



2022. 1. 12.(수)/즉시

문의: 담당자 연락처(02-880-6536)  
연구단장/연구책임자 박제근 교수(02-880-6536) / 교신저자

## 박제근 교수 연구진, 2차원 양자 얽힌 신물질 발견

- 2차원 자성 반데르발스 물질 NiI<sub>2</sub>에서 양자 얽힌 자성 다체 엑시톤 발견 -

- 어드밴스드 머티리얼스誌 논문 게재 -

- 서울대학교 자연대 물리천문학부 박제근 교수 연구진은 연세대 김재훈 교수 연구진과 자성을 띤 새로운 2차원 물질(니켈 다이아이오다이드, 이하 NiI<sub>2</sub>)에서 양자 얽힘 현상을 발견하고, 세계적인 재료학술지인 어드밴스드 머티리얼스에 발표하였다.
- 박제근 교수는 이런 양자얽힌 상태에서 결맞음성이 높은 엑시톤을 발견하였다. 엑시톤은 자유전자와 양공이 전기적 결합으로 묶여 있는 준입자로, 광자를 방출하는 양자상태이기 때문에 양자광원이 필요한 양자정보통신에 중요한 요소로 거론된다.
- NiI<sub>2</sub>는 자성과 강유전성을 동시에 가지는 다중강성 물질로서 얇은 2차원 층으로 분리될 수 있는 자성 반데르발스 물질이다.
- 연구진은 광흡수, 공명 비탄성 X선 산란 실험을 통해 NiI<sub>2</sub>에서 자성과 강유전성과 관련된 엑시톤을 관측하였다.
- 박제근 교수 연구진은 양자역학적 다체 이론으로 엑시톤 실험결과를 설명하고, 이번에 발견한 엑시톤이 양자다체상태임을 알 수 있었다.
- 이번 발견은 2차원 자성 반데르발스 물질인 NiPS<sub>3</sub>(삼황화린니켈)에 이어 두 번째 ‘양자 자성 다체 엑시톤’의 발견으로, 양자 얽힌 엑시톤을 연구할 수 있는 2차원 자성 물질의 저변을 넓혔다.

- 박제근 교수 연구진은 NiPS3(삼황화린니켈)에서의 ‘양자 자성 다체 엑시톤’을 세계 최초로 발견하여 2020년 세계적 학술지 네이처誌에 게재한 바 있다. 이번에는 또 다른 자성 반데르발스 물질인 NiI2(니켈 다이아이오다이드)에서 두 번째 양자 얽힌 엑시톤 발견으로 박제근 교수 연구진이 이 분야에서 선도적인 위치에 있다는 것을 증명하였다.
- NiI2는 NiPS3와 ‘양자 자성 다체 엑시톤’을 가지고 있다는 점에서 공통점을 갖는다. 하지만 NiPS3와 달리 니켈 이온이 삼각 격자를 이루고 있으며, NiPS3보다 복잡한 자성 구조를 가지면서 그와 동시에 강유전성을 띠는 특징이 있다. 따라서 NiI2의 엑시톤은 NiPS3의 엑시톤과 다른 메커니즘으로 작동한다.
- 박제근 교수는 “이번 발견은 양자과학기술에서 핵심적인 양자얽힌 양자물질이 지금까지 알려진 것보다 훨씬 더 광범위하게 있음을 보였다”며 연구 의미를 설명하였다. 이번 NiI2의 자성과 강유전성이 양자 얽힌 엑시톤 발견은 양자정보기술에 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

[붙임] 1. 연구결과      2. 용어설명      3. 그림설명

## 연구 결과

### Multiferroic enabled magnetic-exciton in 2D quantum entangled van der Waals antiferromagnet NiI<sub>2</sub>

*Suhan Son#, Youjin Lee#, Jae Ha Kim#, Beom Hyun Kim#, Chaebin Kim, Woongki Na, Hwiin Ju, Sudong Park, Abhishek Nag, Ke-Jin Zhou, Young-Woo Son, Hyeongdo Kim, Woo-Suk Noh, Jae-Hoon Park, Jong Seok Lee, Hyeonsik Cheong, Jae Hoon Kim\*, Je-Geun Park\**  
(Advanced Materials, *in press*)

물질과 빛의 상호작용은 양자광학부터 응집물질물리학에 이르기까지 다양한 연구 분야의 중심에 있으며, 레이저 물리학과 같은 새로운 분야를 개척하고 있다. 그 중, 자기 절연체에서 발견되는 자기 엑시톤은 매우 드문 예 중 하나이다.

이번 연구는 반데르발스 반강자성 NiI<sub>2</sub>(니켈 다이아이오다이드)에서 자기 상전이가 자기 엑시톤을 활성화할 수 있다는 획기적인 보고를 하였다. 즉, 2차원 자성 반데르발스 물질인 NiI<sub>2</sub>에서 자성과 밀접하게 연결되어 있는 ‘양자 자성 다체 엑시톤’을 발견하였다. 엑시톤이란 전자와 양공으로 이루어진 준입자로, 광자를 방출하는 양자상태이기 때문에 양자 광원이 필요한 양자 정보 통신에 중요한 요소로 거론된다. 연구진은 광 흡수 실험을 포함한 여러 실험과 다체 이론 계산을 통해 NiI<sub>2</sub>에서 장-라이스 양자 다체 상태로부터 엑시톤이 구현된다는 사실을 증명하였다.

이번 발견은 2차원 자성 반데르발스 물질인 NiPS<sub>3</sub>(삼황화린니켈)에 이어 두 번째로, 양자얽힘이 핵심적인 역할을 하는 ‘양자 자성 다체 엑시톤’의 발견이다. 이는 양자 현상을 연구할 수 있는 2차원 물질의 저변을 확대한 획기적인 연구라 할 수 있다. 더 나아가 이 연구를 통해 NiI<sub>2</sub>가 본질적으로 양자 얽힌 바닥 상태로 자기적으로 정렬된 2차원임을 증명하였다.

# 용 어 설 명

## 1. 자성 반데르발스 물질 NiI<sub>2</sub>(니켈 다이아이오다이드)

- 자성 반데르발스 물질은 층 사이가 반데르발스 결합으로 붙이는 약한 전기적 인력으로 이뤄져 얇은 자성을 띠는 원자층을 구현할 수 있다. 간단히 자성 2차원 물질을 만들 수 있어 최근 학계에서 각광받고 있다.
- 반데르발스 물질 NiI<sub>2</sub>는 76 K 아래에서 반강자성 (이웃한 스핀 방향이 반대로 정렬해 전체적으로는 자성이 없고 국소적으로만 자성이 있다)을 띠며 약 60 K 아래에서는 나선 자기 구조를 가지며 강유전성을 띤다. 자성과 강유전성을 동시에 가지고 있는 독특한 2차원 물질로 최근 학계의 주목을 받고 있다.

## 2. 자유전자와 양공

- 원자에 속박된 전자가 에너지를 얻어 속박을 벗어나면 자유전자라고 부르며, 전자가 빠져나가 양 전하를 띠는 빈 자리를 양공이라고 한다.

## 3. 엑시톤

- 전자-양공이 전기적 인력에 의해서 결합된 상태를 엑시톤이라 부른다. 엑시톤 에너지에 해당하는 광자를 반도체에 입사시켜 엑시톤을 생성시킬 수 있고, 이 엑시톤이 붕괴될 때 광자를 방출하기 때문에 양자광원으로 사용될 수 있다. 이러한 특징으로 광통신 등의 양자정보 통신에 매우 유용하다.

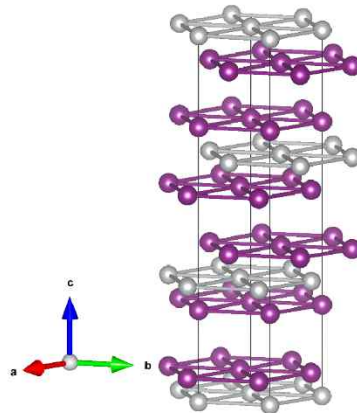
## 4. 장-라이스 (Zhang-Rice) 양자다체상태

- 전자와 홀이 양자적으로 얽혀서 여러 원자에 동시에 속박되어 있는 독특한 양자적으로 얽힌 다체상태이다.

## 5. 양자정보통신

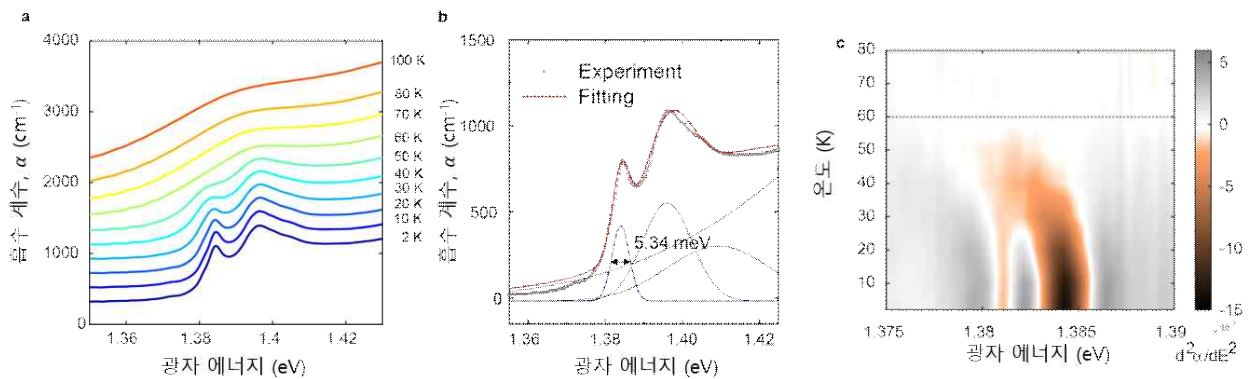
- 양자광원을 정보 단위로 쓰는 통신 기술. 비트 하나에 양자 단 1개만 필요하기 때문에, 훨씬 작은 에너지로 작동하며 현저하게 소형화할 수 있다.

# 그림 설명



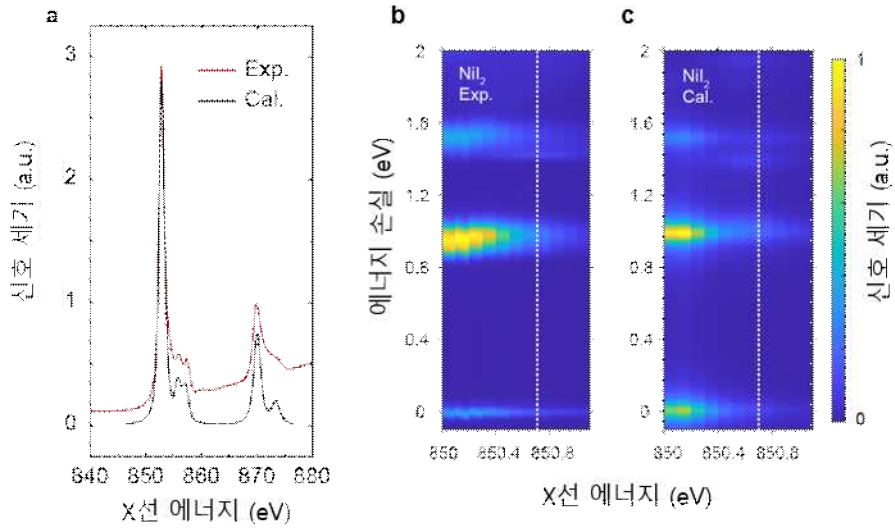
**[그림 1] NiI<sub>2</sub>(니켈 다이아이오다이드)의 결정구조**

실험에 사용한 2차원 자성 반데르발스 물질. 각 층은 니켈 원자가 삼각형 구조로 이뤄져 있으며, 약한 층간 결합 (반데르발스 결합)을 덕분에 쉽게 층을 분리할 수 있다. 스핀의 방향이 고정되어 있지만, 전체적으로 스핀의 총합이 0이 되는 반강자성 물질이다.



**[그림 2] NiI<sub>2</sub>에서 광흡수 실험을 통해 얻은 엑시톤 신호**

(a) 광자의 에너지에 따라 흡수된 빛을 측정한 결과로 엑시톤의 증거이다. (b) 이렇게 얻은 흡수스펙트럼은 매우 좁은 폭으로 분포한다. 이는 결맞음이 상당히 크다는 것을 의미한다. (c) 온도에 따라 흡수 계수의 2차 미분을 하여 자기상전이 (60 K) 아래에서만 매우 좁은 폭의 흡수 스펙트럼이 관측되었다. 즉, 자기상전이와 엑시톤의 관계를 증명한다.



[그림 3] NiI<sub>2</sub>에서 X선 흡수 스펙트럼과 공명 비탄성 X선 산란 실험. 다체계산 결과

(a) X선 흡수 스펙트럼 실험 결과와 이론 계산결과. (b), (c) 공명 비탄성 X선 산란 실험을 통해 X선 에너지 850.7 eV에서의 공명 비탄성 X선 산란 실험결과로서 실험값과 이론값 비교.