물질 상태가 어떻게 위상수학과 연관 지어졌나

DOI: 10.3938/PhiT.25.061

정 석 범

How Phase of Matter Got Associated with Topology

Suk Bum CHUNG

This year's Nobel prize in physics has been awarded partly in response to the recent theoretical and experimental advances in topological states of matter. I review the conceptual development from Thouless' formulation of a topological invariant to the 3D topological insulator, in which the study of various seemingly unrelated problems, such as the helium-3 superfluid, semiconductor spintronics, and graphene, have all played significant roles.

도 입

최근 10년 동안 위상 절연체나 위상 초전도체를 포함하는 위상적 물질 상태에 관한 이론 및 실험 연구가 대단히 활발하게 진행 중이다. 올해 노벨 물리학상 발표에서도 이 분야에 발전이 올해 시상자 선정에 크게 작용했음이 명시적으로 언급되었다. 사실 이 전부터도 관련 연구자들은 위상적 물질 상태라는 개념은 사울리스(1/2 수상)에게서 기원함을 언급해왔다. 다만 사울리스를 포함한 올해 노벨상 수상자들의 관련 연구는 대부분 1988년에 발표되어, 최근의 위상 절연체/초전도체 연구의 초석인 케인-벨레의 양자 스핀 홀 모델이 발표된 2005년까지는 이 분야의 공백기라는 인상을 받기 쉽다. 그러나 사실은 이 기간은 결코 공백기가 아니었으며 오히려 위상적 물질상태에 관한 개념상 중요한 발전이 다양한 분야에 걸쳐서 이루어진 시기였다. 이러한 발전은 양자 홀, 헬륨3 초유체, 반도체 스핀트로닉스, 그래핀 등의 여러 분야에서 산발적으로 진행되었는데, 각 연구 대상의 물질적 특성이 위

Fig. 1. Thouless formulated the theory for the KT transition driven by the real-space vortices and the topological invariant defined by the momentum-space vortices.

상적 물질 상태 기본 원리를 이해하는데 도움을 줬다. 반면에 이 문제들이 위상적 물질 상태에 대해서 일반적으로 생각하기보다는 개별적 연구 대상 물질을 탐구하는 데서 오는 한계도 피하기 어려웠고, 이 문제는 이런 분야들의 연구자들 사이에 교류도 충분히 활발하지 못했기 때문에 체계적인 이해가 지연된 측면이 있었다. 따라서 이 시점에서 코스털리츠-사울리스(KT) 상전이에서부터 양자 스핀 홀 현상을 이해하고, 3차원 위상 절연체를 발견하기까지의 과정을 검토해보는 것도 충분히 의미를 가질 수 있을 것 같다.

KT 상전이에서 위상수학적 불변수로

올해 노벨상의 의미를 이해하기 위해서는 KT 상전이와 위상수학적 불변수(topological invariant)에서 모두 위상수학적 결함(topological defect)이라는 개념이 공통분모로 들어감을 지적

저자약력

정석범 교수는 현재 기초과학연구원 Young Scientist Fellow로, 2008년 일리노이에서 박사학위를 수여받고, 스탠퍼드와 UCLA에서 postdoc으로 위상수학적 물질 상태를 연구해왔으며, 2013년 재미 한국물리학자 협회에서 젊은 우수연구자상을 수상했다.(sbchung@snu.ac.kr)

할 필요가 있겠다. 위상수학적 결합이란 사실 대칭성이 깨진 어느 질서 있는 상태에서나 다 나타날 수 있어서, 초유체의 소용돌이, 자성체의 스커미온, 결정의 어긋남이 다 이에 포함된다. 양자화는 위상수학적 결합의 핵심적 특성이다. 예를 들어 격자의 어긋남은 격자 상수 정수배이고, 초유체의 소용돌이는 감속수가 정수이다. 이 결과 위상학적 결합의 중심에서는 질서가 완전히 깨지나, 멀리서 국소적으로 보면 질서가 회복된다.

이러한 위상수학적 결합은 KT 상전이^[1]에서는 물리계의 구성 입자와 동등한 위치로 격상되었다. 즉 2차원 초유체에서는 저온에서의 구성 입자와 고온에서의 소용돌이 사이에는 쌍대성 변환(duality transformation)이 존재하는데,^[2] KT 상전이에 있는 물리계는 구성 입자에 대해서 기술하건 소용돌이에 대해서 기술하건 똑같은 형태를 갖는다. 따라서 우리는 저온에서는 초유체는 광역적으로 분포하고 소용돌이는 국소화되어 있었다면 반대로 고온에서는 초유체는 국소화되어 있고 소용돌이는 광역적으로 퍼지는 것으로 볼 수 있다.

이렇게 70년대 초 코스텔리츠와 2차원 상전이를 실공간에서의 위상수학적 결합의 작용으로 설명한 사울리스는 10년 후 고모토, 나이팅게일, 덴 나이스와의 연구^[3]에서는 정수 양자 홀 현상을 운동량 공간에서의 위상수학적 결합으로 설명해낸다. 기초 고체 물리에서 가르치는 선형 응답 이론을 이용해서 홀 전도율의 양자화를 확인해 본다는 이 연구의 출발점은 일견 평이해 보였다. 그러나 이 연구에서는 2차원 홀 전도율 계산 공식을 유도하는 과정에서 당시에 정수 양자 홀 현상의 핵심으로 여겨지던 란다우 준위의 물리적 특성은 유한한 에너지 간격 외에는 배제하여 마치 밴드 절연체처럼 다루었다. 정수 양자 홀 상태에서는 밴드 간의 에너지 간격이 항상 열려있는 덕분에 각 밴드에서 베리 곡률(Berry curvature)을 계산하는 것이 가능하다. 그런데 운동량 공간에서 파동 함수가 모순없이 정의되려면 베리 곡률 총합은 양자화되어야 해서, 베리 곡률을 마치 소용돌이 밀도처럼 생각할 수 있다. 즉 정수 양자 홀 현상을 규정짓는 홀 전도율은 운동량 공간의 소용돌이 개수라는 위상수학적 불변수로 결정되므로, 이것을 위상적 물질 상태로 생각할 수 있는 것이다. 이런 관점은 란다우 준위는 물론 외부 자기장마저 없는 정수 양자 홀 상태가 가능성을 제시했다.

란다우 준위나 외부 자기장을 완전히 배제한 양자 홀 현상의 모형을 제시한 것이 할데인의 업적^[4]이다. 그가 제시한 벌집격자에서의 락뭉클 자유전자 모형에서는 시간 역전 대칭성을 깨어졌지만 총 자속(magnetic flux)은 전혀 없었다. 이 모델에서 격자 대칭성을 깨는 항도 도입해서 이런 항의 크기를 조절함에 따라 밴드 간 에너지 간격이 닫혔다가 다시 열리면서 위상수학적 불변수가 바뀌는 것을 확인했다. 따라서 이 연구에 의해서 위상수학적 불변수는 고자기장의 효과가 아닌, 대칭성 깨짐에 의한 질서 상태와는 뚜렷이 구분되는 자발적으로 존재하는 위상수학적 질서가 존재함을 보다 명확하게 보인 결과로 생각될 수 있으며, 나아가서

Fig. 2. The pictures on the left and the right shows, respectively, the A-phase with the same orbital angular momentum alignment for the $|\uparrow\uparrow\rangle$ and $|\downarrow\downarrow\rangle$ pairs and the B-phase with the opposite orbital angular momentum alignment for the $|\uparrow\uparrow\rangle$ and $|\downarrow\downarrow\rangle$ pairs.

양자 위상 상전이가 연속적으로 일어나려면 에너지 간격이 닫혀야 한다는 점을 잘 예시한 모형이기도 하다. 이 무렵에 와서는 양자 홀 현상에 손지기 끝머리 상태(chiral edge state)에 의한 손지기 변칙(chiral anomaly)으로도 설명할 수 있음이 이미 알려져 있었는데, 논문에 명시적으로 나오지는 않지만, 할데인의 락뭉클 자유전자모형은 실공간에서 이런 손지기 끝머리 상태의 해를 구할 수 있는 이점도 존재했다. 할데인의 논문은 1년이 넘는 심사 끝에 겨우 출간이 되었으나, 후술할 이론들에 지대한 영향을 끼쳤고, 나아가서 최근에 실험적으로 확인된 자성체에서 양자 홀 현상^[5]의 원형을 제시한 연구로 인정받고 있다.

사울리스와 할데인이 제시한 위상적 물질 상태는 근본적으로 시간 역전 대칭성이 깨지는 것을 필요로 했다. 그들이 생각한 위상수학적 불변수는 운동량 공간에서 소용돌이 개수였는데, 소용돌이 총 개수가 0이 아닌 것은 곧 시간 역전 대칭성의 부재를 의미할 수밖에 없었다. 시간 역전 대칭성이 보존되는 위상적 물질 상태에 대한 첫 연구는 자기장도 격자도 없는 물리계에서 나왔다.

헬륨 초유체에서의 위상수학적 불변수

헬륨은 두 가지 동위원소의 성질이 매우 상이함은 잘 알려져 있다. 헬륨-4는 핵이 양성자 두 개와 중성자 두 개로 이루어진 보손으로, 저온에서 보즈-아인슈타인 응축으로 초유체 상

REFERENCES

- [1] J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, J. Phys. C: Solid State Phys. **5**, L124 (1972); *ibid* **6**, 1181 (1973).
- [2] V. L. Berezinskii, Soviet Physics JETP **32**, 495 (1971).
- [3] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale and M. den Nijs, Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982).
- [4] F. D. M. Haldane, Phys. Rev. Lett. **61**, 2015 (1988).
- [5] C-Z Zhang, J. Zhang, X. Feng, J. Sheng, K. He, Y. Wang, Q-K Xue *et al.*, Science **340**, 167 (2013).

태가 되며, 이 초유체의 박막이 KT 상전이가 일어나는 대표적인 물리계이다. 반면에, 헬륨-3은 핵이 양성자 두 개와 중성자 한 개로 이루어진 페르미온으로 저온 액체 상태에서는 일단 페르미 유체 상태였다가, 온도가 더 낮아지면 쿠퍼쌍을 이루면서 응축되어 초유체 상태로 상전이가 일어나게 된다. 따라서 헬륨-3 초유체는 헬륨-4 초유체보다는 전하가 없다는 점을 제외하면 오히려 초전도체와 유사한 물리계로 볼 수 있다.

헬륨-3 초유체의 쿠퍼쌍은 바딘-쿠퍼-쉬리퍼의 소리알에 의해 결합된 전자의 쿠퍼쌍들과는 다른 대칭성을 갖는다. 헬륨-3 원자들 사이에는 가까운 거리에서는 강한 반발력이 작용해서 쿠퍼쌍을 이루는 두 원자는 붙어 있다기보다는 서로의 주변을 공전하며, 서로 반대의 스핀이 아니라 같은 스핀끼리 쿠퍼쌍을 이룬다. 그 결과 헬륨-3의 쿠퍼쌍은 궤도 각운동량과 스핀 각운동량 양자수가 모두 0이 아니라 1이 된다.^[6] 80년대 초반에 들어서 쿠퍼쌍의 궤도 운동이나 스핀 상태에 의해 나타나는 베리 곡물에 대한 이론적 연구가 시작되었고, 이 연구에 앞장서던 러시아의 볼로빅은 80년대 후반에 가서 헬륨-3 초유체의 위상수학적 불변수를 찾아내기에 이른다.

헬륨-3 초유체에서는 시간 역전 대칭성을 깨는 상태인 초유체A와 보존하는 초유체B 상태가 모두 알려져 있어서, 볼로빅에게는 시간 대칭성이 보존될 때 위상수학적 불변수를 생각하는 것이 자연스러웠다. 이 중 초유체A는 쿠퍼쌍의 스핀 상태에 관계없이 그러니까 윗방향 스핀끼리 쌍을 이루건 아랫방향 스핀끼리 쌍을 이루건 - 궤도 각운동량이 한 방향으로 정렬하여 시간 역전 대칭성이 깨지는 상태를 가리킨다. 반면에 초유체B의 경우는 2차원에서는 스핀이 윗방향-윗방향인 쿠퍼쌍과 아랫방향-아랫방향인 쿠퍼쌍이 궤도 각운동량이 서로 반대로 정렬하여 시간 역전 대칭성을 보존하며(그림 2 참조), 3차원에서는 이를 일반화하여 쿠퍼쌍의 스핀과 궤도 각운동량의 합이 0이 되는 상태를 유지한다.

볼로빅의 연구 중 2차원에서 초유체A에 관한 부분^[7]은 시간 역전 대칭성이 깨진 경우를 다룬 만큼 정수 양자 홀 연구의 아이디어를 상당수 차용할 수 있었다. 즉 쿠퍼쌍의 상호 공전은 양자 홀에서 사이클로트론 운동과 유사하게 생각할 수 있는데, 여기서 2차원 초유체A에도 정수 양자 홀처럼 손지기 끝머리 상태의 존재를 생각할 수 있었다. 볼로빅은 이런 손지기 끝머리 상태의 존재를 초유체A의 위상수학 불변수의 효과로 설명했다.

헬륨-3 초유체의 물질적 성질은 볼로빅이 위상수학적 불변수를 시간 역전 대칭성이 유지되는 물질 상태로 확장시키기 용이하게 만들었다. 앞에서 언급한 대로 초유체A 쿠퍼쌍들의 궤도 상태를 사이클로트론 운동에 비유해서 생각한다면, 2차원 초유체B의 경우 스핀이 윗방향-윗방향인 쿠퍼쌍은 시계방향 사이클로트론 운동을, 아랫방향-아랫방향인 쿠퍼쌍은 반시계방향 사이클로트론 운동을

하는 것으로 이해할 수 있어서, 윗방향-윗방향인 쿠퍼쌍과 아랫방향-아랫방향인 쿠퍼쌍이 손지기가 반대인 끝머리 상태가 나타나게 함을 볼 수 있다. 또 초유체B에서 시간 역전 대칭성을 보존하는 스핀 소용돌이^[8]의 존재가 그 무렵 논의된 것도, 초유체B가 시간 역전 대칭성을 보존함에도 불구하고 위상적 물질 상태가 될 가능성을 검토할 동기가 되었다. 이에 볼로빅은 초유체B도 위상수학적 불변수를 설정할 수 있음을 보이고, 이를 3차원에까지 적용시켰다.^[9]

반면에 헬륨-3의 물질적 특성은 볼로빅의 연구가 더 인정받기 어렵게 하는 측면도 있었다. 홀 응답 계산에서 위상수학적 불변수를 찾아낸 사울리스와는 달리 볼로빅은 헬륨-3 초유체에서 위상수학적 불변수와 어떤 물리적 응답 사이의 관계를 규명하지 못하여 더 추상적으로 보일 수밖에 없었다. 또한 헬륨-3 초유체가 어떤 의미에서 위상적 물질 상태인지에 대한 혼선이 일어났다. 즉 헬륨-3 초유체의 위상수학적 불변수가 전적으로 쿠퍼쌍의 각운동량 때문이라면, 이것은 위상적 물질 상태는 대칭성 깨짐으로 설명할 수 없다는 원래 취지와 어떻게 부합되느냐는 의문이 제기된 것이다.

추후 리드의 연구^[10]에 의해서 위상적 초전도체의 개념이 더 많은 사람들에게 전달될 수 있었다. 리드는 그 전에 정각마당 이론(conformal field theory)을 써서 $n=2$ 란다우 준위의 반까지 전자가 채울 때, 전자의 짝짓기로 생기는 분수 양자 홀 현상을 제안한 적이 있었으나, 거기서 나타나는 마요라나(Majorana) 페르미온이나 위상수학적 바닥상태 겹침 등의 이색적인 특성을 단순히 자신이 제안한 분수 양자 홀 파동 방정식의 특성이 아니라 초전도체에서 유도해서 보다 물리적인 이해를 도모하고자 했다. 또한 그는 헬륨-3 초유체A와 같은 쿠퍼쌍 대칭성을 가진 초전도체에서 화학 퍼텐셜의 부호를 바꾸면, 위상수학적 불변수가 바뀌면서 에너지 간격이 닫히는 양자 위상적 상전이가 일어남을 명시적으로 보였다. 이 점은 사실 볼로빅의 위상수학적 불변수 공식을 통해서도 확인할 수 있는 부분이기도 했으나, 거기서는 구체적으로 논의되지 않았다.^[1] 사실 헬륨-3 물리에서 화학퍼텐셜은 페르미 에너지와 같은 것으로 생각되어서, 부호를 바꾸는 것을 정당화하기 어렵기도 했다. 아무튼 리드의 연구로 쿠퍼쌍의 대칭성이 초전도체의 위상불변수를 전적으로 결정하지는 않는다는 점이 명확해졌다.

스핀트로닉스와 위상 절연체

2000년대로 넘어와서 스핀트로닉스를 연구하는 사람들에 의

REFERENCES

- [6] A. J. Leggett, Rev. Mod. Phys. **47**, 331 (1975).
- [7] G. E. Volovik, Phys. Scr. **38**, 321 (1988); Soviet Physics JETP **67**, 1804 (1988).
- [8] E. V. Thuneberg, Europhys. Lett. **3**, 711 (1987).
- [9] M. M. Salomaa and G. E. Volovik, Phys. Rev. B **37**, 9298 (1988).
- [10] N. Read and D. Green, Phys. Rev. B **62**, 10267 (2000).

1) 볼로빅은 80년대 초 미국 물리학자들의 헬륨-3 초유체B의 표면 상태에 관한 연구를 전혀 인용하지 않았는데, 당시 상황을 비추어 볼 때 80년대 말 까지도 이 연구들을 전혀 몰랐을 가능성이 크다.

해서 위상적 물질 상태에 대한 탐구가 진행되었다. 1988년에 거대자기저항이 발견된 이후, 전자의 전하 대신 스핀 전류를 흘릴 수 있는 방법을 찾는다면 전자정보기에 큰 혁신을 일으킬 수 있다는 전망이 나왔다. 여기서 주목받은 방법이 전압 강하가 생기는 방향에 수직으로 스핀 전류가 발생하는 스핀 홀 효과 활용이다. 무라카미, 나가오사, 장^[11]은 반도체에서 스핀 홀 효과를 이용하면 전하 전류는 전혀 없이 스핀 전류만 발생할 뿐만 아니라 열손실도 전혀 없다는 점을 지적했다. 문제는 에너지 간격이 열렸을 때 전하의 홀 효과는 양자화되는데 비해서 이들이 연구한 스핀 홀 효과는 양자화가 나오지 않았고, 양자화된 홀 전도율을 대신한 위상수학적 불변수도 구명하지 못한 점이다. 그 때문에 스핀 홀이 어떤 물질 상태의 특성이라고 말할 수 있는지에 여전히 분명하지 않았다.

케인과 멜레^[12]는 그래핀에서 이 문제를 다룸으로서 이런 난점을 피하고 양자 스핀 홀의 위상수학적 불변수를 제대로 파악할 수 있었다. 그래핀에서는 기판의 효과를 고려하더라도 전자들이 평면에 대한 반전 대칭성을 깨는 효과는 매우 미약하므로, 스핀-궤도 결합을 고려하되 이 효과를 완전히 배제한 부분만 생각하면 윗방향 스핀과 아랫방향 스핀이 부호가 반대인 홀 전도율을 갖는 각각의 할데인 모형을 구현하게 되어 양자화된 스핀 홀 전도율을 얻게 된다. 또한 각각의 스핀은 서로 반대 손지기를 갖는 끝머리 상태를 갖게 되어서 서로 시간 역전 변환으로 연결되게 된다. 여기서 반전 대칭성이 깨진다면 위, 아래 방향 스핀이 섞이는 경우, 스핀 홀 전도율은 감소하지만, 여전히 시간 역전 변환으로 연결되는 끝머리 상태는 유지된다. 현상론적으로는 끝머리 상태가 존재하면 스핀 홀 전도율이 유한하고, 존재하지 않으면 0이 된다. 그들은 양자 스핀 홀은 시간 역전 대칭성에 의해서 보호되는 Z_2 (그러니까 홀짝) 위상수학적 불변수로 정의되는 물질 상태로 봄으로써 위의 현상들을 종합적으로 설명할 수 있었다. 다만 그래핀은 이런 개념 정립을 위해서는 매우 유용했으나, 애당초 탄소 원자의 스핀-궤도 결합이 워낙 약해서 극저온이 아니면 케인과 멜레가 논의한 양자 스핀 홀은 구현하기 어려웠고, 대신에 버네빅, 휴즈, 장^[13]이 제안한 HgTe/CdTe 양자 우물에서의 양자 스핀 홀 현상이 뷔르츠부르크 대학 물렌캠프 실험실에 의해서 발견^[14]되었다.

푸, 멜레, 케인^[15]의 후속 연구에서 양자 스핀 홀 개념을 확장해서 3차원 위상 절연체 개념을 정립했다. 이들은 이 연구에서 그래핀 스핀 양자 홀 연구를 위해 고안한 위상수학적 띠 이론을 이용하여 Sb를 첨가한 Bi가 위상 절연체가 됨을 보였다. 이런 위상 절연체의 표면에는 겹침이 전혀 없는 하나의 디랙 점이 나타날 수 있는데, 이 경우 에너지 간격이 열리면 반정수 양자 홀 효과가 나타나고,^[16] 쿠파쌍이 응축되면 대칭성에 관계 없이 위상 초전도체가 되어서^[17] 학계에서 큰 관심을 끌었다.

이 단계에 이르면서 보다 체계화된 위상적 물질 상태에 관

한 논의가 가능해졌다. 자유 해밀토니안에 의한 모든 위상적 물질 상태에 대해서 키타에프에는 주기율표를 작성^[18]한다.

마무리

본 원고에서는 사울리스의 물리계의 위상수학적 불변수 개념을 창시한 후 위상 절연체 및 초전도체 개념이 확립되는 과정을 다루었다. 따라서 평균장으로도 자유 해밀토니안으로 기술되는 물리계만 논의했으며, 여기에 해당하지 않는 분수 양자 홀 효과는 제외했다. 현재 분수 위상 절연체에 대한 여러 가지 이론적 논의가 있었으나, 아직 이런 현상이 구현될 물질을 찾는데 큰 진전이 없는 상황이다. 상호작용으로 분수화된 위상적 물질 상태가 나오는 경우보다는, 상호작용이 위상적 물질 상태의 표면이나 끝머리 상태에 미치는 영향이 실제 물질에서 구현하기 더 쉬운 문제일 가능성이 크다. 특히 위상 초전도체의 경우 평균장 해밀토니안으로만 분류한 키타에프 방식에서 보다 더 나아가서 상호작용에 의한 표면 마요라나 상태의 안정성을 감안한 새로운 분류법들이 연구 중이고, 또한 양자 홀에 대응하는 물리적 응답에 관한 연구도 계속 진행 중이다.

모든 물리 문제에 관한 연구가 그랬듯이 위상적 물질 상태 연구도 처음부터 체계적으로 진행되었다기보다는 여러 분야에서 시행착오를 겪어가면서 단계적으로 진행되었다. 직접적인 연구 대상이 되는 물리계의 특성 때문에 새로운 통찰을 얻기도 했지만, 반대로 이 물리계의 특성을 넘어서는 일반적 법칙을 보지 못하는 경우도 생겼다. 일반적인 법칙을 보기 위해서는 사울리스가 양자 홀에 위상수학적 불변수를 도입한 것처럼, 당장의 문제 해결에는 다소 추상적으로 보이는 개념을 활용해야 할 경우도 존재한다. 반대로 구체적인 대상 물질(헬륨-3, 그래핀)을 가지고 이 문제를 다루었기 때문에 얻게 된 핵심적 통찰들도 많았다. 이런 과정을 보면 물리학자들은 관심 대상인 물리계들을 제한하지 말고 넓게 보되, 이들 모두에 적용될 수 있는 보편적인 원리의 존재 가능성에도 항상 열린 마음이 필요하다.

REFERENCES

- [11] S. Murakami, N. Nagaosa and S-C Zhang, *Science* **301**, 1348 (2003); *Phys. Rev. Lett.* **93**, 156804 (2004).
- [12] C. L. Kane and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 226801 (2005); *ibid* **95**, 146802 (2005).
- [13] B. A. Bernevig, T. L. Hughes and S-C Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006).
- [14] X-L Qi, T. L. Hughes and S-C Zhang, *Phys. Rev. B* **78**, 195424 (2008).
- [15] L. Fu, C. L. Kane and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 096407 (2008).
- [16] M. König, L. Molenkamp *et al.*, *Science* **318**, 766 (2007).
- [17] L. Fu and C. L. Kane, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 106803 (2007).
- [18] A. Kitaev, *AIP Conf. Proc.* **1134**, 22 (2009).