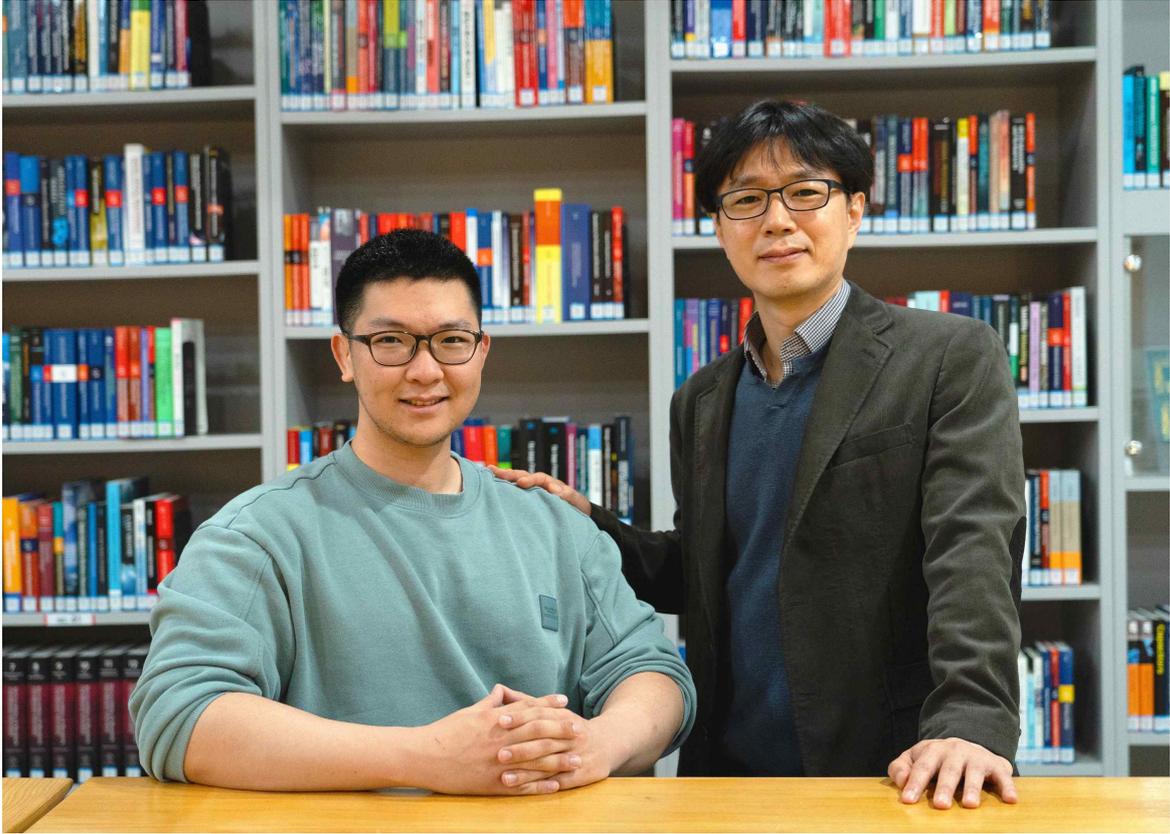


GIST, 물리학 '109년 난제' 풀어...

미시-거시세계 각운동량 전달 메커니즘 밝혀

- 물리·광과학과 이종석 교수팀, 인공구조물 통해 '카이랄 열포논' 세계 최초 직접 관측... '아인슈타인-더 하스 효과' 발견(1915년) 후 미시→거시세계 각운동량 전달 원리 난제로 남아
- "포논이 자기 수송에 직접적으로 기여할 수 있음을 입증한 것으로 향후 포논 공학과 스핀 공학의 융합연구 초석 마련"... 국제학술지 《Nature Nanotechnology》 게재



▲ (오른쪽부터) 물리·광과학과 이종석 교수, 최인혁 박사과정생

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 물리·광과학과 이종석 교수 연구팀이 자성-비자성 초격자* 인공 구조물에서 각운동량을 지니고 있는 카이랄 열포논*의 생성을 확인하는 데 성공했다고 밝혔다.

* 초격자: 두 종류 이상의 물질이 주기적인 층으로 이루어진 구조로, 보통 각 층 두께는 수 나노미터 정도다.

* 카이랄 열포논: 카이랄 포논은 격자가 집단적으로 회전하며 움직이며 물질 속에서 전파해 나가는 포논으로, 서로 거울상이지만 겹치지 않는 성질인 카이랄성을 지닌다. 열통계를 따르는 카이랄 포논을 카이랄 열포논이라고 한다.

각운동량 보존 법칙*은 에너지 보존 법칙, 운동량 보존 법칙과 함께 물리현상을 설명하는 가장 근본적인 세 가지 법칙 중 하나로서, 고전역학으로 기술되는 거시세계와 양자역학으로 기술되는 미시세계에 모두 적용된다.

피겨스케이팅 선수가 회전할 때 몸을 움츠리는 동시에 팔을 오므리는 행동은 회전 관성을 줄여 회전 속도를 조절하는 것이며, 헬리콥터에서 꼬리 날개를 활용하여 균형을 잡는 것은 실생활에서 각운동량 보존 법칙으로 설명되는 사례이다.

* **각운동량 보존 법칙**: 외부로부터 회전력이 작용하지 않는 한 회전체의 각운동량은 일정하게 보존되는 것을 의미하며, 회전하는 물체의 질량은 일정하기 때문에 회전속도는 반비례한다. 각운동량 = 질량 X 속도 X 반지름으로 정의된다.

1915년, 알버트 아인슈타인(Albert Einstein)과 반더르 요하네스 더 하스 (Wander Johannes de Hass)는 미시세계에서 거시세계로도 각운동량이 보존된다는 것을 **아인슈타인-더 하스 효과***를 통해 실험적으로 확인하였지만 어떠한 원리로 미시세계에서 거시세계로 각운동량을 전달하는 지에 대해서는 **초고속 측정 기술의 한계로 1915년 이후 100년이 넘도록 밝혀지지 않았다.**

* **아인슈타인-더 하스 효과(Einstein-de Hass effect)**: 자성 물질 내에 무작위로 정렬된 미시세계 속 자기 쌍극자들이 외부 자기장, 온도 변화를 통해 한 방향으로 정렬될 수 있으며, 스핀 각운동량이 변하게 된다. 이때 각운동량 보존 법칙을 만족하기 위해 거시세계의 자성 물체가 회전하게 되는데 이는 미시세계-거시세계 각운동량 전달을 보여주는 대표적인 효과 중 하나이다.

그러나 과학기술의 급속한 발전에 따라 **스핀-격자 상호작용***을 통해 미시세계 속 스핀에서 격자들의 집단 움직임인 **포논***으로 각운동량을 전달할 수 있다는 사실이 **2022년 독일 콘스탄츠 대학교(Universität Konstanz) 연구팀에 의해 실험적으로 밝혀졌다 [Nature 602, 73 (2022)].** 이때 각운동량을 전달받은 포논을 **카이랄 포논**이라고 부르며, 이는 **미시세계와 거시세계를 이어주는 핵심적인 각운동량 전달 매개체**이다.

* **스핀-격자 상호작용**: 고체 내부에서 입자의 기본 물리량 중 하나인 스핀과 반복적으로 배열된 격자가 서로 강하게 영향을 받는 현상.

* **포논**: 대칭성의 규칙에 따라 반복적으로 배열된 구조인 격자의 집단적 움직임.

그럼에도 불구하고 카이랄 포논의 생성(수 피코초*)과 아인슈타인-더 하스 효과(수 밀리초*) 사이에 방대한 시간적 차이가 존재하며, 그 사이에 어떠한 일이 일어나는지는 지금까지도 수수께끼로 남아 있다.

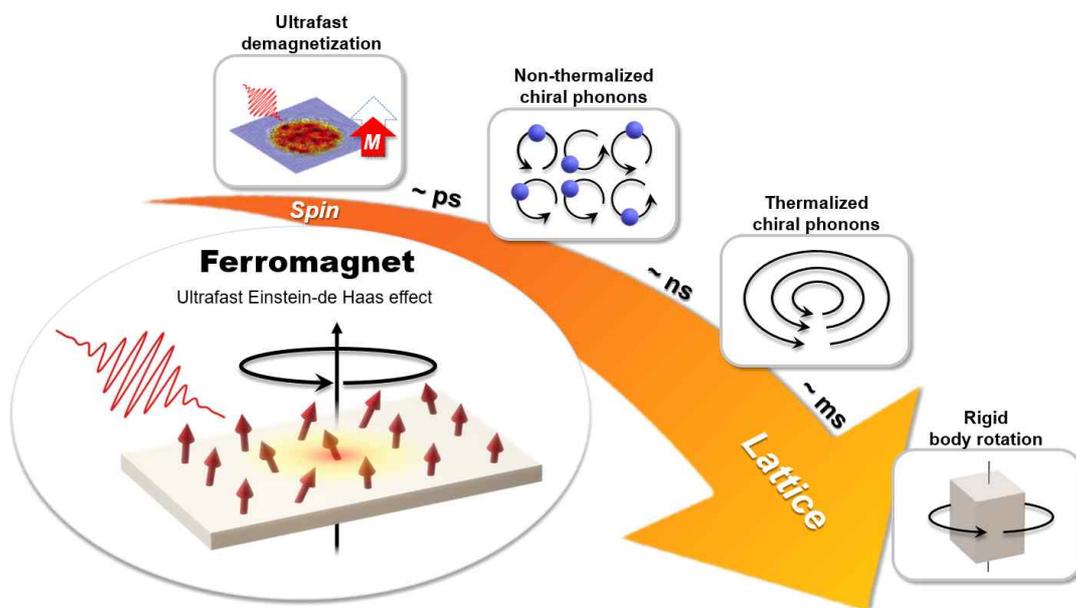
* **피코초**: 1조분의 1초 = 10^{-12} 초

* **밀리초**: 1천분의 1초 = 10^{-3} 초

연구팀은 자성 산화물 **SrRuO3**와 비자성 산화물 **SrTiO3**을 결합시킨 **초격자 형태의 인공 복합 구조물(artificial heterostructure)**을 만들었고, **보스-아인슈타인 통계***를 따르는 **카이랄 열포논**의 생성을 세계 최초로 직접 관측하여 **1조분의 1초와 천분의 1초 사이의 각운동량 전달의 수수께끼를 푸는 데 성공했다.**

* **보스-아인슈타인 통계**: 포논과 같은 보존(boson) 입자들이 열평형 상태에서 따르는 통계적인 분포
연구팀은 **광여기***를 통해 자성 산화물 루테튬산 스트론튬(**SrRuO3**)*에서 **초고속 자기소거***를 유도하고, **카이랄 열포논을 생성**하였다. 이렇게 생성된 카이랄 열포논은 인접한 비자성 타이타늄산 스트론튬(**SrTiO3**)* 층으로 전달되고 **동적 다강성 효과***를 통해 큰 자기 모멘트를 형성하게 된다.

- * **광역기**: 바닥 상태에 있는 전자들에 높은 에너지를 가진 빛을 조사하여 들뜬 상태로 만드는 방법.
- * **루테튬 산 스트론튬(SrRuO3)**: 페로브스카이트 전이금속 산화물로 전도성과 자성을 동시에 지니고 있다. 강한 스핀-격자 상호작용을 보여 '스핀-궤도 토크(SOT)' 연구 등, 여러 스핀트로닉스 분야 연구에 많이 사용되고 있다.
- * **타이타늄 산 스트론튬(SrTiO3)**: SrRuO3와 같은 페로브스카이트 전이금속 산화물로 SrRuO3와 달리 절연체이며, 자성이 존재하지 않는다. 또한 타이타늄 산 스트론튬은 전이금속인 타이타늄의 d 궤도를 점유하고 있는 전자가 다른 전이금속에 비해 가장 적어 상대적으로 전자와 전자 간의 상호작용이나 전자와 격자 간의 결합이 약한 물질로 알려져 왔다.
- * **초고속 자기소거**: 빛에너지에 의해 자성 물질 속 자화가 초고속(수 피코초)으로 감소하는 현상.
- * **동적 다강성 효과(dynamical multiferroicity)**: 회전하는 전하량을 띤 이온들에 의해 전류 고리가 형성되고 암페어 법칙에 의해 자기 모멘트가 형성되는 현상.



▲ 자성 물질 내에서 미시세계 (스핀)-거시세계 (물질 회전)로의 각운동량 전달 과정. 광여기를 통해 초고속 자기소거 (ultrafast demagnetization)을 유도하고, 이때 감소된 스핀의 각운동량이 카이랄 포논으로 전달되는 과정을 SrRuO3/SrTiO3 초격자와 시분해 자기광 커효과를 통해 실시간으로 관측할 수 있다.

연구팀은 펨토초 레이저를 이용한 **시분해 자기광학 커 효과(Magneto-optic Kerr effect) 측정***을 통해 SrRuO3/SrTiO3 초격자 내의 카이랄 열포논이 생성하는 자기 모멘트를 실시간으로 관측하는 데 성공하였고, 카이랄 포논이 생성된 직후 물질의 회전이 발생하기 전까지 카이랄 열포논이 중요한 역할을 하는 것을 실험적으로 밝혀냈다.

* **시분해 자기광학 커 효과 측정** : 펄프빔과 프루브빔의 경로차를 이용하여 광여기된 물질의 자성 특성을 펨토초(1000조분의 1초) 단위로 추적할 수 있는 기술.

이종석 교수는 "이번 연구는 **포논이 자기 수송에 직접적으로 기여할 수 있음**을 입증하는 결과로서 **스핀 공학과 포논 공학의 접점이 존재할 수 있다**는 가능성을 보여 주는 한편, 향후 자기 및 열 기능성이 결합된 **다기능성 나노 소자 개발에 대한 중요한 디딤돌을 제시한 것으로 평가할 수 있다**"고 말했다.

GIST 물리·광학과 이종석 교수가 지도하고 최인혁 박사과정생이 제1저자로 참여한 이번 연구는 한국연구재단의 중견연구자사업, 신진연구자사업, 나노 및 소재 기술개발사업 등의 지원을 받아 수행되었으며, 연구 결과는 재료과학 기초 및 응용 연구 분야의 세계적 학술지 《네이처 나노테크놀로지(Nature Nanotechnology)》에 2024년 7월 12일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Nature Nanotechnology (IF 38.1, 2023년 기준)
- 논문명 : Real-time dynamics of angular momentum transfer from spin to acoustic chiral phonon in oxide heterostructures
- 저자 정보 : 최인혁 박사 (제1저자, GIST), 정승교 박사 (공저자, 성균관 대학교), 송세환 박사 (공저자, 부산대학교), 박성균 교수 (공저자, 부산대학교), 신동빈 교수 (공저자, GIST), 최우석 교수 (공저자, 성균관대학교), 이종석 교수 (교신저자, GIST)