**ĐẠI ​HỌC ​KINH​ TẾ ​QUỐC ​DÂN**

-----\*\*\*-----

A blue and red logo

Description automatically generated

**VẬT LÝ ĐẠI CƯƠNG 2**

**ĐỀ ​TÀI**

**TỔNG QUAN TÌM HIỂU VỀ NANO MAGNET VÀ NEUTRAL ATOMS ĐẾN MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ**

|  |  |
| --- | --- |
| Giảng ​viên ​hướng​ dẫn: | TS. Tống Thị Hảo Tâm |
| Sinh viên: | Đỗ Trọng Khánh |
| Mã sinh viên: | 11201933 |

**Hà​ Nội, thá​ng​ 06 nă​m 2​025**

**Mục lục**

[CHƯƠNG 1. TỔNG QUAn về máy tính lượng tử 3](#_Toc201484793)

[1. Giới thiệu 3](#_Toc201484794)

[2. Hệ thống tính toán lượng tử 3](#_Toc201484795)

[2.1. So sánh Bit và Qubit 4](#_Toc201484796)

[2.2. Chồng chập và vướng víu 5](#_Toc201484797)

[2.3. Hiện thực hóa vật lý 5](#_Toc201484798)

[CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN NAM CHÂM PHÂN TỬ NANO (NANOMAGNET) VỚI máy tính LƯỢNG TỬ 7](#_Toc201484799)

[2.1. Tổng quan 7](#_Toc201484800)

[2.2. Một số bài nghiên cứu liên quan 8](#_Toc201484801)

[2.2.1. Bài nghiên cứu của Tejada và cộng sự 8](#_Toc201484802)

[2.2.2. Bài nghiên cứu của Giovanni Amedeo Cirillo và cộng sự 10](#_Toc201484803)

[CHƯƠNG 3: TỔNG QUAN NGUYÊN TỬ TRUNG HÒA VỚI MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ 12](#_Toc201484804)

[3.1. Tổng quan nguyên tử trung hòa 12](#_Toc201484805)

[3.2. Ứng dụng nguyên tử trung hòa đến máy tính lượng tử 13](#_Toc201484806)

[TÀI LIỆU THAM KHẢO 17](#_Toc201484807)

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAn về máy tính lượng tử

## 1. Giới thiệu

Bộ xử lý máy tính hiện nay giải mã thông tin thành các bit nhị phân 0 và 1, và sử dụng các cổng logic dựa trên transistor chuyển mạch để xử lý chúng. Các máy tính này hoạt động theo nguyên lý tuần tự, trong đó các quá trình được thực hiện theo trình tự cho đến khi cho ra kết quả cuối cùng. Hiện tại, tính toán vẫn tuân theo các quy luật vật lý cổ điển cho đến khi kích thước của các transistor bán dẫn tiến tới kích thước nguyên tử.

Vào năm 1975, Gordon Moore dự đoán rằng số lượng transistor trên vi mạch tích hợp sẽ tăng gấp đôi sau mỗi 18 tháng. Dự kiến trong vòng 10 năm tới, tần số xung nhịp của các bộ xử lý máy tính hiện tại có thể đạt tới khoảng 40 GHz. Dự báo rằng vào năm 2024, định luật Moore sẽ trở nên khó duy trì hơn nữa do kích thước của các bit cổ điển thông thường tiến tới kích thước nguyên tử.

Khác với máy tính cổ điển chỉ hoạt động ở hai trạng thái, máy tính lượng tử mã hóa dữ liệu dưới dạng bit lượng tử, hay còn gọi là **qubit**, trong đó bit có thể đồng thời mang trạng thái 0 và 1 (gọi là chồng chập – *superposition*). Ở cấp độ nguyên tử, máy tính lượng tử có thể được hiện thực hóa bằng các nguyên tử, photon, ion, hoặc electron cùng với các thiết bị điều khiển tương ứng.

## 2. Hệ thống tính toán lượng tử

Tính toán và thông tin lượng tử là lĩnh vực nghiên cứu các tác vụ xử lý thông tin có thể được thực hiện bằng các hệ lượng tử. Nghiên cứu về tính toán lượng tử là một phân ngành của khoa học thông tin lượng tử. Về cơ bản, các hệ thống tính toán dựa trên khả năng lưu trữ và thao tác thông tin. Máy tính hiện tại thao tác các bit theo từng đơn vị riêng lẻ. Máy tính lượng tử khai thác các hiện tượng cơ học lượng tử (ví dụ: chồng chập và vướng víu – entanglement) cho phép dữ liệu được biểu diễn dưới dạng bit lượng tử (qubit) – không bị giới hạn ở các giá trị nhị phân 0 hoặc 1 thông thường, mà có thể là chồng chập của cả hai trạng thái đồng thời. Do đó, một tập hợp các qubit có thể biểu diễn lượng giá trị theo hàm mũ so với bit cổ điển. Điều này khiến tính toán lượng tử trở thành một nền tảng đầy triển vọng, có khả năng giải quyết các bài toán tính toán mà ngay cả siêu máy tính hiện đại nhất cũng không thể xử lý được.

### 2.1. So sánh Bit và Qubit

Khái niệm cơ bản trong tính toán và thông tin cổ điển là bit – một đơn vị mang giá trị 0 hoặc 1. Trong khi đó, tính toán lượng tử dựa trên một khái niệm tương tự: bit lượng tử, hay qubit. Trong miền lượng tử, chúng ta có thể có các hệ thống ở trạng thái chồng chập giữa nhiều trạng thái khác nhau. Điểm khác biệt chính là: qubit có thể ở trạng thái khác với chỉ 0 hoặc 1, hay chính xác hơn, là chồng chập giữa hai trạng thái 0 và 1.

Một qubit đơn có thể được mô tả bởi tổ hợp tuyến tính của hai trạng thái cơ sở (computational basis) |0⟩ và |1⟩:

Trong đó, α và β là các biên độ xác suất và thường là số phức, với điều kiện:

Trong không gian vectơ phức hai chiều, trạng thái của qubit có thể được hình dung như một vectơ. Các trạng thái đặc biệt |0⟩ và |1⟩ là các trạng thái cơ sở trực chuẩn, lần lượt được biểu diễn bằng:

### 2.2. Chồng chập và vướng víu

Hai hiện tượng cơ học lượng tử quan trọng là **chồng chập** (*superposition*) và **vướng víu** (*entanglement*).

* **Chồng chập** cho phép một qubit tồn tại đồng thời ở cả hai trạng thái 0 và 1.
* **Vướng víu** là hiện tượng hai hay nhiều hạt lượng tử có mối liên hệ ràng buộc sâu sắc, đến mức việc đo một hạt lập tức quyết định trạng thái của hạt kia – bất kể khoảng cách giữa chúng.

Tính chất này là nền tảng cho nhiều ứng dụng như tính toán song song lượng tử và truyền thông lượng tử bảo mật.

### 2.3. Hiện thực hóa vật lý

Cho đến nay, một số nỗ lực đã được thực hiện nhằm thiết kế các máy tính lượng tử thực tiễn, tuy nhiên việc hiện thực hóa chúng vẫn còn ở giai đoạn đầu – hoặc nói cách khác, do những rào cản kỹ thuật, các hệ thống máy tính lượng tử chưa thực sự được triển khai trên quy mô lớn. Vì máy tính lượng tử có thể thực hiện nhiều tác vụ song song một cách vượt trội so với máy tính cổ điển trong các ứng dụng như phân tích thừa số nguyên tố và mô phỏng lượng tử, nên trong hai thập kỷ qua, lĩnh vực này đã thu hút rất nhiều sự chú ý.

Vào năm 2000, David DiVincenzo (IBM) đã đưa ra năm tiêu chí nền tảng cho bất kỳ công nghệ qubit nào được xem là hiện thực hóa phù hợp, kèm theo hai tiêu chí bổ sung liên quan đến việc truyền thông lượng tử.

**Các yêu cầu để hiện thực hóa vật lý máy tính lượng tử:**

* Hệ thống vật lý có thể mở rộng với các qubit được xác định rõ ràng
* Khả năng chuẩn bị trạng thái đầu vào đơn giản, xác định
* Khả năng đo trạng thái qubit
* Thực hiện các cổng lượng tử phổ quát với độ chính xác cao
* Thời gian decoherence dài

**Các yêu cầu cho việc xử lý thông tin lượng tử:**

* Chuyển đổi giữa qubit tĩnh và qubit bay
* Truyền qubit giữa hai địa điểm một cách trung thực

Trong thực trạng hiện nay, các nhà nghiên cứu đã nỗ lực xây dựng các hệ thống qubit rối lượng tử để đáp ứng những thách thức này. Mặc dù đã đạt được những tiến bộ thực nghiệm đáng kể, chưa ai xây dựng được máy tính lượng tử có thể thực hiện phép tính mà máy tính cổ điển không thể mô phỏng. Để đạt được điều này cần khoảng 50 qubit và khoảng 10^4 cổng. Ngay cả như vậy, nó vẫn còn xa so với yêu cầu để phân tích một số lớn bất khả thi trên máy tính cổ điển. Tuy nhiên, một số nền tảng vật lý đã nổi lên như những ứng cử viên hàng đầu cho phần cứng tính toán lượng tử, bao gồm ion bẫy, siêu dẫn, nguyên tử trung hòa, photon, chấm lượng tử, và spin trong các vật chủ trạng thái rắn.

CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN NAM CHÂM PHÂN TỬ NANO (NANOMAGNET) VỚI máy tính LƯỢNG TỬ

## 2.1. Tổng quan

Các nam châm phân tử đơn (Single-Molecule Magnets – SMMs) là các hợp chất phối trí thể hiện tính lưỡng định từ và tồn tại một hàng rào năng lượng đối với quá trình đảo chiều từ hóa. Ngoài ra, chúng cho thấy sự thư giãn từ tính chậm ở cấp độ phân tử đơn lẻ (không liên quan đến bất kỳ tương tác phân tử nào), do đó khi phân tử được từ hóa dưới tác động của một trường từ, nó sẽ duy trì từ hóa đó ngay cả khi trường bị loại bỏ. Các phân tử này bao gồm lõi các ion từ tính được bao quanh bởi các phối tử (ligands), các phối tử này có thể được khai thác để liên kết các hệ spin khác nhau, từ đó cho phép triển khai các thiết bị nhiều qubit có khả năng mở rộng.

Để phân tích năng lượng của các hệ này, giả sử có một trường từ tĩnh ​ được áp dụng lên phân tử và mômen từ spin đặc trưng của chúng có xu hướng định hướng theo trục của trường tĩnh nhằm tối thiểu hóa năng lượng. Nếu cung cấp một lượng năng lượng cho hệ, hướng spin có thể thay đổi, điều này cho phép mã hóa thông tin; hơn nữa, vì spin là một đại lượng đặc trưng trong cơ học lượng tử, thông tin lượng tử có thể được mã hóa. Có thể xem xét hai số lượng tử spin khác nhau:

* Số lượng tử chính là một hằng số,
* và số lượng tử phụ , biểu thị thành phần của mômen từ của phân tử dọc theo trục z, phụ thuộc vào năng lượng spin và có thể nhận các giá trị từ −S đến +S với bước nhảy bằng một, do đó tổng số trạng thái là .

Cũng như bất kỳ công nghệ ứng viên nào cho tính toán lượng tử, các nam châm phân tử nano phải đảm bảo được các tiêu chí sau:

* thực thi được một tập cổng lượng tử phổ quát,
* khả năng định địa chỉ hiệu quả các qubit (tức là thao tác kích thích một qubit không ảnh hưởng đến các qubit khác),
* và thời gian tương quan (coherence) đủ dài.

Hóa học lý thuyết đóng vai trò quan trọng trong thiết kế các hệ này, đặc biệt trong việc mô hình hóa động học spin – yếu tố cốt lõi để xây dựng phương pháp thiết kế cho các nam châm phân tử nano có thời gian thư giãn và khử tương quan dài. Để có được các mô hình chính xác hơn mô tả các hiệu ứng phi lý tưởng của qubit spin, hiện nay đang có nhiều nỗ lực tích hợp tương tác spin–phonon – được xem là một tham số then chốt đối với việc làm chậm quá trình thư giãn từ – vào các phương pháp tính toán động học spin, vốn chủ yếu dựa vào việc phân tích hàng rào năng lượng của SMM.

## 2.2. Một số bài nghiên cứu liên quan

### 2.2.1. Bài nghiên cứu của Tejada và cộng sự

Bài nghiên cứu đã chỉ ra nanomagnet (hạt từ tính kích thước nano hoặc cụm phân tử từ tính) ảnh hưởng đến máy tính lượng tử thông qua các đặc tính vật lý đặc trưng của chúng, bao gồm spin lớn, độ dị hướng từ cao, và hiện tượng xuyên hầm lượng tử. Những đặc tính này tác động trực tiếp đến việc xây dựng, điều khiển, và đo lường qubit – đơn vị cơ bản của máy tính lượng tử. Dưới đây là các tác động vật lý chính:

**Tạo và lưu trữ trang thái qubit:**

***Spin lớn và độ dị hướng từ:***

Nanomagnet, như cụm phân tử Fe₈​ với spin S=10, có spin tổng lớn (vài trăm đơn vị hằng số Planck trong các hạt chống sắt từ nhỏ). Spin lớn giúp dễ dàng chuẩn bị và đo lường trạng thái lượng tử so với spin cơ bản.

Độ dị hướng từ cao tạo ra một rào cản năng lượng ngăn spin thay đổi hướng ngẫu nhiên. Điều này dẫn đến các mức năng lượng spin (​) riêng biệt trong giếng thế, với khoảng năng lượng giữa các mức (ví dụ, giữa và ) khoảng vài kelvin. Những mức này được sử dụng làm trạng thái qubit (|0⟩ và |1⟩)

Các mức năng lượng ổn định này cho phép lưu trữ thông tin lượng tử dưới dạng trạng thái spin, tương tự cách bit cổ điển lưu trữ thông tin 0 hoặc 1. Độ dị hướng đảm bảo trạng thái qubit duy trì tính ổn định trước nhiễu nhiệt ở nhiệt độ thấp (< 1 K).

***Hiện tượng xuyên hầm lượng tử:***

Khi hiện tượng xuyên hầm lượng tử (quantum tunnelling) qua rào cản dị hướng từ tính diễn ra đáng kể, các trạng thái qubit là các tổ hợp đối xứng (|0⟩) và phản đối xứng (|1⟩) của trạng thái cơ bản suy biến hai lần . Khoảng năng lượng Δ giữa |0⟩ và |1⟩ trong trường hợp này nhỏ hơn nhiều (vài trăm millikelvin) được tạo ra bởi hiệu ứng xuyên hầm.

Xuyên hầm lượng tử cho phép tạo trạng thái chồng chất (a∣0⟩+b∣1⟩), một đặc trưng cốt lõi của tính toán lượng tử. Điều này xảy ra do spin “xuyên qua” rào cản năng lượng thay vì vượt qua, nhờ các hiệu ứng cơ học lượng tử. Khoảng Δ có thể được điều chỉnh bằng từ trường ngoài vuông góc với trục dễ, cho phép thao tác trạng thái qubit.

**Điều khiển trạng thái qubit**

***Tương tác với từ trường ngoài***

Từ trường dọc (longitudinal) chọn một mức spin cụ thể bằng cách làm nghiêng giếng thế, trong khi từ trường ngang (transverse) gây ra dao động Rabi, xoay trạng thái qubit giữa |0⟩ và |1⟩. Điều này tương tự kỹ thuật NMR, nhưng áp dụng cho spin lớn của nanomagnet, cho phép thực hiện các cổng đơn qubit.

***Tương tác giữa các qubit qua vòng siêu dẫn***

Tương tác này cho phép thực hiện cổng hai qubit (như CNOT), cần thiết để tạo trạng thái rối lượng tử – một yếu tố quan trọng để thực hiện các thuật toán lượng tử phức tạp. Công tắc Josephson cho phép bật/tắt tương tác, kiểm soát chính xác quá trình tính toán.

### 2.2.2. Bài nghiên cứu của Giovanni Amedeo Cirillo và cộng sự

Trong bài nghiên cứu đã chỉ ra Nanomagnet có tác động vật lý đến máy tính lượng tử như sau:

**Là nền tảng vật lý hiện thực hóa qubit**

* Mỗi phân tử Cr₇Ni hoạt động như một qubit lượng tử, nhờ vào trạng thái spin
* Thông tin lượng tử được mã hóa vào hai trạng thái spin cơ bản của phân tử, tương ứng với trạng thái logic |0⟩ và |1⟩.
* Nhờ spin là đại lượng lượng tử, các phân tử này có thể tồn tại trong trạng thái chồng chập, một đặc trưng cốt lõi của tính toán lượng tử.

**Liên kết vật lý giữa các qubit được xây dựng từ các nanomagnet trung gian**

Các qubit (Cr₇Ni) được liên kết với nhau bằng ion Co²⁺, vốn cũng có spin , và đóng vai trò là "công tắc chuyển trạng thái" (switch) giữa các qubit.

Bằng cách điều khiển trạng thái của liên kết Co²⁺ (từ |−½⟩ sang |+½⟩), có thể:

* kết nối hoặc ngắt kết nối hai qubit kề nhau;
* và thực hiện cổng hai qubit như Controlled-phase (Cφ) một cách có điều kiện.

**Có thể điều khiển Cr₇Ni bằng cộng hưởng từ**

* Các thao tác lượng tử như quay một qubit hay thực hiện cổng Cφ được thực hiện thông qua xung từ cộng hưởng đúng tần số chuyển tiếp spin.
* Mỗi qubit có tần số cộng hưởng riêng biệt, nhờ dị hướng từ, giúp điều khiển riêng lẻ từng qubit mà không ảnh hưởng qubit khác.

CHƯƠNG 3: TỔNG QUAN NGUYÊN TỬ TRUNG HÒA VỚI MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ

## 3.1. Tổng quan nguyên tử trung hòa

Nguyên tử trung hòa (neutral atoms) là các nguyên tử không mang điện tích tổng thể, nghĩa là số proton (điện tích dương) trong hạt nhân bằng số electron (điện tích âm) xung quanh. Trong bối cảnh tính toán lượng tử, các nguyên tử trung hòa thường được sử dụng là các nguyên tố kiềm như cesium (Cs) hoặc rubidium (Rb), do chúng có cấu trúc điện tử đơn giản với một electron hóa trị ở lớp ngoài cùng. Các đặc tính vật lý của nguyên tử trung hòa, như khả năng phân cực trong trường điện từ và tương tác yếu ở trạng thái cơ bản, khiến chúng trở thành ứng cử viên lý tưởng để làm qubit – đơn vị cơ bản của thông tin lượng tử – trong máy tính lượng tử.

* **Trạng thái qubit**: Nguyên tử trung hòa sử dụng các trạng thái siêu tinh (hyperfine states), tức là các mức năng lượng khác nhau trong trạng thái cơ bản, gây ra bởi tương tác giữa moment từ của electron và hạt nhân. Hai trạng thái này (thường ký hiệu là |0⟩ và |1⟩) được chọn làm cơ sở qubit.
* **Tính chất vật lý**: Ở trạng thái cơ bản, các nguyên tử trung hòa tương tác rất yếu với nhau, cho phép xếp chúng gần nhau (khoảng cách 2-5 µm) mà không làm xáo trộn trạng thái lượng tử. Khi được kích thích vào **trạng thái Rydberg** (electron ở mức năng lượng cao, cách xa hạt nhân), chúng có tương tác lưỡng cực mạnh, tạo điều kiện cho rối lượng tử.
* **Phương pháp thao tác**: Nguyên tử trung hòa được bẫy bằng **bẫy ánh sáng** (nhíp quang học hoặc mạng lưới quang học), làm lạnh đến nhiệt độ microkelvin bằng laser, và điều khiển bằng xung laser hoặc vi sóng để thực hiện các cổng logic lượng tử.

## 3.2. Ứng dụng nguyên tử trung hòa đến máy tính lượng tử

Nguyên tử trung hòa (neutral atoms), như cesium hoặc rubidium, đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển máy tính lượng tử nhờ các đặc tính vật lý độc đáo, cho phép lưu trữ, xử lý thông tin lượng tử và mở rộng quy mô hệ thống. Dưới đây là các tác động cụ thể của nguyên tử trung hòa đến máy tính lượng tử, dựa trên các cơ chế vật lý và công nghệ liên quan:

**Lưu trữ thông tin lượng tử với độ ổn định cao**:

* Nguyên tử trung hòa sử dụng các **trạng thái siêu tinh (hyperfine states)** trong trạng thái cơ bản làm cơ sở qubit (|0⟩ và |1⟩). Những trạng thái này có **thời gian kết hợp (coherence time)** dài, lên đến hơn 7 giây, nhờ khả năng cách ly tốt với môi trường bên ngoài. Điều này cho phép thực hiện hàng ngàn cổng logic lượng tử trong một lần tính toán mà không mất thông tin.
* Các trạng thái siêu tinh có năng lượng thấp và tương tác yếu với nhau ở trạng thái cơ bản, giảm thiểu mất kết hợp (decoherence) do nhiễu môi trường, như dao động nhiệt hoặc trường điện từ ngẫu nhiên.

**Tạo và điều khiển mảng qubit với khả năng mở rộng quy mô:**

**A diagram of a grid with green and red dots

Description automatically generated**

* Nguyên tử trung hòa được bẫy trong mảng 1D, 2D hoặc 3D bằng các bẫy ánh sáng, như nhíp quang học hoặc mạng lưới quang học, với khoảng cách giữa các điểm chỉ 2-5 µm. Một không gian nhỏ (0,5 mm) có thể chứa hàng nghìn đến hàng triệu qubit, đáp ứng yêu cầu sửa lỗi lượng tử (mỗi qubit logic cần đến 100 qubit vật lý).
* Tác động vật lý: Dịch chuyển AC Stark, xảy ra khi nguyên tử phân cực trong trường điện của laser, tạo ra thế năng bẫy để giữ nguyên tử tại vị trí chính xác. Laser đỏ nhạt thu hút nguyên tử vào vùng cường độ cao, cho phép tạo mảng có cấu hình tùy chỉnh. Kỹ thuật làm lạnh laser đưa nguyên tử xuống nhiệt độ microkelvin, giảm chuyển động nhiệt để đảm bảo độ chính xác khi thao tác qubit.

**Thực hiện cổng logic một qubit với độ chính xác cao:**

* Các cổng một qubit được thực hiện bằng cách điều khiển chuyển tiếp giữa các mức siêu tinh sử dụng xung laser hoặc vi sóng. Kỹ thuật nhắm mục tiêu bằng chùm laser giao nhau cho phép thao tác từng nguyên tử mà không gây nhiễu chéo với các nguyên tử lân cận.
* Tác động vật lý: Chùm laser giao nhau gây dịch chuyển tần số cộng hưởng của nguyên tử mục tiêu thông qua hiệu ứng AC Stark, tách biệt nó khỏi các nguyên tử khác. Xung vi sóng toàn cục kết hợp với dịch chuyển này tạo ra các dịch chuyển pha hoặc lật trạng thái qubit, cho phép thực hiện cổng một qubit nhanh (micro giây) với độ trung thực cao.

**Tạo rối lượng tử thông qua cổng hai qubit:**

* Chặn Rydberg (Rydberg blockade) là cơ chế cốt lõi để tạo rối lượng tử giữa các qubit, cần thiết cho cổng hai qubit như cổng điều khiển NOT (CNOT). Khi một nguyên tử được kích thích vào trạng thái Rydberg (electron ở mức năng lượng cao), nó gây ra dịch chuyển tần số cộng hưởng lớn (lên đến vài GHz) cho nguyên tử lân cận cách vài micron, ngăn nguyên tử thứ hai được kích thích đồng thời. Chuỗi ba xung laser tạo ra cổng điều khiển pha (C\_z) với độ trung thực khoảng 75% (2017), có tiềm năng đạt 99,99% khi tối ưu hóa xung.
* Tác động vật lý: Ở trạng thái Rydberg, các nguyên tử có **tương tác lưỡng cực mạnh**, tỷ lệ với khoảng cách nghịch đảo lập phương, cho phép tác động tầm xa mà không cần di chuyển nguyên tử. Cơ chế này tận dụng **tương tác Van der Waals** giữa các hàm sóng điện tử lớn của trạng thái Rydberg, tạo ra sự phụ thuộc trạng thái cần thiết cho rối lượng tử.

**Hỗ trợ sửa lỗi lượng tử và đo lường chọn lọc:**

* Nguyên tử trung hòa cho phép phát triển các phương pháp sửa lỗi lượng tử bằng cách đo lường trạng thái của một số qubit mà không làm xáo trộn các qubit lân cận. Các kỹ thuật như sử dụng hai loài nguyên tử (một cho lưu trữ, một cho đo lường) hoặc che chắn quang học đang được nghiên cứu.
* Tác động vật lý: **Phát xạ huỳnh quang** từ nguyên tử khi chiếu sáng bằng laser cộng hưởng cho phép đo lường trạng thái qubit với độ chính xác cao. Che chắn quang học hoặc sự khác biệt tần số giữa các loài nguyên tử giảm thiểu nhiễu chéo trong quá trình đo lường.

**Tác động đến hiệu suất và thách thức kỹ thuật:**

**Tích cực:** Nguyên tử trung hòa giống hệt nhau, dễ chuẩn bị bằng bơm quang học, và có thể được sắp xếp lại để lấp đầy mảng trống, tăng hiệu quả sử dụng. Tính linh hoạt của bẫy ánh sáng cho phép điều chỉnh cấu hình mảng theo nhu cầu thuật toán.

**Hạn chế:** Nguyên tử dễ bị va chạm với khí nền trong chân không nhiệt độ phòng, gây mất qubit mỗi 100 giây. Trạng thái Rydberg nhạy với trường điện nền, dẫn đến mất kết hợp. Suy giảm bức xạ của trạng thái Rydberg giới hạn thời gian cổng, đòi hỏi cân bằng giữa tốc độ và độ trung thực.

Va chạm khí nền gây chuyển động ngẫu nhiên, đẩy nguyên tử ra khỏi bẫy. Trường điện nền làm dịch chuyển năng lượng Rydberg, gây lệch pha không mong muốn. Suy giảm bức xạ là hệ quả của chuyển tiếp tự nhiên từ trạng thái Rydberg về trạng thái thấp hơn, tạo nhiễu trong cổng hai qubit.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

* 1. Weiss, D. S., & Saffman, M. (2017). Quantum computing with neutral atoms. *Physics Today*, 70(7), 44-50.
  2. "Magnetic qubits as hardware for quantum computers" (J. Tejada et al., Nanotechnology 12, 181–186, 2001)
  3. Cirillo, Giovanni Amedeo, Giovanna Turvani, and Mariagrazia Graziano. "A quantum computation model for molecular nanomagnets." IEEE Transactions on Nanotechnology 18 (2019): 1027-1039.
  4. Ghirri, Alberto, Filippo Troiani, and Marco Affronte. "Quantum computation with molecular nanomagnets: Achievements, challenges, and new trends." Molecular Nanomagnets and Related Phenomena (2015): 383-430.
  5. Jenkins, M. D., et al. "A scalable architecture for quantum computation with molecular nanomagnets." Dalton Transactions 45.42 (2016): 16682-16693.
  6. Bhat, Hilal Ahmad, et al. "Quantum computing: fundamentals, implementations and applications." IEEE Open Journal of Nanotechnology 3 (2022): 61-77.