위상물질

위상상태의 동역학

DOI: 10.3938/PhiT.25.023

이민철·최만수

Dynamics of the Topological States of Matter

Minchul LEE and Mahn-Soo CHOI

Topological phase transitions defy the conventional understanding on the typical continuous phase transitions which are driven by the spontaneous symmetry breaking and naturally described by local order parameter. Topological phase transitions involve the change in internal topology. Topological states are then classified by topological quantum numbers which are mostly discrete numbers such as topological Chern number in quantum Hall states and the number of gapless boundary states in topological insulators and superconductors.

The issue in the dynamics of the topological states is that the discrete topological numbers are inadequate to describe the topological order during dynamical phase transition. In particular, the topological quantum numbers concern about only the ground state even though the time evolution should involve the excited states. In order to describe the full aspects of the time evolution of the topological order, one should define the order with respect to the full wave function, which is expected to be necessarily nonlocal.

In this article, we briefly review recent studies and developments of the dynamics of the topological states, focus-

ing on one-dimensional topological superconductors and their edge states, Majorana bound states.

들어가는 글

응집물질계는 구성요소들간의 상호작용에 의해 구성요소 자체 성질과는 다른 “떠오르는 현상”(emergent phenomena)을 일으킨다. 대표적인 떠오르는 현상으로 응집물질계의 상(phase)과 상전이(phase transition)를 들 수 있다. 알루미늄과 같은 금속은 온도를 낮추면 초전도체가 되고, 철과 같은 강자성물질은 퀴리온도 이하에서 강자성 상태, 즉 자석이 된다. 이러한 상전이현상은 자발적 대칭성 깨짐(spontaneous symmetry breaking)이란 개념으로 설명되고, 대칭성 깨짐 정도를 나타내는 한 곳질서도(local order parameter)로 기술된다. 하지만, 대칭성 깨짐으로 상전이를 설명하는 란다우 이론으로 기술할 수 없는 새로운 상, 즉 위상상태(topological state)가 최근 들어 발견되고 있다. 대표적인 위상상태로, 강한 자기장이 걸린 이차원 전자계에서 발생하는 양자홀 상태(quantum Hall state)를 들 수 있는데, 양자홀 상태로의 전이에는 어떠한 대칭성 깨짐도 발생하지 않는다.^[1,2] 실제로, 위상상태는 대칭성 깨짐이 아닌 내부 위상학적 구조에 의해 결정되고, 소위 위상양자수(topological quantum number)로 분류된다.^[3,4] 예를 들어, 양자홀 상태는 위상전수(Chern number)로 분류되며,^[5,6] 위상절연체(topological insulator)나 위상초전도체(topological superconductor)는 경계에서 발생하는 에너지틈없는(gapless) 표면상태의 갯수로

저자약력

이민철 교수는 서울대학교 이학박사(2003)로서 고려대학교 연구원, 스위스 바젤대학 연구원, 마르세이 이론물리연구소 연구원을 거쳐 현재 경희대학교 응용물리학과 교수로 재직 중이다.(minchul.lee@khu.ac.kr)

최만수 교수는 포항공과대학교 이학박사(1998)로서, 스위스 바젤대학 연구원, 고등과학원(KIAS) 연구원을 거쳐, 2002년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다.(choims@korea.ac.kr)

REFERENCES

- [1] K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980).
- [2] D. C. Tsui, H. L. Stormer and A. C. Gossard, Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982).
- [3] C. Nájak, S. H. Simon, A. Stern, M. Freedman and S. D. Sarma, Rev. Mod. Phys. **80**, 1083 (2008).
- [4] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [5] R. B. Laughlin, Phys. Rev. B **23**, 5632 (1981).
- [6] R. B. Laughlin, Phys. Rev. Lett. **50**, 1395 (1983).

분류될 수 있다.^[4,7-9]

위상상태를 기술하기 위해 도입된 위상양자수는 띄엄띄엄한(discrete) 값을 갖는다. 위상양자수의 띄엄띄엄한 성질은 위상상태의 동적변화를 기술하기에는 매우 부적합하다. 예를 들어, 물질의 온도, 조성, 내/외부조건을 시간에 따라 변화시켰을 때 발생할 위상학적 질서의 동적변화를 위상양자수로 기술할 수가 없다. 비위상학적 상전이현상을 기술하는 란다우 이론에서는 이런 문제가 발생하지 않다. 대칭성 깨짐 정도를 나타내는 한 곳질서도는 연속적으로 변하며, 동적변화는 긴즈버그-란다우(Ginzburg-Landau) 미분방정식에 의해 결정되기 때문이다.^[10]

위상상태의 동적변화를 기술하는데 발생하는 또 다른 개념적인 문제는, 위상양자수가 물질의 바닥상태만으로 측정된다는 사실이다. 응집물질계의 동적변화는 바닥상태뿐만 아니라 들뜬상태도 일으킨다. 따라서 위상상태의 동적변화를 완벽히 기술하기 위해서는 바닥상태를 포함한 모든 상태를 고려하는 새로운 위상학적 질서도를 정의할 필요가 있다.

이 글에서는 일차원 위상초전도체에 집중하여 위상상태의 동적변화에 대한 최근 연구 동향을 간략히 살펴보기로 한다.

마요라나 양자비트에서의 비단열효과

위상상태의 동적변화에 대한 연구의 필요성은 개념적 요인뿐만 아니라 현실적 요구도 반영한다. 위상상태에 대한 관심이 높아진 이유 중에 하나는, 대칭성을 깨지 않거나 에너지띠 구조를 바꾸지 않는 정도의 무질서나 외부 건드림(perturbation)에 대해 위상상태가 안정해서 이를 양자계산의 기본단위로 사용하기에 적합하기 때문이다. 특히, 마요라나 페르미온(Majorana fermion; MF)을 이용한 위상양자계산(topological quantum computation)은 나노선 네트워크 구조를 이용한 구현 방법까지 제안될 정도로 연구가 진척되었다.^[11] 여기서 MF는 자신의 반입자와 동일한 입자이며, 위상초전도체의 경계에서 에너지띠 없는 들뜬상태로 발생한다. MF를 이용한 양자비트, 즉 큐비트(qubit)의 기본연산은 끈꼬기(braiding), 즉, 두 MF의 상대적 위치를 바꾸기이다. 이는 위상초전도체경계를 시간에 따라 변화시킴으로 구현할 수 있다. 이상적으로는 단열과정(adiabatic process)으로 해야 하지만, 소자의 빠른 작동이 요구되는 상황에서는 비단열효과(non-adiabatic effect)가 들어올 수밖에 없다. 따라서 비단열 끈꼬기 과정에서 위상상태가 얼마나 훼손되는지 알아야 작동속도의 한계를 미리 파악할 수 있다.

먼저, 일차원 위상상태의 구역벽(domain wall) 한쪽이 등속도 v 로 움직이고 있다고 가정해보자. 구역벽이 이동하므로, 여기에 발생한 마요라나 속박상태(Majorana bound state; MBS) 또한 함께 움직인다고 볼 수 있다. 구역벽 한쪽 근처에 한정하

Fig. 1. Majorana wave functions - particle (blue) and hole (red) components - in lab (bottom) and comoving (top) frames for different velocities with respect to the speed of light. The orange line shows the spatial variation of the gap.^[12]

Fig. 2. Velocity dependence ($\beta = v/u$) of the bound-state spectrum of a moving domain wall.^[12]

면, MBS를 구역벽 경계에서 질량의 부호가 바뀌는 디락 해밀토니안으로 기술할 수 있다.^[12] 이 해밀토니안은 상대론적 해밀토니안으로 로런츠 불변성(Lorentz invariance)을 가진다. 즉, 구역벽 이동에 의한 효과를 특수상대론적 효과, 로런츠 수축(Lorentz contraction)과 시간늘어남(time dilation)으로 해석할 수 있다. 그림 1에서 보듯이 움직이는 좌표계에서 MBS의 파동함수가 공간적으로 더 퍼지고, 실험실 기준틀(lab frame)에서는 반대로 구역벽에 국소화된다. 이 효과는 속박상태의 에너지

REFERENCES

- [7] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. **95**, 146802 (2005).
- [8] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. **95**, 226801 (2005).
- [9] X. L. Qi and S. C. Zhang, Rev. Mod. Phys. **83**, 1057 (2011).
- [10] P. C. Hohenberg and B. J. Halperin, Rev. Mod. Phys. **59**, 435 (1977).
- [11] J. Alicea *et al.* Nat. Phys. **7**, 412 (2011).
- [12] T. Karzig, G. Rafeal and F. von Oppen, Phys. Rev. X **3**, 041017 (2013).

Fig. 3. (a) Motion of Majorana bound-states (MBS) and (b) non-adiabatic processes between MBSs or between MBS and continuum states.^[13]

지릿피에도 영향을 미쳐서 그림 2에서 보듯이 속도가 커질수록 에너지간격이 줄어들다가 $\beta = v/u = 1$, 즉 구역벽 이동속도가 페르미 속도(Fermi velocity) u 가 될 때, 에너지간격이 0으로 줄어들어 연속적인 에너지 빛띠를 형성하게 된다. 즉, MBS가 더 이상 존재하지 않는다. 이를 정리하면, (1) 이동속도가 커질수록 외부건드림의 영향을 받기 쉬워지고, (2) 페르미 속도 u 가 광속과 같은 역할을 하여 구역벽 이동속도에 윗한계(upper limit)로 작용한다. 특히, 둘째 제한조건은 위상초전도체의 에너지띠 크기에 상관없이 작용한다.

위 연구에서는 로런츠 불변성을 가진 해밀토니안을 만들기 위해 위상초전도체 내부의 연속상태들(continuum states)과 구역벽 다른 한쪽에 발생한 MBS를 무시하였다(MBS는 반드시 쌍으로 발생한다). 이 두 가지를 모두 포함하면 정확한 해를 구하기는 어려우나, 시간의존 건드림 이론(perturbation theory)으로 정성적 효과를 관찰할 수 있다.^[13] 먼저, 구역벽 이동에 의해 발생하는, MBS로부터 연속상태로의 전이(그림 3 참조)는 당연히도 MBS의 결어긋남(decoherence)을 발생시키고, 선행연구에서와 같이 임계속도(critical velocity)가 존재하여 이동속도가 임계속도보다 빨라지면 비단열과정에 의해 MBS가 불안정해진다. 이 효과는 란다우-제너(Landau-Zener) 터널링과 사실상 유사하고, 이로부터 절연체의 에너지띠(Δ)에서 유추한 시간($\hbar/\Delta$)보다 끈끄기 시간이 길어야 한다는 제한조건을 예측할 수 있다. 하지만, 임계속도에 의해 정해지는 끈끄기 조건은 에너지띠에서 유추한 단순한 조건보다 더 제한적이다. 둘째로, 구역벽 이동에 의해 두 MBS 사이에 발생하는 비단열과정은 두 상태 사이의 결합 크기를 바꾸기 때문에 마요라나 큐비트 상태에 부수적인 영향을 미칠 수 있다.

위상동적상전이

MF를 이용한 큐비트 연산에는 끈끄기를 위한 위상학적 구역벽 이동뿐만 아니라 위상학적 구역의 생성과 소멸 또한 필요하다(그림 4 참조). 즉, 동적으로 위상상전이를 일으켜야 한다. 위상학적/비위상학적 상 모두에서는 에너지띠가 유한한 값을

Fig. 4. Majorana bound-states and topological phase transition.

Fig. 5. Time evolution of Majorana polarization Φ for topological phase transition with different time duration τ .^[15]

갖지만, 상전이점에서 에너지띠가 닫히므로 상전이를 일으키는 속도에 따라 상전이 후에 계가 바닥상태에 머물러있지 않을 수 있다. 계의 위상학적 질서는 대체로 바닥상태에 의해 정의되므로, 위상학적 상으로 상전이를 일으켰을지라도 결맞은 상태는 충분히 위상학적이지 않을 수 있다.

그렇다면, 상전이 후 계의 상태가 위상학적인지 아닌지를 어떻게 판단할 것인가에 대한 기준부터 먼저 세워야 한다. 위상초전도체는 경계에 발생하는 에너지띠 없는 마요라나 끝머리 상태(edge state)로 특징지어진다. 따라서 경계에만 존재하는 영에너지(zero-energy) 상태가 존재하는지 또는 계의 파동함수와 경계 마요라나 상태의 파동함수의 겹침(overlap) 세기가 얼마인지를 이용하여 간접적으로나마 위상상태 여부를 판별할 수 있다.

실제로, 비정상 한곳 상태밀도(anomalous local density of states)를 측정하여 MBS를 판별하는 마요라나 극값(Majorana polarization)^[14] Φ 란 양($\Phi = 0$ 이면 비위상상태, $\Phi = 1$ 이면 위상상태)을 도입하여, 위상학적 상으로 전이한 후에 위상학적 질서가 발생하는 과정을 추적하려 시도하였다.^[15] 그림 5에서 보듯이, 상전이 과정이 너무 빠르면(짧은 상전이시간 τ), 위상

REFERENCES

- [13] M. S. Scheurer and A. Shnirman, Phys. Rev. B **88**, 064515 (2013).
- [14] D. Sticlet, C. Berna and P. Simon, Phys. Rev. Lett. **108**, 096802 (2012).
- [15] E. Peretto, Phys. Rev. Lett. **110**, 087001 (2013).

Fig. 6. Majorana survival probability of a zero-energy Majorana mode after quench toward (a) the non-topological phase and (b) the critical point.^[16]

상태에 도달하지 못하고, 충분히 천천히 진행되어야(긴 상전이 시간 τ) 위상상태($\Phi = 1$)가 된다. 또한, 초전도선의 길이가 길어질수록 위상상태를 얻기 위한 상전이시간이 더 길어진다. 이는 상전이점에서의 에너지틈과 란다우-제너 터널링으로 설명할 수 있다. 위상초전도선의 길이가 유한하면, 상전이점에서 에너지틈이 완전히 닫히지 않고, 길이에 반비례하는 에너지틈(Δ)이 남는다. 상전이시간이 이 에너지틈에 해당되는 시간($\hbar/\Delta$)보다 길면 란다우-제너 터널링이 발생하지 않아 단열과정이 된다. 따라서 초전도선이 길어지면 상전이점 에너지틈이 작아지고 상전이시간이 더 길어야 계가 바닥상태로 남아있어 완벽한 위상상태로 전이될 수 있다.

반대의 경우, 즉 위상학적 상으로부터 시작하여 비위상학적 상으로 전이하는 경우도 비슷한 방법으로 연구할 수 있다. 기본적으로 로슈미트 메아리(Loschmidt echo)라 불리는 양으로서, 영에너지 MBS로 시작한 초기 파동함수와 시간 t 에서의 파동함수의 겹침으로 정의된 마요라나 생존확률을 계산하여 초기 위상상태가 전이 후에 어떻게 남아있는지 추적할 수 있다.^[16] 그림 6은 비위상학적 상으로의 전이 후에 MBS 생존확률이 급격히 감소하나 완벽하게 사라지지는 않음을 보여준다. 또한, 상전이점으로 급랭시키면, MBS가 주기적으로 되살아난다. 초전도선의 길이를 늘이면 이에 비례하여 되살아나는 주기가 길어지기 때문에 이는 유한크기효과(finite-size effect)로 파악할 수 있다. 즉, 경계에 있던 마요라나 끝머리상태가 급랭 후에 나노선을 따라 주기적으로 반복운동을 하여 나타나는 효과로 해석할 수 있다. 특히 상전이점에서는 에너지준위 간격이 일정하여 주기성이 매우 명확하게 드러난다.

위상상전이는 아니지만, 앞 연구와 같이 로슈미트 메아리를 이용하여 MBS를 감지할 수 있는 방법이 최근에 제안되었다.^[17] 그림 7에서와 같이 금속전극을 갑자기 위상초전도선에 연결시키면, 금속전극의 마요라나 채널 중 하나만 안드레프 반사(Andreev reflection)에 의해 위상이동(phase shift)을 겪게 되어 계 전체의 경계조건이 변화한다. 되틀맞춤군(renormalization group) 관점에서 보면 전체 계는 새로운 불막이점(fixed point)

Fig. 7. (a) Sudden connection of normal lead to the Majorana zero-mode and (b) Andreev reflection of a Majorana channel.^[17]

으로 흘러가게 되고, 로슈미트 메아리는 단조감소하는데, 흥미롭게도 이 경우에 시간에 대해 대수적으로 감소하고($\sim t^{-\alpha}$), 그 지수가 무질서나 쿨롱상호작용 등에 상관없이 보편적인 값($\alpha = 1/4$)을 가짐이 밝혀졌다. 따라서 MBS를 탐지하기 위해 제안된 기존 방법(간섭계 또는 터널링 분광)들과 다르게 동적인 방법으로 마요라나 상태의 독특한 특성을 탐지할 수 있다.

위상상전이와 킵블-주렉 열개

일반적인 상전이의 경우도 동적으로 상전이를 빠르게 일으키면 대칭성이 완전히 없어지지 않거나 또는 완전히 형성되지 않을 수 있다. 이는 동적으로 상전이점을 지나면서 위상결함(topological defect)이 발생하기 때문이다. 이런 위상결함이 발생하는 과정을 연구하는 이론으로 킵블-주렉 열개(Kibble-Zurek mechanism; KZM)가 있다.^[18,19] KZM은 상태의 동적변화에 대한 어림이론으로, 외부 구동 시간 척도와 내부 구조 시간 척도를 비교하여, 외부 구동에 의한 변화가 느리면 계가 단열과정을 따르고, 반대의 경우는 계가 외부구동 변화를 못 쫓아간다고 어렵다. 이 이론은 초기 우주의 상전이 과정을 설명하기 위해 제안되었는데, 이론의 단순성에도 불구하고, 응집물질계의 이차 상전

REFERENCES

- [16] A. Rajak and A. Dutta, Phys. Rev. E **89**, 1 (2014).
- [17] R. Vasseur, J. P. Dahlhaus and J. E. Moore, Phys. Rev. X **4**, 041107 (2014).
- [18] T. W. Kibble, J. Phys. A **9**, 1387 (1976).
- [19] T. W. Kibble, Phys. Rep. **67**, 183 (1980).

Fig. 8. (a) Quasi-particle energy levels and (b) relaxation time scales and the adiabatic-impulse crossover times.^[26]

이(second-order transition)^[20,21]와 양자상전이(quantum phase transition)^[22]뿐만 아니라 일부 위상학적 상전이^[23]에서 발생하는 위상결함을 잘 설명한다.

하지만, 최근 연구에 따르면, 위상초전도체 경계에 발생하는 MBS에 의한 위상결함 발생은 KZM에서 예측하는 결과를 따르지 않는다. KZM에 따르면 위상결함 발생확률 $P_{\text{def}} \propto \sqrt{v_q}$ 에 비례한다. 여기서 v_q 는 위상전이속도이다. 하지만, 크루츠 모형(Creutz)과 위상초전도선의 끝머리 상태에서 발생하는 위상결함의 발생확률은 각각 $v_q^{1.35}$, v_q^0 에 비례한다.^[24,25] 이는 마요라나 끝머리 상태가 다른 내부 상태(bulk state)와 달리 위상학적 구조에 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다. 크루츠 모형에서는 위상학적 조건 때문에 끝머리 상태에서 다른 내부 상태로의 들뜸이 불가능하고, 위상초전도선의 경우에는 그와 반대로 끝머리 상태가 상전이점 근처에서 완전히 아닌 곳 되어(delocalized) 매우 많은 위상결함을 발생시킨다.

기존 KZM이 위와 같은 위상학적 끝머리 상태에 의한 효과를 제대로 예측하지 못하는 이유는, KZM이 시간 변화를 두 에너지 준위만으로 기술할 수 있는 계에서만 성립하는데 비해, 끝머리 상태가 있는 위상학적 계는 다중 준위간 시간 변화를 일으키기 때문이다. 따라서, 다중 준위 효과를 고려할 수 있도록 기존 KZM을 확장하면 위상상전이 또한 KZM의 틀 안에서 기술할 수 있다.^[26] 실제로, 그림 8에서와 같이, 영에너지 끝머리 상태를 포함한 다중 준위 구조에서, KZM의 단열과정-일시정지(adiabatic-impulsive) 어려움을 각 준위에 대해 순차적으로 적용하면, 선행 연구에서 관측한, 마요라나 끝머리상태에 의한 위상결함 발생율($P_{\text{def}} \propto v_q^0$)을 얻어낼 수 있다. 확장된 KZM은 비교적 쉬운 계산으로 동적 위상상전이를 다룰 수 있게 해줄 수 있을 뿐 아니라, 기존 KZM에서 벗어나는 위상학적 효과를 이해하는 틀 또한 제공한다.

위상학적 끈질서도

앞 연구들에서는 위상상태를 판단하기 위해서 마요라나 끝머리 상태와의 겹침이나 위상결함 발생을 등을 계산하였다. 하지만, 이들 중 어느 것도 진정한 의미에서의 위상학적 질서도를 직

Fig. 9. Majorana chain representation of 1D topological superconducting wire. Each pair of Majorana fermions, γ_{2j-1} and γ_{2j} in a circle forms the site fermion c_j . The lines connecting Majorana fermions represent the binding between them in three cases: (a) non-topological phase and (b, c) topological phases.

접적으로 대표하지 못한다. 최근에서야 일차원 위상절연체에서 연속적인 값을 갖는 위상학적 질서도가 정의되었다. 이른바 끈질서도(string order parameter)로, 기존의 질서도와 달리 비국소(non-local)하다.^[27-30]

끈질서도를 정의하기 위해서 일차원 위상초전도체에서 비위상학적 상과 위상학적 상 각각에서의 MF 사이의 결합(binding)을 이해할 필요가 있다. 그림 9는 일차원 p-wave 초전도선을 총 N 개의 격자점으로 이루어진 팍묶음모형(tight-binding model)으로 나타내었다. 각 격자점은 하나의 전자 자유도(c_j ; $j = 1, \dots, N$)를 의미하는데, 모든 페르미온은 두 개의 MF의 합($c_j = \gamma_{2j-1} + \gamma_{2j}$)으로 나타낼 수 있다. 비위상학적 상에서는 주로 같은 격자점 내의 MF끼리 결합을 하고(그림 9(a) 참조), 위상학적 상에서는 이웃한 격자의 MF 사이에서 결합한다(그림 9(b, c) 참조). 따라서 위상학적 상에서는 양 끝에 결합되지 않은 MF가 발생하고, 이것이 바로 영에너지 MBS이다. 그렇다면, 위상학적

REFERENCES

- [20] W. H. Zurek, Nature **317**, 505 (1985).
- [21] W. H. Zurek, Phys. Rep. **276**, 177 (1996).
- [22] W. H. Zurek, U. Dorner and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **95**, 105701 (2005).
- [23] J. Dziarmaga, Phys. Rev. Lett. **95**, 245701 (2005).
- [24] A. Bermudez, D. Patane, L. Amico and M. A. Martin-Delgado, Phys. Rev. Lett. **102**, 135702 (2009).
- [25] A. Bermudez, L. Amico and M. A. Martin-Delgado, Phys. New J. Phys. **12**, 055014 (2010).
- [26] M. Lee, S. Han and M.-S. Choi, Phys. Rev. B **92**, 035117 (2015).
- [27] M. Endres *et al.*, Science **334**, 200 (2011).
- [28] J. Haegeman, D. Perez-Garcia, I. Cirac and N. Schuch, Phys. Rev. Lett. **109**, 050402 (2012).
- [29] F. Pollmann and A. M. Turner, Phys. Rev. B **89**, 125441 (2012).
- [30] Y. Bahri and A. Vishwanath, Phys. Rev. B **89**, 155135 (2014).

Fig. 10. Time evolution of string order parameter for topological superconducting wires with different length.^[31]

상에서는 파동함수에 대한 다음과 같은 MF들의 곱의 기댓값이 0이 아니게 된다:

$$S_{top} = \langle \gamma_2 \gamma_3 \cdots \gamma_{2N-2} \gamma_{2N-1} \rangle + \langle \gamma_1 \gamma_3 \cdots \gamma_{2N-2} \gamma_{2N} \rangle.$$

이 양은 끈과 같이 이어진 MF들의 곱으로 정의되었기 때문에 끈질서도라 불리고, 파동함수가 시간에 따라 변화하면서 연속적으로 변화한다. 따라서 끈질서도는 위상상태의 동적 변화를 측정할 수 있는 비국소적인 위상학적 질서도로 활용될 수 있다.

그림 10은 위상학적 상에서 비위상학적 상으로의 전이 후 끈질서도의 시간 변화를 나타낸다.^[31] 계의 길이나 급랭조건에 무관한, 보편적인 초기 감쇄(decay)와 함께, 유한크기 효과로 인해 위상학적 질서가 되살아나는 현상도 보여준다. MBS와의 겹침으로 위상학적 질서를 다뤘던 경우와 달리, 이 경우에는 비위상학적 상으로 전이할 때도 위상학적 질서가 되살아나는 현상이 발생할 수 있음을 보여준다. 물론, 충분히 시간이 지나면, 위상학적 질서는 완전히 감쇄한다. 끈질서도를 이용하면, 초전도선의

일부만 위상학적 상에 있다가 비위상학적 상으로 전이되었을 때, 초기 위상학적 질서가 초전도선의 나머지 부분에 어떻게 전파되는지도 살펴볼 수 있다. 실제로, 이 연구에서는 초기 위상학적 질서가 페르미 속도로 전공간으로 퍼져나가는 현상을 관측하였다. 또한, 페르미온 홀짝성(parity)이 고정된 경우에, 위상학적 끈질서도를 초전도선 양끝 격자 사이의 상관관계로 측정가능함을 증명하였다. 즉, 비국소적인 위상학적 질서를 국소적인 측정으로 얻어낼 수 있는 가능성을 보였다고 할 수 있다.

나오는 글

물질의 위상상태가 생성되기까지 혹은 소멸되기까지 얼마나 걸릴까? 이러한 간단한 질문으로 대변할 수 있는 위상상태의 동역학은 질문과 달리 개념적으로도 답하기 쉽지 않다. 그동안 물질의 상태를 기술하는 패러다임이 자발적 대칭성 깨짐과 연속적인 한곳질서도(또는 질서변수)에 바탕을 두고 있었던 것이 가장 큰 원인이다. 최근 평형상태 위상상태에 관한 연구가 큰 발전을 이루면서 위상상태 동역학에 대한 관심도 증가하고 있다. 이러한 동역학 연구는 위상상태 연구의 가장 큰 동기 중의 하나였던 위상양자컴퓨터 개발 외에도, 전통적인 상전이현상과 위상상전이 현상을 모두 포괄하는 물질의 상태에 관한 근본적인 패러다임을 마련하는 데 매우 중요하다.

REFERENCES

- [31] M. Lee, S. Han and M.-S. Choi, arxiv:1603.01834 (to appear in New J. Phys.).