바일 반금속의 광학적 특성

DOI: 10.3938/PhiT.27.024

김 재 훈

Optical Properties of Weyl Semimetals

Jae Hoon KIM

Weyl semimetals constitute an important class of topological materials currently at the forefront of condensed matter research. The novel electronic structures of Weyl semimetals derived from the presence of Weyl nodes lead to a number of unique physical properties. The interactions of Weyl semimetals with low-frequency electromagnetic waves provide us with further opportunities to probe the dynamics of relativistic chiral fermions in the condensed matter setting. Here, we review the optical properties of Weyl semimetals, concentrating on the low-energy excitations, the universal linear interband absorption, and the chiral anomaly effect under parallel electric and magnetic fields.

들어가는 글

1980년대 중반부터 양자 Hall 전자계(quantum Hall system)와 고온초전도(high temperature superconductivity) 양대 분야가 고체물리학의 최전선을 이루며 지난 30년간 전례 없는 수준의 집중적 연구 노력이 경주되었고, 해당 분야뿐만 아니라 관련된 신물질 합성과 정밀측정 및 이론계산 분야에서 눈부신 발전이 이루어졌다. 고온초전도 물리는 주로 강상관계(strongly correlated systems) 개념을 중심으로 실험 및 이론 연구가 진행되었고, 양자 Hall 전자계는 위상기하(topology)를 고체물리학에 전면적으로 도입하는 계기를 가져왔다.^[1] 여기에 고체물리학의 제3의 최전선을 이루게 되는 이른바 위상

물질(topological materials)^[2]은 양자 Hall 전자계의 확장으로부터 출발하여 결국은 위상초전도(topological superconductivity)^[3]에 이르기까지 일련의 새로운 현상과 개념을 우리에게 제공하고 있다. 위상물질은 기본적으로 2차원계인 양자 Hall 전자계와 그래핀을 넘어서 3차원 위상절연체(topological insulator)^[4]가 그 중심을 이루고 있으며 최근 바일 반금속(Weyl semimetal)^[5]과 디랙 반금속(Dirac semimetals)^[6,7]으로 확장되었다. 또한 위상절연체와 초전도체의 이중접합에서 발생하는 Majorana 페르미온 관련 연구는 미래양자소자에 응용되어 위상전자공학(topotronics)과 양자전산(quantum computation)의 중심 주제로 등장할 것으로 기대되고 있다.

여기서 우선 대표적 위상물질인 위상절연체와 디랙 반금속 및 바일 반금속의 차이를 짚고 넘어갈 필요가 있다. 위상절연체는 기본적으로 벌크 부도체이지만 그 밴드구조의 특이한 위상기하적 성질로 인해 특별한 위상표면상태(topological surface states)가 존재하며 디랙점(Dirac point)을 중심으로 선형 분산(linear dispersion)을 보여준다.^[8,9] 특히 벌크 밴드구조는 강한 스핀-궤도 상호작용(spin-orbit interaction)으로 인한 전도대-가전자대 사이 밴드반전에 기인하고, 일단 형성된 위상표면상태의 디랙점은 밴드갭이 유지되는 한 시간반전대칭성(time reversal symmetry)에 의해 보호된다. 이에 반해 디랙 반금속은 보통 위상절연체가 일반부도체로 위상상전이(topological phase transition)를 거쳐 가면서 중간에 밴드가 닫히는 단계에서 발생하며, 해당 조절인자(tuning parameter)의 값에 예민하게 반응하므로 일반적으로는 보호되지 않는 불안정한 상태로 발견된다.^[6,7] 하지만 최근 이러한 방식을 따르지 않고 결정 대

REFERENCES

- [1] D. J. Thouless *et al.*, Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982).
- [2] C. L. Kane *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 146802 (2005).
- [3] A. P. Schnyder *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 195125 (2008).
- [4] L. Fu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 106803 (2007).
- [5] X. Wan *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 205101 (2011).
- [6] S. Murakami, New J. Phys. **9**, 356 (2007).
- [7] S. Murakami *et al.*, Phys. Rev. B **76**, 205304 (2007).
- [8] P. Hosur *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 046602 (2012).
- [9] P. E. C. Ashby *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 245121 (2014).

저자약력

김재훈 교수는 Stanford University 전자공학 박사(1992)로서 Stanford 고체 연구소(Stanford Solid State Laboratory) 및 네덜란드 Groningen University/국립물성연구소 박사후 연구원을 거쳐 1995년부터 연세대학교 물리학과 교수로 재직 중이며 주로 위상물질과 초전도체 및 자성체의 테라헤르츠 양자물성을 연구하고 있다.(super@yonsei.ac.kr)

Fig. 1. Electronic structure of semimetallic topological materials. (a) Dirac semimetal, (b) Weyl semimetal with broken time reversal symmetry (TRS), (c) Dirac semimetal with Fermi arcs, and (d) Weyl semimetal with broken inversion symmetry (IS). The plus and minus signs represent the right- and left-handed chiralities, respectively.^[10]

칭성(crystal symmetry)에 의해 보호되는 안정적인 디랙 반금속도 소수 발견되었다.^[11-13] 밴드가 닫히는 임계점에서 형성되는 디랙 노드(Dirac node)는 위상절연체에서와는 달리 벌크 밴드의 교차점이며, 근방의 전자-가전자 밴드가 각각 2중축퇴되어 있어 노드 자체는 4중축퇴 상태이다. 바일 반금속은 여기서 디랙 노드가 카이럴성(chirality)에 따라 2중 축퇴된 두 바일 노드(Weyl node)로 갈라진 것으로 보는 것이 편리한 방법이다. 이는 시간반전대칭성 혹은 공간반전대칭성(inversion symmetry) 중 적어도 한 가지가 파괴될 때 가능한 것으로 알려져 있다. 두 바일 노드 역시 벌크밴드의 교차점이지만 이 경우 스핀이 서로 반대의 나선성(helicity)을 가지고 개별 바일 노드의 카이럴성을 따라 가는 것으로 보면 된다(그림 1 참조).

광학적 특성과 동전도도

여기서는 바일 반금속의 광학적 특성을 다루게 됨에 따라 몇 가지 사항을 먼저 고려해 보기로 하자. 첫째로 바일 반금속은 위상절연체 및 디랙 반금속과 마찬가지로 노드를 중심으로 하는 선형분산이 페르미 준위 근처의 전자물성 특히 빛과의 상호작용에 관련된 광학적 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 따라 저주파수의 전자기파 흡수 스펙트럼은 3종 위상물질에서 유사하게 나타나게 된다. 둘째로 외부 자기장의 영향에 따라 3종 위상물질은 큰 차이를 보일 것을 기대할 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 위상절연체는 수직자기장에 의해 시간반

전대칭성이 파괴되면 위상표면상태에 갭이 생기면서 Faraday 및 Kerr 효과가 나타난다는 것이 보고되었다.^[14] 디랙 반금속의 경우는 적절한 조건에서 디랙 노드가 보존되나,^[15] 어떤 경우에는 바일 반금속으로 상전이가 이루어지고 이에 따라 광학적 특성이 좌우된다. 세 번째로 바일 반금속은 특징적인 카이럴 변칙효과(chiral anomaly effect)가 있다. 이에 따르면 외부 전기장과 외부 자기장이 평행할 경우 개별 바일 노드의 전자 밀도가 보존되지 않으며, 그 효과가 저주파수 흡수 스펙트럼에서 직접 관찰 가능할 것으로 기대된다.

바일 반금속의 광학적 특성을 살펴보기 위해 먼저 관련 핵심 물리량과 실험적 배경에 대한 간단한 논의가 필요하다. 일반적으로 광학적 특성이라 하면 고체와 빛의 상호작용을 나타내는 여러 물리적 성질을 가리키는 것으로서, 주파수와 편광 및 온도와 이방성 혹은 외부 자기장 효과 및 비선형 반응까지 방대한 연구 주제라 할 수 있다. 여기서 우리의 관심 영역이 되는 빛 혹은 전자기파의 파장은 대상 물질에 따라 가시광(visible)뿐만 아니라 마이크로웨이브(microwave)-테라헤르츠(terahertz)-적외선(infrared)은 물론 넓게는 자외선(ultraviolet)-X선(X-ray) 영역 중에서 선택되는 것이다. 다만 바일 반금속 및 기타 위상물질의 경우, 노드 근처의 선형분산 상태가 주로 관심의 대상이므로 해당 광특성도 주로 테라헤르츠 및 원적외선에서 보게 되며, 이는 에너지로는 0.1 meV부터 50 meV 정도, 주파수로서는 대략 0.1-10 THz 영역이다. 한편, 이에 상당하는 빛의 파장은 마이크로-밀리미터에 걸쳐 있으므로 대부분의 고체 단위격자보다 훨씬 길다. 따라서 이른바 장파장 극한(the long wavelength limit)으로 근사를 취하면 빛의 파수는 거의 0인 것으로 보고 물질의 광특성 계산에서도 각주파수 Ω 만 고려하면서 운동량 혹은 파수벡터 k 의존도를 무시할 수 있다.

보통 광특성의 선형응답(linear response)은 주파수의 함수인 동전도도(dynamic conductivity) 혹은 광학전도도(optical conductivity) $\sigma(\Omega) = \sigma_1(\Omega) + i\sigma_2(\Omega)$ 로 제시되며 기본적으로 DC 전도도(DC conductivity)를 주파수의 함수로 확장한 것으로 보면 된다. 여기서 실수부 $\sigma_1(\Omega)$ 와 허수부 $\sigma_2(\Omega)$

REFERENCES

- [10] S. Q. Shen, Topological Dirac and Weyl Semimetals, In *Topological Insulators, Springer Series in Solid-State Sciences* (Springer, 2017), vol. 187.
- [11] Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 195320 (2012).
- [12] S. M. Young *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 140405 (2012).
- [13] J. A. Steinberg *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 036403 (2014).
- [14] L. Wu *et al.*, Science **354**, 1124 (2016).
- [15] V. A. Miransky *et al.*, Physics Reports **576**, 1 (2015).

는 각각 광반응의 손실(dissipative)과 유도(inductive) 성격을 표시하는 것으로 보면 된다. 두 함수는 Kramers-Kronig 관계식으로 묶여 있으므로 보통 $\sigma_1(\Omega)$ 의 흡수 스펙트럼에 주목하고자 한다. 여기에 물질의 고유한 밴드구조 혹은 내부 상호작용이 반영되고, 또한 온도, 압력, 외부 자기장 등의 외부 환경에 따라 다양한 결과가 나타난다. 테라헤르츠와 적외선 영역에서의 일반적인 분광측정 및 결과해석 과정은 W. Withayachumnankul *et al.* 논문을 참고하기 바란다.^[16]

바일 반금속의 저주파수 광특성

먼저 이론적인 배경을 간략히 제시하자면, 단환근사(one-loop approximation) 수준에서 Kubo 공식으로 얻는 유한주파수에서의 동전도도 텐서의 실수부는

$$\sigma_{\alpha\beta}(\Omega) = \frac{e^2 \pi \hbar}{\Omega} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega [f(\omega) - f(\omega + \Omega)] \times \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \text{Tr}[\hat{v}_\alpha \hat{A}(\mathbf{k}, \omega) \hat{v}_\beta \hat{A}(\mathbf{k}, \omega + \Omega)]$$

으로 주어진다.^[17] 여기서

$$f(\omega) = [\exp[(\omega - \mu)/T] + 1]^{-1}$$

는 페르미 함수(Fermi function)이고, 속도연산자 $\hat{v}$ 는 Hamiltonian 연산자

$$\hat{H} = \hbar v_F \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{k}$$

와 연결되어

$$\hat{v}_\alpha = (1/\hbar)(\partial \hat{H} / \partial k_\alpha) = v_F \hat{\sigma}_\alpha$$

가 되는데 여기서 $\hat{\sigma}_\alpha$ 는 스핀 연산자이다. 이른바 spectral function $\hat{A}$ 는 그린 함수(Green function)와 관련되어 있고

$$\hat{G}(\mathbf{k}, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{A}(\mathbf{k}, \omega)}{z - \omega} d\omega$$

반대로 그린함수 $\hat{G}$ 는 다시 $\hat{H}$ 와

Fig. 2. Optical conductivity of a single node as a function of angular frequency in energy units.^[17]

$$\hat{G}^{-1}(\mathbf{k}, z) = \hat{I}z - \hat{H}$$

방식으로 연결되어 있다. 여기서 $\hat{I}$ 는 Hamiltonian 연산자의 표현행렬과 같은 차원에서 정의되는 단위행렬이다.

이러한 방식으로 종축 동전도도(longitudinal optical conductivity)($\alpha = \beta$)를 계산한 결과는, 자체에너지(self energy)의 허수부만 포함시킨 경우, C. J. Tabert *et al.* 논문^[17]에 상세히 나와 있다. DC 극한과 절대온도 0도를 가정하고 또한 화학퍼텐셜(chemical potential)을 단일 노드에 붙이면,

$$\sigma_{DC} = \frac{e^2}{12\pi^2 \hbar^2 v_F} \frac{\mu^2 + 3\Gamma(\mu)^2}{\Gamma(\mu)}$$

와 같은 식이 유도된다. 여기서 Γ 는 자체에너지의 허수부로서 산란율(scattering rate)로 볼 수 있고 주파수의 함수이다. 결과적으로 단일 노드에서 비롯되는 DC 전도도는 페르미 속도(Fermi velocity)와 산란율에 좌우되므로 위상절연체의 경우처럼 기본상수만의 조합으로 이루어진 전도양자(conductance quantum)의 배수로 주어지지 않는다는 특징이 있다.

다음으로는 다시 일반적인 경우로 돌아가 유한주파수와 유한온도 및 노드에서 분리된 화학퍼텐셜을 가정하고 계산된 결과를 보도록 하자. 여기서도 논의를 간단화하기 위해, 앞서 나왔던 Γ 를 상수인 Γ_0 로 놓고 계산한 이후 Γ_0 를 0으로 보내

REFERENCES

- [16] W. Withayachumnankul *et al.*, J Infrared Milli Terahz Waves 35, 610 (2014).
- [17] C. J. Tabert *et al.*, Phys. Rev. B 93, 085426 (2016).

고 온도 또한 0으로 보내면 다음 결과를 얻게 되며, 여기서 편의상 자유전자 운반자와 관련된 Drude 부분(D로 표기)과 노드를 중심으로 한 대간전이(interband transition) 부분(IB로 표기)을 분리하여 표시하였다.

$$\sigma_{xx}^D(\Omega) = \frac{e^2 \epsilon_F^2}{3\pi^2 \hbar^2 v_F} \delta(\Omega)$$

$$\sigma_{xx}^{IB}(\Omega) = \frac{e^2}{24\pi \hbar^2 v_F} \Omega \Theta(\Omega - 2|\epsilon_F|)$$

여기서 페르미 에너지(Fermi energy) ϵ_F 는 절대온도 0도에 서의 화학퍼텐셜이다. 이 결과는 저주파수 저온상태 실험을 해석할 수 있는 기초적이고 유용한 모형이 됨을 알 수 있다. 먼저 Drude 부분은 Dirac delta 함수로 주어지므로 London 초전도체와 유사한 양상을 보이고 있고, IB 부분은 선형주파수 의존도를 보이되 ϵ_F 가 0이 아닐 경우 Pauli 봉쇄효과(Pauli blocking effect)에 의한 임계주파수가 있다는 것을 보여 준다. 여기서는 자세히 논의하기 어렵지만, 다시 유한한 상수 산란율을 가정하면 Drude 부분은 0 주파수에 중심으로 Lorentzian 함수에 미약한 2차함수를 곱한 모양으로 나오고, IB 부분도 문턱이 부드러워지면서 미약한 상수배경을 갖게 된다. 그림 2에 이와 유사한 상황이 제시되었다.

지금까지의 논의는 단일노드에 대한 것이었고 이는 디랙 반금속 및 시간반전대칭 파괴형 바일 반금속의 경우 단순히 노드의 숫자만 곱해 실험결과와 비교할 수 있다. 다만 후자의 경우 노드 간 펌핑(internode pumping)이 있을 때는 화학퍼텐셜이 노드에 따라 달라지므로^[18] IB 부분에서 두 개의 임계흡수 주파수가 존재하게 됨에 주의하자. 또한 시간반전대칭을 보존하는 공간반전대칭 파괴형 바일 반금속의 경우에는 처음부터 에너지가 다른 바일 노드쌍들이 발생할 수 있으므로 역시 두 개 이상의 임계흡수 주파수를 기대할 수 있다.

최근 분광측정 실험결과

이제 실제로 바일 반금속으로 확정된 대표적 물질들에 대한 분광측정 실험결과를 살펴보고자 한다. 최근 자발적인 시간반전대칭 파괴형 바일 반금속의 유력한 후보가 보고^[19,20]되었지만 아직 분광측정 실험은 수행되지 않았다. 디랙 반금속에 자기장을 인가하여 얻는 바일 반금속의 경우 시간반전대칭 파괴에 의한 바일 노드 형성이 가능하며 대표적인 예로서는 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 가 있다. 또한 공간반전대칭 파괴형의 바일 반금속은 TaAs, TaP, NbP 등이 있는 것으로 알려져 있다. 여기서는 디랙 반

Fig. 3. Absorption coefficient of $\text{Hg}_{0.83}\text{Cd}_{0.17}\text{Te}$ as a function of energy. The inset shows interband transitions dominantly from the heavy-hole band.^[22]

금속도 함께 비교해 가면서 지금까지 보고된 실험결과를 살펴 보자.

먼저 ZrTe_5 디랙 반금속의 경우, R. Y. Chen *et al.* 논문^[21]에서 보고된 것처럼 $50 - 1200 \text{ cm}^{-1}$ ($6 - 150 \text{ meV}$)의 꽤 넓은 영역에서 선형의 동전도도 스펙트럼이 보고되었다. 다만 여기서 추출되는 페르미 속도가 각분해광전자분광(angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES) 측정에서 관측된 값의 30배에 해당되어 이론적 기대와 크게 어긋난다. 하지만 이는 이 물질의 준이차원성(quasi-two dimensionality)의 결과일 수도 있다고 생각되었다. M. Orlita *et al.* 논문^[22]에서는 $\text{Hg}_{0.83}\text{Cd}_{0.17}\text{Te}$ 의 동전도도가 $50 - 350 \text{ meV}$ 영역에서 선형임이 보고되었으나 이 물질은 Kane 페르미온이라는 특별한 밴드구조를 가진 것으로서 디랙 혹은 바일 반금속은 아닌 것으로 밝혀졌다(그림 3 참조). A. Akrap *et al.* 논문^[23]에서는 Cd_3As_2 디랙 반금속의 선형 동전도도가, 그리고 D. Neubauer *et al.* 논문^[24]에서는 비선형 동전도도가 보고되었고, 이는 결국 Cd_3As_2 도 Kane 페르미온 물질이기 때문으로 분석되었다.

다음으로는 공간반전대칭 파괴형 바일 반금속으로 확인된 물

REFERENCES

- [18] J. Behrends *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 075114 (2016).
- [19] J. Kübler *et al.*, EPL **120**, 47002 (2017).
- [20] X. Li *et al.*, arXiv:1802.00277v2 (2018).
- [21] R. Y. Chen *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 075107 (2015).
- [22] M. Orlita *et al.*, Nat. Phys. **10**, 233 (2014).
- [23] A. Akrap *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 136401 (2016).
- [24] D. Neubauer *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 121202(R) (2016).

Fig. 4. Real part of the optical conductivity of TaAs as a function of temperature and wave number. The inset shows Drude model fits to low-frequency parts.^[25]

질 중에서 TaAs 측정결과가 B. Xu *et al.* 논문^[25]에서 보고되었는데 그림 4에 제시된 것처럼 Drude 부분과 선형 IB 부분이 뚜렷이 나타난 동전도도 스펙트럼이 관찰된다. Drude 부분은 저온에서 약 50 cm⁻¹의 선폭을 갖고 있으며 온도의 제곱에 비례하는 모습이 이론과 잘 맞았고 선형 동전도도 모양이 1000 cm⁻¹까지 관찰되어 이의 원인이 되는 총 12개 중 4개의 바일 노드 쌍이 화학퍼텐셜보다 겨우 2 meV 위에 있을 것으로 분석되었다.

카이럴 변칙효과와 Landau 준위

바일 반금속의 여러 물성 중 가장 매력적인 것은 아마도 카이럴 변칙효과일 것이다. 이 효과는 위상절연체에서는 찾아볼 수 없는 바일 반금속의 특징적인 물성으로서 고체물리학의 위상물질과 입자물리의 양자장론의 접점을 제시하는 매우 흥미로운 연결고리라 할 수 있다. 일반적으로 변칙(anomaly)이라 하면 고전적으로 보존되어야 할 어떤 물리량에 대해 양자역학적 영역에서 명시적으로 보존법칙이 무너지는 경우를 지칭한다. 바일 반금속에서는 서로 다른 카이럴 특성을 갖는 두 바일노드에서 개별 노드 근방의 전자밀도가 독립적으로는 보존되지 않는다는 형태로 나타난다. 이는 반드시 전기장과 자기장이 평행하게 작용하는 경우에 한한다. 특이하게도 디랙 반금속의 경우에서도 유사한 변칙효과가 이론적으로 제안되어 있다.^[26]

카이럴 변칙효과의 정식적 설명은 이른바 액시온 전기동역학(axion electrodynamics) 이론으로 주어지는데 위상물질을 기술하는 Lagrangian 함수에 포함된 θ 항의 $E \cdot B$ 모양이 변칙의 원인이 된다. 시간반전대칭과괴형 바일 반금속의 경우,

Fig. 5. Landau levels for a Weyl semimetal (only the left-handed chirality node shown) at finite chemical potential.^[28]

이 θ 항의 공간미분이 반대 카이럴 값을 갖는 두 노드 간 운동량 혹은 파수간격이 되며 외부 자기장에 비례한다. Yang *et al.* 논문^[27]에 따르면 빛이 외부 자기장과 수직 방향으로 진행하면서 동시에 전기장이 외부 자기장에 평행한 경우(in-plane field, parallel polarization) 바로 종축 동전도도가 자기장의 제곱에 비례하는 양만큼 증가한다. 이는 바로 DC 전도실험에서 관측되는 음자기비저항(negative magnetoresistivity) 혹은 양자기전도도(positive magnetoconductivity)와 맞아떨어지면서 동시에 유한주파수로 해당 현상을 확장하는 것이다. 이로부터 바일 반금속의 카이럴 변칙효과를 뚜렷이 확인해 볼 수 있었지만 아직 실험이 이루어지지 않았다.

마지막으로 외부 자기장이 강도가 증가하여 Landau 준위가 형성되면 새로운 전자기파 흡수 스펙트럼을 기대할 수 있다. 그림 5에 제시된 대로 우선 단일 바일 노드의 Landau 준위를 보면 (2차원 경우와 달리) 3차원성으로부터 비롯되는 k_z 성분, 즉 외부 자기장 방향 운동량 성분에 대한 분산이 있음을 알 수 있다. 또한 단일 바일 노드의 특성상 k_z 에 비례하는 선형 분산이 $n=0$ 준위를 형성하고 있다. P. E. C. Ashby *et al.* 논문^[28]에서는 이러한 Landau 준위가 형성되었을 때 종축 동

REFERENCES

- [25] B. Xu *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 121110(R) (2016).
- [26] A. A. Burkov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 136602 (2016).
- [27] J. Yang *et al.*, arXiv:1801.07706v4 (2018).
- [28] P. E. C. Ashby *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 245131 (2013).

Fig. 6. Real part of the optical conductivity (in units of $e^2/8\pi l_B$) as a function of frequency for several values of the chemical potential. Here, $l_B = \sqrt{c/eB}$ is the magnetic length.^[28]

전도도의 실수부에서 나타나는 흡수 스펙트럼을 계산하였고 그림 6에 결과가 제시되어 있다. 기본적으로 자기장이 없었을 때 관찰되는 대간전이에 따른 선형 흡수 배경에 이제는 첨봉들이 나타나고 각 첨봉의 진입주파수가 자기장의 제곱근에 비례한다는 점이 지적되었다. 여기서도 화학퍼텐셜이 증가함에 따라 저주파수의 단일첨봉으로의 spectral weight 이동이 예측되어 궁극적으로는 단일 사이클로트론 공진(cyclotron resonance)이 형성되는 준고전극한(semiclassical limit)이 출현한다.

나오는 글

지금까지 우리는 바일 반금속의 광특성에 대한 일반적인 이

론과 최근의 실험사례 내용을 살펴보았다. 일반적인 고체의 광특성이론의 기반이 되는 Kubo 공식에 의거한 계산으로부터 바일 반금속의 특이물성이 어떤 양상으로 광특성에 반영되는지 알아보았고 지금까지 확정된 디랙 혹은 바일 반금속 물질의 경우 실험결과도 분석하였다. 특히 물질의 3차원 선형분산과 카이럴 변칙효과가 광특성에 지대한 영향을 끼침을 알 수 있었다. 또한 외부 자기장하의 광특성 변화와 관련 실험의 중요성도 지적하였다.

아울러 여기서 다루지 못한 부분에 대해 간단히 언급하고자 한다. 우선 제2형(type II) 디랙 및 바일 반금속^[29,30]의 광특성은 아직 이론과 실험 연구가 많이 진전되지 못했다. 또한 초고속 광특성 측정 쪽에서도 앞으로 많은 진보가 이루어질 것으로 기대된다. 특히 바일노드 간의 펌핑 직후의 이완현상(relaxation phenomena)과 극초단펄스 자기장으로 디랙 반금속을 바일 반금속으로 전환한 이후의 회복 동역학(recovery dynamics) 등은 매우 흥미로운 주제가 아닐 수 없다. 이외에도 초전도상태로 진입하는 바일 반금속의 페르미 원호상태, 위상절연체-디랙 반금속-바일 반금속의 위상기하적 상전이, 그리고 이들 간의 이종접합 등의 광특성 연구가 진행 중이고, 실용적인 측면에서는 광결정(photonic crystal)으로 구현한 바일 반금속 관련 제작기술 및 광특성 측정연구도 매우 중요한 방향이다.^[31,32] 이제 약 10년 전부터 등장한 여러 위상물질은 양자 Hall 효과와 고온초전도와 같은 반열에 올라 21세기 고체물리학을 견인하게 될 것이 분명해졌다. 앞으로 이 분야에서 많은 새로운 연구결과가 도출되고 많은 연구자의 노력이 결실을 맺기를 기대해 본다.

REFERENCES

- [29] T. R. Chang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 026404 (2017).
- [30] A. A. Soluyanov *et al.*, Nature **527**, 495 (2015).
- [31] L. Lu *et al.*, Nat. Photonics **7**, 294 (2013).
- [32] L. Lu *et al.*, Science **349**, 622 (2015).