강상관계의 새로운 틀을 찾아서

끈이론적 다체물리

DOI: 10.3938/PhiT.26.031

신 상 진

Toward a New Frame of a Strongly Correlated System

Sang-Jin SIN

We give a conceptual introduction to the holographic many-body theory based on the similarity and universality of the quantum critical points and the black holes. When applied to Dirac materials like graphene and surface state of a topological insulator, the new method gives remarkable agreements between the theory and experiments in an island of parameter space where strong correlation arise through formation of the small fermi surface.

들어가기

새로운 물질을 발견했을 때 연구자들이 성분-구조 분석 후 바로 다음에 하는 것이 전기 및 열적 수송계수를 재는 것이다. 성분과 구조를 보는 것은 고체를 가장 높은 에너지에서 보는 것이며 수송계수는 거시적 규모의 물질이 갖는 평균적 기능이니 이의 측정은 그 물질을 가장 낮은 에너지에서 보는 것이다. 전자로부터 후자가 얻어진다면 물리적으로 이 물질을 이해한다고 말할 수 있다. 그런데 고온초전도체에 있어서는 이 연결이 아직 없다. 구조를 아는데 기능이 설명되지 않는 것이다. 즉 우리는 고온 초전도체의 이론을 가지고 있지 않다. 고온초전도체 뿐만 아니라 많은 전이금속 산화물과 희토류화합물에 대해서도 같은 이야기를 할 수 있다. 상당 부분의 신소재는 이런 류에 속해서 물리학적 이해가 잘 안 되고 있다.

무엇이 문제인가? 간단히, 우리가 가진 「다체를 위한 양자역학적 계산법」인 섭동양자장론이 이런 물질에는 잘 적용될 수

없기 때문이다. 다체의 물리량을 쿨롱상호작용의 크기를 가늠하는 결합상수(coupling constant) g 의 급수로 계산할 때 g 가 어떤 임계값 g_c 보다 크면, 즉 강한 상호작용을 하면, 급수가 발산한다.¹⁾ 현재의 다체물리학을 통틀어 가장 중요한 아이디어인 페르미 액체이론은, 상호작용이 입자의 질량이나 전하는 변화시키지만 입자성 자체는 손상시키지 않는다고 가정한다. 그런데 물리량이 발산한다는 것은 이것이 불가능하다²⁾는 뜻이다. 양자장론에서 말하는 입자란 스핀과 모멘텀이 잘 정의된 파동, 즉 힘을 받지 않고 있는 물질의 양자적 상태를 말하는데 강한 상호작용하는 물질 내에 있는 전자는 입자적 성질이 없다. 이러한 전자계를 비페르미 액체(non-fermi liquid)라 부른다. 그러므로 강한 상호작용하는 전자계에 섭동장론을 적용하면 결과도 잘 안 맞지만 입자가 없는 계에 입자를 기반으로 하는 이론을 적용하는 것은 시작부터 문제가 있다. 강상관계 이론가들의 핵심적인 고뇌는 입자성을 고집하면 계산이 안 맞고 입자성을 포기하면 적용할 물리학이 없다는 것이다.

홀로그래피, 강상관계의 새로운 틀

그렇다면 강상관계를 어떻게 접근해야 하는가? 대상이 무엇이건 물리학의 기본적인 방법은 환원론이다. 물질을 가장 간단한 요소들로 분해하여 그 단위 요소를 연구하는 것은 가장 기본적인 방법론이기 때문이다. 그러나 강상관 물질에 이를 적용할 때는 조금 다른 발상이 요구된다. 왜냐하면 계를 이루는 입자들이 서로 상관(interact)하고 얽혀(entangled) 있어 독립된 개체로서 존재하지 못하기 때문이다. 다체물리의 가장 오묘한 부분은 충분히 많은 원자가 모이면 새로운 자유도가 창발하여(emergence) 새로운 현상을 야기시킬 수 있다는 것이다. 이 창발 현상을 분류하고 각각에 대한 메커니즘을 알아내는 것이 현

저자약력

신상진 교수는 U.C. Berkeley 이학박사(1989)로서 미국 Rutgers 대학교, Florida 대학교 연구원을 거쳐 현재 한양대학교 물리학과 교수로 재직 중이며 물리학회 JKPS 편집위원장을 맡고 있다.(sjsin@hanyang.ac.kr)

- 1) 물론, 재규격화를 통해 각 항을 유한하게 만든 다음의 발산이다.
- 2) 문제가 더 심각하게 되는 것은 상호작용이 관련연산자(relevant operator)로 주어질 때인데, 이 경우 격자구조가 보일 때(high energy)는 크기가 작은 상호작용도 낮은 에너지에서 평균적으로(coarse grained) 접근하면 매우 크게 된다는 것이다. 이는 vertex correction을 불가피하게 만들고, 평균장이론뿐 아니라 Random Phase Approximation(RPA)의 방법론을 무효화시킨다.

대적 의미에서의 다체 물리학의 목표라 할 수 있다. 그런데 창발현상은 개별입자의 성질로부터 기능을 알아내는 것이 원리적으로 불가능하다고 이야기한다.³⁾ 충분히 많은 개수의 원자정보를 컴퓨터에 입력하여 양자역학을 풀면 컴퓨터는 창발된 자유도를 인지할 수 있을지도 모르지만, 물리학이란 우리의 뇌가 수용할 수 있는 개수의 자유도와 시간만을 가지고 물질을 '이해'할 수 있는가 하는 질문에 답하는 것이기 때문이다. 그러므로 창발성이 문제가 될 때 우리는 새로운 원소개념을 필요로 한다. 원자나 쿼크와 같은 구조론적 원소가 아니라 고대의 흙, 물, 공기, 불과 같은 기능적 원소를 찾아야 한다. 현대적으로 말하면 대칭성, 양자상전이점 근방의 동역학지수(dynamical exponent) 그리고 계의 얽힘 정도 같은 것들이다. 거시적 물질의 물성을 지배하는 가장 중요한 기능적 원소는 대칭성이며 많은 경우 이 대칭성은 구조로부터 파생되기에 대칭성이란 기능적 원소는 상호작용이 약한 경우에도 이미 중요하게 대접받아 왔다. 얽힘의 강상관계에서의 역할도, 여기서는 깊이 소개하지 않겠으나, 앞으로 가장 주목받을 연구테마 중의 하나이다.⁴⁾

양자 상전이점과 블랙홀의 유사성: 양자 상전이점의 존재는 섭동장론의 용어로서도 쉽게 설명될 수 있다. 위에서 언급한 것처럼 물리량을 상호작용의 계수에 대한 급수로 표현하고 상호작용의 계수를 0에서 출발하여 점점 증가시키면 어떤 임계값에서 급수는 발산하게 된다. 이 임계값에서 처음 계를 정의하고 표현하기 위해 사용되었던 변수들은 의미를 잃는다. 그 너머에서는 새로운 변수가 의미를 갖게 된다. 이 발산이 일어나는 곳에서 계의 모든 길이/에너지 스케일은 무시되며 발산 혹은 0에 수렴하는 속도를 측정하는 임계지수(critical exponent)만이 문제가 된다. 이러한 발산의 이유를 원래 새로운 질량(갭)이 없는 자유도가 생성되었는데 이를 부주의하게 적분해 버린 결과라 생각하면 양자임계점의 존재는 새로운 gapless degree of freedom의 출현으로 해석할 수 있다. 이 자유도의 분산관계(dispersion relation)를

$$\omega = k^z$$

로 표현할 때 z 를 양자임계점의 동역학지수라 부른다. 양자임계점을 기술하는 데는 계의 특성 대부분이 필요가 없다. 즉 많은 다른 계가 같은 양자임계점을 가질 수 있고 이런 의미에서 양자임계점은 마치 평형점처럼 보편적(universal)이다. 양자임계점에 도달한 계는 계의 대부분 정보를 잃어버렸거나 적어도 잃어버린 것처럼 보인다. 이는 중력이론에서의 블랙홀을 연상시킨다. 별이 내폭하여 블랙홀이 되면 별이 지녔던 수많은 정보를 블랙홀은 잃어버렸거나 적어도 잃어버린 것처럼 보인다. 블랙홀은 보존량의 양자수 외엔 아무것도 보여 주지 않는다.

끈이론, 양자얽힘, 텐서네트워크와 홀로그래피: 이러한 유사성을 더 진척시킬 수 있을까? 이 질문에 답하기 위한 것은 아니었지만, 끈이론은 이 유사성이 사실인 예를 찾아 주었다. 즉 네 개의 초대칭성이 존재하는 4차원 양밀이론의 기저상태는 5차원 Anti de Sitter 공간과 동치⁵⁾이고 양쪽의 유한온도 버전도 성립한다는 것이다. 즉 4차원 양밀이론의 유한온도 평형상태는 AdS 유한온도 블랙홀과 동치라는 것이다. 양밀이론은 스케일 불변성이 있어 양자상전이점과 매우 비슷한 면모가 있고 대응되는 블랙홀은 양밀이론의 상호작용이 클수록 고전적 중력으로 기술될 수 있다. 특이한 점은 동등한 양자 사이에 차원이 하나 다르다는 것이며 이를 강조하기 위해 빛 홀로그래피와 유사성을 빌어 홀로그래피란 용어가 쓰인다. 이는 막대한 가능성이 기대되는 연구의 방향이어서 많은 연구자들은 엄밀한 단계를 밟지 않고 그 확장을 위한 연구를 하고 있다. 따라서 강상호작용하는 계와 AdS 중력 사이의 대응성이 끈이론이나 초대칭성 없이도 존재하느냐 하는 질문에 긍정적으로 답할 수 있다면 이 방향의 연구는 보다 큰 모멘텀을 얻을 수 있다. 이에 관해선 최근 세 가지 긍정적 소식이 있다. 첫째는 1+1차원 계를 위한 MERA라는 텐서 그물망계에서 3차원 AdS가 발견된 것이고,^[1] 둘째, 1+1차원의 홀로그래피적 양자얽힘계산이 등각장론 계산과 완전히 일치한다는 것이며,^[2] 셋째는 Sachdev-Ye 모델의 중력듀얼이 존재하고 이것이 2차원 AdS라는 Kitaev의 결과가 있다.^[3] 이 세 가지

- 3) 그러나 오늘날의 가장 발전된 컴퓨터도 격자 개수가 손가락 개수만큼만 있어도 처리하기 어렵다. 창발된 자유도가 과연 얼마만큼의 원자가 있어야 나오는지 알기도 어렵지만 미래의 컴퓨터가 충분히 큰 수의 입력데이터를 처리할 수 있다고 해도 이는 물리학이 아니다. 그것은 물질이란 아날로그 컴퓨터를 조금 단순화한 디지털 컴퓨터로 대신하는 것에 불과하다.
- 4) 예를 들어 연속된 시공간의 존재마저도 양자얽힘에 근간을 두고 있다는 반 램스동의 제안이 연구자들의 주목을 받고 있다. 공간이란 양자 얽힘 바느질로 꿰맨 일종의 천 조각들과 같다는 것이다. Mark Van Raamsdonk의 최근의 강의록 arXiv:1609.00026을 보라.
- 5) 줄여서 AdS/CFT라 부른다. J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998), [hep-th/9711200]. 이 논문은 20년 후인 현재 12000회 이상 인용되었다.

REFERENCES

- [1] B. Swingle, Phys. Rev. D **86**, 065007 (2012). arXiv:0905.1317.
- [2] P. Calabrese and J. L. Cardy, J. Stat. Mech. **0406**, P06002 (2004) [hep-th/0405152]; S. Ryu and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. **96**, 181602 (2006) [hep-th/0603001].
- [3] A. Kitaev, "A Simple Model Of Quantum Holography," talks at KITP, 2015, <http://online.kitp.ucsb.edu/online/entangled15/kitaev1/>, <http://online.kitp.ucsb.edu/online/entangled15/kitaev2/>, J. Maldacena and D. Stanford, "Comments On The Sachdev-Ye-Kitaev Model," arXiv:1604.07818.

Fig. 1. Theory versus experiment in graphene transports. (a) electric conductivity, (b) Thermal conductivity. Dotted line is for one current model and realline is two currents model. Blue color is to guide eyes to fermi liquid where holographic theory does not apply.

모두 연구자들의 많은 관심을 받아 큰 흐름을 이루는 연구로 이어지고 있다.

디랙물질과 홀로그래피

이상과 같은 세계적 조류를 배경으로 본 연구실의 연구를 소개하기로 한다. 운이 좋아 충분히 많은 등각장론의 홀로그래피 중력학이 존재한다고 하자. 그럼 홀로그래피 이론은 실제 세계에 존재하는 물질의 양자상전이점의 기술에 과연 쓸모가 있을까? 유일한 방법은 홀로그래피 이론에 의해 잘 기술되는 예를 발견하고 그 이유를 설명하는 길뿐이다. 사실 AdS/CFT가 응집물리에 첫 적용된 것이 2007년임에도 불구하고 그러한 예를 찾으려는 노력을 하지 않았다. 그도 그럴 것이 강상관계에서 실험-이론의 정량적 일치를 경험한 일이 (거의) 없기에 연구자들은 정성적 문제에 집착해 있었다. 고온 초전도체 물질들은 매우 복잡한 구조를 가지고 있으며 따라서 양자임계점에서의 행동양식도 복잡하다. 이론에 도움이 되려면 간단한 물질에 강상관계가 있어야 한다. 그래야 현상에 대한 해석의 다양성이 줄기 때문이다.

1. 그래핀과 홀로그래피

그래핀은 세상에 존재하는 가장 간단한 결정구조이다. 이런 물질에 강상관계가 있다면 그야말로 강상관계의 수소원자가 될

것이다. 이런 생각을 하고 있을 즈음 Science 온라인 판에 하버드대의 김필립 교수 등의 논문이 게재된 것을 보았는데 내용이 그래핀에서의 비데만-프란츠법칙(Wiedemann-Franz law) 위반이었다.^[4] 전자가 전하와 열전달 모두의 주체라면 각 온도에서 전기전도율과 열전도율은 비례해야 한다. 직관적으로도 당연한 이 경험적 법칙은 페르미 액체 이론의 결론이기도 하다. 그런데 실험결과는 디랙점 부근에서 페르미 액체이론이 기대하는 수치의 20배를 얻었다는 것이다. 즉 그래핀 내의 전자계가 디랙점 부근에서는 페르미 액체일 수 없다는 것이니 강상관계여야 함을 말해준다. 이어서 나온 Lucas와 Sachdev 교수와의 공동논문^[5]에서는 실험의 결과를 유체역학적으로 해석했더니 정성적으론 괜찮으나 정량적으로는 잘 맞지 않았고, 불순물이 주는 효과를 고려하기 위해 유체의 점성상수들의 위치 의존성을 고려했더니 조금 나아졌다는 내용이 실려 있었다. 유체역학을 적용했다는 것은 계가 국지적인 평형상태에 도달했다고 가정한다는 것이며 이는 전자상호 간의 작용이 강하고 전자-불순물 간 충돌보다 더 자주 일어난다고 가정한다는 뜻이다. 즉 전자계가 강상관계이고 그래핀 시료가 지극히 깨끗해야 한다. 후자는 왜 실험이 이제야 이루어졌는지를 설명한다. 그런데 왜 그래핀이 강상관계인가? 사실 2008년에 Sachdev의 학생이었던 밀러가 쓴 논문^[6]에 의하면 그래핀이 강상관계일 것이라고 추정할 만한 근거가 있다. 디랙점 부근의 페르미 면은 매우 작다. 따라서 전자-홀의 쌍창생이 충분치 않고 따라서 전자들의 전하가 가려짐(Screen)이 약하다. 효과 상호작용상수는

$$\alpha_{eff} \sim \frac{e^2}{4\pi\epsilon\hbar c} \frac{c}{v_F} \sim 2.2/\epsilon_r$$

이므로 전하가림상수 ϵ_r 가 크지 않은 그래핀의 디랙점 근방은 강상관계가 된다. 이 공식은 페르미 면이 큰 일반금속의 전자 간 상호작용은 임의로 작다는 것도 말해준다.

그래핀이 디랙점 부근에서 강상호 작용계이고 디랙론이 대칭성에 의해 보호된다면 동역학지수 $z=1$ 인 양자상전이점이라고 할 수 있지 않을까? 한양대의 서윤석 박사와 나는 이미 오래전부터 홀로그래피를 써서 수송계수를 계산해 온 터였기에 이제

REFERENCES

- [4] J. Crossno, J. K. Shi, K. Wang, X. Liu, A. Harzheim, A. Lucas, S. Sachdev, P. Kim, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. A. Ohki and K. C. Fong, Science **351**, 1058 (2016), arXiv:1509.04713.
- [5] A. Lucas, J. Crossno, K. C. Fong, P. Kim and S. Sachdev, Phys. Rev. B **93**, 075426 (2016), arXiv:1510.01738.
- [6] M. Müller, J. Schmalian and L. Fritz, Phys. Rev. Lett. **103**, 025301 (2009), arXiv:0903.4178.

막 리서치를 시작한 송근호 군의 도움을 받아 신속히 계산을 해 보았다. 첫 결과는 별로 좋지 않았다. 자세히 보니 유체역학을 변형 없이 적용했을 때의 Lucas 등의 결과와 같았다.(그림 1의 점선 참조) 그런데 생각해 보니 열전도율이 전기전도율보다 20배나 더 나왔다면 이는 이론을 조금 비틀어 풀리는 문제가 아니라 필경 숨은 자유도가 있어야 한다는 생각이 들었다. 그렇다면 열만 나르고 전하는 나르지 않는 중성류가 존재해야 된다는 말이 된다. 즉, 두 개의 흐름이 있어야 한다. 하나는 보통의 전류 다른 하나는 중성류. 이 아이디어에 바탕을 두고 새 모델을 짰고 계산결과는 우리를 실망시키지 않았다.

디랙점 부근에서의 홀로그래피 계산결과는 실험과 강상관계 데이터에 대한 이론-실험의 비교라고는 믿을 수 없을 만큼 일치했다.(그림 1 참조) 김필립-Sachdev 교수와의 토론 끝에 중성류의 근원을 찾아낼 수 있었다. 디랙콘의 에너지-모멘텀 보존법칙 때문에 전자와 홀의 전류가 각각 보존되어야 한다.^[7] 두 전류를 더하면 총 전류가 되고 두 전류를 서로 빼면 중성류가 된다. 이 결과는 2017년 1월 PRL에 실렸고 에디터 추천 논문으로 선정되었다.^[8]

2. 위상부도체의 표면상태와 홀로그래피

그래핀에 디랙콘이 있다는 것 외에 그래핀의 물성은 아무것도 쓴 것이 없기 때문에, 나는 디랙콘이 있는 다른 물질들에서도 같은 일이 일어나는지 궁금했다. 우리는 구글의 이미지 썬치를 써서 디랙콘을 가지는 물질들의 수송계수 데이터를 찾았다. 디랙물질들 중 그래핀 다음으로 중요하고 따라서 많이 연구된 계는 3차원 위상부도체의 표면상태이다. 이 물질에 대해 아직 수송계수의 아노말리는 측정된 바가 없다. 대신 자성물질을 도핑시켜 표면 갭을 열고 그 결과 생기는 전기전도도를 자장의 함수로 측정한 magneto-conductivity 데이터가 있었다.^[9] 흥미로운 현상 중 하나는 weak antilocalization(WAL)과 weak localization(WL) 현상이다. 자성체 도핑이 없거나 낮으면 온도에 관계없이 WAL만 일어나고 도핑이 너무 높으면 강자성체가 된다. 중간도핑영역에선 두 가지 모두 일어나며 높은 온도에선 WAL, 낮은 온도에선 WL이 일어나기 때문에 온도가 내려가면서 WAL에서 WL로의 전환이 일어난다. 그런데 이 전환 영역에서의 MC 곡선이 기존 이론으로 잘 설명이 되지 않는다. 따라서 이 부분을 홀로그래피 이론으로 설명하는 것을 목표로 하였다. 자기적 수송계수의 계산 또한 계산법이 알려져 있으나 문제는 i) 위상부도체를 홀로그래피로 어떻게 구현하느냐와 ii) 자성물질의 도핑을 어떻게 처리하느냐 하는 문제였다. 벌크 갭이 있는 한 내부의 수송상태를 기술할 필요는 없다. 물질의 위상부도체성은 벌크가 부도체이고 표면의 디랙콘이 있다는 것으로 이미 반영되었다고 생각할 수 있다. 남은 문제

Fig. 2. (top) Increasing doping build up surface gap, which shrink the fermi surface, making the system strongly interacting, just as the case of graphene. If we decrease the temperature, there will be transition from WAL to WL. (bottom) Theory vs. experiments for MC curves in Cr doped Bi_2Te_3 , and Mn doped Bi_2Se_3 .

는 표면 갭과 표면 수송계수의 자성물질의 밀도 의존성인데 이를 위해선 결국 계가 자성을 갖는 불순물과의 상호작용이 필요해진다. 여기서 아이디어가 필요하다. 위상수는 소위 인스턴톤 밀도함수의 적분으로 표현되고 불순물 농도는 액시온의 미분제공 즉 운동에너지항에 비례한다. 가장 자연스러운 것은 위상 부도체 표면에서의 자성물질에 의한 물성변화를 인스턴톤과 불순물의 density-density 곱으로 주어지는 상호작용항을

REFERENCES

- [7] M. S. Foster and I. L. Aleiner, Phys. Rev. B **79**, 085415 (2009), arXiv:0810.4342.
- [8] Y. Seo, G. Song, P. Kim, S. Sachdev and S.-J. Sin, Phys. Rev. Lett. **118**, 036601 (2017), arXiv:1609.03582.
- [9] D. Zhang *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 205127 (2012); L. Bao, W. Wang, N. Meyer, Y. Liu, C. Zhang, K. Wang, P. Ai and F. Xiu, Scientific Reports **3**, 2391 (2013).

넣는 것이다.⁶⁾ 우리는 그에 따른 해석적 해를 구할 수 있었고 모든 자기적 수송계수를 해석적으로 구할 수 있었다. 결과는 놀라웠다. 여기서도 WAL → WL 전환이 있는 파라미터 영역에서의 데이터와 이론은 거짓말처럼 맞아 떨어졌다.(그림 2(아래) 참조) 그림 2(위)를 보면 데이터와 이론이 잘 맞는 영역이란 다른 아닌 페르미면이 작은 곳이라는 것을 알 수 있다. 두 개의 다른 실험팀에서 두 가지 시료에서 얻은 데이터는 그림 2(아래)에서 보듯이, 이론의 파라미터를 조정하는 것에 대응된다. 즉, 현상은 보편성이 있고 이론은 실험과 일치한다. 이 결과는 PRB의 Rapid Communication에 출판되었다.^[10]

앞으로의 일들

또 하나의 성공이라고 좋아하고 있을 때, 오랜 강상관계 연구의 경험을 가진 전문가 두 분이 내 강연을 듣고 재미있는 코멘트를 했다. “고체물리는 그렇게 잘 맞을 수 없어요, Too good to be true.” 비록 디랙점 부근의 작은 파라미터의 섬(island)에서지만 왜 그렇게 잘 맞는지 아직은 우연이라는데 나는 동의할 수 있다. 그러나 우리의 수송계수는 논리적 단계를 거쳐 해석적인 공식으로 주어진 결과이다. 정당성이나 출처를 불문하고, 여러 개의 온도에서 자장의 함수로 주어진 데이터를 맞추는, 즉 3차원 데이터를 맞추는, 공식을 요리하려고 시도해 보자. 조절 가능한 파라미터는 두 개의 커플링상수와 페르미 속도뿐이다. 매쓰매티카는 아라비안나이트 지니와 같다. 잠시만 같이 놀아주면 당신에게 적어도 다항식으로는 그 작업이

6) 상호작용항 $\sim (\partial \chi_f)^2 F \wedge F$

Fig. 3. Members of string manybody group of Hanyang University: from the right side, Dr. Yunseok Seo, Dr. Yonghui Qi, myself, Mr. Eunseok Oh and Mr. Geunho Song.

불가능하다는 것을 보여줄 것이다. 이 정도면 우연이라도 꽤 괜찮은 경험이다. 이러한 경험의 반복을 만들어가기 위해 가능한 많은 디랙물질의 디랙점 근방에서 강상관계의 특성이 존재하는가를 확인하고 이론의 보편성을 입증하는 것이 당면 목표이다. 디랙물질에서의 보편성이 확보되면 동역학적 지수가 큰 무거운 페르미온이나 고온초전도체 물질로 확장해 나갈 것이다. 한양대 끈이론적 다체물리 연구팀을 소개하는 사진으로 이 글을 마무리한다.

REFERENCES

- [10] Y. Seo, G. Song and S. J. Sin, Phys. Rev. B **96**, 041104 (2017), [arXiv:1703.07361].