바일금속의 전자수송 특성

DOI: 10.3938/PhiT.27.021

신동우·한승윤·김지훈

Electron Transport Properties in a Weyl Metal

Dongwoo SHIN, Seungyun HAN and Jeehoon KIM

We present the transport properties, such as negative longitudinal magnetoresistance, nonlocal electron transport, and violation of Ohm's law, in a Weyl metal. Chiral anomaly with a dissipationless channel between two Weyl nodes is responsible for the unusual transport properties. Breakdown of Ohm's law in particular results from the charge pumping effect associated with chiral anomaly. The chiral anomaly may affect the nonlocality of a Weyl metal through hydrodynamics originating from strong electron correlations. In this article, we discuss a variety of Weyl metals, including a family of inversion/noninversion symmetry, type I/II, half-Heusler materials, and their transport properties.

들어가는 글

1928년 디랙 방정식이 만들어진 후, Hermann Weyl은 1년 후 디랙 방정식을 변용하여 질량은 없지만 키랄리티가 있는 바일페르미온을 발표한다. 그 후 약 90년 동안 고에너지 입자 물리 실험을 통한 바일페르미온은 발견되지 못했다. 이렇게 고 에너지 물리에서 관찰되지 못한 바일 또는 마요라나 입자들은, 최근 응집물리에서 주된 관심사이다. 이는 고체 내에서 특정 환경과 주기적인 결정격자에서 움직이는 전자들의 상태는 디랙

방정식과 유사한 유효적인 저에너지이론으로 기술될 수 있기 때문이다.

응집물리에서 바일금속에 대한 연구는 2011년 이론 논문^[1,2]을 시작으로 이론 중심의 연구가 2013년까지 진행되었다. 실험논문으로는 2013년 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 에서 바일금속의 특징인 음의 자기저항(LNMR)을 관측한 김현정, 김기석 교수의 논문이 최초이다.^[3] 하지만 발표 당시에는 전류제트 혹은 불순물 효과에 의한 결과일 수도 있어서 많은 관심을 끌지 못했다. 2015년 각분해광전자분광(ARPES) 실험의 전자구조 증거(페르미아크)들이 발견된 후 바일금속은 응집물리실험의 주된 연구 분야가 되었다. 이후 전자수송의 LNMR과 ARPES의 페르미아크는 이론적으로 예측한 바일금속을 증명하는 주요 지표가 되었다. 2017년 김지훈 교수 연구팀은 키랄변칙에 의한 전하펌핑효과로 인해 바일금속에서 음의 법칙이 성립하지 않음을 밝혀내어, 기존 결과와는 차별이 있는 바일금속만의 특징을 발표하였다. 금속에서 음의 법칙이 성립하지 않는 것은 향후 금속전자소자의 출현을 예고하고 있어 앞으로 많은 연구가 예상된다.

바일금속은 선형분산식을 만족하는 두 개의 바일노드를 가지고 있다. 각각의 바일노드는 토폴로지컬 키랄전하(chiral charge) 및 베리위상(Berry phase)을 갖고 있는 특이점으로 자기홀극(magnetic monopole) 역할을 한다. 두 개의 바일노드들은 서로 독립적이지 않고 마치 끈으로 연결되어 있는 것처럼 행동한다. 즉, 자기장에 평행한 전기장이 인가되면($\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$) 한쪽 바일노드의 전자 수가 증가하는 동시에 다른 쪽 노드의 전자 수는 감소한다. 주목할 점은 한 개의 바일노드(+)에서는 외부 전기장에 의해 전자가 생성되어 연속방정식을 만족시키지 않지만, 나머지 바일노드(-)를 고려하면 생성과 소멸이 동시에 일어나게 되어 전체적으로 전류에 연속방정식이 성립한다. 하지

저자약력

신동우 연구원은 현재 포항공과대학교 물리학과 석박사통합과정 학생으로서 자기힘현미경 연구실에서 바일금속 연구를 진행 중이다.

한승윤 연구원은 현재 포항공과대학교 물리학과 석박사통합과정 학생으로서 자기힘현미경 연구실에서 바일금속 연구를 진행 중이다.

김지훈 교수는 미국 텍사스 대학교에서 2007년 박사학위를 받은 후 하버드대학교 박사후연구원, 로스앨러모스연구소 박사후연구원 및 선임연구원 후, 2013년부터 포항공과대학교 물리학과에 재직 중이며, 바일금속의 물성 및 소자 연구를 진행하고 있다.(jeehoon@postech.ac.kr)

REFERENCES

- [1] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath and S. Y. Savrasov, Phys. Rev. B **83**, 205101 (2011).
- [2] A. Burkov and L. Balents, Phys. Rev. Lett. **107**, 127205 (2011).
- [3] H. J. Kim, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 246603, doi:10.1103/PhysRevLett.111.246603 (2013).

Fig. 1. Schematic diagrams of an energy dispersion in (a) Dirac metal. (b) Weyl metal.

만, 두 바일노드 간의 키랄전류는 영이 아니고 전기장과 자기장의 곱에 비례하는 값으로 나타난다. 이것을 바일금속의 ‘키랄변칙’이라고 한다. 키랄변칙은 두 개의 바일노드가 서로 연결되어 있다는 것을 말해준다. 바일금속의 키랄변칙은 음의 자기저항, 비정상홀효과, 비국소 전자수송, 비데만-프란츠법칙 위반, 옴의 법칙 위반 등의 전자수송현상들을 보여준다. 또한, 바일금속은 키랄변칙으로 인해 맥스웰전자기방정식 대신에 엑시온전자기방정식이 적용되어 여러 흥미 있는 광학적 성질을 보여준다.

본 바일금속 특집호에서는 바일금속을 전반적으로 소개하기 위해, 바일금속의 종류 및 물성(음의자기저항, 비정상-홀효과, 비국소전자수송, 비선형저항), 바일금속의 키랄변칙(베리위상 및 키랄변칙), 바일금속 이론(양자장론적 이해), 바일금속의 광학적 특성, 광전자분광학(전자구조 및 페르미아크), 바일금속의 초전도 성질(하프호이즐러 바일초전도체) 등 6개의 원고들로 이루어졌다. 본 원고에서는 전자수송실험 결과인 음의자기저항, 비정상홀효과, 비국소적 수송현상, 옴의 법칙 깨짐 등의 현상을 간략하게 소개하려고 한다.

바일금속 종류

1. 시간역전/반전 대칭 유무 및 Type I/II 바일금속

바일금속이 되기 위해서는 시간역전대칭 혹은 반전 대칭이 깨져야 한다. 전자의 경우 대표적인 바일금속으로 BiSb,^[3] ZrTe₅^[5] 등이 있다. 자기장이 걸려있지 않을 때, 이 금속들은 에너지 띠틈이 닫혀서 노드가 생기고 선형 분산식을 가지는 디랙금속이다. 그림 1(a)에서 보듯이 디랙금속은 한 개의 디랙 노드에 4개의 에너지밴드가 중첩되어 있다. 이러한 디랙금속에 자기장을 인가해 주면 시간역전대칭이 깨지게 되어 4개의 에너지밴드가 공존했던 1개의 디랙노드는 2개의 밴드가 공존하는 키랄부호가 반대인 2개의 바일노드들로 갈라지는 바일금속이 된다(그림 1(b)).

이와는 달리 원자구조의 반전대칭이 깨져있는 바일금속은 외

Fig. 2. (a) Type-I WP with a point-like Fermi surface. (b) A type-II WP appears as the contact point between electron and hole pockets. The grey plane corresponds to the position of the Fermi level, and the blue (red) lines mark the boundaries of the hole (electron) pockets.^[7]

Table 1. A variety of Weyl metals showing different types and symmetries.

	Broken symmetry	Type
BiSb alloy, ZrTe ₅	Time Reversal	I
TaAs, TaP, NbAs, NbP	Inversion	I
WTe ₂ , MoTe ₂	Lorentz	II

부자기장 없이 바일금속이 될 수 있다. 대표적인 물질로는 TaAs, NbAs, TaP, NbP 등이 있다.^[6] 위에 기술된 두 종류의 바일금속군에서 바일노드는 항상 쌍을 이룬다. 하지만 각 쌍의 노드들의 배열에는 차이가 있다. 시간역전대칭이 깨진 바일금속의 노드는 $\mathbf{k}$, $-\mathbf{k}$ 에 있고, 각각의 키랄전하는 부호가 반대인 한 쌍의 바일노드가 존재한다. 하지만 반전대칭이 깨진 경우는 같은 부호의 키랄전하가 존재하게 되고, 총 키랄전하가 보존되어야 하기 때문에 $\mathbf{k}'$, $-\mathbf{k}'$ 에 반대의 키랄전하를 갖고 있는 바일쌍이 존재하게 되어 총 2쌍의 바일노드가 존재한다. 따라서 바일쌍의 개수가 다르기 때문에 전자수송실험에서 두 종류의 바일금속들은 서로 다른 경향성을 보일 수 있다.

대칭성의 유무와 달리, 바일금속은 타입 I과 타입 II로 나눌 수 있다. 타입 I은 그림 2(a)와 같이 페르미준위가 선형분산식을 가로질러 페르미면이 닫혀있다. 하지만 타입 II^[7]의 경우 그림 2(b)와 같이 선형분산식이 누워져 있고 페르미면이 열려있다. BiSb, ZrTe₅ 등이 타입 I으로 분류되고 WTe₂, MoTe₂ 등

REFERENCES

- [4] D. Shin, *et al.*, Nat. Mater. **16**, 1096 (2017).
- [5] Q. Li, *et al.*, Nat. Phys. **12**, 550 (2016).
- [6] B. Q. Lv, H. M. Weng, B. B. Fu, X. P. Wang, H. Miao, J. Ma, P. Richard, X. C. Huang, L. X. Zhao, G. F. Chen, Z. Fang, X. Dai, T. Qian and H. Ding, Phys. Rev. X **5**, 031013 (2015).
- [7] A. A. Soluyanov, *et al.*, Nature **527**, 495 (2015).

Fig. 3. Left, a sketch showing the four-fold degeneracy at 0 in zero B of the bands $|3/2, \pm 3/2\rangle$ (blue curve) and $|3/2, \pm 1/2\rangle$ (red curve). Au: Right, in finite B ($\parallel$ to the axis as shown), the larger Zeeman shift of $|3/2, \pm 3/2\rangle$ leads to Weyl nodes with opposite χ (red and grey cones).^[8]

이 타입 II로 분류된다(표 1 참조). 마찬가지로 타입 I과 II는 전기적, 광학적 성질이 다를 수 있고, 어떻게 다른지에 대한 연구가 진행되고 있다.

2. 하프 호이즐러(Half-Heusler) 바일금속

바일금속의 특징인 두 쌍의 선형 밴드가 한 바일노드에서 만나야 한다는 것은 바일 물리를 다양한 금속에 확장시키는 것을 저해한다. 이러한 한계를 극복해줄 금속으로써 하프호이즐러가 최근에 많은 연구자들의 관심을 끌고 있다. 하프호이즐러는 C_4 대칭성이 깨져 있어 라쉬바와 드레셀하우스 효과에 의한 스핀-궤도 결합이 나타나거나 혹은 자기장을 걸어주면 제만 에너지가 커서 중첩되어 있던 에너지띠가 스핀의 값에 따라 분리가 되어 두 개의 바일노드를 갖는 바일금속이 될 수 있다.

그림 3과 같이 자기장이 없을 때 감마 점에서 4개의 상태가 중첩된 하프 호이즐러에 자기장을 걸어주면 스핀 1/2을 가진 전자 에너지띠는 내려가고 스핀 -3/2 값을 가진 에너지띠는 올라가서 2개의 교점이 생긴다. 2개의 교점과 교점 근처에서의 에너지띠가 마치 2개의 바일 포인트와 선형 밴드처럼 행동하는 바일금속이 된다.^[8] 여기서 중요한 사실은 선형분산식을 갖는 디랙금속이 아니어도, 즉 약간의 갭이 있어도, 가해진 자기장에 의한 제만에너지가 크다면 그림 3과 같이 바일금속이 될 수 있다는 것이다.

기존에 선형 밴드를 가진 물질에 반전 대칭을 깨거나, 시간 대칭을 깨서 바일 포인트와 선형 에너지띠를 만든 것과 다르게 이차 혹은 약간의 에너지띠틈이 있더라도 바일금속을 만들 수 있다는 것이 하프 호이즐러의 특징이다. 또한 라쉬바 및 드레셀하우스 스핀궤도결합이 동시에 존재하는 하프호이즐러 물질 중에서 두 종류의 스핀궤도결합이 바일금속의 물성에 어떻

Fig. 4. (a) A schematic diagram of the charge pumping effect induced by the development of a Fermi-energy imbalance between two Weyl bands with opposite chirality for $B \parallel E$. (b) Current dependence of the longitudinal MR ($B \parallel E$) taken at $T = 5$ K in the Weyl state of $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$. The inset shows the current dependence of the transverse MR taken at the same current values as the longitudinal MR. The four MR curves overlay one another. (c) The I-V curves measured at $B = 0$ (left axis, black line) and $B = 9$ T for both longitudinal (left axis, red line) and transverse (right axis, green line) configurations at $T = 5$ K. (d) The I-V curves obtained from the subtraction of a linear slope in several magnetic fields for a LMR configuration.^[4]

게 영향을 미치는가는 최근 연구동향 중에 하나이다. 더불어서 몇몇 하프호이즐러 바일금속은 초전도 성질을 보이는데, 이는 위상초전도체 연구에 중요한 실마리를 줄 것으로 예상된다.^[9] 예를 들어 하프 호이즐러의 특이한 초전도 현상 중 하나인 임계온도 근처에서 자기 저항이 선형적인 특성은 위상적 효과라고 알려져 있다.

바일금속 물성연구

1. 음의자기저항

바일금속의 바일노드는 위상학적 특이점으로써 베리곡률을 가지고 있고 자기홀극처럼 행동한다. 이러한 바일노드들 사이에는 총 전류는 보존되나 키랄전류가 영이 안 되는 키랄변칙이 존재하는데, 이로 인해 특이한 전자수송현상들이 나타난다(그림 4(a)). 그 중 가장 널리 알려져 있는 것이 음의 자기저항(negative longitudinal magneto resistance, NLMR)이다. 이

REFERENCES

- [8] M. Hirschberger, *et al.*, Nat. Mater. **15**, 1161, doi:10.1038/nmat4684 (2016).
- [9] Z. Liu, *et al.*, Nat. Commun. **7**, 12924 (2016).

것은 이론적으로 잘 예측되고^[10,11] 실험적으로도 BiSb,^[3] ZrTe₅,^[5] TaAs^[12] 등에서 관측되었다. **E**와 **B**가 평행한 상태에 저항을 측정하면, 키랄변칙에 의해 저항이 **B**의 2승에 비례하여 작아지는 것이 바일금속의 음의자기저항 현상이다. 그림 4(b)는 BiSb에서 관측된 음의자기저항으로 자기장에 따라 저항이 올라가다 다시 내려가는 것을 보여준다. 자기장이 작은 영역과 큰 영역에서 저항의 경향성 반대가 되는 이유는 약한 반국소화(weak-antilocalization)와 위에서 설명한 음의자기저항의 세기 차이 때문이다. 양자역학적 관점에서 불순물에 의한 전자 산란은 보강간섭을 통하여 증가될 수 있고(약한 국소화효과), 이로 인해 저항이 증가될 수 있다. 하지만, 스핀-궤도 결합이 강한 물질에서는 스핀과 운동량이 결합되어 산란 시 상쇄 간섭이 일어나서 저항이 감소될 수 있다(약한 반국소화효과). BiSb는 스핀-궤도 결합이 큰 물질로써 자기장이 작은 영역에서는 약한 반국소화효과가 우세하여 자기장이 큰 영역인 음의 자기저항 구간보다 낮은 저항을 보여준다.

또한 자기장과 전류 사이의 각도에 따라 바일금속의 저항이 달라지게 된다.^[4] 그림 4(c)는 BiSb 시편에 자기장을 0 T(검정색), 전류에 수직으로 9 T(초록색), 또는 평행하게 9 T(빨간색)를 걸어주었을 때 나타나는 I-V 커브이다. 빨간선의 경우에만 I-V 커브가 휘어져서 나타나는 것은 키랄변칙으로 인한 전하평핑효과(그림 4(a)) 때문이다. 이는 금속물질에서 최초로 음의법칙이 깨진 사례이다. 이전까지는 금속 내에 전자의 페르미속도가 드리프트속도보다 훨씬 크기 때문에 비선형성이 나타나지 않았지만, 바일금속 내에 자기장이 전기장과 평행하게 걸려있게 되면 전하평핑효과에 의해 비선형 저항이 나올 수 있게 된다. 자세한 내용은 아래 “음의 법칙 깨짐” 장을 참고 바란다.

2. 비정상적 홀 효과 및 양자진동 실험

바일금속의 바일노드는 특이한 베리곡률을 갖고 있기 때문에 운동량 공간에서 자기홀극으로 근사되고, 이로 인해 바일금속은 비정상적인 홀전압을 갖고 있을 것이라 예상된다.^[13,14] 이는 쿠보공식에서 쉽게 확인할 수 있다: 즉, 쿠보공식을 통해 바일금속의 홀전압을 계산하면 자기장이 걸려있지 않은 상태에서도 $\sigma_{xy}^{AHE} = \sum_{i,k} n_{i,k} \Omega_{i,k}^z$ 같이 베리곡률에 수직하게 홀전압이 측정됨을 알 수 있다. 실험적으로는 2018년 ZrTe₅에서 비정상적 홀 전압이 측정되었다.^[15]

지금까지 기술한 전자수송 현상은 자기장의 세기가 작아서 란다우 준위를 고려하지 않았을 때이다. 자기장이 커지게 되면 바일금속에서 란다우 준위를 고려해야 한다. 바일금속의 란다우 준위는 자기장 하에서의 바일금속의 해밀토니언 방정식을 이용하여 기술할 수 있다(그림 5 참조). 원래는 바일노드 2개

Fig. 5. Landau levels with a chiral zero mode in a Weyl metal.^[16]

가 쌍을 이루어 존재하는 상황에서 자기장에 의해 각각의 란다우 준위가 나누어진다. 중요한 점은 각각의 란다우 준위의 모양이 이차함수와 유사한 형태를 나타내지만, 키랄 제로모드(chiral zero mode)라고 불리는 한 개의 준위만 선형성을 갖게 된다(그림 5 빨간 화살표 참조). 따라서 바일금속에서 란다우 준위가 형성되어도 키랄 제로모드의 존재로 인해 키랄변칙이 존재하고 앞에서 언급된 여러 흥미 있는 바일전자 수송현상들이 나타난다.

주목할 점은 란다우 준위를 고려해야 하는 고자기장 영역에서는 새로운 전자수송현상이 나타나게 된다. 대표적으로는 베리 곡률이 특이하기 때문에 양자진동에서 나타나는 주기성이 $S_n \frac{\hbar}{eH_n} = 2\pi(n + \frac{1}{2} + \beta + \delta)$ 같이 표현된다.^[17] 여기서 S_n 는 각 란다우 준위의 페르미면의 넓이, β 는 베리위상, δ 는 2D에서는 0, 3D에서는 $\pm \frac{1}{8}$ 이라는 값을 가지는 추가적인 위상 이동이다. 일반적인 포물선 밴드에서는 베리위상이 0이어야 하지만, 바일금속에서는 0이 아닌 값을 갖게 된다. 이러한 결과는 양자진동에서 나타나는 란다우 준위의 위치를 확인해보면

REFERENCES

- [10] D. T. Son and B. Z. Spivak, Phys. Rev. B **88**, 104412, doi:ARTN 104412 10.1103/PhysRevB.88.104412 (2013).
- [11] K. S. Kim, H. J. Kim and M. Sasaki, Phys. Rev. B **89**, 195137, doi:ARTN 195137 10.1103/PhysRevB.89.195137 (2014).
- [12] X. C. Huang, *et al.*, Phys. Rev. X **5**, 031023, doi:ARTN 031023 10.1103/PhysRevX.5.031023 (2015).
- [13] A. A. Burkov, Phys. Rev. Lett. **113**, 187202, doi:10.1103/PhysRevLett.113.187202 (2014).
- [14] N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, A. H. MacDonald and N. P. Ong, Rev. of Mod. Phys. **82**, 1539, doi:10.1103/RevModPhys.82.1539 (2010).
- [15] T. Liang, *et al.*, Nat. Phys. **14**, 451 (2018).
- [16] M.-C. Chang, Lecture notes on topological insulators (2017).
- [17] L.-X. Wang, C.-Z. Li, D.-P. Yu and Z.-M. Liao, Nat. Commun. **7**, 10769 (2016).

Fig. 6. Index plot to extract the Berry phase for samples S_1^a and S_2^a (as detailed in the text). The inset shows quantum oscillations in conductivity σ_{xx} for S_2^a fitted to the Lifshitz-Kosevich formula (dashed line) with a phase of $\beta=0.84$.^[18]

알 수 있다. 그림 6은 Cd_3As_2 에서 측정된 란다우 준위의 위치를 인덱싱한 것으로 베리 위상이 0.84인 위상금속임을 알려준다.^[18] 이처럼 비정상-홀효과 및 양자진동 실험은 바일금속임을 알려주는 실험 지표가 될 수 있다.

3. 비국소적 전자수송

(1) 키랄변칙에 의한 비국소성

그림 7 같이 자기장과 전기장을 국소적인 곳에 걸어주면 키랄 변칙에 의해 키랄포텐셜 차이가 국소적으로 생기고, 양의 키랄 전자가 음의 키랄 전자보다 더 많아지게 된다(전하편평 효과). 키랄포텐셜은 긴 완화시간 때문에 국소적이지 않은 영역까지 퍼져서, 국소전기장이 없는 곳에서도 키랄포텐셜 차이가 존재하게 된다.

키랄포텐셜 차이가 있는 상황에서 감지 자기장을 걸어주면, 자기장에 의해 전하편평이 가능한 채널이 생기고 이때 전압차가 관측된다. 재미있는 점은 감지자기장을 걸어주지 않으면 전압차가 관측이 안 되는데, 이는 비국소성이 순전히 키랄변칙에 의한 것이라는 증거이다.^[19] 전자수송 실험으로 키랄변칙을 측정하는 것은 측정값이 키랄변칙에 의한 것인지 금속의 다른 특징 때문인지 구분해 내기가 힘들기 때문에 쉽지 않다. 예를 들어, 관측된 음의 자기저항(NLMR)이 키랄변칙에 의한 전자수송에 의한 것인지 혹은 전류제팅(current jetting) 효과인지 구분하는 것은 어려운 과제 중 하나였지만, 비국소성 측정은 키랄변칙에 의해서만 나타나기 때문에 키랄변칙 효과를 직접적으로 측정하기 좋은 예이다.

(2) 유체역학에 의한 비국소성

고체에서 전자들 간의 상호작용이 매우 강하여 불순물에 의한 산란 시간보다 전자들 간의 산란 시간이 훨씬 작으면 마치

Fig. 7. Non local experiment set up. Left: Electric field and magnetic field are applied. Right: only detection magnetic field is applied.^[19]

Fig. 8. Electron's flow. Left: Hydrodynamic flow. Right: conventional Ohmic flow.^[20]

전자들이 물처럼 행동하는 구간이 존재한다. 이 구간에서는 전혀 예상하지 못했던 다양한 현상들이 나타날 수 있는데, 대표적인 것이 전자흐름의 분포가 등방적이지 않다는 것이다. 그림 8의 오른쪽은 전자의 분포가 등방적인 전형적인 옴식 흐름이고, 왼쪽은 비등방적인 전자의 유체역학적 흐름을 나타낸다. 유체역학적 흐름에서는 상호작용이 강하여 한 흐름이 다른 흐름에 마찰을 주거나, 또는 끌고 가는 현상이 발생한다. 우리가 물웅덩이 한 가운데를 밀면 가운데뿐만 아니라 그 근처 물들도 같이 앞으로 가는 것과 유사한 현상이다.^[20]

최근에 그래핀에서 전자의 흐름이 유체처럼 행동하는 구간이 존재한다고 알려져 있다. 전압 차를 준 영역 밖에서 음의 저항이 측정된 것인데, 이는 전자들이 물처럼 행동을 하여 밀어준 영역 밖에도 전자의 흐름이 생겼고, 그 흐름에 의해 소용돌이

REFERENCES

- [18] A. Narayanan, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 117201 (2015).
- [19] S. A. Parameswaran, T. Grover, D. A. Abanin, D. A. Pesin and A. Vishwanath, Phys. Rev. X **4**, 031035, doi:ARTN 031035 10.1103/PhysRevX.4.031035 (2014).
- [20] J. Gooth, *et al.* Electrical and thermal transport at the planckian bound of dissipation in the hydrodynamic electron fluid of WP_2 . arXiv preprint arXiv:1706.05925 (2017).

Fig. 9. Top: Non-local negative resistance. Bottom: Mechanism of a negative electrical response: viscous shear flow generates vorticity and a backflow on the side of the main current path.^[21]

가 생겼기 때문이다.^[21]

이 결과는 많은 논쟁을 낳았고, 후에 많은 이론적 계산과 시뮬레이션 결과들이 보고되었다.^[21] 현재는 강한상호작용하는 전자들이 유체처럼 행동할 수 있다는 사실이 받아들여지고 있고, 더 나아가 그래핀 전자들의 점성까지 보고되고 있다.^[22]

현재 키타변칙까지 고려한 유체역학이나 그래핀에서의 소용돌이 현상에 관한 연구가 진행 중에 있다. 유체역학적 구간에선, 바일금속의 키타변칙과 비정상-홀 효과를 고려해야 비국소적 포텐셜이 관측된다는 것이 예측되었고,^[23] 유체역학적 구간의 원인이 그래핀과 다르게 전자-전자 상호작용이 아닌 전자-포논 상호작용이라는 계산결과가 최근 발표되었다.^[24] 실험적으로는, 타입 II 바일금속인 WP₂에서 유체역학적 구간이 존재한다는 것이 보고되었다.^[20] 앞으로 바일전자들의 위상 성질과 상호작용의 결합에 의한 재미있는 수송 현상들이 관측될 것이라 기대된다.

4. 비선형 저항

일반적인 금속에서 전자는 빛의 속도에 가까운 페르미속도 ($\sim 10^6$ m/sec)로 방향성 없이 움직이고 있다. 금속에 전압을 걸어주면 전자는 전기장 방향으로 이동하는데 그 이동속도는 약 10^{-4} m/sec로 페르미속도보다 대략 10^{10} 배 작다. 이처럼 인가된 전기장에 기인한 전자의 이동속도는 페르미속도에 비해

서 매우 작기 때문에, 일반적으로 가해진 전기장은 전자의 고 유속도인 페르미속도에 영향을 줄 수 없다. 금속에서 옴의 법칙은 금속에 필연적으로 존재하는 불순물(저항을 만드는 여러 가지 원인을 지칭)과 전자의 페르미속도 때문에 전자의 운동이 가해진 전기장에 따라 계속해서 가속되지 않고 전류의 흐름이 일정한, 즉 전류밀도는 전기장에 비례한다는 법칙이다. 금속에서 옴의 법칙을 깨기 위해서는 1) 불순물을 제거해서 전자가 가속도 운동을 하여 전자의 이동속도가 페르미속도에 가깝게 하거나, 2) 전자의 이동속도가 페르미속도가 되도록 강한 전기장을 가해주거나, 3) 금속의 페르미에너지를 조절하여 페르미속도를 전자의 이동속도만큼 낮추는 것이다. 위 3가지 경우는, 마치 현재 기술로는 물체의 속도를 빛의 속도로 가속시킬 수 없듯이, 거의 불가능한 영역에 있다. 위와 같은 이유로 금속에서 옴의 법칙은 190년간 깨지지 않은 법칙으로 자리매김하고 있다.

바일금속은 기존금속과 달리 위상학적 전자구조로 인해 키타 변칙이 존재하고, 두 개의 바일특이점(바일노드)들 간에 전하펌핑 효과가 나타난다. 즉, 바일금속에 전기장이 가해지면 바일노드 간에 전하펌핑 효과로 인해 저항없이 전류가 흐르게 된다. 따라서 바일금속에서는 가해진 전기장 때문에 생기는 일반적인 전자의 이동과 전하펌핑 효과로 인한 전자의 이동, 즉 두 종류의 전위차(인가된 전기장과 전하펌핑 효과에 의한 전기장)가 전자의 운동에 영향을 준다. 두 가지 전위차에 의한 바일금속의 전류밀도는 다음과 같이 표시된다:

$$\begin{aligned} j &\propto (\tau^0 + \tau^1 + \tau^2 + \dots)((\mu_5)^0 + (\mu_5)^1 + (\mu_5)^2 + \dots) \\ &= \tau^0(\mu_5)^0 + \tau^0(\mu_5)^1 + \tau^0(\mu_5)^2 \\ &\quad + \tau^1(\mu_5)^0 + \tau^1(\mu_5)^1 + \tau^1(\mu_5)^2 \\ &\quad + \tau^2(\mu_5)^0 + \tau^2(\mu_5)^1 + \tau^2(\mu_5)^2 + \dots \\ &= \tau^0(\mu_5)^1 + \tau^1(\mu_5)^0 + \tau^1(\mu_5)^2 + \tau^2(\mu_5)^1 + \dots, \end{aligned}$$

τ 는 전자의 산란시간이고, μ_5 는 바일전자의 전하펌핑 에너지

REFERENCES

- [21] L. Levitov and G. Falkovich, Nat. Phys. **12**, 672, doi:10.1038/Nphys3667 (2016).
- [22] A. Tomadin, G. Vignale and M. Polini, Phys. Rev. Lett. **113**, 235901, doi:10.1103/PhysRevLett.113.235901 (2014).
- [23] E. V. Gorbar, V. A. Miransky, I. A. Shovkovy and P. O. Sukhachov, Phys. Rev. B **97**, 205119, doi:ARTN 205119 10.1103/PhysRevB.97.205119 (2018).
- [24] J. Coulter, R. Sundararaman and P. Narang, Microscopic Origins of Hydrodynamic Transport in Type-II Weyl Semimetal WP₂. arXiv preprint arXiv:1804.06310 (2018).

이다. “ $\tau^0 + \tau^1 + \tau^2 + \dots$ ”로 표시된 항은 인가된 전기장에 의한 것이고 “ $(\mu_5)^0 + (\mu_5)^1 + (\mu_5)^2 + \dots$ ”은 전하펌핑으로 생긴 전기장에 의한 것이고 일반적인 금속에서는 존재하지 않는다. τ 와 μ_5 는 전기장 E 로 표시될 수 있고, 위 식은 간단히 $j \propto \sigma_1 E + \sigma_2 E^3 + \dots$ 로써 표현된다. 따라서 바일금속에서 전류밀도는 전기장의 세제곱에 비례하는 비선형 항이 나타나게 되고, 이로 인해 옴의 법칙이 깨지게 된다.

요약하면, 바일금속은 쌍으로 이루어진 두 개의 바일콘(자기 홀극) 사이에 저항이 없는 전도 채널이 존재한다. 두 개의 바일콘을 잇는 방향으로 전기장을 가하면 카이럴 변칙으로 인한 전하펌핑이 나타나고, 이것이 비선형저항을 생성시키는 원인이 된다. 비선형저항의 발견은 엑시온 전자기학이 적용되는 바일 금속에서 자기홀극의 존재를 밝힌 최초의 실험으로 물리학적으로 중요한 의미를 갖는다. 또한, 금속이 비선형저항을 보인 것은 옴의 법칙이 발견된 이후 처음 있는 예로써, 이를 이용하면 금속만으로 이루어진 전자소자를 구현할 수 있다. 만약 금속으로 트랜지스터와 같은 전자소자를 만들 수 있다면 다음과 같은 장점이 있다: 1) 금속은 반도체에 비해서 열전도도가 크므로 현재 반도체소자의 발열 문제를 획기적으로 개선할 수 있다. 2) 바일금속은 카이럴 변칙에 기인한 저항이 없는 채널로

인해 전자의 이동도가 매우 높기 때문에 기존의 반도체보다 훨씬 빠르게 동작하면서도 소모되는 에너지가 적은 극 저전력 소자를 구현할 수 있다. 바일금속의 비선형 저항은 앞으로 금속을 이용한 비선형전자공학 분야를 열 것으로 기대된다.

나오는 글

금속의 위상학적 성질에 대한 연구는 최근 응집물질물리의 주된 연구대상이다. 대표적인 위상금속인 바일금속은 카이럴 변칙에 기인한 여러 재미있는 전기 및 광학적 물성을 보여준다. 특히, 전하펌핑에 의한 비선형전기전도도는 일반금속에서는 나타나지 않는 바일금속만의 성질이다. 바일금속에 대한 대표적 물성인 음의자기저항(2013년) 및 비선형 저항(2017년) 등은 한국 과학자에 의해서 최초로 발견되었고, 한국이 세계적으로 바일 금속을 선도하는 분야이다. 향후 바일금속을 이용한 금속트랜지스터의 발명 및 획기적인 전자소자의 개발 또한 한국 과학자의 손에서 이루어진다면, 바일금속의 최초 발견, 최초 성질 규명, 최초 전자소자개발 등의 중요한 일들을 모두 한국인 과학자가 해내는 일이 된다. 이와 같은 물리학의 흐름을 바꿀 만큼 엄청난 일이 한국에서 곧 일어나길 바란다.