

브레이딩되는 입자, 안정적인 범용 양자컴퓨터 가능할까

(2026.08.25., 양자정보연구지원센터)

□ 브레이딩(Braiding)되는 특이한 입자들이 신뢰성 높은 범용 양자컴퓨터를 구현할 수 있음

○ 비가환 애니온을 활용한 범용 양자컴퓨팅 구현 가능성 제시

- 시카고대학교, 하버드대학교, 스톤브룩대학교, Quantinuum 공동 연구진이 비가환(non-Abelian) 애니온을 이용해 범용 양자계산에 필요한 완전한 연산 집합(universal gate set)을 구현하고 실험적으로 검증
- 비가환 애니온은 다수의 일반 큐비트를 얹힌 상태로 연결해 새로운 형태의 입자로 동작하도록 만든 것으로, 애니온을 서로 이동시키는 브레이딩(braiding)을 통해 양자 정보를 조작
- 연구진은 Quantinuum의 H2 이온트랩 양자 프로세서에서 54개 큐비트를 이용해 S3 대칭에 기반한 비가환 애니온을 구현
- 기존 D4 기반 애니온은 브레이딩만으로 범용 양자계산을 수행하기에 충분하지 않았으나, 이번 연구에서는 브레이딩과 융합(fusion)을 결합하여 범용 연산이 가능함을 입증

○ 브레이딩과 융합을 이용한 범용 양자 연산 구현

- 연구진은 일반적인 큐비트보다 3개의 양자 상태를 표현할 수 있는 위상학적 큐트릿(topological qutrit)을 구성
- 애니온의 브레이딩을 통해 하나의 얹힘 게이트를 구현하고, 융합을 통해 서로 다른 두 종류의 측정을 수행
- 이 세 가지 연산을 조합하면 원리적으로 모든 양자 연산을 수행할 수 있는 범용 게이트 집합을 구성할 수 있음을 입증
- 이는 브레이딩만으로는 구현할 수 없었던 연산까지 수행할 수 있음을 보여준 것으로, 비가환 애니온 기반 양자컴퓨팅의 범용성을

최초로 실험적으로 입증한 결과

○ 양자 오류정정 및 매직 상태 증류의 한계 극복 가능성

- 현재 양자컴퓨터는 오류를 억제하기 위해 정보를 여러 물리적 큐비트에 분산 저장하는 양자 오류정정 코드를 사용하지만, 오류정정 코드만으로는 보호된 데이터에 필요한 모든 범용 연산을 수행하기 어려움
- 이에 일반적으로 매직 상태(magic state)를 별도로 준비하고, 많은 자원을 사용하는 증류(distillation) 과정을 거쳐야 하므로 상당한 수의 큐비트가 소모됨
- 연구진은 비가환 애니온의 위상학적 연산을 이용해 매직 상태를 직접 준비할 수 있음을 확인하여, 기존의 고비용 증류 과정을 우회할 가능성을 제시
- 따라서 비가환 오류정정 코드는 매직 상태 증류나 배양(cultivation)에 의존하지 않고도 결함 허용(fault-tolerant) 양자계산을 구현할 수 있는 새로운 접근법으로 주목

○ 향후 대규모 결함 허용 양자컴퓨터로의 발전 가능성

- 이번 연구에서는 실제로 능동적인 오류정정을 수행한 것은 아니며, 개별 연산 구성 요소의 동작과 이론적으로 예측된 매직 상태의 구현을 검증하는 개념증명 단계에 해당
- 향후 비가환 애니온 기반 연산과 실제 오류정정 기술을 결합하고, 비가환 양자 메모리를 안정적으로 구현하는 것이 주요 과제
- 연구진은 이러한 기술이 발전할 경우 비가환 애니온이 대규모 · 결함 허용 · 범용 양자컴퓨터를 구현하기 위한 새로운 기반 기술이 될 수 있을 것으로 기대

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/07/17/braided-exotic-particles-could-build-reliable-universal-quantum-computers/>