3차원 바일 금속의 물리적 성질과 연구의 전망

DOI: 10.3938/PhiT.25.021

김현정·김기석

Introduction and Prospect for a Three-Dimensional Weyl Metal

Heon-Jung KIM and Ki Seok KIM

A three-dimensional (3D) Weyl metal is a topological metal with pairs of singular points in momentum space called Weyl nodes. These points are topologically nontrivial objects and monopole sources of Berry curvature and are characterized by a unit chiral (topological) charge. Here, we briefly introduce the characteristic features of a 3D Weyl metal and review the current status of research on anomalous transport phenomena originating from its nontrivial topological structure.

들어가는 글

상대론적 양자역학의 방정식인 디랙 방정식의 해는 하나의 스칼라 함수가 아닌 스피너(spinor)라 불리는 4개의 함수의 조합으로 이루어져 있다. 이 중에서 두 개는 양의 에너지를 갖는 입자(particle)의 상태를 기술하며 나머지 두 개는 음의 에너지를 갖는 반입자(antiparticle)의 상태를 기술한다. 특히, 입자의 질량이 0인 경우에는 그림 1과 같이 아주 특별한 선형의 분산 관계를 갖게 된다. 독일의 수학자이자 이론 물리학자인 H.

Fig. 1. Energy dispersion of graphene.

Weyl은 입자의 질량이 0인 경우에 특정 차원에서 디랙 방정식의 해가 4개의 성분을 갖는 스피너의 형태가 아니라 2개의 성분이 될 수 있음을 확인하였는데 디랙 방정식의 이러한 해로 기술되는 입자를 바일(Weyl) 페르미온 혹은 바일 입자라고 한다.^[1] 바일 페르미온은 디랙 입자의 양의 에너지와 음의 에너지에서 겹침이 깨져 키랄리티를 갖는 입자로 생각할 수 있다. 지금까지 발견된, 자연계에 존재하는 기본 입자 중에서 바일 페르미온이 존재하는지에 대하여 오랜 기간 동안 논쟁이 있어 왔다. 한때 뉴트리노(neutrino)의 질량이 없는 것으로 믿었던 때에 뉴트리노가 바일 입자일 것으로 추측되었으나 뉴트리노가 질량을 가지는 것으로 확인된 이후에는 뉴트리노는 바일 페르미온이 될 수 없는 것이 분명해졌다. 지금까지도 H. Weyl이

저자약력

김현정 교수는 POSTECH 물리학과 이학박사(2005)로서 POSTECH 초전도연구단 Postdoctor(-2006), MPI (Germany) Stuttgart Postdoctor(-2008)를 거쳐 현재 대구대학교 물리학과 부교수로 재직 중이다. (hjkim76@daegu.ac.kr)

김기석 교수는 POSTECH 물리학과 이학박사(2004)로서 고등과학원 물리학과 Postdoctor(-2007), CEA Saclay (France) Postdoctor(-2008), APCTP Junior Research Group, Research Professor(-2011)를 거쳐 현재 POSTECH 물리학과 부교수로 재직 중이다. (tkfkd@postech.ac.kr)

REFERENCES

- [1] H. Weyl, I. Z. Phys. 56, 330 (1929).

예측한 바일 페르미온은 자연계의 기본 입자 중에서는 발견되지 못하였다. 그렇다면 바일 페르미온은 자연계에 존재하지 않는 것인가? 자연계의 기본 입자 중에는 바일 페르미온은 발견되지 않고 있지만 특별한 전자구조를 갖는 고체 물질에서는 준입자(quasiparticle)의 형태로 바일 페르미온이 존재할 수가 있다. 본 리뷰에서는 준입자의 형태로 바일 페르미온이 존재할 수 있는 바일 금속의 특별한 위상적 구조의 성질과 이로부터 야기되는 물성에 대하여 소개하고자 한다.

바일 노드(Weyl node)의 안정성

지금 디랙 페르미온이 존재하는 물질들은 아주 잘 알려져 있다. 벌집 구조를 갖는 탄소의 단위자층인 그래핀이 대표적인데 이 물질은 탄소원자들의 벌집 구조 때문에 선형의 분산 관계를 갖는 두 개의 밴드가 k 공간의 두 지점, 즉, K 지점과 K' 지점에 존재한다.^[2] 또 다른 예는 3차원 위상절연체이다.^[3] 3차원의 위상절연체는 강한 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)에 의하여 특별하게 꼬인 밴드 구조로 인하여 특별한 표면의 상태를 가지고 있다. 이렇게 3차원 위상 절연체의 표면에 존재하는 전자들도 선형의 분산 관계를 따르며 그 양자역학적인 상태는 디랙 방정식에 의해 기술이 된다. 이와 같이 디랙 페르미온은 물질에서 준입자의 형태로 존재할 수 있다. 그런데 위에서 언급한 대표적인 두 가지 예는 모두 2차원의 경우이다. 그렇다면 3차원에서도 그래핀과 같은 전자 구조를 갖는 물질, 즉 우리가 3차원 디랙 금속(3D Dirac metal) 혹은 바일 금속(Weyl metal)이라 지칭할 수 있는 물질이 자연계에 존재할 수 있는가? 그리고 이러한 물질이 존재한다면 어떤 특별한 특성을 가지게 될까?

3차원 디랙 혹은 바일 금속의 상태가 어떤 물질에서 구현될 수 있는지를 논의하기에 앞서 차원의 변화가 위상적 구조에서 왜 중요한지를 바일점(Weyl point)의 안정성과 연관하여 생각해보자. 3차원 물질의 전자 구조에 바일 점(Weyl point) 혹은 바일 노드(Weyl node)라 불리는 특이점이 존재하면 그 근처 영역의 전자구조는

$$H_{Weyl} = \sum_{i,j \in x,y,z} \hbar v_{ij} k_i \sigma_j$$

로 표현된다. 여기서 $\hbar$ 는 플랑크 상수이며 v_{ij} 는 페르미 속도, k_i 는 운동량, 그리고 σ_j 는 파울리 행렬을 나타낸다. 여기서 각 바일 밴드에 대하여 키랄리티 양자수(chirality quantum number) χ 를 정의할 수 있는데 $\chi = \text{sgn}[\det(v_{ij})]$ 가 된다. 이 해밀토니안에는 모든 파울리 행렬이 사용되었기 때문에 이 해밀토니안과 엇바꿈(anticommutation)되는 행렬로 표현되는 연

산자는 존재할 수 없다. 또한, 물질에 대한 모든 섭동(perturbation)은 파울리 연산자와 마찬가지로 행렬로 표시되기 때문에 어떠한 섭동도 바일 노드에 갇을 만들 수가 없고 따라서 바일 노드는 k 공간에서 위상적으로 안정적인 특징점이 된다. 실제 물질의 전자 구조는 바일 노드에서 에너지가 높거나 낮은 영역에서는 바일 해밀토니안 H_{Weyl} 에서 벗어나 이 영역에서 바일 금속으로서의 특성을 잃어버리게 된다.

바일 노드의 특이점으로서의 특성과 안정성은 다음과 같이 이해할 수 있다. k 공간에서 블로흐(bloch) 상태에 있는 전자들은 단위 낱칸 안에 존재하는 블로흐 상태들의 공간적인 변화 때문에 $\vec{A} = i \langle u(\vec{k}) | \vec{\nabla}_k u(\vec{k}) \rangle$ 로 주어지는 유효 벡터 포텐셜을 느끼게 된다. 이 벡터 포텐셜이 만드는 장 $\vec{F} = \vec{\nabla}_k \times \vec{A}(\vec{k})$ 를 베리 곡률(Berry curvature) 혹은 천 다발(Chern flux)이라고 하며 k 공간에서 자기장과 같은 역할을 한다. k 공간에서 바일 노드 바깥쪽의 페르미 면에 대하여 $\vec{F}$ 를 면적분한 양은 다음과 같은 관계식으로 키랄리티 양자수와 연결되게 된다.

$$\frac{1}{2\pi} \oint_{FS} \vec{F}(\vec{k}) \cdot d\vec{S}(\vec{k}) = \text{sgn}[\det(v_{ij})] = \chi$$

이 식에서 $d\vec{S}$ 는 점유된 상태에서부터 나가는 방향으로 정의가 되는 k 공간에서의 미소 면적이다. k 공간에서 $\vec{F}$ 는 자기장과 같은 역할을 하므로 위의 식은 k 공간에서 바일 노드가 전하의 크기가 키랄리티가 되는 자기 홀극(magnetic monopole)의 역할을 한다는 사실을 의미한다. 이 식은 또한 바일 노드를 포함하는 페르미 면(Fermi surface)은 위상적으로 특별하고 베리 곡률의 적분으로 주어지는 천 숫자(Chern number)가 χ 혹은 $-\chi$ 를 갖게 됨을 의미한다. 바일 노드의 이러한 성질 때문에 바일 노드를 자기 홀극 혹은 위상적인 키랄 전하(topological chiral charge)라고도 부른다. Nielsen과 Ninomiya에 의하면^[4,5] 밴드 구조에서 총 자기 전하량은 0이 되어야 하므로 바일 노드의 개수는 항상 짝수이어야 하며 하나의 키랄리티를 갖는 바일노드의 개수는 반대 키랄리티의 노드의 개수와 같아야 한다. 2차원의 물질인 그래핀 역시 디랙 노드(Dirac node)를 가

REFERENCES

- [2] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov and A. K. Geim, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
- [3] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [4] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Nuclear Physics B **193**, 173 (1981).
- [5] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Nuclear Physics B **185**, 20 (1981).

하지만 위에서 설명한 것과 같은 자기 홀극의 위상적인 특성을 가지지 못해 디랙 노드는 바일 노드와 달리 위상적으로 안정적이지 못하다(위상적으로 보호받지 못한다). 그래핀을 기술하는 해밀토니안에는 파울리 행렬의 x 와 y 성분 두 개만 쓰이고 z 와 관련한 상호작용이 섭동으로 들어오게 되면 에너지 분산식에 갭이 열릴 수 있게 된다. 3차원 바일 금속의 이러한 위상적인 특징이 그래핀과 3차원 바일 금속을 구분 짓는다.

바일 해밀토니안 H_{Weyl} 이 물질의 전자구조를 잘 기술하는 영역에서 위상적으로 안정적인 바일 노드가 제거되는 경우는 다음의 두 가지이다. 첫 번째는 특정한 키랄리티(chirality)를 갖는 바일 노드와 그 반대 키랄리티를 갖는 바일 노드가 k 공간에서 움직여 합쳐져 사라지는 것이다. 두 번째는 반대 키랄리티를 갖는 노드 사이에 산란(inter-node scattering)이 일어나 키랄리티의 섞임이 일어나면서 바일 노드라는 특이점이 없어지는 경우이다. 두 번째 경우에 노드 사이의 산란이 강해지면 결국에는 물질의 병진 불변성(translational invariance)이 깨지게 된다. 바일 노드가 특별한 이유는 이 두 경우를 제외한 어떠한 섭동에도 위상적으로 보호를 받아 안정적이라는 데 있다.

$Bi_{1-x}Sb_x$ 합금

그렇다면 위에서 설명한 특성을 갖는, 위상적으로 특별한 바일 금속을 어디에서 찾아야 할까? 3차원 바일 금속이 되기 위한 전제 조건이 노드의 존재이므로 갭의 크기가 0인 제로갭 반도체가 3차원 디랙 금속 혹은 바일 금속의 후보 물질이 될 수 있을 것이다. 이 문제와 관련하여 이론 물리학자인 Murakami는 2007년에 흥미로운 논문을 발표한다.^[6] 이 논문에서 Murakami는 3차원 위상 절연체와 밴드 절연체 사이에서 일어나는 위상 상전이 현상에 대하여 연구하였는데 3차원의 경우에 2차원과는 달리 특별하게 반전 대칭성(inversion symmetry)이 없는 경우에 이 위상 상전이 지점에서 틈이 없는(gapless) 상이 안정화될 수 있다는 사실을 밝혀내었다. 이러한 상은 잘 정의된 키랄리티를 갖는 상태로 위에서 설명한 바일 금속이 된다. 이러한 상은 시간 역전 대칭성(time reversal symmetry)이 깨진 경우에 3차원 위상 절연체와 밴드 절연체 사이에서 존재하는 위상 특이점(topological critical point)에서도 나타나게 된다. 이러한 사실을 종합하였을 때 바일 금속은 3차원 위상절연체와 밴드 절연체 사이에 위치한 제로갭 반도체에서 존재할 가능성이 크다.

위의 조건을 만족시키는 대표적인 물질에 $Bi_{1-x}Sb_x$ 합금이 있다.^[7,8] Bi는 반금속(semimetal)의 대표적인 물질로 작은 페르미 면이 만들어내는 물질의 특징 때문에 지금까지도 많은 연구가 진행되고 있는 물질이다. Bi는 k 공간의 T 지점에 정

Fig. 2. A phase diagram of $Bi_{1-x}Sb_x$ alloy as a function of the Sb concentration x . The pink region is where 3D topological insulator is realized.^[7]

공 밴드가 있고 L 지점에는 전자 밴드가 존재한다. 이러한 전자 구조를 갖는 Bi에 Sb가 첨가되게 되면 그림 2와 같은 전자 구조의 변화가 나타나게 된다. Sb가 첨가되었을 때 두 가지의 특징적인 전자 구조의 변화가 보인다. 첫 번째는 T 지점의 밴드의 높이가 Sb의 양에 따라 점차 낮아져 $x \sim 7-9\%$ 에서 페르미 에너지 아래로 가라앉게 되는 것이고 두 번째는 L 지점 밴드의 밴드갭이 점차 줄어 $x \sim 4\%$ 근처에서 틈이 없는 상이 나타나는 것이다. 더 나아가 $x > 4\%$ 의 영역에서 밴드의 성격이 반전되게 되는데 이러한 밴드 반전으로 인하여 T 지점의 밴드가 페르미 에너지 아래로 가라앉은 $x > 9\%$ 의 영역에서 $Bi_{1-x}Sb_x$ 합금은 3차원 위상 절연체가 된다. 이 영역에서 $Bi_{1-x}Sb_x$ 합금은 ARPES 실험을 통하여 최초로 밝혀진 3차원 위상 절연체로 밝혀졌다.^[9]

L 지점의 밴드만을 살펴보면 $x \sim 4\%$ 의 틈이 없는 상(gapless phase)은 $x < 4\%$ 의 영역에 존재하는 밴드 절연체와 $x > 4\%$ 의 영역에 존재하는 3차원 위상 절연체를 구분 짓는 특이점이 된다. $Bi_{1-x}Sb_x$ 합금의 L 지점의 밴드 구조는 바일 금속에 대하여 예측한 Murakami의 이론에 등장하는 대칭성에 대한 조건만을 제외한 모든 조건들을 만족시키고 있다는 것을 알 수가 있다. 따라서 $x \sim 4\%$ 인 $Bi_{0.96}Sb_{0.04}$ 합금은 3차원의 디랙 금속의 성질을 내재하고 있으며 대칭성이 붕괴되면 3차원 바일 금속으로 변할 가능성을 가진 물질이다.

REFERENCES

- [6] S. Murakami, New Journal of Physics **9**, 356 (2007).
- [7] Liang Fu and C. L. Kane, Phys. Rev. B **76**, 045302 (2007).
- [8] Heon-Jung Kim, Ki-Seok Kim, J.-F. Wang, M. Sasaki, N. Satoh, A. Ohnishi, M. Kitaura, M. Yang and L. Li, Phys. Rev. Lett. **111**, 246603 (2013).
- [9] D. Hsieh, D. Qian, L. Wray, Y. Xia, Y. S. Hor, R. J. Cava and M. Z. Hasan, Nature **452**, 970 (2008).

키랄변칙(Chiral anomaly)

그렇다면 반전대칭성 혹은 시간반전대칭성을 붕괴시켜 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 합금을 3차원 디랙 금속에서 3차원 바일 금속으로 바꿀 수는 없을까? 반전대칭성은 물질의 구조에 의하여 결정되므로 외부적인 수단을 이용하여 붕괴시킬 수가 없지만 시간 역전 대칭성은 외부 자기장을 가해주는 방법을 이용해 붕괴시킬 수가 있다. 이러한 아이디어를 적용하면 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 합금의 전자 구조를 변화시킬 수 있을 것으로 예측이 된다. $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 의 두 개의 밴드 중에서 L 지점에 존재하는 콘 모양의 밴드인 디랙

콘(Dirac cone)은 자기장이 인가되었을 때 키랄리티의 겹침이 깨어지면서 자기장의 방향으로 키랄리티를 갖는 두 개의 바일 콘(Weyl cone)으로 나누어지게 될 것이다. k 공간에 L 지점은 세 곳이 있으므로 이곳에 있는 디랙 콘은 각각 자기장의 방향으로 두 개의 바일 콘으로 나누어지게 된다. 그림 3은 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 에 자기장이 인가되어 하나의 디랙 콘이 두 개의 바일 콘으로 나누어지게 되는 상황에서 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 의 전자 구조를 도식적으로 보여준다. 이와 같은 전자 구조는 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 에 자기장이 인가되었을 때 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 합금이 3차원 바일 금속이 되었음을 보여주는 직접적인 증거가 될 것이다. 그러나 안타깝게도 물질의 전자구조를 직접적으로 측정할 수 있는 실험 방법인 ARPES 기법은 광전자들이 자기장의 영향을 받게 되므로 자기장이 인가된 상황에서는 사용할 수가 없게 된다. 그렇다면 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 에 자기장이 인가되었을 때 3차원 바일 금속이 된다는 사실을 실험적으로 증명할 수는 없는 것일까?

3차원 바일 금속이 노드를 갖는 그래핀이나 여타의 다른 물질들과 비교했을 때 특별한 이유는 입자 물리에서 예측된 키랄 변칙(chiral anomaly)이 발현^[10-12]되어 예상하지 못한 물성이 나타날 수 있기 때문이다. 키랄 변칙은 키랄리티를 갖는 입자들의 키랄 전류가 보존되지 않는 변칙을 지칭한다. 이는 자연계에서 고전역학적인 측면에서 보았을 때 성립해야 하는 (키랄 전하를 포함하는) 전하의 보존법칙이 양자역학적 원리를 도입할 경우 성립하지 않는 예외적인 경우에 해당하는데 바일 금속은 키랄 변칙이 나타나야만 하는 물질이다. 가장 간단한 전자구조를 갖는 3차원 바일 금속은 키랄리티가 반대인 두 개의 키랄 밴드(바일 콘)를 갖게 된다. 이 3차원 바일 금속에서 하나의 키랄 밴드에서는 전하의 보존법칙이 성립하지 않는다 (게이지 변칙). 물론 두 개의 키랄 밴드 전체에 대해서는 전하 보존법칙이 성립하는데 하나의 키랄 밴드가 전하의 원천(source) 그리고 나머지 키랄 밴드가 전하의 싱크(sink)의 역할을 한다. 즉, 각 키랄 밴드를 통하여 흐르는 전류 밀도를 각각

Fig. 3. Expected electronic structure of $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ in magnetic fields. A single Dirac cone at the L point is split into two Weyl cones with definite chirality along the direction of the magnetic field.^[8]

J_+ 와 J_- 라고 하면 이 전류 밀도는

$$\partial_\mu J_\pm^\mu = -\chi \frac{e^3}{4\pi^2 \hbar^2} \vec{E} \cdot \vec{B}$$

를 만족시키며 $\partial_\mu (J_+ + J_-) = 0$ 이 된다. 위의 관계식으로부터 $\partial_\mu (J_+ - J_-) \propto \vec{E} \cdot \vec{B}$ 을 얻을 수 있고 키랄 전하의 보존 법칙이 깨어짐을 볼 수 있다. 반대 키랄리티를 갖는 키랄 밴드들은 양자역학적으로 연결되어 있다고 이해할 수 있다. 그래핀도 3차원 바일 금속과 마찬가지로 k 공간의 K 지점과 K' 지점에 두 개의 디랙 밴드를 가지고 있지만 이 두 디랙 밴드 사이에는 3차원 바일 금속과 달리 어떠한 연관성도 없다. 이러한 키랄 변칙은 3차원 바일 금속의 전자기적인 성질에 지대한 영향을 미치게 되는데 3차원 바일 금속에서 전자기학의 법칙은 전하의 원천과 싱크의 역할을 하는 바일 노드들로 인하여 수정되게 된다. 특히, 키랄 변칙은 3차원 바일 금속에서 E/B 의 조건에서 기존의 전도이론으로는 설명할 수 없는 음의 자기저항 성분이 나타나도록 만든다.^[8,13-15] 보통의 금속에서는 전자의 사이클로트론 운동 때문에 자기장이 증가할수록 저항이 증가하게 된다. 3차원 바일 금속에서는 외부 전기장이 인가되었을 때 두 바일 콘 사이에 키랄 변칙에 의한 흠어지지 않는 전류 채널(dissipationless current channel)을 통하여 전류가 흐

REFERENCES

- [10] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Phys. Lett. B **130**, 389 (1983).
- [11] S. Adler, Phys. Rev. **177**, 2426 (1969).
- [12] J. S. Bell and R. Jackiw, Il Nuovo Cimento **60A**, 4 (1969).
- [13] D. T. Son and B. Z. Spivak, Phys. Rev. B **88**, 104412 (2013).
- [14] Ki-Seok Kim, Heon-Jung Kim and M. Sasaki, Phys. Rev. B **89**, 195137 (2014).
- [15] Ki-Seok Kim, Heon-Jung Kim, M. Sasaki, J-F. Wang and L. Li, Sci. Technol. Adv. Mater. **15**, 064401 (2014).

Fig. 4. The negative magnetoresistance of $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$, TaAs, Na_3Bi , and Cd_3As_2 for $E \parallel B$, which originates in chiral anomaly.^[8,19,22,29]

른다. 이 전류는 노드 사이의 산란을 통하여 상쇄되면서 정상 상태를 이루게 된다. 자기장이 강해질수록 흩어지지 않는 전류 채널을 통하여 상대적으로 더 많은 전류가 흐르게 되어 시료의 저항은 감소한다. 키랄변칙에 의한 자기저항 성분의 자기장 의존성은 페르미 에너지와 자기에너지의 상대적인 크기에 따라 달라지는데 자기장의 세기가 상대적으로 강해 란다우 준위가 중요해지는 양자 영역(quantum region)에서는 저항이 자기장의 선형에 비례하여 감소하고 반면, 페르미 에너지가 상대적으로 큰 준고전 영역(quasi-classical region)에서는 저항이 자기장의 이차함수 형태로 감소하게 된다. 준고전 영역에서의 자기 저항의 거동 특성은 그림 4에서 볼 수 있듯이 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 에서 처음으로 발견되었으며 이후에 새롭게 발견된 3차원 디랙 금속과 반전대칭성이 붕괴된 3차원 바일 금속에서도 같은 현상이 발견되었다. 준고전 영역에서 키랄변칙에서 야기되는 전자의 전기 전도의 현상들은 볼츠만 수송 방정식을 통하여 정량적으로 이해할 수가 있다.^[14,15]

새로운 디랙 금속과 바일 금속: 반전대칭성이 붕괴된 구조를 갖는 바일 금속

$\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 합금에서 키랄변칙의 효과가 나타날 수 있다는 사실이 보고된 이후, 2014년도부터 3차원 디랙 금속과 바일 금속에 대한 연구가 폭발적으로 활기를 띠기 시작하였다. 이러한 관심은 연구의 증가로 이어져 새로운 디랙 금속인 Cd_3As_2 ,^[16-19] Na_3Bi ,^[20-22] 그리고 ZrTe_5 ^[23]가 발견되었다. 이 물질들에 대해서는 APRES와 같은 실험 방법을 적용하여 디랙 금속의 특별한 전자구조에 대한 연구가 집중으로 수행되었다.

이러한 연구를 통하여 이 물질들이 디랙 콘을 가지고 있는 것이 밝혀지게 되었다. 또한 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 합금에서 발견된 것과 같은 $E \parallel B$ 조건에서 음의 자기 저항 성분이 발견되어 이 물질들에서도 자기장이 인가된 상황에서 보편적으로 키랄변칙에 의한 전기전도의 변화가 나타난다는 사실이 확인되었다.^[19,22,23]

3차원 바일 금속에 대한 또 한 번의 관심의 증가는 반전대칭성이 붕괴된 구조를 갖는 3차원 바일 금속이 발견되었을 때 일어나게 되었다. 밀도 범함수 이론(density functional theory)을 통하여 TaAs, TaP, NaAs, 그리고 NaP가 반전대칭성이 깨어진 구조를 가지면서 3차원 바일 금속이 될 수 있음이 이론적으로 예측^[24,25]이 되었으며 이러한 예측은 전 세계 유수의 ARPES 연구 그룹들이 3차원 바일 금속의 특이한 전자구조인 바일 콘(Weyl cone)과 페르미 원호(Fermi arc)라 불리는 표면 상태를 측정함으로써 실험적으로 확인되었다.^[26,27]

반전대칭성이 깨어진 구조를 갖는 3차원 바일 금속의 발견은 페르미 원호와 불리는 이 물질의 특별한 표면 상태를 실험적으로 연구할 수 있는 기회를 제공한다는 점에서 특별한 의미가 있게 된다. 3차원 바일 금속에서도 3차원 위상절연체(3D topological insulator)와 마찬가지로 전자구조의 특별한 위상 구조 때문에 위상적으로 보호받는 표면 상태가 존재하게 된다.^[28] 평판 모양의 3차원 바일 금속은 표면에 페르미 원호를 갖게 되는데 이 페르미 원호는 그 표면으로 투영된 부호가 다른 키랄리티를 갖는 바일 노드를 표면을 통하여 그림 5와 같이 이어준다. k 공간에서 바일 노드를 포함하지 않는 슬라이스는 2차원 천 절연체(Chern insulator) 혹은 2차원 양자 홀 절연체(integer-quantum-Hall insulator)가 된다는 사실을 바탕으로 이 페르미 원호를 이해할 수가 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 바일 노드로부터 멀리 떨어진 슬라이스는 천 숫자

REFERENCES

- [16] M. Neupane *et al.*, Nat. Commun. **5**, 3786 (2014).
- [17] S. Borisenko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 027603 (2014).
- [18] Z. K. Liu *et al.*, Nat. Mater. **13**, 677 (2014).
- [19] Hui Li *et al.*, Nature Communications **7**, 10301 (2016).
- [20] Z. K. Liu *et al.*, Science **343**, 864 (2014).
- [21] S.-Y. Xu *et al.*, Science **347**, 294 (2015).
- [22] Jun Xiong *et al.*, Science **350**, 413 (2015).
- [23] Qiang Li *et al.*, arXiv:1412.6543.
- [24] S.-M. Huang, S.-Y. Xu, I. Belopolski, *et al.*, Nature Commun. **6**, 7373 (2015).
- [25] Hongming Weng, Chen Fang, Zhong Fang, B. Andrei Bernevig and Xi Dai, Phys. Rev. X **5**, 011029 (2015).
- [26] B. Q. Lv *et al.*, Phys. Rev. X **5**, 031013 (2015).
- [27] S.-Y. Xu *et al.*, Science **349**, 613 (2015).
- [28] Pavan Hosur and Xiaoliang Qi, Comptes Rendus Physique **14**, 857 (2013).
- [29] Xiaochun Huang *et al.*, Phys. Rev. X **5**, 031023 (2015).

Fig. 5. A schematic diagram of two Weyl cones with + and - chirality. The red lines represent Fermi arcs, which connect two Weyl nodes with opposite chirality. Here C is the Chern number of the 2D insulator at fixed momentum along the line connecting the Weyl nodes. The Fermi arc is a collection of the edge states of these 2D Chern insulators.^[28]

(Chern number)가 0인 2차원의 절연체(trivial insulator)가 되는 반면 바일 노드 사이에 존재하는 슬라이스는 천 숫자가 1인 2차원 천 절연체(2차원 양자 홀 상태)가 된다. 2차원 양자 홀 절연체는 위상적 구조의 특성에 의해 벌크에서 모서리로 흘러 나가는 전류의 성분이 존재하고 이로부터 모서리의 키랄 전자의 양자 상태가 반드시 존재해야 함이 설명된다. 이 슬라이스의 모서리 상태는 k 공간에서 하나의 점으로 나타나며 각 슬라이스 상의 점들을 모으면 페르미 원호가 된다. 따라서 페르미 원호는 천 숫자가 1인 2차원 천 절연체의 모서리 상태의 집합을 k 공간에서 표현한 것으로 키랄리티가 다른 두 바일 노드를 표면에서 이어준다. 3차원 바일 금속의 표면 상태를 이와 같이 2차원 슬라이스를 도입하여 이해할 수 있는 근거는 두 바일 콘을 연결하는 방향의 모멘텀 성분이 란다우의 페르미 액체 이론이 성립하는 한도 내에서는 보존되는 좋은 양자수로 생각할 수 있기 때문이다. 다시 말해서, 그 방향으로의 운동량이 보존되지 않는 상황에서는 앞의 2차원 천 절연체를 바탕으로 하는 설명은 더 이상 성립하지 않는다. 자기장을 인가하였을 때 3차원 바일금속이 되는 물질에서는 적용이 불가능하였던 ARPES 기법을 이용하여 페르미 원호에 대한 측정이 반전대칭성이 붕괴된 구조를 갖는 3차원 바일 금속에서는 가능하게 된다.

그림 6은 TaAs 계열의 3차원 바일 금속에서 k 공간상의 바일 노드들의 분포와 함께 TaAs에서 ARPES를 통하여 측정된 페르미 원호의 모습을 보여준다.^[24,26] TaAs에는 총 12쌍의 바일 노드가 존재하며 이 바일 노드가 특정 면에 투영된 모습에 따라 고유한 모습의 페르미 원호의 모양을 갖게 된다. ARPES를 이용하여 측정된 그림 6의 페르미 원호의 끝에는 각각 2개

Fig. 6. The Fermi arcs measured by ARPES and locations of Weyl nodes in the momentum space in TaAs.^[24,26]

의 바일 노드가 투영되어 있어 이 지점을 시작으로 두 개의 페르미 원호가 시작되게 된다. TaAs에서는 반전대칭성이 깨어진 3차원 바일 금속의 표면 상태뿐만 아니라 x, y, z 방향에 대한 선형의 분산관계, 그리고 바일 노드와 같은 특별한 전자구조에 대해서도 ARPES를 이용하여 활발하게 연구가 진행되고 있다.

전 망

앞에서 설명한 특별한 위상적인 구조와 특별한 위상 구조에 기인하는 물성 때문에 3차원 바일 금속은 많은 물리학자들의 관심을 끌어들였다. 지금까지 이 분야의 연구는 다음의 3가지 방향으로 이루어져 왔다. 첫 번째는 새로운 3차원 바일 금속을 찾는 연구이다. 3차원 바일 금속의 모체가 될 수 있는 3차원 디락 금속은 기본적으로 에너지 갭의 크기가 0이면서 선형의 분산관계를 가지고 있는 반도체 혹은 반금속 물질이다. 작은 에너지 갭을 갖는 반도체의 경우 자기장의 제이만 에너지(Zeeman energy)가 에너지 갭보다 크게 되면 스핀 업/다운 밴드의 교차로 인하여 노드가 만들어질 수가 있고 또한 이를 통하여 3차원 바일 금속의 상태가 실현된다. 자기장이 없는 경우 3차원 바일 금속 상태를 실현하기 위해서는 물질에 강자성이 형성되거나 물질이 반전대칭성이 없는 특별한 구조를 가져야만 한다. 따라서 3차원 바일 금속이 되기 위한 물질의 전체 조건이 있게 되지만 모체가 될 수 있는 갭이 작은 반도체와 반금속의 성질을 보이는 물질들은 많이 존재하기 때문에 다양한 물질에서 3차원 디락 금속과 바일 금속의 성질이 나타날

것으로 예상이 된다. 이러한 예상대로 최근 직방정계 구조 (orthorhombic structure)의 MoTe_2 가 기울어진 바일 콘을 갖는 두 번째 종류의 3차원 바일 금속임이 밝혀지고 있다.^[30-35] 이 물질은 동시에 낮은 온도에서 초전도체가 되어^[36] 이 물질에서 위상적 초전도성(topological superconductivity)이 나타날 가능성이 논의되고 있는 상황이다. 두 번째의 연구 방향은 ARPES 기법을 이용한 3차원 바일 금속의 전자구조의 연구로 이러한 연구를 통하여 반전대칭성이 깨어진 TaAs, TaP, NbAs, 그리고 NbP와 같은 물질에서 바일 콘과 페르미 원호의 존재가 분명하게 확인되었다. 세 번째 연구의 흐름은 키랄변칙에 기인하는 3차원 바일 금속의 특별한 물성을 찾는 연구가 그것이다. 지금까지 확인된 키랄변칙에 기인하는 물성은 음의 자기 저항 성분으로 나타나는 전도 현상이 유일하다. 그러나 키랄변칙에 의하여 3차원 바일 금속 안에서는 전자기학의 법칙이 대대적으로 수정된다(axion electrodynamics)^[37]는 사실을 상기해 볼 때 지금까지 알려지지 않은 새로운 전자기학적인 현상이 바일 금속에서 발견되는 것은 그리 오랜 시간이 걸리지 않은 것으로 예상이 된다.

3차원 바일 금속의 연구 초기에는 바일 금속의 특징을 나타내는 바일 콘과 페르미 원호의 측정이 중요했으나 앞으로 이 분야의 연구에서는 키랄변칙과 페르미 원호로 불리는 특별한 표면 상태에서 기인하는, 보통의 금속에서는 나타나지 않는 새로운 현상에 대한 연구가 활발하게 이루어질 것으로 예상된다. 바일 금속의 전도 현상에만 한정해서 논의하더라도 키랄변칙이 전자 전도에 영향을 주어 나타나는 대표적인 현상에는 음의 자기저항, 키랄 자기적 효과(chiral magnetic effect),^[38] 그리고 비정상 홀효과(anomalous Hall effect)^[39]가 있는 것으로 이론적으로 논의되고 있다. 이 중에서 음의 자기저항은 앞에서 살펴본 바와 같이 이미 여러 물질에서 발견되었다. 키랄 자기적 효과는 3차원 바일 금속에서 외부 자기장으로부터 유도되는 흠어지기 없는(dissipationless) 전류가 자기장에 비례하는 형태로 나타나는 현상을 지칭하며 비정상 홀효과는 강자성 금속에서 강자성이 자기장의 역할을 하여 홀 전압이 발생시키듯이

바일 노드가 만드는 k 공간의 배리 곡률 혹은 천 다발이 자기장의 역할을 하여 홀 전압이 발생시키는 현상을 말한다. 이 두 가지 현상은 아직 실험적으로는 관측되지 못하였다. 물론 일부 연구에서 음의 자기저항이 키랄 자기적 효과의 결과라는 주장^[23]도 있으나 키랄 자기적인 효과와 비정상 홀효과는 음의 자기저항과 달리 3차원 바일 금속에서 나타나는 흠어지기 없는 전류에 기인한다는 점을 상기한다면 그 주장의 근거는 다소 빈약하다고 볼 수가 있다. 키랄 자기적 효과와 비정상 홀효과의 실험적 증명에는 반드시 이 효과들이 흠어지기 없는 전류로부터 야기된다는 사실이 포함되어야 한다. 지금까지 3차원 바일 금속의 특별한 밴드 위상 구조에서 기인하는 여러 가지 성질에 대하여 살펴보았는데 이 분야는 현재에도 매우 빠르게 발전하고 있는 분야이다. 그래핀의 연구가 3차원 위상절연체의 연구로 이어지고 3차원 위상절연체의 연구는 또 다시 3차원 바일 금속의 연구로 이어지고 있다. 3차원 바일 금속은 지금까지의 고체 물질에 대한 관점을 새로운 시각으로 바꾸며 axion electrodynamics라는 새로운 전자기적 법칙의 발현으로 응집물리학 분야의 새로운 패러다임을 이끌어낼 것으로 기대된다. 또한 앞서 살펴본 키랄변칙이 만들어내는 전기 전도의 특성을 어떻게 이용할 수 있을지 살펴보는 일도 흥미롭다.

REFERENCES

- [30] Yan Sun, Shu-Chun Wu, Mazhar N. Ali, Claudia Felser and Binghai Yan, Phys. Rev. B **92**, 161107(R) (2015).
- [31] Lunan Huang *et al.*, arXiv:1603.06482.
- [32] Ke Deng *et al.*, arXiv:1603.08508.
- [33] J. Jiang *et al.*, arXiv:1604.00139.
- [34] Aiji Liang *et al.*, arXiv:1604.01706.
- [35] N. Xu *et al.*, arXiv:1604.02116.
- [36] Yanpeng Qi *et al.*, Nature Comm. **7**, 11038 (2016).
- [37] Y. Chen, Si Wu and A. A. Burkov, Phys. Rev. B **88**, 125105 (2013).
- [38] Dam Thanh Son and Naoki Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **109**, 181602 (2012).
- [39] M. M. Vazifeh and M. Franz, Phys. Rev. Lett. **111**, 027201 (2013).