

양자 연산에 안정성을 가져오는 새로운 기법

(2026.05.12., 양자정보연구지원센터)

□ 중성원자 기반 양자컴퓨터의 안정적 양자게이트 기술 개발

- 양자컴퓨터 구현에 필요한 큐비트(qubit)는 초전도 회로, 이온트랩, 중성원자 등 다양한 방식으로 구현되고 있음
- 최근에는 초전도 회로와 이온트랩 기술이 활발히 연구되고 있으나, 레이저 빛으로 포획한 중성원자(neutral atom) 역시 높은 확장성과 안정성을 가진 유망 기술로 평가받고 있음
- 중성원자는 전하를 띠지 않아 외부 전기적 잡음에 덜 민감하며, 광격자(optical lattice)를 이용하면 하나의 시스템 내에서 수천 개 이상의 큐비트를 동시에 구현할 수 있음
- 반면 안정적인 양자게이트(quantum gate) 구현이 어렵다는 한계가 존재함. 기존에는 리드버그 원자(Rydberg atom), 원자 충돌, 터널링 효과 등을 활용했으나, 특히 터널링 기반 방식은 레이저 세기의 미세한 변동에도 민감하여 연산 정확도가 저하되는 문제가 있었음

□ ETH 취리히 연구진, 기하학적 위상 기반 고정밀 Swap 게이트 구현

- ETH 취리히(ETH Zurich) 양자전자연구소의 티만 에슬링거(Tilman Esslinger) 교수 연구팀은 기하학적 위상(geometric phase)만을 이용하여 매우 안정적인 스왑 게이트(swap gate) 구현 성공함
- 스왑 게이트는 두 큐비트의 양자 상태를 서로 교환하는 연산으로, 대규모 양자컴퓨터에서 양자정보를 전달·재배치하는 데 필수적인 기술임
- 연구진은 외부 환경 변화에 민감한 동역학적 위상(dynamical phase) 대신, 입자의 이동 경로 자체에 의해 결정되는 기하학적 위상을 활용함으로써 실험 잡음(experimental noise)에 강한 양자게이트를 구현함
- 기하학적 위상은 전자의 스핀(spin)을 360도 회전시킬 경우 방향

은 같지만 파동함수의 위상은 달라지는 현상과 유사한 개념임

□ 광격자 기반 원자 제어 및 대규모 큐비트 실험 성공

- 연구진은 극저온 상태의 칼륨 원자(potassium atom)를 광격자 내부에 가둔 뒤, 레이저 빔을 정밀하게 조작해 원자 쌍의 파동함수가 서로 겹치도록 제어함
- 이 과정에서 원자의 스핀 상태를 큐비트로 사용하였으며, 칼륨 원자가 페르미온(fermion) 특성을 가져 동일한 양자상태를 동시에 가질 수 없다는 점을 이용해 기하학적 위상을 형성함
- 연구 결과, 연구진은 1밀리초(ms) 이하의 짧은 시간 안에 두 큐비트 상태를 교환하는 스왑 게이트를 구현했으며, 정확도는 99.91%에 달함
- 또한 17,000개의 큐비트 쌍에 대해 동시에 동일한 게이트 연산을 수행하는 데 성공하여 중성원자 기반 양자컴퓨터의 대규모 확장 가능성을 입증함

□ 향후 연구 방향 및 기대효과

- 연구진은 향후 양자가스 현미경(quantum gas microscope) 기술과 결합하여 개별 큐비트를 선택적으로 관찰·제어하는 기술 개발을 추진할 계획임
- 이를 통해 특정 큐비트에만 선택적으로 스왑 게이트를 적용하는 정밀 제어가 가능해질 것으로 기대됨
- 또한 원자 간 충돌 효과를 추가한 “하프 스왑(half-swap)” 게이트 구현에도 성공하였으며, 이는 큐비트 간 양자얽힘(entanglement)을 생성할 수 있어 양자 알고리즘 구현에 중요한 기반 기술로 평가됨.
- 이번 연구는 중성원자 기반 양자컴퓨터의 안정성과 확장성을 동시에 향상시킨 성과로, 향후 대규모 양자정보처리 시스템 개발과 실용적 양자컴퓨터 구현에 중요한 전환점이 될 것으로 전망됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/04/09/a-new-trick-brings-stability-to-quantum-operations/>