각분해광전자분광을 활용한 바일금속 연구

DOI: 10.3938/PhiT.27.025

허민재·김근수

Study of Weyl Metals by Using Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy

Minjae HUH and Keun Su KIM

The theory of topological order classifies materials into the topologically trivial and the topologically nontrivial, leading to the discoveries of topological insulators and of Dirac and Weyl metals. Experimental characterization of the band structures of such materials is important not only to identify a novel class of topological matter but also to systematically investigate topological phase diagrams. Angle-resolved photoemission spectroscopy is one of the experimental techniques with which one can directly measure the band structure of solids. In this article, we introduce how to exploit angle-resolved photoemission spectroscopy to study the topological quantum states of matter, primarily focusing on Weyl metals.

들어가는 글

고체물리학에서는 고전적인 밴드이론(band theory)에 근거하여 물질을 도체와 부도체로 구분해 왔다. 최근 응집물질물리학계에서는 고체의 밴드 구조상에 숨은 위상 질서와 그 물리적 의미에 대한 이해가 깊어지면서 물질을 위상학적으로 평범한 상태(topologically trivial state)와 특이한 상태(topologically nontrivial state)로 구분한다. 위상 물질들은 꼬인 위상 질서에

Table 1. Topological quantum states of matter selected for two dimension (2D) and three dimension (3D) with example materials.

Dimension	Topological phase	Materials
2D	Dirac semimetal	Graphene
	Topological insulator	HgTe quantum well
	Weyl semimetal	-
3D	Dirac semimetal	Cd ₃ As ₂ , Na ₃ Bi
	Topological insulator	Bi ₂ Se ₃ , Sb ₂ Te ₃
	Type I Weyl semimetal	TaAs, TaP, NbP
	Type II Weyl semimetal	WTe ₂ , MoTe ₂ , PdTe ₂

의해 물질의 끝단 혹은 경계면에 독특한 끝머리 상태가 존재하며, 이를 위상 끝머리 상태(topological edge state)라 부른다. 위상 끝머리 상태는 특정 대칭성으로 보호되며 외부 섭동에 의해 쉽게 변형되지 않기 때문에 물질의 전기적, 광학적 성질에 지대한 영향을 준다. 따라서 고체 물질의 위상 상태를 체계적으로 분류하고 그 물성을 이해하는 것은 학문적 관점뿐만 아니라 응용적 관점에서도 매우 중요하다.

지난 10년간 학계의 지속적인 노력에 힘입어 물질의 위상 상태가 달라 서로 구분 가능한 다양한 위상 상태들이 이론적으로 예측되었으며, 그 중 전부는 아니지만 상당수가 실제 물질에서 발견되었다. 지금까지 알려진 대표적인 위상 양자 상태는 표 1에 요약한 바와 같이 2차원 위상 절연체(topological insulator), 3차원 위상 절연체, 3차원 디랙 금속(Dirac metal), 3차원 바일 금속(Weyl metal), 2형 바일 금속 등을 꼽을 수 있다. 이들의 밴드 구조에는 고유의 현상론적 특징이 존재하기 때문에, 밴드 구조 측정이 가능한 다양한 실험 기법을 활용하여 위상 물질을 연구할 수 있다.

각분해광전자분광은 우수한 운동량 분해능 덕분에 고체 물질의 밴드 구조를 직접적으로 측정하는 실험 기법 중 하나이다. 초고진공(ultrahigh vacuum) 환경에서 그림 1과 같이 극자의선(ultraviolet) 혹은 연엑스선(soft x-ray) 파장을 갖는 포톤을 조사할 때 방출되는 광전자의 운동에너지와 각도를 전자분석기로 계측한다. 간단한 에너지 보존과 운동량 보존 법칙에 근거하여 운동에너지를 결합에너지로 각도를 결정운동량으로 환산하면, 고체 초기 상태의 에너지와 운동량의 상관관계, 즉 밴드

저자약력

허민재 연구원은 포항공과대학교에서 학사 학위(2016)를 취득하였으며, 동 대학원 통합과정 신분이자 연세대학교 물리학과와 참여연구원으로 재직 중이다. (minjae.huh@postech.ac.kr)

김근수 교수는 연세대학교 물리학과 이학박사(2010)로 미국 로렌스버클리연구소 박사후 연구원을 거쳤다. 2013년부터 포항공과대학교 물리학과 교수로 재직하였고, 2017년부터 연세대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (keunsukim@yonsei.ac.kr)

Fig. 1. Schematic diagram of angle-resolved photoemission spectroscopy. Photons are shed on a sample to yield photoelectrons, and their energy and angle are recorded with the hemispherical electron analyzer. The typical form of data, which is the energy dispersion with respect to the crystal momentum, is shown on the bottom right.

분산에 관한 정보를 얻을 수 있다. 최근 전자분석기의 측정 효율과 분해능의 비약적 발전에 힘입어 고체의 밴드구조 분석에 널리 활용되고 있으며, 특히 밴드 구조에 독특한 특징을 갖는 위상물질 연구에 유용하다.

본 소개 논문에서는 바일 금속을 중심으로 최근 주목받고 있는 다양한 위상 물질의 밴드 구조를 비교 대조하여 소개하고자 한다. 또한 밴드 구조상에 나타나는 현상론적 특징을 확인하기 위한 유용한 실험기법 가운데 하나로서 각분해광전자분광을 어떻게 활용하는지 소개하고자 한다. 이어 2차원 바일 금속 발견의 가능성을 소개하고, 위상물질 연구에 대한 간략한 전망을 덧붙이며 글을 마무리하겠다.

2차원 디랙 금속과 3차원 위상 절연체

고체에 존재하는 위상 질서가 최근 주목받게 된 계기는 바로 그래핀의 발견이다. 그래핀은 탄소 원자들이 육각벌집 모양의 평면 구조를 이루는 2차원 물질이다. 탄소는 스핀-궤도 상호작용의 크기가 매우 작기 때문에 이를 무시하는 경우 그래핀을 2차원 디랙 금속으로 분류할 수 있다. 그래핀은 브릴루앙 영역(Brillouin zone)의 모서리(K와 K' 지점)에서 전도 밴드(conduction band)와 가전자 밴드(valence band)가 점으로 만난다. 그 주변에서 에너지와 운동량 분산 관계는 선형으로 나타나며, 이러한 밴드 구조를 “디랙 원뿔(Dirac cone)”이라 부른다(그림 2(a)). 그래핀의 디랙 원뿔은 각분해광전자분광 측정을 통해 직접적으로 확인할 수 있다. 그림 2(c)는 실리코카바이드

Fig. 2. Schematic illustration of Dirac cones in (a) graphene and (b) the surface state of 3D topological insulators. Blue and red arrows represent spin and pseudospin directions, respectively.^[1] (c) ARPES spectra of graphene taken along two orthogonal in-plane directions.^[2] (d) ARPES intensity maps of graphene taken at -0.05 eV and with different light polarizations.^[3] HP is the linear horizontal polarization, VP is the linear vertical, and LCP and RCP are left and right circular polarizations, respectively.

기판의 표면에 성장된 단층 그래핀의 밴드구조를 측정한 실험 결과이다. 두 개의 서로 직교한 평면 방향으로 측정된 밴드 분산이 모두 선형으로 나타남을 확인할 수 있다.

그래핀의 디랙 원뿔 밴드에 숨은 위상 질서는 유사스핀(pseudospin)의 개념을 도입하여 쉽게 이해할 수 있다. 유사스핀은 그래핀에 존재하는 부분격자(sublattice) 간의 위상차에 해당한다. 그래핀 디랙 원뿔의 유사 스핀의 방향은 각각 디랙 점(Dirac point)을 중심으로 운동량과 평행하거나 반 평행하게 돌아가는 질서를 가지고 있다. 특정 실험 조건에서 이 유사스핀의 방향이 상태 함수의 홀짝성(parity)을 결정하기 때문에, 편광된 포톤을 이용하면 홀짝성 선택 규칙(selection rule)에 따라 스펙트럼 세기에 강한 변조 효과를 유발할 수 있다. 이 효과를 이용하여 그림 2(d)와 같이 그래핀의 밴드 구조에 숨겨진 유사스핀의 질서를 관찰할 수 있는 것이다.

그래핀과 유사한 밴드 분산과 위상 질서는 위상 절연체의 끝머리 상태에서 찾아볼 수 있다. 할데인(Haldane)의 모델에 따르면 그래핀의 디랙 점에 밴드갭(band gap)이 발생할 때,

REFERENCES

- [1] E. Rotenberg, Nat. Phys. **7**, 8 (2011).
- [2] A. Bostwick *et al.*, NJP **9**, 385 (2007).
- [3] Y. Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 166803 (2011).

Fig. 3. (a-c) Band dispersion of graphene with the band gap near the Dirac points in the Haldane model.^[4] The up and down arrows represents pseudospin directions along the vertical axis of graphene. (d) Real-space distribution of topological edge states in 3D topological insulator.^[5] (e) ARPES spectra taken from a 3D topological insulator, Bi₂Se₃.^[6] BCB and BVB are bulk conduction and bulk valence bands, respectively, and SSB shows the surface state band. (f) Spin-resolved ARPES data taken from the SSB of Bi₂Se₃, where spin polarization along the axis orthogonal to crystal momentum is plotted.

유사스핀이 그림 3(a)-(c)와 같이 정렬된 상황을 생각할 수 있다.^[4] 공간반전 대칭성(space-inversion symmetry)이 깨진 경우 K와 K'에 서로 같은 방향의 유사스핀이 정렬되어 위상학적으로 평범한 상태가 된다(그림 3(b)). 반면 시간역전 대칭성(time-reversal symmetry)이 깨진 경우 K와 K'에 서로 반대 방향의 유사스핀이 정렬되어 위상학적으로 특별한 상태 또는 위상 절연체 상태가 된다(그림 3(c)).

3차원 위상 절연체의 위상 끝머리 상태는 표면의 2차원 밴드이므로 그 밴드 구조와 위상 질서를 그래핀과 비교하기에 용이하다. 3차원 위상 절연체의 위상 끝머리 상태의 밴드 구조는 기본적으로 그래핀과 유사하게 선형의 밴드 분산을 갖는 디랙 원뿔 모양이다(그림 2(b)). 하지만 그래핀의 경우 실제 스핀은 거의 겹쳐 있으나 유사스핀이 K와 K' 지점에서 반대로 회전하는 질서를 형성하고 있는 반면, 스핀-궤도 상호작용이 강한 3차원 위상 절연체의 한쪽 표면에는 공간반전 대칭성이 깨져 유사스핀이 아닌 실제 스핀이 회전하는 질서를 갖게 된다(그림 2(b)). 그 반대쪽 표면에는 스핀이 정반대 방향으로 정렬하여 회전하는 위상 끝머리 상태가 짝으로 존재하여(그림 3(d)), 시스템 전체로 보면 스핀이 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 디랙 원뿔 쌍이 겹쳐진 셈이다.

각분해광전자분광 실험에서 광전자가 비탄성 충돌을 겪지 않고 고체를 탈출하는 깊이(escape depth)는 표면으로부터 서너 층 수준에 불과하다. 따라서 실제 실험에서 한쪽 표면의 위상 끝머리 상태는 측정할 수 있지만, 그 반대쪽 표면의 위상 끝머리 상태는 관찰할 수 없다. 3차원 위상 절연체로 잘 알려진 Bi₂Se₃의 위상 끝머리 상태에 대한 각분해광전자 분광 결과를 보면(그림 3(e)), 덩어리(bulk)의 전도 밴드(BCB)와 가전자 밴드(BVB) 사이에 선형의 밴드 분산을 보이는 표면 위상 끝머리 상태의 밴드(SSB)를 확인할 수 있다.

2차원 위상 끝머리 상태의 밴드 구조에 존재하는 스핀 질서는 “스핀각분해광전자분광”을 통해 측정할 수 있다. 통상적인 각분해광전자분광 실험과 같이 광전자의 에너지와 각도를 측정 한 후, 스핀 검출기를 통과시킴으로써 스핀 방향에 대한 정보를 추가적으로 얻어낸다. 이를 활용하여 Bi₂Se₃의 표면 끝머리 상태의 스핀 방향을 측정하면 양의 기울기를 갖는 밴드와 음의 기울기를 갖는 밴드의 스핀이 서로 반대 방향으로 정렬되어 있음을 확인할 수 있다(그림 3(f)).

3차원 디랙 금속과 3차원 바일 금속

3차원 디랙 금속은 스핀-궤도 상호작용을 고려하지 않은 그래핀의 3차원 유사물이라 할 수 있다. 이들은 그래핀이나 위상 절연체의 끝머리 상태와 유사하게 디랙 원뿔 모양의 밴드 구조를 갖는다. 다만 그래핀의 경우 디랙 점을 중심으로 2차원 평면 방향으로만 선형의 밴드 분산을 갖는 반면, 3차원 디랙 금속은 그림 4(a), (b)와 같이 세 가지 모든 운동량 방향으로 선형의 밴드 분산을 갖는다. 따라서 이러한 3차원 디랙 금속의 특징을 실험적으로 확인하기 위해서는 세 가지 모든 운동량 방향으로 밴드 분산을 측정해야 한다.

3차원 덩어리 시료에서 표면에 평행한 방향의 밴드 분산뿐만 아니라 표면에 수직인 방향의 밴드 분산도 각분해광전자분광으로 측정할 수 있다. 각분해광전자분광 실험에서 광원의 에너지는 초기 전자 상태의 표면 수직 방향 운동량을 결정한다. 따라서 광원의 에너지를 변화시켜가며 각분해광전자분광 실험을 수행하면 표면에 수직 방향 밴드 분산도 관찰할 수 있는 것이다. 이러한 실험을 위해서는 광원의 에너지를 연속적으로 가변가능한 방사광가속기가 필수적이다.

방사광가속기와 각분해광전자분광 실험을 통해 3차원 디랙

REFERENCES

- [4] M. A. Sentef *et al.*, Nat. Comm. **6**, 7047 (2015).
- [5] C. Jozwiak *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 165113 (2011).
- [6] Y. L. Chen *et al.*, Science **329**, 659 (2010).
- [7] C. Jozwiak *et al.*, Nat. Phys. **9**, 293 (2013).

Fig. 4. (a-b) Band structure of 3D Dirac metals, where band dispersions are linear along three orthogonal momentum directions.^[8] (c) ARPES intensity map of Cd_3As_2 taken at the Fermi energy. The solid red lines indicate the bulk Brillouin zone, and the dashed red lines shows the projection on to the 2D Brillouin zone. (d-e) ARPES spectra of Cd_3As_2 taken along the two orthogonal momentum directions, respectively.^[9]

금속의 특징이 처음 확인된 물질은 Cd_3As_2 와 Na_3Bi 이다. 각분 해광전자분광으로 측정한 Cd_3As_2 의 3차원 페르미 면(Fermi surface)을 살펴보면 한 쌍의 디랙 점이 표면에 수직한 운동량 방향으로 분리되어 나타난다(그림 4(c)). 이 디랙 쌍 가운데 하나를 중심에 두고 직교한 세 운동량 방향으로 밴드 분산을 측정하면, 그림 4(b)와 유사한 디랙 원뿔이 나타남을 확인할 수 있다(그림 4(d), (e)). 3차원 디랙 금속의 디랙 원뿔에도 그래핀과 유사한 유사스핀 질서가 존재하며, 편광된 광원을 이용하면 흡착성 선택 규칙에 따라 유사스핀 질서의 존재를 확인할 수 있다.

3차원 디랙 금속의 디랙 점에는 2차원 디랙 금속과 다른 중요한 특징이 있다. 시간역전 대칭성과 공간반전 대칭성을 고려한 2차원 디랙 금속에서 파울리 스핀 행렬의 수직방향 성분이 유한한 경우 그림 3(a)-(c)와 같이 디랙 점에 밴드 갭이 존재한다. 하지만 3차원 디랙 금속의 경우 파울리 스핀 행렬의 세 방향 성분 모두로 표현되므로 시간역전 대칭성 또는 공간반전 대칭성이 깨지더라도 밴드갭이 발생하는 대신, 그림 5(a)와 같이 각각의 디랙 점이 운동량 방향으로 분리되어 한 쌍 이상의

Fig. 5. Schematic illustration of (a) a Dirac cone with four-fold degeneracy and (b) a pair of Weyl cones with twofold degeneracy.^[10] Red and blue arrows represents opposite spin directions, respectively. (b) Calculated Fermi surface of $\text{TaAs}(001)$. The open and closed circles are a pair of Weyl points, and the orange lines correspond to the surface Fermi arcs that connect each pair of Weyl points. (c) Experimental Fermi surface map of $\text{TaAs}(001)$ taken with the surface-sensitive condition. (d) Magnified Fermi arcs, compared with those taken with more bulk-sensitive conditions (bottom panel).^[11]

바일 점(Weyl point)을 형성하게 된다.

디랙 점과 바일 점은 공통적으로 3차원 운동량 공간에서 모든 방향으로 선형의 밴드 분산을 갖지만, 중요한 차이점은 스핀 질서와 축퇴성(degeneracy)에 있다. 현상론적으로 이들을 쉽게 구분하는 방법은 교차점(crossing point)에 겹쳐진 밴드의 개수를 세는 것이다. 하나의 디랙 점에는 그림 5(a)와 같이 전도 밴드와 가전자 밴드가 만나 두 개의 겹침이 발생하며, 스핀이 서로 반대 방향으로 회전하는 두 겹의 밴드가 추가적으로 겹쳐져 있다. 다시 말해 하나의 디랙 점에는 총 4겹의 밴드 겹침(fourfold degeneracy)이 존재하는 것이다. 반면 공간반전 대칭성 혹은 시간역전 대칭성이 깨지면 스핀 축퇴성이 사라지게 되어 4겹의 밴드가 겹친 디랙 점 하나가 한 쌍의 바일 점으로 분리된다(그림 5(a)). 각각의 바일 점에는 오로지 전도 밴드와 가전자 밴드가 만나서 발생하는 두 겹의 밴드 겹침(twofold degeneracy)만이 존재하는 것이다.

REFERENCES

- [8] Z. K. Liu *et al.*, Science **343**, 864 (2014).
- [9] Z. K. Liu *et al.*, Nat. Mater. **13**, 677 (2014).
- [10] L. X. Yang *et al.*, Nat. Phys. **11**, 728 (2015).
- [11] S. -Y. Xu *et al.*, Science **349**, 613 (2015).

결과적으로 한 쌍의 바일 점은 서로 반대 방향으로 회전하는 스핀 질서를 갖는다(그림 5(c)). 이는 3차원 위상 절연체의 2차원 표면 상태와 유사한 특징이나(그림 2(b)), 위상 끝머리 상태의 밴드 구조가 아닌 덩어리 자체의 밴드 구조라는 점이 다르다. 3차원 운동량 공간에서 한 쌍의 바일 점을 각각 자기 홀극(monopole)과 반홀극(antimonopole)으로 볼 수 있다. 따라서 이들은 서로 연결되며 반드시 한 점에서 만나 쌍 생성(pair creation)하거나 쌍 소멸(pair annihilation)한다.^[12] 서로 연결된 바일 쌍을 2차원 표면 브릴루앙 영역에 투영하면 선형 밴드 분산의 교차점들이 모여 바일 쌍을 연결하는 페르미 호(Fermi arc)를 이룬다. 이 페르미 호는 3차원 바일 금속의 위상 끝머리 상태에 해당하므로, 바일 금속의 가장 중요한 현상론적 특징이다.

바일 금속의 바일 쌍과 페르미 호를 측정하기 위해서는 전 연상상태에서 시간역전 대칭성 또는 공간반전 대칭성이 깨져 있는 적당한 물질이 필요한데, 대표적으로 TaAs를 꼽을 수 있다. 그림 5(c)는 제 1 원리로 계산한 TaAs의 페르미 면으로, 다수의 3차원 바일 쌍과 각 바일 쌍을 연결하는 페르미 호가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

각분해광전자분광을 이용하여 TaAs의 페르미 면을 측정하면 그림 5(d)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 전반적인 페르미 면의 형태는 그림 5(c)처럼 이론적인 계산 결과를 잘 따라가는 것으로 보이지만, 이 데이터만으로는 바일 점과 페르미 호를 구분하기 어렵다. 이들을 명확히 구분하기 위해서 바일 점이 3차원적 밴드 분산을 갖는 반면, 페르미 호는 2차원적 밴드 분산을 갖는다는 사실을 이용할 수 있다. 각분해광전자분광에서 광전자의 탈출 깊이는 포톤의 에너지에 의존하는데, 약 10 ~ 100 전자볼트(eV) 사이에서는 탈출 깊이가 짧기 때문에 표면 부근을 더 민감하게 측정하며, 10 eV 이하 또는 1000 eV 이상에서는 광전자의 탈출 깊이가 길어져 3차원 덩어리 영역을 좀 더 민감하게 측정한다. 이 점에 착안하여 TaAs의 페르미 면을 표면과 덩어리에 민감한 조건에서 측정 후 비교한 결과가 그림 5(e)에 위쪽과 아래쪽에 각각 나타나 있다. 표면에 민감한 조건(그림 5(d))에서 페르미 호와 겹쳐 명확히 구분되지 않았던 바일 쌍이 덩어리 부분에 민감한 조건에서는 스펙트럼 세기가 더 강하게 나타나 명확히 구분할 수 있다(그림 5(e), 아래쪽).

2차원 바일 금속 탐색

디랙 금속과 바일 금속을 교차점에서 밴드 겹침의 개수로 간단하게 정의하면 2차원 바일 금속을 생각해 볼 수 있다. 여태까지 2차원 바일 금속을 생각하기 어려웠던 이유는 3차원 디랙 점과 달리 2차원 디랙 점은 일반적으로 안정하지 않기

Fig. 6. (a) Topological phase diagram from a normal insulator to a topological insulator. The horizontal axis is the band gap controlled by an external parameter denoted as m . (b) Ball and stick model for the crystal structure of black phosphorus.^[13] (c) ARPES spectra of black phosphorus taken before (left) and after (right) the topological phase transition. Constant energy map taken at the crossing energy is shown on the bottom right.^[14]

때문이다. 실제로 그래핀의 경우 스핀-궤도 상호작용을 고려하면 비록 매우 작지만 유한한 밴드갭이 발생하여 디랙 점이 사라지게 된다. 따라서 엄밀히 말하면 그래핀은 2차원 디랙 금속이 아니며, 2차원 위상 절연체 상태에 해당하는 것이다. 하지만 만약 물질의 특정 결정 대칭성이 2차원 디랙 점을 보호한다면 안정한 2차원 디랙 점을 만들 수 있다. 이 경우 시간역전 대칭성 또는 공간반전 대칭성이 깨지더라도 하나의 디랙 점이 각각 한 쌍의 2차원 바일 점으로 분리되므로 2차원 바일 금속의 발견이 가능한 것이다.

그림 6(a)는 위상 물질을 분류하는 이론에서 예측하는 위상도표(topological phase diagram)를 나타낸다. 위상학적으로 평범한 부도체의 밴드갭(m)이 점차 줄어 0을 지나 음수에 이르면, 밴드가 반전되어 위상절연체 상태로 전이한다. 이러한 위상 전이(topological phase transition)의 임계점(m_c) 근방에서 물질의 고유 결정대칭성에 따라 디랙금속 상태가 발생할 수 있다. 여태까지 위상물질에 대한 실험 연구는 대부분 이론적으로 예측된 특징적인 밴드 구조를 갖는 물질을 탐색하는

REFERENCES

- [12] B. Yan *et al.*, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **8**, 337 (2017).
- [13] J. Kim *et al.*, JESRP **219**, 86 (2017).
- [14] J. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 226801 (2017).

방식으로 연구가 이루어졌다. 하지만 만약 물질의 밴드갭을 폭 넓은 범위에서 제어할 수 있다면 위상학적으로 평범한 물질에 위상학적으로 특이한 상태를 인공적으로 유도함으로써 위상 도표에 대한 체계적인 연구가 가능하다.

그러한 가능성이 실현된 물질로서 흑린(black phosphorus)을 꼽을 수 있다(그림 6(b)). 천연 상태 흑린의 밴드 구조는 위상학적으로 평범한 상태이며 약 0.3 eV의 좁은 밴드갭을 갖는다. 흑린의 표면에 강한 수직 전기장을 인가하면(즉, 층간 퍼텐셜의 차이를 만들면) 밴드갭이 점차 줄어 그림 6(c)와 같이 전도 밴드와 가전자 밴드의 에너지가 반전되기에 이른다. 전도 밴드와 가전자 밴드가 겹친 부분에 밴드갭이 발생하지만 지그재그 방향 축에는 밴드갭이 없는 교차점이 형성되어 한 쌍의 디랙 점을 형성한다. 흑린의 디랙 점은 그래핀과 유사해 보이거나 스핀-궤도 상호작용을 고려하면 중요한 차이점이 있다. 흑린의 결정구조에는 시공간 반전 대칭성(spacetime inversion symmetry)이 존재하기 때문에 수직 전기장에 의해 공간반전 대칭성이 깨지더라도 2차원 디랙 점이 안정하다. 이에 따라 그래핀과 달리 한 쌍의 디랙 점이 두 쌍의 바일 점으로 분리되는 것이다. 비록 흑린의 스핀-궤도 상호작용 세기가 약하여 2차원 바일 점이 아직 발견되지 않았지만 스핀-궤도 상호작용의 세기를 증가시킬 수 있다면 2차원 바일 금속의 발견도 가능할 것이다.

나오는 글

바일 금속 외에도 새롭고 중요한 위상 양자 상태에 대한 예측과 발견은 오늘날까지 이어지고 있다. 이 글에서 미처 모두 다룰 수 없었으나 최근 로렌츠 불변성이 위배되는 2형 바일 금속이 WTe_2 에서 발견되었다.^[16] 또한 디랙 점과 바일 점에 겹친 밴드 개수가 두 겹 또는 네 겹과 같이 짝수로 나타나는 반면, MoP에서는 홀수 개인 세 겹의 밴드가 겹친 “3성분 페르미온”이 발견되

Fig. 7. Topological field-effect transistors made of van der Waals heterostructures, which can be switched on and off through topological phase transitions instead of carrier modulations.^[15]

기도 하였다.^[17] 이외에도 위상 이론에서 예측되었으나 아직 실험적 발견을 기다리고 있는 다양한 위상 상태가 존재한다. 또한 비록 3차원 바일 금속의 존재는 실험적으로 확인되었으나, 최소 개수의 바일 쌍과 페르미 호를 갖는 “바일 금속의 수소 모델”과 같은 물질을 발견할 수 있다면, 바일 금속의 전도 및 광학적 특성 연구에 중요한 역할을 할 것이다.

끝으로 디랙 금속과 바일 금속에 대한 연구가 새로운 소자의 개발로 이어질 가능성을 언급하며 이 글을 마무리하고자 한다. 앞서 소개한 바와 같이 만약 외부 전압으로 물질의 위상 전이를 제어할 수 있다면, 전하량 제어를 위상 전이로 대체하는 “위상 전계효과 트랜지스터(topological field-effect transistor)”를 생각해 볼 수 있다(그림 7). 위상 전계효과 트랜지스터는 전압이 인가되지 않을 때 통상적인 부도체 상태이지만, 게이트 전압을 인가하면 위상 전이가 발생하여 디랙 입자 또는 바일 입자가 전하로 작용하는 방식으로 고성능 소자의 가능성을 열 수 있다.

REFERENCES

- [15] X. Qian *et al.*, Science **346**, 1344 (2014).
- [16] P. Li *et al.*, Nat. Comm. **8**, 2150 (2017).
- [17] B. Q. Lv *et al.*, Nature **546**, 627 (2017).