobrze odseparowane z powodu występującej między nimi siły Coulomba.

Teraz kubity są przekazywane przez wybrane jądrowe spiny w konkretnej molekuale. Każdy spin może być zorientowany równoległe ($|\uparrow\rangle = |0\rangle$) lub antyrównoległe ($|\downarrow\rangle = |1\rangle$) do zadanego stałego pola magnetycznego. Spiny potrzebują dużo czasu by nastąpiła dekoherencja, tak więc kubity mogą być przechowywane przez odpowiednio długi czas.

NMR

Możliwe jest też włączenie pulsującego, rotującego magnetycznego pola z częstotliwością ω (gdzie ω to energia dzieląca stany spinu zorientowanego w górę i w dół) i przeprowadzić oscylacje Rabiego spinów.

Jony są bardzo dobrze odseparowane z powodu występującej między nimi siły Coulomba.

Przez odpowiednie dobranie impulsu, przeprowadzamy wybraną transformację na pojedynczym spinie. Wszystkie spiny w molekuale są wystawione na działanie rotującego pola magnetycznego, ale tylko te w rezonansie reagują.

NMR

Ponadto, spiny posiadają oddziaływania dipol-dipol, co może być wykorzystane do stworzenia bramki. Różnica między $|\uparrow\rangle$ i $|\downarrow\rangle$ dla jednego spinu może zależeć od stanu sąsiednich spinów. Tak więc to czy impuls jest w rezonansie, tak aby obrócić spin zależy od stanu sąsiednich spinów.

NMR

Gershenfeld, Chuang, Cory, Fahmy i Havel opisali jak stworzyć "efektywne czyste stany", którymi można manipulować i monitorować przez przeprowadzenie odpowiednich operacji na tzw. termicznym zbiorze.

Wykazali również, że niektóre kwantowe algorytmy (np. algorytm faktoryzacji Shora) mogą być przedstawione w deterministycznej formie (przynajmniej w taki sposób, że duża ilość komputerów da ten sam wynik) tak więc uśrednianie po wielu wynikach nie zepsuje rezultatów.

Bibliografia



Caltech Lecture Notes, *Chapter 1. Introduction and Overview*

<http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/notes/chap1.pdf>
(czerwiec 2018)

Dziękujemy za uwagę.