구글 양자 프로세서로 고전적 한계 넘어선 새로운 물질 상 규명

(2025.10.02., 양자정보연구지원센터)

□ 구글 양자 프로세서를 이용해 고전적 한계를 넘어서는 이색적인 물질 상(phase) 탐구

○ 연구개요

- 국제 공동연구팀이 “구글 초전도 양자 프로세서(Sycamore-class)”를 이용해 새로운 비평형(non-equilibrium) 물질 상(phase) 창출하고 관찰
- Floquet topological order라는 이색적 위상 질서를 실험적으로 구현(*Nature* 게재)
- 이는 고전적 시뮬레이션으로는 다룰 수 없는 강결맞음(entanglement) 상태를 양자 프로세서로 탐구 가능함을 보여줌

○ 연구 배경 및 의의

- 일반적인 물질 상(고체, 자성체 등)은 “평형 상태(equilibrium)”에서 안정
- Floquet topological order는 주기적으로 외부 구동(force)을 가한 비평형 조건에서만 존재 가능
- 이번 실험은 비평형 양자 위상 질서를 최초로 대규모(최대 58큐비트)에서 관측 → 기존 고전적 시뮬레이션의 한계 넘어선 영역
- 양자 프로세서가 단순한 시뮬레이터를 넘어 새로운 물리학 발견 플랫폼으로 기능할 수 있음을 입증

○ 주요 성과

- Floquet Kitaev 모형을 초전도 큐비트 격자에 구현
- (핵심 특징) Chiral edge modes: 경계면을 따라 정보가 보호된 채 전파되는 특수 채널 관측

- Anyons: 시스템 진화에 따라 상호 전환되는 준입자적 여기 상태 확인
- 간섭(interferometric) 프로토콜로 직접 측정 불가능한 위상 불변량(topological invariant) 도출 → “시간 결정(time-crystal)-유사” 거동 확인
- (보정 기법) Randomized compiling, dynamical decoupling, post-selection 등 최신 에러 억제 기법 적용, 결과적으로 58큐비트 수준에서 안정적 패턴 관찰 가능

ㅇ 방법론

- 구글 양자 프로세서의 2D 초전도 큐비트 격자 활용
- 큐비트 상호작용은 에너지 준위 교환 기반 게이트로 구현
- 추가 큐비트를 “위상 탐침(probe qubit)”으로 활용해 anyon 교환 시 위상 정보를 검출
- 보조 큐비트 결합을 통해 에지 모드의 에너지 스펙트럼을 추적

ㅇ 한계 및 도전과제

- (실험적 제약) 게이트 오류·결잃음 → 긴 시간 스케일에서 신호 감쇠 발생, 관측된 위상 질서는 제한된 시간 구간에서만 안정
- (규모적 한계) 58큐비트는 고전적 시뮬레이션을 넘어서는 수준이지만, 실용적 오류보정 컴퓨팅에 필요한 규모에는 아직 미치지 못함
- (토폴로지 기반 양자컴퓨터와의 차이) 이번 관찰은 이론적 기반을 제공하나, 아직 오류에 강한 토폴로지 큐비트 저장 장치는 아님
- 짧은 시간 동안 나타나는 동역학적 위상 질서일 뿐, 장기적 정보 저장 불가

ㅇ 향후 전망

- 이번 성과는 양자 하드웨어가 비평형 위상 물질 탐구에 실제적

역할을 할 수 있음을 보여줌

- **양자 오류보정(QEC)** 연구에 시사점 제공 – 토폴로지 질서와 anyon 개념은 이미 오류보정 연구의 핵심 아이디어
- **다른 플랫폼 확장 가능성**: 중성 원자, 이온 트랩 등에서도 유사 프로토콜 적용 가능
- **이론적 과제**: 비평형 시스템에 맞는 새로운 질서 매개변수(order parameter) 정의 필요 → 향후 "비평형 위상 물질의 위상도(phase diagram)" 구축 가능성

ㅇ 결론

- 이번 연구는 비평형 조건에서만 존재하는 위상 질서를 양자 프로세서로 직접 구현한 사례
- 고전적 계산의 한계를 넘어서는 영역에서 양자 장치의 발견 잠재력을 제시
- 아직 응용 단계는 아니나, 향후 토폴로지 기반 양자 컴퓨팅과 비평형 물리학 탐구에 중요한 교두보 역할을 할 전망

(원문)

1. https://thequantuminsider.com/2025/09/11/scientists-use-googles-quantum-processor-to-probe-exotic-phases-of-matter-beyond-classical-reach/