

바륨이온을 이용한 다중(25층 수준) 중첩상태 qudit을 실현했다는 실험논문 소개

Pei Jiang Low 외(싱가폴대학) 2025년,

“Quantum logic operations and algorithms in a single 25-level atomic qudit”

(arXiv)

(최종덕, philonatu.com)

1. 논문에 대해

이 연구에서는 137Ba^+ 이온 하나의 내부 에너지 준위 25개를 하나의 qudit으로 사용하여 최대 24개 상태의 중첩을 구현하고, 양자 논리게이트와 알고리즘을 실험적으로 수행.

137Ba^+ (바륨 이온) 하나를 사용했는데

하나의 이온 안에서 25개의 내부 에너지 준위를 하나의 qudit으로 적용한 실험이다.

최대 24개 상태의 동시 중첩(superposition) 을 실험적으로 생성하는 데 성공하고

qudit 차원(d)이 커질수록 결맞음(coherence)이 어떻게 감소하는지 측정했다.

하나의 이온만으로 Bernstein-Vazirani 알고리즘과 Toffoli gate 구현했다.

---> 초급 수준이지만 기존 qubit 기반 양자컴이 아니라 qudit 기반 다준위 양자컴퓨팅의 가능성을 입증했다는 데 의미가 크다.

<관련 기존논문>

(1) 2022, Realizing quantum gates with optically-addressable 171Yb^+ ion qudits

Yb^+ 이온으로 4준위(ququart) 구현, qudit gate 실험 성공

(2) 2024, Towards multiqudit quantum processor based on 171Yb^+ ion string

8개의 Yb^+ 이온, 각각 4준위 qudit, Grover 알고리즘, Bernstein-Vazirani 분자 시뮬레이션 수행

그러면 우선 이 논문을 설명하기 전에 큐딧이 기존 큐비트와 어떻게 다른지를 설명한다.

2. 큐비트와 큐딧의 차이 qubit / qudit

qubit은 $|0\rangle$, $|1\rangle$ 의 두 기저상태를 사용하는 2차원 힐베르트 공간이다.

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

한편 qudit은 d 개의 기저상태를 사용하는 d 차원 힐베르트 공간이다.

$$|\psi\rangle = \sum_{i=0}^{d-1} a_i|i\rangle$$

$$|\psi\rangle = a_1|1\rangle + a_2|2\rangle + \dots + a_{25}|25\rangle$$

-- 25개의 상태가 동시에 존재.

- 바륨 이온의 경우 내부 에너지 준위 25개를 선택하여 하나의 qudit을 구성하였다. - 레이저를 이용하여 여러 상태의 중첩을 만들고 제어한다.
- 차원이 커질수록 유지해야 하는 상대위상이 많아져 coherence 유지가 어려워진다.

qubit의 $|0\rangle$, $|1\rangle$ 는 2차원 공간의 두 기저벡터

한편 이 실험에 적용된 기저벡터는 25개다. 즉 에너지 준위의 25층을 사용했다는 뜻이다. 이를 25차원 큐딧이라고 부른다.

왜 큐딧인가?

큐비트라면 25개의 상태를 표현하려면 $2^5=32$ 이므로 최소 5개의 큐비트가 필요하다.

반면 qudit은 이온 하나에서 25개의 상태를 구현할 수 있다.

즉 많은 정보를 하나의 물리 시스템 안에 넣을 수 있다.

쉽게 말해서 현재 IBM이나 Google의 초전도 양자컴퓨터는 수백 개, 수천 개의 큐비트 등(한국 광주카이스트; 10개 미만 수준) 큐비트의 개수를 늘리는 방향으로 발전하고 있다.

반면 이 논문은 한 개의 입자 안에 가능한 한 많은 내부 자유도를 사용한다는 전혀 다른 접근방식이다. 즉 입자의 수를 늘리는 대신, 하나의 입자 안에서 계산 공간을 최대한

확장한다는 방법론이다.

3. 에너지 준위에 따른 고유상태는 다 다르지만 양자정보의 관점에서는 모두 동등한 지위를 갖는다

이 실험에서는 25개의 서로 다른 에너지 준위를 양자정보의 기저상태로 사용하였다. 이들은 물리적으로는 서로 다른 에너지 고유상태이며 에너지 간격도 일정하지 않다.

그러나 양자정보의 수학적 표현에서는 이들 모두가 25차원 힐베르트 공간을 이루는 정규 직교 기저벡터로서 동등한 지위를 가진다. 여기서 '동등'이란 에너지가 같다는 뜻이 아니라, 양자상태를 표현하는 기저벡터로서 동일한 수학적 역할을 한다는 의미이다.

좀더 쉬운 말로 표현하면 아래와 같다.

25차원 qudit에서는 $|0\rangle$ 부터 $|24\rangle$ 까지의 25개 기저상태는 물리적으로는 서로 다른 에너지 고유상태이지만, 양자정보의 수학적 표현에서는 25차원 힐베르트 공간을 이루는 동등한 기저벡터로 취급된다.

즉 전자 에너지 준위의 도약에너지의 차이가 있듯이 $|0\rangle$ 에서 $|1\rangle$, $|2\rangle$ 를 거쳐 $|24\rangle$ 에 이르는 각각의 에너지 준위에 따른 고유상태는 다 다르지만 양자정보의 관점에서는 모두 동등한 지위를 갖는다는 뜻이다.

25개 각각의 에너지준위 각 상태 사이의 에너지 간격이 균등하지 않다. Hyperfine splitting과 Zeeman splitting 때문에 간격이 서로 다르며, 오히려 이러한 차이 덕분에 특정 전이를 레이저로 선택적으로 제어할 수 있다. 모든 간격이 같다면 원하는 전이만 선택하기가 훨씬 어려워질 것이다.

4. 왜 coherence가 어려운가?

qudit 차원(d)이 커질수록 결맞음(coherence) 감소가 많아질 수 있다.

여기서 차원이란 사용할 수 있는 독립적인 양자 기저상태의 개수다. 예를 들어 d=2는 qubit, d=3은 qutrit라고 표현한다면 이 실험에서는 d=25, 즉 25개의 기저상태를 사용하는 qudit이다.

그런데 문제가 있다. 차원이 커질수록 동시에 유지해야 하는 진폭과 상대위상이 많아지므로 coherence를 유지하기가 점점 어려워진다는 점이다.

상태가 많아질수록 모든 위상을 유지해야 한다. 예를 들어 25개의 상태라면 25개의 진폭뿐 아니라 상대위상(relative phase) 24개 이상을 모두 유지해야 한다. 조금이라도 레이저가

흔들리거나 자기장이 변하면

$|1\rangle + |2\rangle + |3\rangle$ 로 되지 않고

$|1\rangle + 0.95|2\rangle + 0.7|3\rangle$ 처럼 바뀐다.

결국 차원이 높아질수록 결맞음coherence 유지가 매우 어렵다는 뜻이다.

이 논문은 이것을 실제로 측정했다는 데 의미가 있다.

이 논문에서는 fidelity와 coherence, 두 개념의 차이를 말한다.

Coherence결맞음은 양자상태의 중첩과 상대위상이 얼마나 유지되는지를 나타내는 물리적 성질이다.

Fidelity충실도는 실제 만들어진 상태가 목표 상태와 얼마나 일치하는지를 나타내는 비교 척도다.

Coherence는 상태 자체의 성질이고, Fidelity는 두 상태 사이의 유사도를 나타내는 성능 지표인데, Coherence가 낮아지면 Fidelity도 감소하는 경향이 있지만 두 개념은 동일하지 않다.

5. 나의 해석 - 이분법에서 다층수준론으로

전통적인 큐비트는 "0 또는 1의 중첩"이라는 이분법적 구조를 기반으로 한다.

반면 qudit은 하나의 물리적 존재 안에 다수의 가능한 상태가 동시에 공존하는 고차원 상태공간을 사용한다.

큐빗qubit 기반 양자컴퓨터도 당장 될 일이 아닌데, 큐딧qudit 기반 양자컴의 구현은 먼 일 같다. 그러나 이론적으로는 상당한 변혁을 예고한다.

계산 능력의 향상뿐 아니라, 존재가 본질적으로 다중 가능성을 품고 있다는 관점을 물리적으로 구현하는 사례라고 나는 철학적으로 평가한다.

특히

큐빗qubit 컴퓨팅은 기존 이분법의 확장이지만,

큐딧qudit 컴퓨팅은 이분법 논리를 완전히 벗어난 장르라는 점에서

나에게 의미가 크다.