

초전도체에서 갑작스런 전이, 양자 기술 고속 전환

(2025.01.08., 양자정보연구지원센터)

□ 초전도체에서 갑작스러운 전이가 양자 기술을 가속화할 수 있음

○ 연구 배경

- 최근 연구에서는 특정 불규칙 초전도체가 갑작스러운 상전이를 일으킨다는 사실을 발견, 이는 기존 이론에 도전하는 결과이며 양자 컴퓨팅에 중요한 영향을 미칠 수 있음
- 연구팀은 인듐 산화물 필름(indium oxide films)을 조사한 결과, 초전도 상태에서 절연 상태로의 전이가 점진적이지 않고 갑작스럽게 발생하는 첫 번째 종류의 양자 상전이가 관찰되었음, 이는 기존 초전도체에서 일반적으로 나타나는 연속적인 두 번째 종류의 전이와는 대조적임

○ 연구 결과 및 발견

- (초전도체에서의 변화) 인듐 산화물 필름의 초전도 상태에서 절연 상태로의 갑작스러운 변화는 ‘1차 양자 상전이(first-order quantum phase transition)’ 로 설명되며, 이 전이는 기존 이론에서 예측한 점진적인 변화와는 다른 양상임
- (슈퍼플루이드 강성) 연구팀은 중요한 측정을 통해 초전도 상태의 위상 왜곡을 저항하는 능력을 나타내는 ‘슈퍼플루이드 강성(superfluid stiffness)’ 이 특정 수준의 무질서에서 급격히 감소하는 것을 발견함
- (크리티컬 온도와 슈퍼플루이드 강성) 이 필름들의 크리티컬 온도는 전자쌍 결합의 강도와 관계없이 슈퍼플루이드 강성에 의존하게 되며, 이는 전자쌍이 존재하지만 초전도성이 부족한 ‘가짜갭(pseudo gap)’ 상태와 일치하는 현상임

□ 양자 컴퓨팅에서 중요성

- 양자 회로 설계에 미치는 영향
 - 초전도체는 양자 컴퓨터에서 핵심적인 역할을 하며, 큐비트와 슈퍼인덕터와 같은 구성 요소들을 제공함, 연구팀이 관찰한 갑작스러운 상전이는 양자 시스템의 안정성과 성능 향상에 필요한 재료 설계에 중요한 정보를 제공할 수 있음
 - (슈퍼인덕터 개발) 이 연구에서 다른 초전도체처럼 슈퍼플루이드 강성이 낮지만 전자쌍 결합이 유지되는 재료는, 큐비트를 외부 간섭으로부터 차단하고, 양자 컴퓨팅의 필수 요소인 결맞음 시간을 향상시키는 데 유용한 슈퍼인덕터를 개발하는 데 기여할 수 있음

□ 제작 조건 제어 및 연구 방법

- 제작 조건과 실험
 - 연구팀은 비정질 인듐 산화물 박막을 연구하며, 필름의 무질서를 제어하여 제작 조건을 조절하였음, 고급 마이크로파 분광학을 이용해 이 박막으로 제작된 초전도 공진기의 플라즈몬 스펙트럼을 측정하고, 슈퍼플루이드 강성과 그 변화 과정을 정밀하게 추출함
 - (불규칙성 증가와 슈퍼플루이드 강성) 기존 이론에서는 예상한 점진적인 감소 대신, 불규칙성이 증가함에 따라 슈퍼플루이드 강성이 급격히 떨어지는 현상이 관찰됨, 이는 초전도 상태에서 절연 상태로의 전이를 나타내며, 대규모의 일관성 붕괴를 시사함

□ 연구의 제한점 및 향후 연구 방향

- 연구의 한계
 - 이 연구는 인듐 산화물이라는 특정 유형의 불규칙 초전도체에만 한정되어 있으며, 다른 재료에서 유사한 전이가 발생하는지에 대한 여부는 아직 미지수임

- (쿠퍼 쌍 상호작용) 연구는 쿠퍼 쌍 간의 반발 상호작용과 그로 인한 고립된 쿠퍼 쌍 유리(glass) 상태의 등장에 대한 이해가 부족함, 이러한 상호작용의 미시적 세부 사항에 대한 추가 연구가 필요함
- 향후 연구 방향
 - 기존 양자 상전이 모델을 재검토할 필요성이 제기되며, 특히 불규칙한 시스템에서의 적용 가능성에 대해 탐구할 필요가 있음
 - 또한, 새로운 양자 회로 구성 요소의 개발 가능성을 높이기 위해 물질 특성, 불규칙성 및 양자 현상 간의 상호작용을 조사하는 연구가 필요함
 - (슈퍼인덕터 개발) 불규칙성이 슈퍼플루이드 강성과 상전이에 미치는 영향을 이해함으로써 새로운 슈퍼인덕터 개발 가능성을 제시함
- 이 연구는 프랑스 그르노블 알프 대학교, CNRS, 그르노블 INP, 인스티튜트 넬, 구글 리서치, 카를스루에 공과대학 등 여러 기관의 연구자들이 공동으로 수행함
 - 연구자들은 초전도체의 양자 상전이에 대한 이해를 새롭게 하고, 양자 회로의 안정성을 높이는 데 중요한 기여를 하고 있음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/01/04/sudden-transition-in-superconductors-could-shift-quantum-technology-into-high-gear/>