

과학자들, 양자 유체의 숨겨진 구조 밝혀냄

(2026.09.11., 양자정보연구지원센터)

□ 소산(Dissipation)을 활용한 안정적 양자 얽힘 생성 기술 구현

○ 엑시톤 이용한 보스-아인슈타인 응축체(BEC) 구현의 새로운 가능성 제시

- 보스-아인슈타인 응축체(BEC)는 많은 입자가 개별적인 특성을 잃고 하나의 집단적인 양자 상태처럼 행동하는 ‘물질의 제5상태’로, 거시적인 양자 결맞음(coherence)을 구현할 수 있어 양자기술 분야에서 중요
- 연구진은 60년 이상 시도되어 온 엑시톤(전자-정공 쌍) 기반 BEC를 고체 반도체에서 구현하고, 이를 전기적·자기적으로 조절할 수 있는 새로운 방법을 제시

○ 기존 엑시톤 BEC 구현의 한계 극복

- 기존에는 엑시톤을 빛으로 생성했기 때문에 수명이 약 10억분의 1초에 불과해, 입자들이 서로 상호작용하고 안정적인 집단적 양자 상태를 형성하기 전에 소멸하는 문제가 존재
- 또한 기존 BEC는 일반적으로 진공 상태에서 원자 기체를 극도로 낮은 온도까지 냉각해 구현하기 때문에 실제 반도체 소자에 적용하고 제어하는 데 한계가 있었음
- 연구진은 엑시톤을 들뜬 상태가 아닌 안정적인 “바닥상태(ground state)”에 존재하도록 2차원 반도체 소자를 설계해 엑시톤의 짧은 수명 문제를 극복

○ 원자 한 층 두께의 2차원 반도체에서 엑시톤 BEC 관측

- 로렌스 버클리 국립연구소(Berkeley Lab)가 이끄는 연구팀, 원자 한 층 두께의 반도체에서 엑시톤들이 집단적으로 행동하는 BEC 상태 관측
- 극저온 환경에서 자기광학 분광법을 이용해 전자와 정공의 반응을 측정하고, 소자의 위아래에 설치된 전기 게이트를 통해 엑시톤의 밀도를 조절

- 엑시톤들이 개별적으로 움직이지 않고 연구진이 예측한 것처럼 집단적으로 행동하는 현상을 확인함으로써 고체 반도체에서 안정적인 양자 유체를 구현할 가능성을 제시

○ 기존보다 훨씬 높은 온도에서 BEC 특성 확인

- 연구진은 엑시톤 BEC의 특징이 약 “2K(켈빈)” 까지 유지되는 것을 확인했으며, 이는 여전히 극저온이지만 기존 초저온 원자 기체를 이용한 BEC 실험보다 수백만 배 높은 온도
- 엑시톤이 단순히 빛에 의해 순간적으로 생성되는 입자가 아니라, 전기적·자기적으로 조절 가능한 소자 내부에서 안정적인 평형 양자 유체를 형성한다는 점을 확인
- 이는 기존의 극저온·진공 환경 중심의 BEC 연구를 고체 반도체 기반 연구로 확장할 수 있는 중요한 계기로 평가

○ 엑시톤 BEC 내부의 ‘숨겨진 구조’ 발견

- 원자적으로 얇은 반도체에서 전자와 정공 ‘밸리(valley)’ 라는 양자적 자유도도 보유
- 이러한 스핀-밸리 자유도에 의해 엑시톤은 서로 다른 스핀 패턴과 양자적 특성을 가질 수 있으며, 연구진은 BEC가 단순히 하나의 상태로 구성되지 않았음을 확인
- 특히 서로 다른 내부 스핀-밸리 구조를 가진 두 개의 성분이 존재하며, 이에 따라 여러 가지 서로 다른 양자 상태가 형성될 수 있음을 발견

○ 자기장을 이용해 동일한 양자 유체의 상태를 제어

- 연구진은 작은 자기장을 가하는 것만으로 동일한 엑시톤 유체를 서로 다른 “양자 상태(응축체 상)” 로 전환할 수 있음을 확인
- 기존에는 전자와 정공이 엑시톤을 형성한다는 사실은 알려져 있었지만, 엑시톤이 실제로 응축체를 형성했는지와 그 내부에 어떤 양자적 질서가 존재하는지를 직접 확인하기 어려웠음
- 엑시톤 BEC의 존재뿐만 아니라 그동안 관찰하기 어려웠던 내부의 숨겨진 양자 구조를 직접 확인하고 제어할 수 있는 방법 제시

○ 고체 물질에서 양자 유체를 연구할 수 있는 새로운 플랫폼 확보

- 양자 유체는 전자나 다른 입자들이 개별적으로 움직이지 않고 하나의 유체처럼 집단적으로 행동하는 독특한 물질 상태로, 새로운 양자 현상을 연구하는 데 중요한 대상
- 양자 유체를 극저온 원자 기체가 아닌 고체 반도체 소자 내부에서 구현하고 전기장과 자기장으로 조절할 수 있다는 가능성 제시
- 이를 통해 향후 다양한 조건에서 엑시톤의 집단적 행동과 내부 양자 질서, 양자 상태 간 전환 등을 연구할 수 있을 것으로 기대

○ 차세대 양자·컴퓨팅 기술로의 확장 가능성

- 연구진은 엑시톤 BEC를 기반으로 초유체 기반 양자 소자와 회로를 구현하는 것을 향후 연구 목표로 제시
- 이번 연구 결과는 양자 시뮬레이션뿐만 아니라 차세대 통신 및 컴퓨팅을 위한 결맞는 광전자 기술, 더 빠르고 에너지 효율적인 엑시톤 기반 컴퓨팅 소자 개발에도 활용 가능
- 특히 전자와 정공의 결합으로 형성되는 엑시톤의 양자적·광학적 특성을 활용하면 기존 전자소자와 다른 방식으로 정보를 처리하고 전달하는 새로운 기술 개발로 이어질 가능성

○ 엑시톤 BEC의 안정화와 내부 구조 제어를 동시에 구현한 점이 핵심 성과

- 엑시톤을 바닥상태에 안정적으로 유지함으로써 기존의 짧은 수명 문제를 해결하고, 전기 게이트를 통해 엑시톤 밀도를 조절하는 데 성공
- 또한 자기장을 이용해 BEC의 내부 양자 상태를 전환함으로써 단순한 ‘응축체 형성’에서 나아가 양자 유체의 내부 구조까지 직접 관찰·제어할 수 있음을 입증
- 향후 고체 물질에서 새로운 양자 유체와 양자 상태를 연구하는 기반을 마련하고, 양자 시뮬레이션·차세대 통신·고효율 컴퓨팅 등 다양한 분야의 새로운 기술 플랫폼으로 발전할 가능성 제시

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/08/11/scientists-reveal-hidden-structure-of-a-quantum-fluid/>