

연구진, Majorana 큐비트에 저장된 정보 판독

(2026.03.04., 양자정보연구지원센터)

□ Majorana 큐비트에 저장된 정보 판독

○ 연구 개요 및 의의

- 스페인과 네덜란드 연구진, 마요라나 기반 위상 큐비트 (Majorana-based topological qubit)에 저장된 정보를 읽어내는 새로운 방법을 실험적으로 입증함
- 해당 연구는 결함 허용(fault-tolerant) 양자컴퓨팅 실현을 위한 핵심 단계로 평가됨(*Nature* 게재)

○ 스페인 재료과학연구소(ICMM-CSIC)의 라몬 아구아도(Ramón Aguado) 연구원은 이번 성과가 “중대한 진전” 이라고 평가

- ‘양자 정전용량(quantum capacitance)’ 이라는 새로운 측정 기법을 통해 마요라나 큐비트에 저장된 정보에 접근하는 데 성공
- 이 기법은 시스템의 국소적 특성이 아니라 전체 상태에 민감하게 반응하는 ‘전역(global) 탐침’ 역할을 수행

○ 위상 큐비트 원리와 기존 한계

- 위상 큐비트는 정보를 단일 물리적 위치에 저장하지 않고, 마요라나 제로 모드(Majorana zero modes)라 불리는 두 개의 양자 상태에 비국소적으로 분산 저장
- 정보가 공간적으로 분산되어 있기 때문에 국소적 잡음이나 외부 교란에 강함
- 저장된 정보를 파괴하려면 시스템 전반에 걸친 동시적 오류가 필요하므로 이론적으로 높은 안정성을 가짐
- 그러나 이러한 ‘비국소성(non-locality)’ 은 측정 단계에서 오히려 기술적 난제로 작용
- 정보가 특정 지점에 국한되지 않기 때문에, 기존의 국소 전하 측

정 방식으로는 큐비트 상태를 읽기 어려움

- 무리하게 측정할 경우, 위상적 보호(topological protection) 특성이 손상될 우려 존재

○ 최소 키타예프 체인 기반 나노구조 구현

- 연구진은 문제 해결을 위해 ‘최소 키타예프 체인(minimal Kitaev chain)’ 이라 불리는 모듈형 나노구조를 제작
- 이 장치는 두 개의 반도체 양자점(quantum dots)을 초전도 연결부로 결합한 구조로 구성
- 이를 통해 마요라나 모드를 **상향식(bottom-up)** 방식으로 인위적으로 생성 및 제어 가능
- 기존의 복잡한 이종 물질 조합 기반 실험과 달리, 본 구조는 단순화된 플랫폼 제공
- 핵심 양자 상태를 의도적으로 형성하고 조정할 수 있어 실험적 가변성(tunability) 향상
- 위상 큐비트 연구의 재현성과 확장 가능성 측면에서 의미 있는 진전

○ 양자 정전용량 기반 정보 판독 기술

- 연구팀은 양자 정전용량 탐침을 활용하여 시스템 전체의 집단적 상태를 측정
- 국소 전하가 아닌, 계 전체의 양자 상태 변화에 반응하는 측정 방식 적용
- 단일 실시간(real-time) 측정을 통해 마요라나 결합 상태의 짝수(even) 또는 홀수(odd) 패리티(parity) 판별 성공
- 패리티 구분은 위상 큐비트의 논리적 0과 1에 해당하는 핵심 정보
- 짝수·홀수 패리티는 큐비트가 점유(occupied) 상태인지 비점유(unoccupied) 상태인지와 대응
- 전역 탐침은 정보를 읽어내면서도 시스템의 위상적 보호 특성을 유지

- 연구진은 이번 실험이 위상적 보호 원리를 직접적으로 검증했다고 평가
- 기존 국소 전하 측정은 인코딩된 정보를 감지하지 못함을 확인
- 반면 전역적 측정 방식은 보호 특성을 훼손하지 않으면서 정보 판독 가능성을 입증
- 패리티 점프 및 결맞음 시간 측정 성과
 - 실험 과정에서 무작위 패리티 점프(random parity jumps)를 관찰
 - 이를 통해 패리티 결맞음 시간(parity coherence time)이 1밀리초(ms)를 초과함을 측정
 - 이는 향후 위상 마요라나 큐비트 연산에 유망한 수치로 평가됨
 - 밀리초 단위의 결맞음 시간은 양자 오류 정정 및 논리 게이트 구현 측면에서 중요한 기술적 지표
 - 장시간 안정적으로 정보를 유지할 수 있음을 시사
 - 위상 기반 양자컴퓨팅의 실용화 가능성 제고
- 본 연구는 네덜란드 델프트 공과대학교(Delft University of Technology)에서 주도적으로 개발된 새로운 실험 방법론과, 스페인 ICMM-CSIC의 이론적 기여가 결합된 성과
 - 고도화된 실험 결과 해석에 이론적 분석이 핵심적 역할 수행
 - 유럽 연구기관 간 협력 모델의 대표적 사례
- 종합적으로, 이번 연구는 마요라나 기반 위상 큐비트의 정보 판독 문제를 해결할 수 있는 실험적 경로를 제시
 - 위상적 보호 원리를 유지하면서도 정보 접근이 가능성을 실증
 - 향후 결합 허용 양자컴퓨팅 구현을 위한 핵심 기술적 토대 마련이라는 점에서 학술적·기술적 의의가 큼

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/02/12/researchers-read-information-stored-in-majorana-qubits/>