

Time crystals, 미래 양자컴퓨터 동력원 가능성 제시

(2025.10.29., 양자정보연구지원센터)

□ Time crystals과 기계 공진기 결합, 양자 컴퓨터 메모리와 센서 가능성

○ 연구 배경과 필요성

- 시간 결정(Time Crystal, TC)은 외부 에너지 없이도 일정한 주기를 유지하는 양자 물질로, 장기적 양자 정보 보존 가능성을 제시
- 기존 시간 결정은 대부분 외부와 격리된 상태였으나, 본 연구는 TC를 기계적 공진기와 결합하여 외부와 상호작용 가능성을 입증
- 연구 목표: TC의 자발적 리듬과 양자 제어 기술(optomechanics)을 결합 → 안정적 양자 메모리 및 초정밀 센서 개발 가능성 탐색

○ 실험 구조와 구현

- 연속형 시간 결정(Continuous Time Crystal, CTC): 초저온(밀리켈빈 수준) 헬륨-3 초유체 내에서 형성
- 마그논(Magnon, 자기 준입자)을 단일 양자 상태로 응축 → 집단적 선회(precession) → 시간 결정 형성
- TC를 액체 표면의 중력파(미세 파동)와 결합 → 기계적 공진기 역할 수행
- 결과: TC의 진동수 변동이 기계적 운동에 의해 조절됨 → 광학적 캐비티(optomechanics)와 유사한 주파수 측정 패턴 관찰

○ 핵심 기술과 관찰 결과

- 주파수 변조(Frequency modulation): 표면 기울기에 따라 TC 주파수가 비선형(quadratic)으로 변화 → 진정한 optomechanical 거동 확인
- 선형/비선형 결합 조절 가능: 장치 정렬을 미세 조정, 원하는 coupling 구현
- 공진수 측정: 표면 운동 공진수 12.5 Hz, 초유체 준입자 수 증가 시 공진 폭 증가 → TC가 양자 센서 역할 수행.
- TC의 장기적 안정성: 기존 양자 시스템 대비 수십~수백 배 길게 지속 → 양자 메모리와 초정밀 주파수 기준 가능성

- 의의와 잠재적 응용
 - TC와 기계 공진기 결합 → “Time Crystal Optomechanics” 제안
 - 응용 가능 분야: 양자 메모리: 장시간 정보 저장
주파수 참조 및 센서: 초정밀 주파수 검출, 미세 운동/장 검출
양자 제어 및 얽힘 실현: 미래 나노기계 공진기와 결합 시 가능
 - 장치 경량화 및 고주파 나노 공진기 도입 → 강한 양자 결합 (quantum strong coupling) 가능
 - 메커니컬 다이내믹 카시미어 효과, Majorana 페르미온 검출, 암흑물질 탐지 가능
- 실험적 성과와 한계
 - TC-공진기 결합 증명: 이전 격리된 TC 실험의 한계 극복
 - 현재 coupling 강도 약함 → 단일 양자 단위(ripplon) 의한 주파수 변화 감지 어려움
 - TC가 표면 운동에 미치는 영향(backreaction) 거의 없음 → 양방향 제어 구현 필요
 - 그러나 초저온 환경에서 극도로 민감한 측정 가능 → 작은 에너지 손실도 TC를 통해 관측
- 향후 연구 방향 및 결론
 - 나노 기계 공진기 도입 → 강한 결합 구현, 주파수·품질 인자 개선
 - 실온 재료(YIG 필름) 활용 → 마그논 기반 TC 구현 가능성
 - TC의 장기적 코히어런스 활용 → 양자 컴퓨터 메모리, 초정밀 주파수 기준, 센서 기술 발전
 - 본 연구는 연속형 시간 결정과 기계 공진기 결합을 최초로 입증, TC의 자발적 주기와 외부 제어 기술 결합 가능성을 보여줌
 - TC 기반 양자 센서, 주파수 기준, 양자 메모리 개발의 새로운 길 열림
 - 향후 나노 공진기와 실온 재료 적용을 통해 강한 양자 결합과 실제 응용 가능성이 확대될 전망

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/10/17/is-it-time-for-time-crystals-researchers-report-time-crystals-could-power-future-quantum-computers/>