

빛-물질 열평형화, 중성원자 양자컴퓨팅 발전에 기여

(2026.02.18. 양자정보연구지원센터)

- 빛-물질 열평형화에 대한 새로운 통찰, 중성원자 양자컴퓨팅 발전에 기여 가능
 - 광자(빛)와 원자가 장시간 상호작용하더라도 항상 빠르게 열평형(thermal equilibrium)에 도달하지는 않으며, 일정 기간 서로 다른 온도를 유지할 수 있음을 이론적으로 규명한 연구임
 - 해당 결과는 중성원자 기반 양자컴퓨터에서 빛과 원자 간 상호작용으로 인한 정보 손실 우려를 완화할 수 있는 가능성을 제시함
 - 연구는 Physical Review Letters에 게재되었으며, University at Buffalo 연구진이 주도함
 - 일반적으로 상호작용하는 입자들은 에너지를 교환하며 빠르게 동일 온도에 도달하는 열평형 상태에 이르는 것이 물리적 상식임
 - 특히 광자가 광학 공진기 내부에서 반복적으로 물질과 상호작용할 경우, 빠른 열평형화가 예상됨
 - 그러나 열평형은 양자 특성을 약화시키고, 양자컴퓨터에서 저장·처리되는 정보의 소실을 초래할 수 있음
 - 중성원자 양자컴퓨터와 열평형 문제
 - 중성원자 양자컴퓨터는 개별 원자(주로 리드베리 상태로 들뜬 알칼리 금속 원자)를 큐비트로 사용하며, 레이저 빛으로 포획·제어·읽힘을 구현함
 - 초전도 기반 큐비트와 달리 복잡한 배선 없이 광학적 제어가 가능하다는 장점이 있음
 - 그러나 향후 대규모 확장을 위해 다수의 리드베리 원자 배열을 광자로 연결할 경우, 빛이 장시간 머물며 원자와 반복 상호작용

하게 되어 열평형화로 인한 정보 붕괴 위험이 제기되어 왔음

○ 연구진은 광학 공진기(두 개의 거울 사이에 빛을 가두는 구조) 내부에 중성원자 배열을 배치한 이론 모델을 구성하여 양자 동역학을 시뮬레이션함

- 초기 에너지 교환 이후, 광자와 원자가 효율적으로 에너지를 공유하지 않는 ‘준열평형(prethermal)’ 상태에 진입할 수 있음을 확인함
- 이 상태에서는 광자와 원자가 서로 다른 온도를 유지하며, 경우에 따라 원자는 음의 온도, 광자는 양의 온도에 머무를 수 있음
- 시간이 지나 광자가 점차 공진기 밖으로 누출되면 결국 열평형에 도달하지만, 그 이전까지는 양자 정보 보존에 충분한 시간 창(window)이 형성됨

○ 기술적 · 응용적 의의

- 열평형 지연은 밀리초 단위라 하더라도 양자 연산 수행에는 의미 있는 시간 범위를 제공함
- 이는 빛을 활용해 대규모 중성원자 배열을 연결하더라도, 즉각적인 양자 정보 붕괴가 반드시 발생하지는 않음을 시사함
- 더 나아가, 원자가 방출한 빛을 배열 간 연결 매개체로 재활용할 수 있는 가능성도 제기됨
- 시스템을 한 번 설정하면 외부 개입 없이도 비평형 상태를 일정 시간 유지할 수 있다는 점에서 확장형 아키텍처 설계에 긍정적인 근거를 제공함

○ 한계 및 향후 과제

- 본 연구는 이론적 시뮬레이션에 기반하며, 실제 대규모 하드웨어 환경에서의 검증은 추가 연구가 필요함
- 공진기 손실, 환경 노이즈, 다체 상호작용 복잡성 등 현실적 요소를 반영한 후속 연구가 요구됨

- 준열평형 상태의 지속 시간과 제어 가능성을 정량적으로 확장하는 것이 핵심 과제임
- 본 연구는 빛-물질 상호작용에서 열평형이 필연적·즉각적으로 발생한다는 통념을 수정하며, 중성원자 양자컴퓨팅 확장성에 대한 이론적 기반을 강화함
- 특히 광자 기반 연결 구조에서도 일정 시간 양자 특성을 보존할 수 있음을 제시함으로써, 차세대 대규모 중성원자 양자컴퓨터 설계에 중요한 통찰을 제공함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/01/22/new-insight-into-light-matter-thermalization-could-advance-neutral-atom-quantum-computing/>