

헬륨 위 전자 기반 양자컴퓨팅 핵심 난제 해결

(2026.07.20 양자정보연구지원센터)

□ 연구진, 헬륨 위 전자(Electron-on-Helium) 양자컴퓨팅의 핵심 기술적 난관 극복

○ 헬륨 위 전자 기반 양자컴퓨팅, 핵심 기술 장벽 돌파

- 연구진은 초유체 헬륨(superfluid helium) 표면 위에 가둔 “단일 전자(single electron)”의 운동 상태와 마이크로파 광자(microwave photon) 사이의 “강한 결합(strong coupling)”을 구현하는 데 성공했다고 발표함
- 이번 연구는 Nature Physics에 게재되었으며, 헬륨 위 전자(Electron-on-Helium)를 활용한 양자컴퓨팅 플랫폼 개발에서 수십 년간 해결하지 못했던 핵심 기술 문제를 극복한 성과로 평가됨
- 강한 결합은 전자와 광자가 환경으로 정보가 손실되는 속도보다 빠르게 에너지를 교환하는 상태로, 두 시스템을 하나의 양자 시스템처럼 제어할 수 있게 해주는 중요한 조건임

○ 헬륨 위 전자 기반 양자컴퓨팅의 장점

- 전자는 초유체 헬륨 표면 위에 떠 있기 때문에 고체 물질 내부의 결함이나 전기적 잡음 영향을 적게 받아, 높은 품질의 양자 상태 유지가 가능한 플랫폼으로 주목받아 왔음
- 연구진은 전자의 “스핀(spin)”을 큐비트로 활용하는 방안을 제안해 왔으나, 개별 전자의 상태를 효율적으로 제어하고 측정하는 기술 확보가 주요 난제로 남아 있었음
- 이번 강한 결합 구현은 전자의 운동 상태와 마이크로파 신호를 연결해 정밀한 제어와 측정을 가능하게 하는 새로운 방법을 제공
- 기존에는 초전도 회로, 이온트랩, 반도체 양자점 등에서는 강한 결합이 구현되었지만, 헬륨 위 전자 시스템에서는 전자와 전자기

장의 상호작용이 약해 구현이 어려웠음

○ 고임피던스 초전도 공진기를 이용한 강한 결합 구현

- 연구팀은 초전도 기반 고임피던스 마이크로파 공진기와 초유체 헬륨 위에 형성된 단일 전자 트랩을 결합해 전자-광자 상호작용을 강화함
- 실험은 절대온도에 가까운 7밀리켈빈(mK) 환경의 희석 냉동기에서 수행되었으며, 실리콘 장치 내 미세 채널에 채워진 헬륨 위에 전자를 가두고 전압으로 전자의 위치와 운동을 제어함
- 연구진은 전자-광자 결합 강도가 118MHz에 도달했으며, 이는 공진기 손실률(23MHz)과 전자 결맞음 손실률(최소 61MHz)을 넘어서는 수준으로 강한 결합 조건을 만족했다고 보고함
- 강한 결합의 대표적 증거인 진공 라비 분할(Vacuum Rabi Splitting) 현상을 관측해 전자와 공진기가 양자 정보를 공유하는 결맞은 상태에 진입했음을 확인함

○ 단일 전자 제어 및 양자 상태 측정 기술 확보

- 연구진은 양자점 구조에 전자를 선택적으로 넣고 빼는 과정을 반복 제어하며, 마이크로파 공진기의 주파수 변화를 통해 전자의 존재와 상태를 정밀하게 확인함
- 또한 2중 주파수 분광법(two-tone spectroscopy)을 활용해 갇힌 전자의 양자화된 운동 상태를 직접 측정하고, 실험 결과가 이론 시뮬레이션과 높은 일치성을 보임을 확인함
- 이러한 정밀 제어 능력은 향후 다수의 큐비트를 연결하고 안정적인 양자 연산을 수행하기 위한 핵심 요소로 평가됨

○ 남은 과제와 향후 양자컴퓨팅 활용 가능성

- 연구진은 에너지 이완 시간 측정 결과 전자가 최대 약 0.76마이크로초(μ s) 동안 들뜬 상태를 유지할 수 있음을 확인했으며, 주요 제한 요인은 에너지 손실보다 “순수 위상 탈동조화(pure

dephasing)” 인 것으로 분석함

- 탈동조화 원인으로는 헬륨 표면의 미세한 파동인 “리플론(ripplon)” 과 전자 주입 과정에서 발생하는 불필요한 전하 변동 등이 후보로 제시됨
- 온도가 증가할수록 탈동조화 속도가 크게 증가하는 현상도 확인되어, 향후 저온 안정성과 재료 개선이 중요한 연구 과제로 남음
- 이번 연구는 단일 전자 수준에서 헬륨 기반 양자 시스템의 제어 가능성을 입증한 것으로, 향후 전자 스핀 큐비트, 오류 보정 기술, 대규모 큐비트 배열 기술과 결합될 경우 기존 초전도·이온 트랩 방식과 경쟁할 새로운 양자컴퓨팅 플랫폼으로 발전할 가능성이 있음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/06/16/researchers-clear-critical-hurdle-for-electron-on-helium-quantum-computing/>