

보도일시	2020. 8. 6.(목) 조간(국제엠바고 8.6. 0시)부터 보도해주시기 바랍니다.		
배포일시	2020. 8. 4.(화) 09:00	담당부서	기초연구진흥과
담당과장	이주원(044-202-4530)	담당자	강창원 서기관(044-202-4532)
관련기관	기초과학연구원(IBS) 강상관계 물질 연구단 양범정 교수 (02-880-6604) 임준원 책임연구원(02-880-8108)		

IBS, 베일에 싸여있던 물리량 ‘양자거리’ 잰다

- 고체물성의 핵심인 양자거리 측정 가능성을 세계최초로 제시 -
- 네이처誌에 논문 발표... 양자컴퓨터 소재 탐색에 활용 기대 -

- 기초과학연구원(IBS) 강상관계 물질 연구단 양범정 교수(서울대 물리천문학부)는 임준원 책임연구원, 김규 원자력연 책임연구원과 함께 측정이 불가능했던 고체의 ‘양자거리’ 를 측정하는 방법을 세계 최초로 제시하였다.
- 양자거리*는 두 개의 양자상태를 비교하는 개념으로, 목표했던 양자상태와 실제 양자상태의 차이 즉, 양자통신과정 혹은 양자컴퓨터 연산과정의 양자정보 손실을 측정할 수 있을 것으로 기대된다.
 - * 양자상태(에너지, 스핀 등 양자역학적으로 본 입자의 상태)의 정보를 담고 있는 두 파동함수의 유사성을 나타내는 물리량으로, 서로 같을 때 0, 서로 직교할 때 1.
- 양자역학에서 고체 내의 전자는 파동으로 간주되는데, 이 파동은 곡률과 양자거리로 나타내는 기하학적 모양을 가진다. 양자거리는 파동구조의 핵심 요소지만 지금까지는 고체에서 양자거리를 측정할 방법이 없었고, 물성으로도 나타나지 않아 크게 주목받지 못했다.
- 연구진은 평평한 에너지띠*를 갖는 고체에 자기장을 걸어서 양자거리 측정이 가능하다는 것을 세계에서 처음으로 밝혀내었다.
 - * 고체 속 전자가 운동량에 상관없이 일정한 에너지를 가짐(일반적인 고체는 전자의 에너지가 운동량에 크게 의존하는, 복잡한 곡선 에너지띠를 갖는다)
- 과학기술정보통신부(장관 최기영)와 IBS(원장 노도영)는 이번 성과가 8월 6일 00시(한국시간) 세계 최고 권위의 학술지 네이처(Nature, IF 42.778)에 논문으로 게재되었다고 밝혔다.

- 연구진은 평평한 에너지띠를 갖는 고체에 자기장을 걸면 에너지 준위가 변하는 것을 이론적으로 발견하고, 이 변화로부터 양자거리를 특정할 수 있다는 것을 증명하였다.
- 연구진은 평평한 에너지띠와 곡선 에너지띠가 교차하는 물질*에 자기장을 걸면 전자들의 에너지 준위(란다우 준위)가 퍼짐을 발견했다.
 - * 전자가 운동량에 따라 여러 에너지를 가져서 평평한 띠와 곡선 띠를 둘 다 가지며, 두 띠가 교차하는 고체물질. 평면 형태의 순환 그래핀, 카고메 격자물질 등이 그 예다.
- 이어서, 이 에너지 준위 퍼짐은 에너지띠끼리 교차하는 점에서의 양자 상태에 달려있음을 밝혔다. 양자거리를 결정하는 양자상태가 실제 물질인 에너지에 영향을 미친 것이다.
- 이에 착안해 연구한 결과, 양자거리의 최댓값이 에너지 준위 퍼짐을 결정함을 밝혀내었다.
- 이번 연구는 고체 전자의 에너지 준위를 관찰해 양자거리를 정확히 측정할 수 있음을 이론적으로 증명해서, 전자 파동의 기하학적 구조와 관련한 새로운 고체 연구의 장을 열 것으로 기대된다.
 - 임준원 책임연구원은 “여러 이차원 물질에서 파동함수의 양자거리를 정확히 측정하고, 관련 물성을 조절할 수 있다”고 의미를 밝혔다.
 - 양범정 교수는 “고체를 양자기하학으로 분석한 기존 연구들은 곡률에 국한되어 있었는데, 이번 연구로 양자거리를 측정하여 물성을 밝힐 수 있게 됐다”며 “나아가 양자정보 분야에 쓰일 새로운 재료를 찾는 데 기여할 것”이라고 밝혔다. 특히, “순수 이론 분야에서 네이처에 논문을 게재하는 일은 세계적으로 매우 드물다”고 덧붙였다.
 - 이번 연구는 IBS와 연구재단 및 미 육군 연구소의 지원으로 수행되었다.

<참고자료> : 1. 논문 정보 2. 연구이야기 3. 용어설명
 4. 그림설명 5. 연구자 이력사항

논문 정보

□ 논문명

- Quantum distance and anomalous Landau levels of flat bands

□ 저자

- 임준원(제1저자, IBS/서울대), 김규(공동저자, 한국원자력연구원), 양범정(교신저자, IBS/서울대)

□ 내용 요약

IBS 강상관계물질 연구단은 고체 속 전자 에너지가 일정한 즉, 평평한 에너지띠를 가지는 고체물질에 자기장을 걸었을 때 에너지 준위 퍼짐이 나타나며 이를 이용해 양자거리를 잴 수 있다는 새로운 사실을 제시했다. 이는 고체에서 양자거리 측정이 가능함을 처음으로 보인 연구다.

연구 이야기

□ 양자 거리가 무엇이고, 왜 측정해야 하는가?

양자 거리란 두 개의 양자 상태 사이의 양자 역학적인 거리를 정의하는 양으로, 두 양자 상태가 서로 비슷할수록 거리는 가까워지고, 두 상태가 서로 다를수록 거리가 멀어지는 특성이 있습니다. 양자 거리는 양자 정보 분야에서 중요한 개념들 중 하나인 신뢰도(fidelity)라는 양과 매우 밀접하게 연관되어 있습니다. 신뢰도란 두 개의 양자 상태가 얼마나 닮았는지를 측정하는 양으로, 양자 통신 과정에서 정보의 손실이 얼마나 있었는지를 정량화한 개념입니다.

양자컴퓨터의 성능은 신뢰도가 높을수록 좋아집니다. 즉, 신뢰도 값을 알아낼 수 있는 양자 거리의 측정은 양자컴퓨터 분야에서 중요한 의미를 지니며, 이번 연구를 통해서 고체에서도 양자 거리의 측정이 가능해지고, 고체를 양자컴퓨터 분야에 응용할 수 있는 가능성을 열어주었다고 할 수 있습니다.

고체물리 분야의 측면에서도 양자 거리의 측정은 큰 의미를 가집니다. 양자 역학적으로 전자는 파동으로 간주되며 고체 내에서 움직이는 전자의 파동은 블로흐 파라고 합니다. 블로흐 파는 기하학적인 구조를 가진다는 것이 알려져 있는데, 이는 블로흐 파에 곡률과 거리가 정의된다는 의미입니다. 곡률은 이 기하학적 대상에 구멍이 몇 개 있는지 결정하며, 최근 위상 물질들을 기술하는 핵심 개념입니다. 그리고 블로흐 파 사이의 거리에 해당하는 양이 바로 양자 거리입니다. 이 두 개의 개념들은 모두 고체의 에너지띠에는 드러나지 않고 블로흐 파에 숨겨져 있기 때문에 직접적으로 관측하기가 매우 힘든 양이지만 고체 물성에 큰 영향을 주기 때문에, 이를 측정할 수 있는 방법을 찾는 연구가 중요합니다.

□ 평평한 에너지띠 시스템이 무엇이고, 왜 이번 연구에서 다뤄졌는가?

고체의 에너지띠란, 블로흐 파가 가질 수 있는 에너지와 운동량 사이의 관계를 선으로 그린 것 입니다. 보통은 에너지가 운동량에 심하게 의존해서 곡선의 형태로 그려지는데, 주어진 고체의 격자 구조가 특수한 경우, 특정 에너지띠가 운동량에 대해 변하지 않는 평평한 직선으로 그려질 수 있고, 이런 띠를 평평한 에너지띠라고 부릅니다. 평평한 띠가 흥미로운 물리적 특성을 가짐은 오래 전부터 예측되었지만, 최근 실제로 평평한 띠를 가진 고체들이 발견되면서 (ex 뒤틀린 두층 그래핀- 그래핀 두 층이 서로 각도가 다르게 겹쳐 있는 구조,

카고메 격자 물질) 평평한 띠 시스템은 큰 관심을 받고 있습니다. 고체 내에서 전자들이 움직이고 있고 그 평균 속도가 있는데, 평평한 띠 시스템은 전자가 움직이는 속도가 정확히 0이 됩니다. 전자 속도가 0인 구조에서 어떤 독특한 물성이 생기는지가 물리학자들의 주된 질문입니다.

이들테면 곡률의 효과를 최소화할 수 있는 에너지 구조라서 양자 거리 효과가 크게 나타날 수도 있습니다. 자기장 하에서 평평한 에너지띠의 특성에 대한 체계적인 연구가 진행된 적이 없어서 이번 연구에서 다루게 되었습니다.

□ 어떻게 양자 거리의 측정법을 찾았는가?

평평한 에너지띠에서는 전자의 유효 질량이 무한대가 되어 란다우 준위 문제를 잘 기술할 수 없고, 양자거리가 0이 된다는 것이 정설이었습니다.

평평한 에너지띠는 보통 자기장을 걸어도 에너지 변화가 없지만, 특정 이차원 물질(평평한 에너지띠와 다른 에너지띠가 만나는 물질)에 자기장을 걸면 띠틈*으로 란다우 준위 퍼짐이 나타남을 발견했습니다.

* 고체에서는 전자가 가질 수 있는 에너지 값이 여러 개의 에너지띠로 나타나는데, 이웃한 에너지 띠 사이의 범위를 띠틈이라고 합니다.

먼저, 이러한 퍼짐이 평평한 에너지띠의 블로흐 파(파동함수)에 특이점이 있는 경우에만 일어난다는 사실을 파악했습니다. 특이점이 존재하는 경우, 양자 거리가 유한한 값을 가진다는 점에 착안해서, 특이성의 강도와 양자 거리의 상관관계를 유추하였습니다. 그리고 자기장 하에서 란다우 준위가 퍼진 정도가 블로흐 파 특이성의 강도와 비례함을 보임으로써 양자 거리와 에너지 띠 퍼짐 사이에 매우 밀접한 관계가 있음을 이론적으로 증명하였습니다. 실험적으로 자기장 하에서 에너지띠를 측정할 수 있으므로, 자기장이 걸린 시스템의 에너지 퍼짐으로부터 양자 거리를 실험적으로도 측정할 수 있습니다.

□ 이번 연구의 의미와 향후 응용 방안

이번 연구는 평평한 에너지띠를 가지는 고체물질에서, 자기장 하에서의 전자 거동에 대한 새로운 현상 및 원리를 발견하였고, 이를 통해서 고체 속 전자 파동함수의 양자 기하학적 성질에 관해서 더 깊은 이해를 할 수 있게 되었습니다. 2차원 물질의 평평한 에너지띠는 현재 매우 활발히 연구되고 있는 주제인데, 관련 후속 연구들에 새로운 시각을 제공할 것으로 기대됩니다. 그리고 이 새로운 물리 현상에서 양자거리라는 양이 매우 중요한 역할을 함을 밝힘으로써, 양자 거리가 고체물질에서 관측 가능한 매우 흥미로운 양임을 보였습니다. 이를 통해 양자 거리와 관련된 고체의 여러 물성을 밝히고 이를 실험으로 측정하기 위한 수많은 후속 연구들이 행해질 것으로 기대됩니다. 이는 기존에 베리 곡률 현상에 국한되어 있는

고체물질의 양자 기하학적 물성 연구에 새로운 지평을 열 수 있습니다. 또한, 고체에서 양자 거리를 측정하는 방법을 이용하여, 고체 시스템에서 양자 정보 분야를 연구할 수 있는 새로운 플랫폼을 활발히 탐색하게 되는 계기가 될 것으로 기대합니다.

또 양자컴퓨터는 정보처리의 기본 단위로 '큐비트'를 사용하고 있는데, 큐비트는 0과 1로 표시될 수 있는 두 개의 다른 상태가 양자얽힘이라는 독특한 상태로 결합돼 있습니다. 양자거리는 큐비트 사이의 결합을 기술하는 데 중요한 물리개념이며, 양자 컴퓨터의 성능을 결정할 수 있습니다. 이번에 밝힌 '양자거리'라는 개념은 양자컴퓨터의 후보 소재들을 탐색하는 데 널리 활용될 수 있을 것으로 기대됩니다.

용어 설명

1. 네이처(Nature)誌

- 자연과학 분야 세계최고 권위 학술지(Impact Factor : 42.778)

2. 에너지띠 구조와 평평한 에너지띠

- 고체에는 수많은 전자들이 존재하는데, 이런 전자들의 에너지를 파동수의 함수로 그린 선을 에너지띠라고 부른다. 일반적으로 고체에는 굉장히 많은 에너지띠들이 복잡하게 얽혀있다.
- 엄밀하게는 고체 내에서 움직이는 전자에 대한 슈뢰딩거 방정식을 풀면, 전자가 가질 수 있는 가능한 에너지 값을 알 수 있다. 이를 고유 에너지(eigen energy)이라고 한다. 고유 에너지를 결정 운동량(고체와 같이 공간상에서 주기성이 있는 시스템에서, 파동수에 대응되는 양을 결정 운동량(crystal momentum)이라고 부른다)에 대한 함수로 나타낸 것을 에너지 띠 구조(band structure)라고 한다.
- 고유 에너지가 결정 운동량의 값에 의존하지 않고 일정한 경우를 평평한 에너지띠라고 부른다.

3. 에너지 준위와 란다우 준위(Landau level)

- 양자역학적 시스템에서 입자가 가질 수 있는 불연속적인 에너지를 일반적으로 에너지 준위라고 한다.
- 자기장이 걸린 상태에서의 전자의 에너지 준위를 란다우 준위라고 한다.

4. 파동함수와 블로흐 파

- 양자역학적으로 물질은 입자가 아닌 파동의 형태를 지니고 있다. 이 파동은 일반적으로 복소수 값을 가지며, 주어진 시스템에 해당하는 슈뢰딩거 방정식의 해로 얻어지는데, 이를 파동함수라고 한다. 파동함수의 절대값의 제곱은 그 물질이 어떤 위치에서 관측될 확률 밀도를 의미한다.
- 고체에서 전자의 고유 파동함수를 블로흐 파라고 한다.

5. 양자 거리(Quantum distance)

- 블로흐 파는 운동량 공간 혹은 매개변수 공간에서 기하학적인 구조를 가지고 있다. 우리가 어떤 기하학적인 공간을 기술 할 때, 그 공간의 곡률과 그 공간 위에서 두 점 사이의 거리에 대한 정보를 알아야 한다. 블로흐 파에서 곡률에 해당하는 양이 베리 곡률이고, 거리에 해당하는 양이 양자 거리이다.
- 양자 거리는 두 블로흐 파(파동함수)가 서로 같을 때 0이 되고, 서로 직교할 때 1이 되며, 일반적으로 0과 1 사이의 값을 가진다.

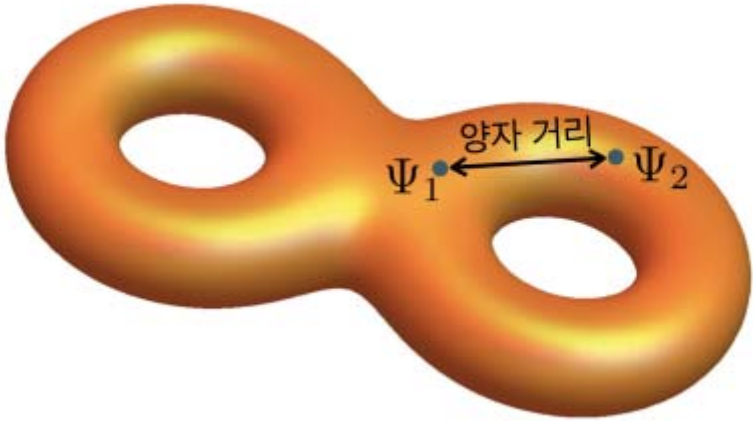
6. 전자 유효질량

- 고체 내의 전자는 수많은 원자들과 상호작용을 하기 때문에, 자유 공간에서의 전자와 거동이 매우 다르며 복잡하다. 이러한 고체 내의 전자를 근사적으로 자유 공간의 전자인 것처럼 기술하는 방법이 있다. 이 과정에서 실제 전자의 질량이 아닌 새로운 질량 값을 취하게 되는데, 이를 유효 질량이라고 한다. 유효 질량은 에너지띠를 결정 운동량에 대해서 두 번 미분한 값에 반비례한다.
- 평평한 에너지띠는 에너지가 결정 운동량에 대해 변하지 않으므로, 미분값이 0가 되어서 유효질량은 무한대가 된다.

7. 양자 컴퓨터

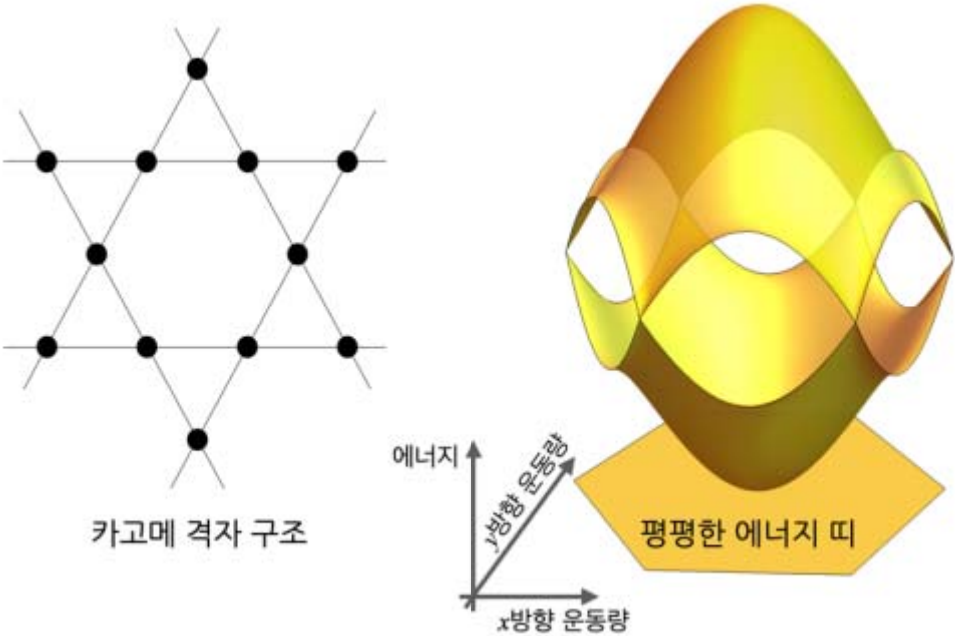
- 양자 중첩, 양자 얽힘과 같은 양자역학적인 특성을 이용하여 계산을 수행하는 컴퓨터를 의미한다. 현재 우리가 사용하는 고전적 컴퓨터에서는 정보를 0 또는 1을 이용한 비트로 표시하지만, 양자 컴퓨터에서는 양자 중첩을 이용한 큐비트를 이용하여 정보를 더 효율적으로 나타낸다. 소인수 분해와 같은 특정 문제들에 대해서 고전적인 컴퓨터와 지수적으로 차이가 날 만큼 빠른 계산 속도를 보일 수 있는 것으로 알려져 있다.
- 양자컴퓨터의 연산이 진행되는 동안 양자 상태는 결맞음을 최대한 유지해야 좋은데, 이 결맞음 정도를 측정하는 양을 신뢰도(fidelity)라고 한다. 신뢰도는 두 양자 상태가 닮을수록 1에 가까워지고, 다를수록 0에 가까워진다. 신뢰도는 양자 거리와 매우 밀접한 양으로 서로 반대되는 의미를 지니고 있다.

그림 설명



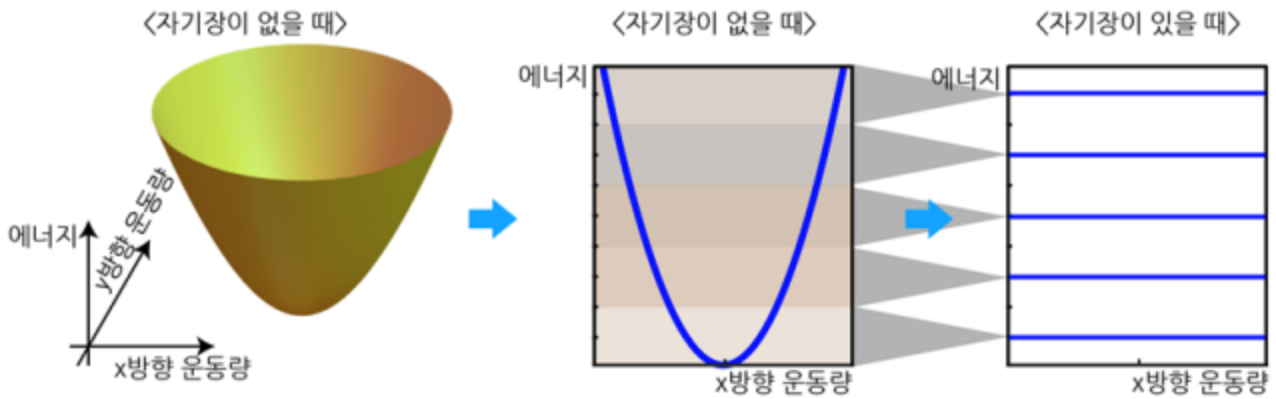
[그림 1] 전자의 파동함수인 ‘블로흐 파’ 와 양자 거리

고체 내에서의 전자의 파동 함수인 블로흐 파의 기하학적 구조. 양자 거리를 통해서 두 블로흐 파 사이의 양자 역학적인 거리가 얼마나 가까운지 또는 먼지 나타낼 수 있다.



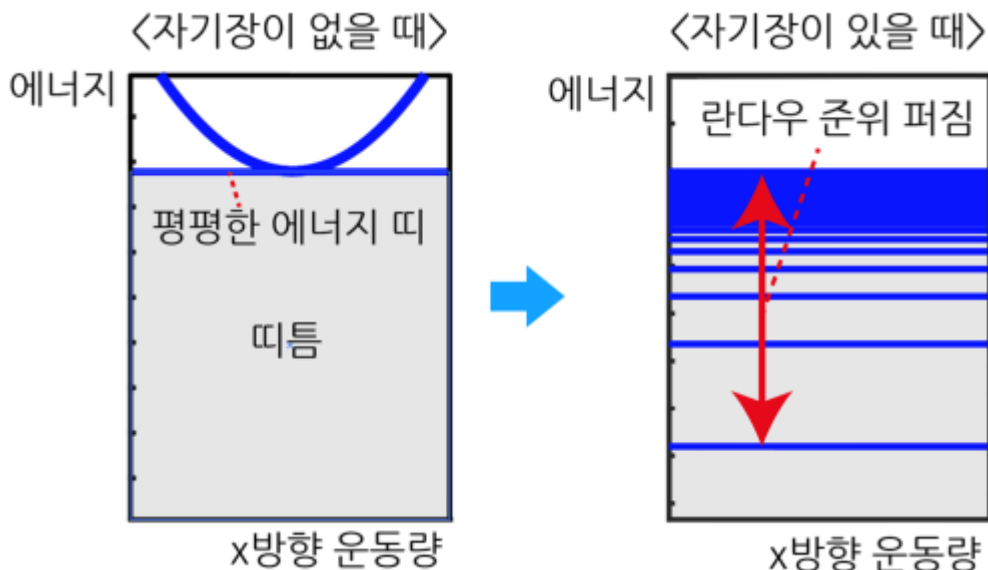
[그림 2] 평평한 에너지를 갖는 2차원 카고메 격자와 에너지 띠 구조
(왼쪽) 카고메 격자 구조. (오른쪽) 카고메 물질 속 전자들의 전체 에너지 띠 구

조. XY 평면은 운동량을, Z축은 에너지를 가리킨다. 아래쪽 평면이 평평한 에너지띠를 나타낸다. 연구진은 이 평평한 에너지띠의 독특한 란다우 준위를 연구했다.



[그림 3] 일반적인 고체의 에너지띠와 란다우 준위

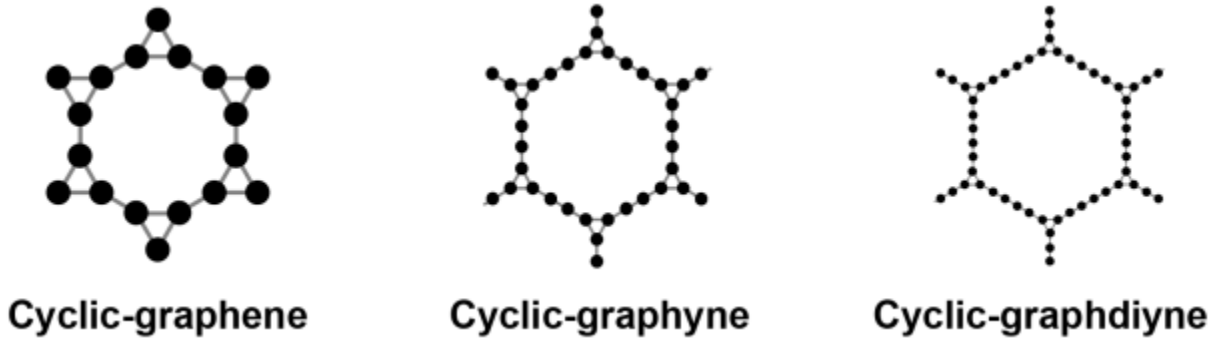
왼쪽은 자기장이 없는 경우의 일반적인 2차원 시스템의 에너지띠를 나타낸다. XY평면은 운동량, Z축은 에너지를 가리킨다. 가운데는 편의상의 목적으로 왼쪽의 에너지띠를 한 쪽 방향의 운동량에 대해서만 그린 것이다. 오른쪽은 같은 시스템에 자기장을 걸었을 때 란다우 준위를 나타낸다. 가운데의 연속적인 에너지 스펙트럼이 에너지 축 방향으로 균등하게 분할되어 오른쪽의 불연속적인 스펙트럼으로 변하게 된다.



[그림 4] 자기장 하에서 평평한 에너지띠의 란다우 준위 변화

왼쪽은 자기장이 없을 때의 평평한 에너지 띠 구조이다. 평평한 띠 아래쪽 회색 에너지 영역이 띠틈으로, 원래 전자는 이 띠틈에 해당하는 에너지를 가질 수 없다.

오른쪽은 같은 시스템에 자기장을 걸었을 때의 란다우 준위 그림이다. 란다우 준위가 띠틈으로 퍼져 나가서 전자가 띠틈에 해당하는 에너지를 가질 수 있게 되었고, 연구진은 이 퍼진 너비가 블로흐 파(전자의 파동함수)의 양자 거리에 의해 결정됨을 증명했다.



[그림 5] 자기장 하에서 란다우 준위 퍼짐을 관측할 수 있는 후보 물질들

이번 연구에서 제안된 란다우 준위 퍼짐을 관측하고 양자 거리를 측정할 수 있는 물질 후보들이다. 모두 탄소 원자 네트워크 형태이며, 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 단위 격자의 크기가 커진다. 이 물질들은 매우 평평한 에너지 띠 구조를 가지고, 블로흐 파가 유한한 양자 거리를 지니고 있어서 자기장을 걸었을 때 란다우 준위 퍼짐 현상이 예상된다.

연구자 이력사항

<양범정 IBS 강상관계 물질 연구단 교수, 교신저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 기초과학연구원(IBS) 강상관계물질 연구단
서울대학교 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6604
- E-mail : bjyang@snu.ac.kr



2. 학력

- 2001-2008 박사, 서울대학교 물리천문학부
- 1997-2001 학사, 서울대학교 화학부

3. 주요 경력사항

- 2019 - 현재, 서울대학교 자연과학대학 물리천문학부 부교수
- 2015 - 2019, 서울대학교 자연과학대학 물리천문학부 조교수
- 2010 - 2015, 일본 이화학연구소 박사후 연구원
- 2008 - 2010, 캐나다 토론토대학 물리학과 박사후 연구원

<임준원 IBS 강상관계 물질 연구단 책임연구원, 제1저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 기초과학연구원(IBS) 강상관계 물질 연구단 책임연구원
서울대학교
- E-mail : phyruth@snu.ac.kr



2. 학력

- 2006 - 2011, 박사, 연세대학교, 물리 및 응용물리과
- 2004 - 2006, 석사, 연세대학교, 물리 및 응용물리과
- 1999 - 2004, 학사, 연세대학교, 자연과학부

3. 주요 경력사항

- 2019 - 현재, 책임연구원, 강상관계물질 연구단
- 2017 - 2019, 연구조교수, 강상관계물질 연구단
- 2015 - 2017, Guest Scientist, Max-Planck Institute for Physics of Complex Systems, Germany
- 2011 - 2015, 박사후연구원, 고등과학원

<김규 원자력연구원 책임연구원, 공동저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 한국원자력연구원(KAERI) 신소재융합기술연구부
책임연구원
- 전 화 : 042-866-6511
- E-mail : kyoo@kaeri.re.kr



2. 학력

- 1999 - 2006, 박사 포항공과대학교 물리학과
- 1997 - 1999, 석사 포항공과대학교 물리학과
- 1993 - 1996, 학사 포항공과대학교 물리학과

3. 경력사항

- 2019-현재: 책임연구원 한국원자력연구원
- 2016-2019: 책임연구원 막스플랑크 한국/포스텍 연구소
- 2010-2016: 연구조교수 포항공과대학교
- 2009-2010: 박사후연구원 Rutgers University
- 2006-2008: 박사후연구원 포항공과대학교