키타예프 체인 모델과 마요라나 영준위 상태

DOI: 10.3938/PhiT.29.018

전상준 · 최광용

Kitaev's Chain Model and Majorana Zero Modes

Sangjun JEON and Kwang-Yong CHOI

A Majorana Fermion (MF), defined as a particle that is its own anti-particle, can be engineered in the form of quasi-particles appearing in condensed matter systems. Majorana zero modes (MZMs), topologically protected zero-energy states, can exist at the topological phase boundary of one- or two-dimensional systems. These MZMs follow non-Abelian statistics and can be used as a building block for fault-tolerant quantum computers. Here, we introduce the conceptual development of MZMs based on Kitaev's chain model and give a brief history of the experimental realization of MZMs.

들어가며

위상물질은 위상학적으로 불변량인 천 숫자(Chern number)와 위상학적 가장자리 상태(topological edge state)를 주요한 특징으로 가진다. 천 숫자는 벡터장과 비슷한 접속(connection)이란 수학적인 물체를 다양체(manifold) 위에 올려놓았을 때 그 접속에 대한 위상론적인 정보를 담고 있다.

접속의 개념을 이해하기 위해 다음과 같은 비유를 생각해 보자. 투명한 유리로 만들어진 평면 위에 눈금이 매겨진 볼링공을 폐곡선을 따라 굴린다. 유리 평면 아래에서 관찰자가 볼

링공의 경로를 따라가며 유리 바닥과 볼링공이 접촉하는 점의 눈금을 기록한다. 이때, 한 점에서의 눈금을 바로 옆의 다른 점의 눈금과 연결해주는 벡터장이 접속이다. 한편, 볼링공의 눈금의 기준점을 정하는 것에 임의성이 존재하는데 이를 게이지 자유도(gauge freedom)라 부른다. 물리적 실제성을 가지기 위해서는 게이지 불변량이 필요하다. 우리는 접속의 곡률(curvature)을 통해 측정 가능한 물리정보를 얻을 수 있다.

곡률은 폐곡선을 따라 본래의 출발점으로 돌아온 볼링공과 굴리기 전의 볼링공의 눈금을 비교하여 얻는다. 같은 점에서 비교하기 때문에 기준점을 바꾼다 해도 눈금의 차이는 변하지 않는다. 이때, 곡률은 폐곡선이 작으면 폐곡면의 넓이와 눈금의 차이가 비례한다.

전자계에서 전자는 역격자 공간에서 운동한다. 이때, k_1 운동량을 갖는 전자들의 위상이 k_2 운동량을 가지는 위상으로 변하는 베리접속(Berry connection)을 정의하고, 이로부터 베리곡률(Berry curvature)을 얻는다. 이런 베리곡률을 이용해 실제 천 숫자를 계산한다. 천 숫자가 물리적인 의미가 있는 가장 잘 알려진 예는 정수 양자 홀 효과(integer quantum Hall effect, IQHE)이다. IQHE에서 홀 전도도(전류와 전기장의 비)는 천 숫자로부터 계산할 수 있다.

벌크-가장자리(bulk-edge) 대응원리에 의하면, 천 숫자가 영(零)이 아니면, 위상학적 가장자리 상태가 존재한다. 실험적으로 위상학적 가장자리는 홀 효과 측정을 통해 확인할 수 있다. 전자계에서 블로흐(Bloch) 파동함수의 베리곡률로부터 양자 홀 효과, 스핀 홀 효과, 위상 절연체와 같은 위상 현상들이 발현한다. 최근에는 이런 위상현상을 포톤, 포논, 마그논, 엑시톤과 같은 무(無)전하 혹은 전하-중립(charge-neutral) 준입자로 확대하는 연구가 활발하다.

본 특집호에서는 전하-중립 준입자의 베리곡률로 인해 발현하는 위상현상을 다음의 내용을 중심으로 소개하고자 한다. 키타예프 체인 모델과 마요라나 영(零)준위 상태, 벌집구조 자성체의 디락 마그논과 위상적 성질, 스핀계의 열적 홀 효과, 이종접합구조에서 나타나는 스커미온(실공간 베리곡률 효과), 및 이차원 물질에서의 밸리 및 엑시톤 홀 효과를 포함한 5개의 원고들로 구성되어 있다. 먼저, 본 기고 글에서는 키타예프의

저자약력

전상준 교수는 2012년 서울대학교에서 물리학 박사학위를 취득하였다. 학위 후 미국 프린스턴 대학교에서 2017년까지 박사 후 연구원으로 재직하면서 위상 물질의 전자구조와 위상 초전도체 스핀 특성을 주사 터널링 현미경을 이용하여 연구하였다. 2018년 중앙대학교 조교수로 부임하였고 저차원 위상 물질에서 나타나는 전자구조와 자성구조를 연구하고 있다. (jsangjun@cau.ac.kr)

최광용 교수는 독일 Aachen 공과대학 물리학과 박사(응집물리실험 전공)로서, 현재 중앙대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (kchoi@cau.ac.kr)

체인 모델을 소개하고 이 모델을 실험적으로 구현한 대표적인 시스템을 살펴보겠다.

마요라나 페르미온

1925년 에르빈 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger)는 기본입자들의 양자역학적 거동을 기술하는 비 상대론적 파동 방정식을 제시하였다. 이 선형 편미분 방정식은 양자 역학의 기본 가정으로부터 물질의 상태를 기술하는 방법을 마련하여 고전역학으로 설명할 수 없었던 물질의 상태를 파동방정식의 해로 기술하였다. 1928년 폴 디랙(Paul Dirac)은 입자의 상대론적 파동 방정식을 기술하기 위하여 슈뢰딩거 방정식과 상대론적 에너지-질량 관계식을 융합한 선형 편미분 방정식을 제시하였다. 이 디랙 방정식으로부터 물질과 반물질, 스핀의 개념을 설명할 수 있게 되었고 표준모형의 기본입자들을 설명하는 방정식으로 자리매김하였다. 1937년 에토레 마요라나(Ettore Majorana)는 디랙 방정식을 유도하는 과정에서 실수해(real solution)만을 가지는 상대론적 파동 방정식을 발견하였고, 그의 이름을 따라 이 파동 방정식을 따르는 새로운 입자는 마요라나 페르미온(Majorana fermion)이라고 정의되었다. 마요라나 페르미온은 디랙 페르미온과 달리 물질과 반물질이 같아 구분할 수 없으며 중성 전하를 띠는 특성이 있다.

응집물질은 디랙 방정식으로 기술되는 기본입자인 전자들이 원자핵이 만들어낸 주기적인 퍼텐셜 안에서 움직이는 것으로 이해할 수 있다. 물질 안에서 상호작용하는 전자들의 다체계 효과로 인하여 다양한 준입자(quasiparticles)가 생성된다. 생성된 준입자들을 이용하여 물질의 전기적, 자기적, 광학적, 열적 특성을 기술할 수 있으므로 응집물질 안에서 준입자는 실재하는 입자처럼 작용한다. 특정 조건 안에서는 마요라나 페르미온과 같은 파동 특성을 가지는 준입자가 응집물질 안에서 생성될 수 있고, 특히 준입자의 에너지가 영이고 실공간 위 특정 위치에 국소화된 마요라나 영준위 상태(Majorana zero mode) 또한 발현될 수 있다. 1997년 알렉세이 키타예프(Alexei Kitaev)는 비가환 애니온(non-Abelian anyons)을 이용한 위상 양자컴퓨터의 개념을 정립하였다.^[1] 위상 양자컴퓨터는 범용 양자컴퓨터를 구현하는 한 가지 방법으로 물리적 수준에서 양자 얽힘 상태를 유지하여 무결함 양자컴퓨터(fault tolerant quantum computer)를 구현할 수 있다. 2001년 키타예프는 마요라나 영준위 상태가 응집물질 안에서 구현될 수 있음을 간단한 1차원 체인 모델을 이용하여 보여주었고, 이 영준위 상태가 비가환 애니온의 성질을 가지고 있어서 위상 양자컴퓨터의 큐비트(Qubit)로 사용할 수 있음을 밝혀내었다.^[2]

키타예프의 체인 모델을 실제 물질에서 구현하기 위하여 많

은 이론적 연구가 진행된 가운데,^[3] 2012년 초전도체로 덮인 나노선 위에서 마요라나 영준위 상태의 실험적 증거가 터널링 측정을 통하여 확인되었다.^[4] 그 후 2014년 자성 철 원자 체인에 유도된 위상 초전도체의 발견,^[5] 2019년 일차원 모서리 상태에 유도된 위상 초전도체의 발견^[6] 등으로 다양한 응집물리 시스템에서 키타예프의 1차원 모델이 구현될 수 있음을 보였다.

Kitaev's chain model

키타예프는 마요라나 영준위 상태를 이론적으로 구현할 수 있는 가장 간단한 체인 모델을 선보였다.^[2] 이 모델은 스핀이 없는 일차원 페르미온 시스템을 가정한 것이다. 키타예프 체인 모델은 일차원 격자 안에서 각 칸을 채우고 있는 전자들의 에너지(μ), 옆 칸과의 상호작용을 통한 에너지(t)와 함께, 초전도 효과에 의한 에너지(Δ)로 이루어져 있다.

$$H_K = \sum_j [-t(c_j^\dagger c_{j+1} + c_{j+1}^\dagger c_j) - \mu(c_j^\dagger c_j - \frac{1}{2}) + \Delta c_j c_{j+1} + \Delta^* c_{j+1}^\dagger c_j^\dagger]$$

스핀이 없는 일차원 시스템을 가정한 모델이기 때문에, 전자 간의 끌림이 원인인 초전도 효과를 해밀토니언에 넣는 가장 간단한 방법은 바로 옆 칸에 있는 전자와 쌍을 만드는 것이고 이는 일차원 p파 초전도체를 암시한다. 이차 양자화 형식에 따르면 페르미온 연산자($c_j^\dagger$ 와 c_j)는 j 번째 칸에 전자를 생성 또는 소멸하는 연산자이며 일반적으로 두 개의 마요라나 연산자($\gamma_{j\alpha}$)의 합으로 표기할 수 있다.

$$c_j = \frac{1}{2}(\gamma_{j1} + i\gamma_{j2}), \quad c_j^\dagger = \frac{1}{2}(\gamma_{j1} - i\gamma_{j2})$$

마요라나 연산자는 페르미온 연산자의 실수부와 허수부에 해당하며 다음과 같은 성질을 가지고 있다.

$$\{\gamma_{i\alpha}, \gamma_{j\beta}\} = 2\delta_{ij}\delta_{\alpha\beta}, \quad \gamma_{i\alpha}^\dagger = \gamma_{i\alpha}$$

이 성질로부터, 마요라나 연산자는 생성과 소멸이 같은 준입자를 기술하는 연산자임을 알 수 있다.

REFERENCES

- [1] A. Y. Kitaev, Ann. Phys. (N. Y.) **303**, 2 (2003).
- [2] A. Y. Kitaev, Physics-Uspekhi **44**, 131 (2001).
- [3] C. Nayak *et al.*, Rev. Mod. Phys. **80**, 1083 (2008).
- [4] V. Mourik *et al.*, Science **336**, 1003 (2012).
- [5] S. Nadj-Perge *et al.*, Science **346**, 602 (2014).
- [6] B. Jäck *et al.*, Science **364**, 1255 (2019).

Fig. 1. Two different ground states of Kitaev's chain model. Diagram of Topologically trivial state (top) and topologically non-trivial state (bottom). MFs make pairs with MFs within the same site in a topologically trivial ground state. MFs make pairs with the MFs in the neighboring site and leaves unpaired MFs at the end of the chain.^[7]

키타예프 체인 모델은 초전도 효과로 인하여 $2t = \pm \mu$ 인 경우를 제외하고는 초전도 간격(초전도 간격 안에서는 아무런 상태도 존재하지 않으므로 진공으로 여길 수 있다)이 존재하고 매개 변수 t , μ 의 선택에 따라 두 개의 서로 다른 바닥 상태를 가진다. 무한히 긴 체인의 경우 이 두 개의 바닥 상태는 구별할 수 없지만 유한한 길이의 체인은 체인의 양 끝에 쌍을 이루지 못하는 마요라나 상태가 남게 되어 두 바닥 상태를 위상적으로 구분 짓는다(그림 1). 체인의 양 끝에 존재하는 마요라나 상태는 대칭성에 의해 에너지가 영인 상태여서 마요라나 영준위 상태라고 부르며 초전도 간격에 의해 외부 잡신호로부터 보호되어 양자 얽힘 상태를 긴 시간 동안 유지할 수 있다.

전자스핀의 이중 결합으로 인하여 스핀이 없는 시스템을 가정한 키타예프의 체인 모델을 응집물질 시스템에서 구현하기 어려울 것으로 생각되었으나 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)과 지만 효과(Zeeman effect)를 이용하면 스핀이 없는 일차원 전자 밴드를 구현할 수 있음이 연구되었다. 이 기고 글에서는 키타예프 체인 모델을 성공적으로 구현하고 마요라나 영준위 상태를 측정할 반도체 나노선 플랫폼, 자성 원자 체인 플랫폼, 양자 스핀 홀 플랫폼을 소개하겠다.

Semiconducting nano-wire platform

스핀-궤도 결합이 강한 반도체 나노선에 초전도 효과를 유도한 후, 자기장을 나노선과 평행한 방향으로 인가하여 일차원 위상 초전도체를 만들 수 있음이 제안되었다. 마요라나 영준위 상태는 이 나노선의 끝부분에 생성될 것으로 예상하였으며, 전기 전도도 측정에서 영 에너지에서 터널링 전도율(tunneling conductance)이 $2e^2/h$ 로 양자화될 것으로 예상하였다. 라시바(Rashiba) 스핀 궤도 결합으로 인하여 유효 자기장 B_{so} 가 나노선에 수직인 방향으로 생성되고, 운동량 공간상에서 스핀-다운 밴드는 왼쪽으로 스핀-업 밴드는 오른쪽으로 움직여 $k=0$ 에서 서로 교차하게 된다. 외부 자기장이 나노선과 평행한 방향으로 가해지면, 교차점에서 에너지 간격이 발생되고, 페

Fig. 2. Engineering MZMs in a semiconducting nanowire. The direction of the effective magnetic field from the spin-orbit coupling is perpendicular to the axis of nanowire. The spin-dependent electronic bands of nanowire shift in the momentum space and open a helical gap axis at $k=0$ by the magnetic field parallel to the nanowire axis. The SEM image displays InSb nanowire device for generating MZMs and the detected zero-bias peak in the tunneling measurements.^[4]

르미 준위를 이 간격 안에 놓음으로써 스핀이 없는 일차원 전자 시스템을 구현할 수 있음이 이론적으로 제안되었다(그림 2).

마요라나 영준위 상태의 첫 번째 실험적인 증거는 초전도체인 NbTiN으로 덮인 InSb 나노선에서 발견되었다.^[4] 200 mT의 외부 자기장을 InSb 나노선 방향으로 인가하고 게이트 전압 조절을 통하여 나노선의 페르미 준위가 에너지 간격 안에 위치하도록 조정하였을 때, 영 에너지에서 터널링 전도율이 증가하는 것을 확인하였다. 영준위 상태는 자기장의 방향에는 민감하게 영향을 받지만, 자기장의 세기, 게이트 전압 세기에는 민감하지 않아 앞선 이론에서의 예상과 일치하는 특성을 보였다. 그러나 영준위 상태의 전도율이 양자화되지 않은 점과 영이 아닌 초전도 간격의 전도율(soft gap)로 인하여 측정된 영 에너지 상태의 위상적 특이성에 문제가 제기되었다. 그러나 나노선 위에 결맞음 방식(epitaxial growth)으로 길러진 초전도 박막을 통하여 나노선에 유도된 초전도 효과를 최적화하였고 앞선 실험에서 제기된 문제점을 해결하였다.^[8]

위상 큐비트(qubit)의 생성과 조작을 목표로 다중의 마요라나 영준위 상태를 생성할 수 있는 다양한 형태의 나노선 소자를

REFERENCES

- [7] M. Franz, Nat. Nanotechnol. **8**, 149 (2013).
- [8] H. Zhang *et al.*, Nature **556**, 74 (2018).

설계하고 측정하는 연구가 진행되고 있으며,^[9,10] 스핀-궤도 결합이 강한 이차원 나노 박막에 초전도 상태를 유도하고 반도체 공정과 같은 나노 소자 제작을 통하여 나노선 네트워크를 구성하는 연구 또한 진행되고 있다.^[11]

Magnetic atomic chain platform

초전도 물질 안에 자성을 띤 원자가 있을 때, 자성 원자 주변에 국소적으로 한 쌍의 속박 상태가 초전도 간격 안에 생성된다(Yu-Shiba-Rusinov state).^[12] 속박 상태의 에너지는 자성 원자와 초전도체를 이루는 원자 사이의 상호작용 크기에 의해 결정된다. 이러한 자성 원자가 초전도체 위에서 일차원 원자 체인을 형성하게 되면, 각 원자가 생성하는 속박 상태가 초전도 간격 안에서 일차원 분산을 형성하고, 이를 시바 띠(Shiba band)라고 부른다. 자성 원자 사이의 강한 교환 에너지로 인하여 페르미 에너지에 가까운 한 종류의 스핀이 시바 띠를 형성하는 데 주도적인 역할을 하므로 스핀이 없는 일차원 초전도체를 형성할 수 있다.^[13] 시바 띠는 초전도체의 물질-반물질 대칭성에 의해서 에너지가 영인 지점에서 서로 교차하며, 자성 원자 체인의 자기질서가 평행하지 않으면(강자성 자기질서와 반강자성 자기질서의 경우 스핀의 방향이 평행하다) 교차점에서 위상적으로 특이한 초전도 간격이 생성될 것으로 예상하였다.^[13]

초고진공(ultra high vacuum) 안에서 철 원자로 이루어진 자성 원자 체인을 초전도체인 납 결정 위에 구현하였고 주사 터널링 현미경(scanning tunneling microscopy)을 이용하여 철 원자 체인의 구조 분석과 전자구조 분석이 이루어졌다. 원자 수준의 공간 분해능으로 터널링 분광 측정(tunneling spectroscopy)을 수행하여 전자밀도를 측정한 결과, 철 원자 체인의 양 끝에서 국소화된 영준위 상태를 발견하였다.^[5] 그러나 측정된 영준위 상태가 이론에서 예측된 마요라나 상태임을 보이기 위하여 철 원자 체인의 자기질서를 측정한 결과, 예상과 달리 철 원자 체인은 강자성 자기질서를 가지는 것으로 확인되었다. 스핀 분극 측정에 참여한 저자 또한 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 다양한 방법으로 여러 철 원자 체인의 자기질서를 측정하였지만, 통계적으로 모든 철 원자 체인은 강자성 자기질서를 가지는 것으로 확인되었다. 이론과 실험의 불일치를 해결하는 실마리는 반복된 측정 과정에서 초전도체인 납 결정이 보여준 특이한 스핀 분극이었다. 이 측정을 통하여 납 결정이 매우 강한 스핀-궤도 결합을 가지고 있음을 실험적으로 확인하였고, 철 원자 사이의 강자성 교환 상호작용과 초전도체의 스핀-궤도 결합이 융합하여 위상적으로 특이한 초전도체가 형성됨을 밝혀내었다(그림 3).

Fig. 3. A diagram for STM measurement of topological superconductivity induced in an atomic magnetic chain. Strong exchange energy between magnetic atoms makes the single spin band cross the Fermi level with a high probability. Strong spin-orbit coupling in the superconductor, together with the spinless 1D electron band, results in a formation of a topological superconductor and MZMs at the end of the chain. The STM spectroscopy resolves the spatial distribution of MZMs appearing on a magnetic chain.^[5]

마요라나 영준위 상태는 위상의 변화가 있는 경계에서 나타나므로 경계에 속박된 위상적으로 일반적인 상태와 구별이 쉽지 않다. 이 문제를 해결하기 위하여 저자는 극저온에서 90 μ V의 분해능으로 영준위 상태를 분석하여 물질-반물질 대칭성을 확인하였고^[14] 에너지 분해능을 가지는 스핀 분극 측정을 통하여 철 원자 체인의 끝에서 측정된 영준위 상태가 항상 최대 스핀 분극을 가지는 것을 발견하였다.^[15] 이는 철 원자의 배경 스핀 분극으로는 영준위 상태의 스핀 분극을 정규화할 수 없음을 보인 것으로 마요라나 영준위 상태만이 가지는 특성으로부터 이해할 수 있다.^[14]

1D helical edge platform

이차원 위상 절연체인 양자 스핀 홀(quantum spin Hall) 시스템에서는 경계에서 위상적으로 보호된 나선형의 일차원 가

REFERENCES

- [9] D. Aasen *et al.*, Phys. Rev. X **6**, 031016 (2016).
- [10] H. Zhang *et al.*, Nat. Commun. **10**, 1 (2019).
- [11] F. Nichele *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 1 (2017).
- [12] A. Yazdani *et al.*, Science **275**, 1767 (1997).
- [13] S. Nadj-Perge *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 020407 (2013).
- [14] B. E. Feldman *et al.*, Nat. Phys. **13**, 286 (2016).
- [15] Sangjun Jeon *et al.*, Science **358**, 772 (2017).

Fig. 4. A diagram for engineering MZMs using superconducting helical edge states of bismuth bilayer. A trivial topological gap(Δ_H) is generated by the hybridization of helical edge states and the magnetic states. The size of the trivial gap and the existence of MZMs strongly depends on the direction of the magnetization of Fe cluster.^[6]

장자리 상태(helical edge state)가 존재한다.^[16] 초전도 근접효과를 이용하여 가장자리 상태에 초전도 상태를 유도하게 되면, p-과 초전도체와 비슷한 위상 초전도체가 생성된다.^[17] 초전도 효과가 유도된 나선형 가장자리 상태와 위상적으로 일반적인 간격이 만나는 위상적 경계(topological phase boundary)에서 마요라나 영준위 상태가 생성될 것으로 예상하였다. 그러나 지금까지 알려진 양자 스핀 홀 물질이 많지 않고, 위상적 경계를 만들 수 있는 소자 제작에 어려움이 있어 실험적으로 구현하기에는 어려움이 있었다.

비스무트 이층(bismuth bilayer) 구조는 이론적으로 가장 먼저 알려진 양자 스핀 홀 시스템이다.^[18] 비스무트 이층 구조의 가장자리에서 강한 스핀-궤도 결합을 하는 일차원 전자구조가 존재함이 주사 터널링 현미경을 통한 비스무트 결정 측정에서 밝혀졌으며,^[19] 고차원 위상 초전도체(higher order topological insulator)의 개념 정립과 함께 삼차원 비스무트 결정은 위상적으로 보호된 일차원 모서리 상태(Hinge state)를 가짐이 보고되었다.^[20] 초전도체인 니오븀 결정 위에 길러진 비스무트 박막에서도 스핀-궤도가 결합한 일차원 전자 상태가 가장자리에서 존재하고, 이 가장자리 상태(edge state)에 초전도 상태가

유도됨을 실험적으로 보였다.^[6] 자성 철 원자의 클러스터와 비스무트의 모서리 상태가 만나는 지점에서 영준위 상태가 측정되었고 스핀 분광 측정을 통하여 영준위 상태가 위상적으로 특이한 상태임을 밝혀내었다(그림 4).

실험을 계획할 당시에는 이론 제안에 따라 철 원자 클러스터가 가지는 자성 간격을 이용하여 위상 경계를 형성하고 마요라나 영준위 상태를 생성하는 것이 목표였으나, 실제 구현된 시스템에서 철 원자 클러스터는 비스무트 모서리 상태와 융합하여(hybridize) 위상적으로 일반적인 간격을 형성하는 것으로 측정되었다. 철 원자 클러스터의 자화 방향과 마요라나 영준위 상태의 존재 여부가 밀접한 관계가 있음을 보임으로써 기존의 이론 모형을 확장하고 마요라나 영준위 상태를 구현하는 새로운 방법을 제시하였다.

마치며

마요라나 영준위 상태 연구는 마요라나의 수학적 모델에 의해 예견된 입자가 응집물질 상에서 준입자의 형태로 존재할 수 있음을 보였다는 데 그 의의가 있다. 그러나 마요라나 본인은 예상하지 못하였던 마요라나 준입자의 비가환 통계 특성과 이를 바탕으로 하는 위상 양자 컴퓨터의 개념이 이 연구 분야를 활성화하였다. 새로운 응집 물리 이론과 개념의 정립에 따라 저차원 복합 구조의 제작과 측정이 지속해서 보고되고 있으며, 지금까지 예상하지 못한 물리현상의 발견을 통해 이론의 확장과 정교화가 이루어지는 선순환 구조가 이어지고 있다. 또한, 지금껏 응집 물리의 독립적인 주제로 연구되었던 초전도 현상, 자성 현상, 위상 현상, 강상 관계, 다체계 효과의 통합적인 이해가 요구되어 응집물질을 연구하는 새로운 패러다임을 만들고 있다.

REFERENCES

- [16] B. Andrei Bernevig *et al.*, Science **314**, 1757 (2006).
- [17] Liang Fu *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 161408 (2009).
- [18] S. Murakami, Phys. Rev. Lett. **97**, 236805 (2006).
- [19] I. K. Drozdov *et al.*, Nat. Phys. **10**, 664 (2014).
- [20] F. Schindler *et al.*, Nat. Phys. **14**, 918 (2018).