디락/바일 준금속의 분류

DOI: 10.3938/PhiT.25.019

양 범 정

Classification of Weyl/Dirac Semimetals

Bohm-Jung YANG

Topological semimetals describe electronic states which have band-touching points or lines on the Fermi energy and which often display stable surface states and intriguing bulk topological responses. Recently, many novel topological semimetals, including Weyl/Dirac semimetals, have been theoretically predicted, and soon after their prediction their existence was experimentally confirmed. In this article, we review the recent progress in the study of a three-dimensional Dirac/Weyl semimetal in particular, focusing on how to classify possible Dirac/Weyl semimetals based on the crystalline symmetries of periodic solids.

서론

응집물질의 기본 물성은 페르미 준위(Fermi level)에 존재하는 저에너지 들뜸(low energy excitations)을 기술하는 입자의 종류와 이들 간의 상호작용을 통해서 이해할 수 있다. 지금까지 연구되어 온 대부분의 금속들에 존재하는 저에너지 들뜸은 2차 분산 관계(quadratic dispersion relation)를 만족시켜서 해당 입자들의 동역학이 슈뢰딩거 방정식(Schrödinger equation)을 통해서 이해될 수 있었다. 그런데 그래핀의 발견으로 저에너지 들뜸이 1차 분산 관계(linear dispersion relation)를 가지고 해당 입자들이 디락 방정식(Dirac equations)으로 기술될 수 있는 시스템이 고체 내에서 구현될 수 있음이 널리 알

려지게 되었다.^[1] 이러한 디락 입자의 존재는 그래핀이 가지는 독특한 물성의 근본적인 이유가 된다. 최근 들어서 그래핀 같은 2차원 시스템뿐만 아니라 몇몇 3차원 시스템에서도 저에너지 들뜸이 디락 입자로 기술될 수 있음이 알려지게 되었다.^[2] 이 글에서는 3차원 디락 입자로 기술될 수 있는 3차원 디락 준금속(Dirac semimetal)에 대한 최근 연구 성과들을 소개하고 앞으로 나아가야 할 연구 방향에 대한 논의를 하고자 한다.

디락 준금속(Dirac semimetal)이란 무엇인가?

일반적으로 고체는 에너지 간격(energy gap)의 존재 여부 혹은 페르미 준위(Fermi level)의 상태 밀도(density of states)의 유무에 따라 도체와 부도체로 분류가 된다. 부도체는 에너지 간격이 존재하고 이에 따라 페르미 준위의 상태 밀도가 제로가 되는데 반해 도체는 에너지 간격이 없고 페르미 준위의 상태 밀도도 유한하다. 그런데 재밌게도 디락 준금속은 에너지 간격은 없지만 페르미 준위의 상태 밀도는 제로가 되어서 도체와 부도체의 중간적인 성질을 지닌다. 디락 준금속의 이러한 독특한 물성의 근본 이유는 페르미 준위의 에너지띠 구조(band structure)가 가지는 특징 때문이다. 디락 준금속에서는 전도띠(conduction band)와 원자가띠(valence band)가 운동량 공간(momentum space)에서 하나의 점에서 교차하고 있는데 이로 인해 일반 도체와 달리 페르미면(Fermi surface) 대신 페르미점(Fermi point)을 가지고 있다. 또한 페르미점 근방에서 선형 분산 관계를 가지는데 이로 인해 에너지 간격이 제로이면서 페르미 준위에서의 상태 밀도가 제로가 되는 현상이 생기게 된다.

디락 준금속 상태가 실제 물질에서 구현되기 위해서는 두 가지 조건이 만족되어야 한다. 첫 번째로 전도띠와 원자가

저자약력

양범정 교수는 2008년 서울대 물리천문학부에서 이학박사 학위를 취득했으며 2015년부터 서울대학교 물리천문학부 조교수로 재직 중이다. 양자 스핀 시스템, 위상 절연체, 위상 준금속 등에 대해 연구해 왔다. (bjyang@snu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] A. H. Castro Neto *et al.*, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
- [2] O. Vafek and A. Vishwanath, Annual Review of Condensed Matter Physics **5**, 83 (2014).

띠의 교차점(이하 디락점(Dirac point)이라 칭함)이 안정하게 존재할 수 있어야 하고, 둘째로 디락점이 페르미 준위 근방에 존재해야 한다. 첫 번째 조건을 만족시키기 위해서, 즉 안정한 디락점을 가지기 위해서는 시스템의 대칭성이 중요한 역할을 하는데 이에 대해서는 다음 단락부터 좀 더 자세하게 설명을 하겠다. 두 번째 조건을 만족시키기 위해서는 운반자 도핑(carrier doping)이나 게이트 전압(gate voltage)을 가해서 페르미 준위를 조절하는 작업이 필요한데 현재 많은 연구자들이 이 방향으로 노력을 기울이고 있다.

대칭성에 따른 디락 준금속의 분류

안정한 디락점을 만드는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 두 개의 에너지띠(energy band) 사이에 준위교차(level crossing)가 생겨서 디락점이 생기는 경우고, 다른 하나는 시스템의 대칭성으로 인해 운동량 공간의 특정 점에서 대칭성이 보호하는(symmetry protected) 에너지 겹침(energy degeneracy)이 생기는 경우이다.^[3]

사실 준위교차에 의해서 생기는 디락점을 이해하는데도 대칭성은 중요한 역할을 한다. 왜냐하면 두 개의 에너지띠 사이의 준위밀침(level repulsion)은 각 에너지띠의 겹침(degeneracy)에 크게 의존하고, 각 에너지띠의 겹침을 결정하는 게 바로 시스템의 대칭성이기 때문이다. 일반적으로 에너지띠의 겹침이 클수록 준위밀침이 커서 준위교차가 생기기 어렵다. 에너지띠의 겹침을 결정하는 가장 중요한 대칭성은 시간 역전 대칭성(time reversal symmetry)과 반전 대칭성(inversion symmetry)이다.

이 두 대칭성이 동시에 존재하는 시스템에서는 에너지띠가 항상 이중 겹침(double degeneracy)을 보이는데, 이는 모든 운동량 점에서 스핀 방향이 반대인 두 개의 상태가 같은 에너지를 가지고 겹쳐져 있기 때문이다. 이런 에너지띠의 이중 겹침은 두 개의 에너지띠 사이의 준위밀침을 증가시켜서 일반적으로 준위교차가 힘들어진다. 이런 시스템에서 준위교차를 만들 수 있는 한 가지 경우는 전도띠와 원자가띠의 반전 대칭 고유값(parity eigenvalues)이 반대 부호를 가질 때이다. 특히 시간 역전 불변 운동량(time reversal invariant momentum, TRIM)에서는 모든 상태들이 특정한 반전 대칭 고유값을 가지게 되는데 두 개의 에너지띠가 다른 반전 대칭 고유값을 가지게 되면 두 상태가 준위밀침 없이 교차가 가능해진다. 그림 1(a)에서 보여진 것처럼 일반적으로 이런 형태의 준위교차는 위상 절연체(topological insulator)와 일반 부도체(normal insulator) 사이의 상전이(phase transition)를 유발하게 되는데 이러한 위상상전이(topological phase transition)의 특이점(critical point)에서 디락점이 생길 수 있다.^[4] 하지만 이런 디락점은 불안정

Fig. 1. Classification of three-dimensional Dirac semimetals in systems with time-reversal (T) and inversion (P) symmetries. Here m indicates a tuning parameter such as the pressure, doping, etc. (a) In the absence of an additional symmetry other than T and P, a Dirac point can appear only at the critical point between a normal insulator and a topological insulator. (b) In the presence of a non-symmorphic symmetry, a class-II Dirac semimetal having an isolated Dirac point at a TRIM on the Brillouin zone surface can appear. (c) In the presence of a symmorphic rotation symmetry, a class-I Dirac semimetal having a pair of Dirac points on the rotation axis can appear between two gapped insulators.^[3]

하므로 이런 방법을 통해서도 안정된 디락 준금속 상이 생길 수 없다.

하지만 시스템이 시간 역전 대칭성과 반전 대칭성 외에 추가적으로 회전 대칭성(rotation symmetry)을 가지게 되면 예외적인 경우가 생긴다. 예를 들어, 시스템이 z -축 방향으로 회전 대칭성을 가진다고 하자. 이 경우에 운동량 공간의 z -축 위에서는 모든 블로흐 상태(Bloch state)들이 회전 연산자(rotation operator)의 고유값(eigenvalue)을 가지게 된다. 특히 전도띠와 원자가띠가 각운동량 공간의 z -축 상에서 다른 회전 고유값을 가지게 될 경우 준위교차가 가능해지고 교차점에 존재하는 디락점은 회전 대칭성에 의해 보호가 된다.^[5,6] 각 에너지띠가 이중 겹침을 보이고 있기 때문에 디락점에서는 사중 겹침(four-fold degeneracy)이 존재하게 된다. 이와 같이 다른 회전 고유값을 가지는 상태들의 준위교차에 의해서 생겨나는 디락 준금속을 1종(class I) 디락 준금속이라 부를 수 있다. 최근에 발견된 3차원 디락 준금속 물질 Cd_3As_2 , Na_3Bi 모두 이런 메

REFERENCES

- [3] B.-J. Yang and N. Nagaosa, Nat. Comm. **5**, 4898 (2014).
- [4] S. Murakami *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 205304 (2007).
- [5] Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 195320 (2012).
- [6] Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 125427 (2013).

커니즘에 의해 생성되었고 그림 1(c)에 보여진 것처럼 두 개의 디락점을 페르미 준위에 가지고 있다.^[7]

사중 겹침을 가지는 디락점을 만드는 두 번째 방법은 시스템이 시간 역전 대칭성과 반전 대칭성 이외에 nonsymmorphic 대칭성을 가지는 경우이다.^[8,9] 여기서 nonsymmorphic 대칭성은 일반 점군(point group) 대칭성과 부분 병진(partial translation)이 합쳐져서 생긴 대칭성을 말한다. Nonsymmorphic 대칭 연산자는 부분 병진 때문에 고유값이 운동량에 의존하게 되는데, 이런 운동량 의존성으로 인해 브릴루앙 영역(Brillouin zone)의 경계에 존재하는 TRIM에서 nonsymmorphic 대칭 연산자와 반전 대칭 연산자가 엇바꿈 관계(anti-commutation relation)를 만족하게 된다.^[10,11] 이러한 엇바꿈 관계는 서로 다른 두 개의 크라머스쌍(Kramers pair)이 겹쳐지게 해주고 결국 4중 겹침을 가지는 디락점이 브릴루앙 영역 경계에 생기게 만든다. 이렇게 nonsymmorphic 대칭성에 의해서 브릴루앙 영역 경계에 있는 TRIM에 디락점이 존재하는 디락 준금속을 2종(class II) 디락 준금속이라 할 수 있다.(그림 1(c) 참조) 지금까지 β -BiO₂, distorted spinel compounds 같은 몇 가지 물질들이 이론 계산을 통해 2종 디락 준금속 후보로 제안이 되었지만 모두 화학적으로 안정한 물질이 아니어서 실험적으로 구현되기까지는 앞으로도 많은 노력이 요구된다.^[12]

대칭성에 따른 바일 준금속(Weyl semimetal)의 분류

시스템의 시간 역전 대칭성이나 반전 대칭성 중 하나가 깨지거나 혹은 두 가지가 모두 깨지게 되면 새로운 형태의 디락 준금속이 생길 수 있는데, 소위 말하는 바일 준금속(Weyl semimetal)이 바로 그것이다. 바일 준금속이 가지는 가장 중요한 성질은 겹침점(degeneracy point)에서 이중겹침(two-fold degeneracy)을 보인다는 것이다. 이는 시간 역전 대칭성과 반전 대칭성이 모두 있는 시스템에 존재하는 디락점이 4중겹침을 가지는 것과 비교된다. 바일 준금속의 겹침점을 바일점(Weyl point)이라고 부른다. 바일점이 2중겹침을 보이는 이유는 일반적으로 시간 역전 대칭성과 반전 대칭성이 동시에 존재하지 않으면 블로흐 상태들이 TRIM이 아닌 운동량 공간에서는 겹침(degeneracy)이 없기 때문에 두 에너지띠 사이에 준위교차가 생기면 교차점에서 2중겹침만 나타나게 되기 때문이다.

바일점이 가지는 가장 중요한 성질은 각 바일점이 양자화된(quantized) 위상숫자(topological number)를 가진다는 점이다. 바일점이 가지는 위상숫자를 나선전하(chiral charge)라고 부르는데 이는 각 바일점을 둘러싸는 2차원 폐곡면 위에서 바일점이 만들어내는 베리곡률(Berry curvature)을 적분한 값, 곧 천

Fig. 2. (a) A time-reversal symmetric Weyl semimetal breaking inversion symmetry. Two Weyl points at the momenta k and $-k$ have the same chiral charges. Since the total chiral charge of the system should be zero, there should be at least four Weyl points. (b) A inversion symmetric Weyl semimetal breaking time-reversal symmetry. Two Weyl points at the momenta k and $-k$ have the opposite chiral charges, thus the minimal number of Weyl points in the system is two.

숫자(Chern number)를 말한다. 2차원 닫힌 다양체 위에서 천 숫자는 양자화되므로 각 바일점의 나선전하도 정수값을 가지게 된다.^[13,14]

바일 준금속은 시스템의 대칭성에 따라 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 시간 역전 대칭성을 가지는 바일 준금속(time reversal symmetric Weyl semimetal)으로 여기서는 반전 대칭성이 존재하지 않는다.^[15] 시간 대칭성은 운동량 k 에 존재하는 바일점과 운동량 $-k$ 에 존재하는 바일점을 연결해 주는데, 여기서 중요한 점은 시간 대칭성으로 연결된 두 바일점의 나선전하는 같은 값을 가진다는 성질이다. 그런데 병진 대칭성을 가지는 시스템은 항상 나선전하의 합이 0이 되어야 하므로, 이는 반대 나선전하를 가지는 두 개의 바일점이 다른 운동량 점 k' , $-k'$ 에 추가적으로 존재해야 함을 의미한다. 이러한 이유로 시간 역전 대칭성을 가지는 바일 준금속은 그림 2(a)와 같이 최소한 네 개의 바일점을 가지게 된다. 최근에 발

REFERENCES

- [7] Z. K. Liu *et al.*, Science **343**, 864 (2014), M. Neupane *et al.*, Nat. Comm. **5**, 3786 (2014), S. Borisenko *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 027603 (2014), S. Jeon *et al.*, Nat. Mater. **13**, 851 (2014), Z. K. Liu, Nat. Mater. **13**, 677 (2014).
- [8] S. M. Young *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 140405 (2012).
- [9] J. A. Steinberg *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 036403 (2014).
- [10] S. M. Young and C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. **115**, 126803 (2015).
- [11] B.-J. Yang, T. Morimoto, A. Furusaki, Phys. Rev. B **92**, 165120 (2015).
- [12] Q. D. Gibson *et al.*, Phys. Rev. B **91**, 205128 (2015).
- [13] X. Wan *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 205101 (2011).
- [14] L. Balents, Physics **4**, 36 (2011).
- [15] S. Murakami *et al.*, New J. Phys. **9**, 356 (2007).

견된 TaAs, TaP 등의 물질이 여기에 속한다.^[16]

반면에 반전 대칭성을 가지는 바일 준금속(inversion symmetric Weyl semimetal)은 시간 대칭성을 가지지 않는다. 반전 대칭성 역시 운동량 k 에 존재하는 바일점과 운동량 $-k$ 에 존재하는 바일점을 연결해 주는데, 여기에 굉장히 중요한 점은 반전 대칭성으로 연결된 두 개의 바일점의 나선전하는 부호가 반대라는 사실이다. 따라서 반전 대칭성을 가지는 바일 준금속은 그림 2(b)와 같이 두 개의 바일점만 운동량 공간에서 가질 수 있게 된다. 반전 대칭성을 가지는 바일 준금속의 후보로는 pyrochlore 구조를 가지는 이리듐 산화물^[13]과 HgCr_2Se_4 ^[17]와 같은 자성체들이 있는데 아직 실험적으로 바일점이 직접적으로 관측되지는 않았다. 하지만 최근 일련의 자기 수송(magnetotransport) 실험을 통해서 이리듐 산화물에서 바일 준금속의 존재 가능성을 뒷받침해주는 증거들이 발표되었고^[18] 이와 관련된 많은 연구들이 활발히 진행 중이다.

또한 아주 최근에 와서 바일 준금속을 좀 더 세분화하려는 노력이 있었는데 그 중의 하나가 2종 바일 준금속(type II Weyl semimetal)의 제안이다.^[19] 지금까지 논의된 페르미점을 가지는 바일 준금속을 1종 바일 준금속이라고 부른다면, 2종 바일 준금속의 가장 중요한 특징은 페르미면(Fermi surface)의 존재이다. 일반적으로 고체 시스템에서는 로렌츠 불변성(Lorentz invariance)이 존재하지 않으므로 바일점(Weyl point) 근방의 에너지 분산이 기울어질 수 있다. 그런데 이런 기울어짐(tilting)의 정도가 어느 특정 방향으로 아주 커지면 결국엔 시스템이 전자 페르미면(electron Fermi surface)과 홀 페르미면(hole Fermi surface)을 만들고 이 두 페르미면 사이에 바일점이 존재하게 되는데 이렇게 기울어진 에너지 분산을 가지는 바일 준금속이 바로 2종 바일 준금속이다.(그림 3 참조) 최근 일련의 밴드 구조 계산을 통해서 MoTe_2 와 WTe_2 이 2종 바일 준금속의 후보로 제안되었다.^[20]

앞으로의 연구 과제

응집물질에 존재하는 디랙 입자에 대한 연구가 기존에는 그 래편 시스템에 국한되어 있었는데, 최근 들어 다양한 종류의 3차원 디랙/바일 준금속의 발견으로 관련 주제에 대한 관심과 연구 범위가 널리 확대되고 있다. 특히 시스템의 대칭성에 따라 여러 가지 형태의 새로운 디랙 준금속 상태가 가능하다는 사실은 시스템의 대칭성과 에너지띠들의 겹침에 대한 보다 체계적인 연구가 필요함을 시사한다. 이런 맥락에서 특히 중요한 것이 nonsymmorphic 대칭성과 띠겹침의 관계를 이해하는 것이다. Nonsymmorphic 대칭성이 브릴루앙 영역 가장자리에서 에너지띠들의 들러붙음(sticking)을 일으킨다는 것은 잘 알려진

Fig. 3. (a) Type-I Weyl semimetal with a Fermi point. (b) Type-II Weyl semimetal with a Weyl point between an electron and a hole pocket.^[19]

사실이었지만^[21] 에너지띠들의 들러붙음이 만드는 기저 상태(ground state)의 성질에 대해서는 잘 이해가 되지 못하였다. Nonsymmorphic 대칭성과 3차원 디랙 입자의 안정성의 관계가 체계적으로 연구되기 시작한 것은 아주 최근에 이루어진 일이고 현재 nonsymmorphic 대칭성이 만들어 내는 새로운 전자상태에 대해 많은 연구자들이 관심을 가지고 활발히 연구하고 있다.^[22]

또 한 가지 중요한 연구 주제는 선마디(line node) 준금속에 대한 연구이다. 기존의 디랙 준금속은 전도띠와 원자가띠가 하나의 점에서 겹침이 생긴 상태를 말하는데, 그림 4에서 보여준 것처럼 시스템이 특정한 대칭성을 가지는 경우에 겹침점들이 모여서 하나의 선을 만드는 것도 가능함이 알려졌다. 선마디 준금속은 상태밀도가 에너지에 선형적으로(linearly) 의존하는데 이는 디랙 준금속 상태밀도의 이차적(quadratic) 에너지 의존성 혹은 일반 금속 상태밀도의 에너지 독립성 등과 구분이

REFERENCES

- [16] H. Weng *et al.*, Phys. Rev. X **5**, 011029 (2015), S.-M. Huang *et al.*, Nat. Comm. **6**, 7373 (2015), B. Lv *et al.*, Phys. Rev. X **5**, 031013 (2015), S. -Y. Xu *et al.*, Science **349**, 613 (2015), B. Q. Lv *et al.*, Nat. Phys. **11**, 724 (2015), L. X. Yang *et al.*, Nat. Phys. **11**, 728 (2015), S. -Y. Xu *et al.*, Nat. Phys. **11**, 748 (2015).
- [17] G. Xu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 186806 (2011).
- [18] K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 136402 (2012), K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 075127 (2014), K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 056402 (2015), Z. Tian *et al.*, Nat. Phys. **12**, 134 (2016).
- [19] A. A. Soluyanov *et al.*, Nature **527**, 495 (2015).
- [20] Y. Sun *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 161107 (2015), T.-R. Chang *et al.*, Nat. Comm. **7**, 10639 (2016).
- [21] A. König and N. D. Mermin, Phys. Rev. B **56**, 13607 (1997), L. Michel and J. Zak, Phys. Rep. **341**, 377 (2001).
- [22] S. A. Parameswaran *et al.*, Nat. Phys. **9**, 299 (2013), H. Watanabe *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **112**, 14551 (2015), H. C. Po *et al.*, Science Advances **2**(4), e1501782 (2016).

Fig. 4. Fermi surface structure of semimetals. (a) A semimetal with eight point nodes. (b) A semimetal with a line node on the $k_z=0$ plane.

되는 성질이다. 이러한 상태밀도의 에너지 의존성이 보이는 독특한 특성은 열역학적량(thermodynamic quantities)의 온도 의존에서도 독특한 차이를 보일 수 있는 근거가 된다. 뿐만 아니라 선마디 준금속 역시 새로운 형태의 위상성질을 보일 수 있다는 예측들이 있어서 그에 대한 관심도가 점점 높아지고 있다. 가능한 선마디 준금속에 대한 체계적인 분류와 그 기저 상태가 가지는 독특한 물성에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.^[23]

디락 준금속 연구가 더욱 활기를 띠기 위해서는 디락 준금속이 가지는 독특한 물성, 특히 위상성질에 대한 실험적인 검증이 필요하다. 물론 Angle-resolved photoemission spectroscopy(ARPES)를 통해, 덩치상태(bulk states)와 표면상태(surface states)의 에너지 분산 관계가 확인이 되었고 이러한 자료들은 디락 준금속의 존재를 확인하는 중요한 증거를 제시하였다. 하지만 디락 준금속의 위상성질을 이해하기 위해서는 ARPES뿐만 아니라 전도 특성(transport properties)에 대한

실험적인 연구들이 함께 뒷받침이 되어야 한다. 최근에 이루어진 일련의 자기수송 현상에 대한 연구들은 디락/바일 준금속이 가지는 위상성질에 대한 다양한 증거들을 제시하고 있으나 아직 이 방향으로 더욱 많은 노력과 발전이 필요하다.^[24]

결론

3차원 디락/바일 준금속의 발견으로 에너지 간격(energy gap)이 없는 금속 상태도 위상성질을 가질 수 있다는 사실이 널리 인식이 되었고 이로 인해 기존에 부도체로 국한되어 있던 위상물질에 대한 연구가 준금속과 금속으로까지 확대가 되고 있다. 특히 시스템의 대칭성에 따라 다양한 형태의 디락 준금속이 존재할 수 있다는 사실은 아직까지 연구되지 않은 많은 위상물질들이 베일에 가려져 있음을 시사한다. 앞으로도 새로운 위상물질의 발견과 해당 물질의 위상성질을 밝히기 위해 더욱더 많은 이론적/실험적인 노력이 요구된다.

REFERENCES

- [23] Y. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 036807 (2015), H. Weng *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 045108 (2015), R. Yu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 036807 (2015), C. -K. Chiu and A. P. Schnyder, Phys. Rev. B **90**, 205136 (2014), L. S. Xie *et al.*, APL Mat. **3**, 083602 (2015), Y. Chen *et al.*, Nat. Comm. **6**, 6593 (2015), G. Bian *et al.*, Nat. Comm. **7**, 10556 (2016).
- [24] H. J. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 246603 (2013), X. Huang *et al.*, Phys. Rev. X **5**, 031023 (2015), J. Xiong *et al.*, Science **350**, 413 (2015), C. L. Zhang *et al.*, Nat. Comm. **7** 10735 (2016).