

중성원자 양자시스템, 10만 큐비트 확장 전략 제시

(2026.01.22., 양자정보연구지원센터)

□ 중성원자 양자 시스템의 10만 큐비트 시대 여는 확장 전략 제시

- 중성 원자 양자컴퓨터의 대규모 확장을 향한 연구 배경
 - 양자컴퓨터가 고전 컴퓨터를 능가하기 위해서는 큐비트 수의 비약적인 증가가 필수적이며, 현재 최첨단 양자컴퓨터는 약 1,000큐비트 수준에 머물러 있음
 - 컬럼비아대 물리학자 세바스찬 윌(Sebastian Will)과 난팡 위(Nanfang Yu) 연구팀은 10만 큐비트 이상을 구현할 수 있는 기반 기술을 목표로 설정함
 - 연구진은 Nature에 발표한 논문에서 **광학 트위저(optical tweezer) 기술과 메타표면(metasurface) 기술을 결합해 중성 원자 배열을 획기적으로 확장하는 방법을 제시함**
- 중성 원자 배열과 큐비트로서의 장점
 - 중성 원자 배열은 개별 원자를 규칙적으로 포획·제어하여 양자컴퓨터를 구성하는 유망한 플랫폼으로 빠르게 부상 중임
 - 본 연구에서 연구팀은 스트론튬 원자 1,000개를 성공적으로 포획했으며, 동일한 방식으로 10만 개 이상까지 확장 가능성을 입증
 - 원자는 중첩과 얽힘 등 양자컴퓨팅에 필요한 성질을 자연적으로 구현할 수 있고, 모든 원자가 본질적으로 동일해 대규모 동기화 및 보정 부담이 적다는 장점이 있음
 - 연구진은 “원자는 자연이 제공하는 완벽하게 동일한 큐비트이며, 문제는 이를 대규모로 제어하는 방법이였다” 고 설명함
- 기존 광학 트위저 기술의 한계와 최근 성과
 - 지난 10여 년간 단일 원자를 레이저로 가두는 광학 트위저 배열이 중성 원자 제어의 핵심 기술로 활용되어 옴

- 기존 방식은 공간 광변조기(SLM)나 음향광학 편향기(AOD)를 이용해 다수의 트위저를 생성하는데, 장비가 크고 복잡하며 확장성에 제약이 있음
- 최근 칼텍(Caltech) 연구진이 6,100개의 원자를 포획해 큐비트로 동작 가능성을 보였으나, 기술적 한계로 인해 그 이상 확장은 어려운 상황이었음

○ 메타표면 기반 광학 트위저의 핵심 개념

- 연구팀은 트위저 배열 생성을 위해 메타표면이라는 완전히 새로운 광학적 접근법을 도입함
- 메타표면은 수십~수억 개의 나노미터 크기 픽셀로 구성된 평면 광학 소자로, 하나의 레이저 빔을 통과시키면 픽셀 배열에 의해 빛의 위상이 정밀하게 조절됨
- 본 연구에 사용된 픽셀 크기는 200nm 미만으로, 트위저에 사용된 520nm 파장보다 훨씬 작아 단일 소자에서 직접 트위저 배열을 생성할 수 있음
- 이는 부가 장비가 필요한 기존 SLM·AOD 방식과 달리, 소형·저비용이면서도 배열 크기의 근본적 한계를 제거함

○ 메타표면 트위저의 기술적 장점

- 메타표면은 수만 개의 평면 렌즈가 한 평면에 중첩된 것과 같은 효과를 내며, 하나의 레이저로 동시에 수만 개의 초점(트위저)을 생성할 수 있음
- 실리콘 나이트라이드와 이산화티타늄으로 제작된 메타표면은 $2,000 \text{ W/mm}^2$ 이상의 초고출력 레이저도 견딜 수 있어 대규모 원자 포획에 적합함
- 반도체 클린룸 공정을 활용한 나노제조 기술과 결합되어, 더 크고 정밀한 소자의 제작이 가능하다는 점에서 장기적 확장성이 매우 큼

- 실험 결과 및 대규모 확장 가능성 입증
 - 연구팀은 메타표면 트위저 플랫폼의 유연성을 보이기 위해 다양한 2차원 원자 배열을 구현함
 - 1,024개 사이트의 정사각 격자, 수백 개 원자로 구성된 준결정(quasicrystal) 및 자유의 여신상 패턴, 원자 간격 $1.5\mu\text{m}$ 미만의 원형 배열 등을 성공적으로 시연함
 - 특히 직경 3.5mm, 1억 개 이상의 픽셀을 포함한 메타표면을 제작해 600×600 배열, 즉 총 36만 개의 광학 트위저를 생성함
 - 이는 기존 기술 대비 두 자릿수 이상 규모가 큰 성과로, 10만 큐비트 이상 양자 시스템으로 가는 현실적인 경로를 제시함
- 양자기술 전반으로의 파급 효과
 - 해당 기술은 양자컴퓨터뿐 아니라, 복잡한 양자 다체 현상을 연구하는 양자 시뮬레이터, 실험실 외부에서도 활용 가능한 초정밀 광학 원자시계 등 다양한 중성 원자 기반 양자기술로 확장 가능
 - 대규모·고균일 원자 배열 구현은 향후 양자정보과학 인프라의 핵심 요소로 작용할 것으로 기대됨
- 향후 과제와 전망
 - 연구진은 다음 단계로 더 많은 원자를 포획하는 실험을 계획 중이며, 이를 위해서는 더 고출력 레이저가 필요함
 - 다만 요구되는 레이저 출력은 기술적으로 충분히 달성 가능한 범위에 있어, 10만 큐비트급 중성 원자 양자컴퓨터 구현이 현실적인 목표로 제시됨
 - 본 연구는 대규모 양자컴퓨팅으로 나아가기 위한 핵심 병목을 해결한 중요한 이정표로 평가됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/01/16/physicists-outline-technique-to-scale-neutral-atom-quantum-systems-beyond-100000-qubits/>