

위상 물질의 양자 수송에 대한 이해 심화 연구

(2026.09.16., 양자정보연구지원센터)

□ 위상 물질의 양자 수송에 대한 이해를 심화하는 연구

- 3차원 위상 절연체에서 기존 이론과 다른 양자 진동 현상 규명
 - 브라질 상파울루대학교(USP), 미국 로스앨러모스 국립연구소 및 워싱턴대학교 등의 연구진은 3차원 위상 절연체인 “지르코늄 펜타텔루라이드(ZrTe_5)”에서 기존 이론으로 설명하기 어려운 비정상적 양자 진동 현상을 관측하고, 그 원인을 규명함
 - 연구 결과는 5월 Nature Communications에 게재되었으며, 최대 “60 T의 강한 자기장과 약 0.7 K(-272.45°C)”의 극저온에서 전기 수송 실험과 이론 모델링을 수행하여 현상을 분석함
- ZrTe_5 의 특성과 위상적 전자구조
 - 위상 절연체는 내부에서는 전류가 잘 흐르지 않지만 표면에서는 전류가 흐르는 특성을 가지며, 이는 전자 밴드의 위상적 특성과 결정 대칭성에 의해 보호됨
 - ZrTe_5 는 서로 다른 위상 상태의 경계에 가까운 물질로, 온도 · 기계적 변형 · 조성 · 자기장 등의 작은 변화에도 전자적 특성이 달라질 수 있어 위상 상전이 및 상대론적 준입자 연구에 적합한 소재로 주목받고 있음
- 양자한계를 넘어 지속되는 비정상적 양자 진동 관측
 - 일반적으로 자기장 속 전자의 에너지는 양자화되어 “란다우 준위(Landau levels)”를 형성하며, 이 준위가 페르미 준위를 통과하면서 전기저항에 주기적인 슈브니코프-드하스(Shubnikov-de Haas) 진동이 발생함
 - 통상적인 금속에서는 이러한 진동이 자기장 세기 B의 역수인 $1/B$ 에 대해 일정한 주기성을 보이며, 전자가 가장 낮은 란다우 준위

에 도달하는 ‘양자한계’ 이후에는 진동이 사라지는 것으로 예상됨

- 그러나 ZrTe_5 에서는 $1/B$ 의 규칙적인 주기를 따르지 않는 자기저항 진동이 양자한계를 넘어 강한 자기장에서도 지속되는 현상이 관측됨

○ ‘재진입 란다우 준위(Reentrant Landau levels)’ 메커니즘 제시

- 연구진은 비정상적 진동의 원인으로 자기장에 따른 란다우 준위의 ‘백벤딩(back-bending)’ 현상을 제안함
- 강한 자기장에서 전자의 궤도 운동에 의한 사이클로트론 에너지와 전자 스핀과 자기장의 상호작용에 따른 “제만 효과(Zeeman effect)”가 강하게 결합하면서 란다우 준위의 에너지 변화가 비선형적으로 나타남
- 이에 따라 일반적으로 페르미 준위에서 멀어져야 할 란다우 준위가 다시 페르미 준위로 돌아와 이를 재차 통과할 수 있으며, 이 과정에서 기존 이론이 예상하지 못한 새로운 양자 진동이 발생하는 것으로 분석됨
- 특히 ZrTe_5 와 같이 강한 스핀-궤도 결합을 갖는 물질에서는 전자의 스핀과 궤도 운동이 서로 얽혀 이러한 현상이 두드러지는 것으로 나타남

○ 다체 상호작용이 아닌 물질 고유의 위상적 특성으로 설명

- 연구진은 관측된 비정상 진동이 다수의 전자 사이 상호작용에 의해 발생하는 “다체 효과(many-body effects)” 인지, 물질의 전자 구조 자체에서 비롯된 위상적 효과인지를 구분하고자 함
- 분석 결과, 전자 간 상호작용을 포함하지 않은 3차원 디랙 해밀토니안 기반 단일입자 모델만으로도 실험 결과를 재현할 수 있음을 확인함
- 이는 관측된 현상이 전자들의 집단적 상호작용보다는 ZrTe_5 의 비

자명한 전자 밴드 위상과 강한 스핀-궤도 결합에 기인함을 시사함

○ 시료별 상이한 양자 진동 현상에 대한 통합적 설명

- 기존 연구에서는 동일한 ZrTe_5 에서도 시료에 따라 정상적인 $1/B$ 주기 진동, 비주기적 진동, B 에 대한 로그 주기성을 보이는 등 서로 다른 결과가 보고되어 논란이 있었음
- 이번 연구는 이러한 차이가 반드시 서로 다른 물리적 메커니즘 때문이 아니라, 동일한 디랙 전자구조에서 시료의 전하 운반자 밀도와 페르미면 크기가 달라짐에 따라 나타날 수 있음을 제시함
- 특히 낮은 전하 운반자 밀도를 가진 시료에서는 제만 효과와 사이클로트론 효과가 비슷한 수준으로 나타나 재진입 란다우 준위가 형성되기 쉬운 반면, 운반자 밀도가 높은 시료에서는 기존의 사이클로트론 항이 우세하여 통상적인 $1/B$ 주기성이 유지되는 것으로 분석됨

○ 스핀 분리 전자상태 간 간섭 현상 확인

- 양자 진동에는 스핀에 의해 분리된 두 전자상태가 각각 기여하며, 두 상태는 서로 다른 유효질량을 갖는 것으로 나타남
- 두 전자 채널의 간섭으로 인해 온도가 증가할수록 진동 진폭이 단순히 감소할 것으로 예상하는 기존 Lifshitz-Kosevich 모델과 달리, 특정 온도 구간에서 진폭이 국소적으로 감소하는 현상이 관측됨

○ 향후 위상 물질 및 새로운 양자상 연구에 활용 가능

- 각도별 자기저항 측정을 통해 낮은 자기장 조건에서 ZrTe_5 의 페르미면이 3차원적이고 타원체에 가까운 형태임을 확인했으며, 전하 운반자 밀도는 약 10^{16} cm^{-3} 로 매우 낮은 수준으로 추정됨
- 이는 ZrTe_5 가 위상 상전이에 매우 가까운 물질임을 뒷받침하며,

자기장 · 전하 운반자 밀도 · 기계적 응력 · 온도 · 대칭성 등을 제어함으로써 새로운 위상 물질 및 양자상을 탐색할 수 있는 플랫폼으로 활용될 가능성을 제시함

- 특히 연구진은 향후 “웨이일 준입자(Weyl quasiparticles)”와 관련된 보다 복잡한 위상 상태의 구현 및 탐색으로 연구를 확장할 수 있을 것으로 전망함

○ 의의

- 본 연구는 극저온 · 초고자기장 환경에서 ZrTe_5 의 비정상적 양자 수송 현상을 실험적으로 확인하고, 이를 재진입 란다우 준위와 전자 스핀의 역할을 통해 설명했다는 점에서 의미가 있음
- 이를 통해 위상 절연체에서 전하 수송뿐 아니라 전자 스핀이라는 또 다른 기본 자유도가 양자 수송 현상에 중요한 역할을 할 수 있음을 보여주었으며, 위상 물질의 전자구조와 양자 수송 메커니즘에 대한 이해를 확대함

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/08/17/study-deepens-understanding-of-quantum-transport-in-topological-materials/>