하프-호이슬러 위상 준금속의 특이한 초전도성

DOI: 10.3938/PhiT.27.026

김 현 수

Unconventional Superconductivity in Topological Semimetal Half-Heusler Compounds

Hyunsoo KIM

Topological phases of matter have been the center of interest since the discovery of topological insulators. Semimetals and superconductors are such topological systems and often exhibit a signature indicative of the existence of relativistic quasiparticles, *i.e.*, Dirac and Weyl fermions. These unconventional fermions manifest exotic behaviors, such as the chiral anomaly. For a topological semimetal with $j = 3/2$, the emergence of unprecedented superconductivity is also expected with a spin state beyond the triplet state. In this article, we discuss recent progress on possible high-spin superconductivity in $j = 3/2$ topological semimetal half-Heusler compounds, which would allow up to spin septet pairing states.

서 론

최근 고체 물리학 분야에서 각종 기저 상태를 위상학적 관점에서 재해석하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 경향은 위상 절연체의 발견 이후에 본격적으로 활기를 띠게 되었다.^[1] 위상 절연체란 고체 절연체 중에서 에너지 띠구조 또는 나열 순서가 양자 단일 과정을(이 경우 고체를 구성하는 원자 사이의 거리를 서서히 아주 멀리 증가시키는 과정) 거쳤을 때 그 고체를 구성하는 원자들의 에너지 준위 순서로 돌아갈 수 없는 절연체를 말한다. 가장 대표적인 경우는 고체 상태에서의 스핀-궤도 상호작용 때문에 띠의 순서가 뒤집히는 경우다. 이런 위상

절연체가 일반 절연체와 맞닿은 경우에 두 물질의 인접한 표면에 위상적 표면상태(topological surface state)라고 불리는 이차원 전도 상태가 자연적으로 나타난다. 그리고 그래핀(graphene)에서 관측되는 비슷한 이차원 에너지 띠구조 때문에 그 표면에 존재하는 전자들은 일반 전도 전자들과 현저하게 다른 특성을 보인다. 따라서 상대론적 양자역학을 적용해야 그 전도 전자들의 동역학(즉 전자기적 성질)이 정확하게 설명된다. 이런 종류의 문제는 입자물리학에서 오랫동안 연구되어 왔었고, 이런 상대론적인 페르미언 입자는 “디랙(Dirac) 페르미언”으로 불린다.

상대론적인 입자들을 다루는 양자역학 문제는 일반적으로 복소 함수인 디랙 방정식으로 설명된다. 디랙 방정식은 특별한 경우에 두 가지 간단한 형태의 방정식으로 유도된다.^[2] 첫 번째 경우로 입자의 질량이 영인 경우 디랙 방정식은 두 개의 독립적인 방정식으로 나누어질 수 있다. 그리고 각각의 방정식은 다른 나선성 법칙을 따르는 페르미언을 기술한다. 이런 입자들은 “바일(Weyl) 페르미언”이라 불린다. 두 번째 경우로 만약에 디랙 방정식을 실함수 형태로 변형을 하게 되면 입자 자체가 반입자인 아주 특별한 종류의 입자들을 기술하게 된다. 이와 같은 입자들은 “마조라나(Majorana) 페르미언”이라고 불린다. 이런 특별한 상대론적인 입자들이 고에너지 현상에서는 아직 관측되지 않고 있는 반면에 최근 고체 상태 내에서 관측되었다는 보고가 끊임 없이 발표되고 있다.^[2]

이런 위상학적 물질과 상대론적 전도 전자의 관계는 아주 밀접하다. 상대론적 전도 전자들은 준금속에서 주로 발견되고 있는데, 저온에서 또 다른 기저 상태로 상전이를 하는 경우 이 전자들의 특성 때문에 아주 흥미로운 물리 현상이 나타날 수 있다. 이 글은 이런 종류의 물질에서 나타나는 초전도 상태에 대해서 소개하고자 한다. 특히 바일 준금속으로 알려져 있는 하프-호이슬러(half-Heusler) 물질에서^[3] 발견된 새로운 종류의

저자약력

김현수 박사는 부산대학교에서 학사와 석사를 마친 후, 아이오와 주립대학교 물리학과에서 박사학위를 취득하였으며, 메릴랜드 대학교에서 박사후 연구원 과정을 거친 후 2017년부터 같은 대학의 Center for Nanophysics and Advanced Materials에서 선임 연구원으로 재직 중이다.
(hyunsoo@umd.edu)

REFERENCES

- [1] Joel E. Moore, *Nature* **464**, 194 (2010).
- [2] N. P. Armitage, E. J. Mele and A. Vishwanath, *Rev. Mod. Phys.* **90**, 015001 (2018).
- [3] Max Hirschberger *et al.*, *Nat. Mater.* **15**, 1161 (2016).

초전도 현상에 초점을 맞춘다.

아래 글 내용은 다음과 같이 구성하였다. 처음, 초전도의 근본적인 성질과 원리에 대해서 설명한다. 초전도 특성을 이해하기 위해서는 정상 상태 이해가 필수 조건이고 에너지 띠구조의 이해가 아주 중요하다. 하프-호이스러의 대표적인 물질인 YPtBi의 에너지 띠구조와 구체적인 초전도 성질에 대해서 설명한다. 전도 전자의 밀도가 아주 작은 관계로 초전도성 연구를 위한 실험에 많은 어려움이 있지만, 비교적 잘 알려져 있는 초전도의 자기적 성질을 바탕으로 최근에 진행되고 있는 연구 중 일부를 마지막 절에서 간략히 소개한다.

미시적 관점에서의 초전도성

최근 바일 준금속 물질 후보 중 하나인 YPtBi에서 아주 특이한 초전도 상태가 기대되고 있다. 이와 관련된 연구 결과의 이해를 위해서 이 장에서는 초전도성에 대해서 간략하게 소개한다. 일반적인 초전도의 성질과 역사에 대해서는 물리학과 첨단기술 2011년 9월 “끝나지 않은 100년의 초전도 역사”(DOI: 10.3938/PhiT.20.034)를 참조하기 바란다. 우선 초전도체는 초유체(superfluid)와 아주 밀접한 관계가 있다. 초유체 현상이란 보스-아인슈타인 응축체(Bose-Einstein condensate)에서 유체 점성에 의한 흐름의 저항이 없어지는 상태를 일컫는다. 전도 고체에서도 유사한 현상이 일어나는데, 이 경우에 고체 내부의 전도 전자들이 저항 없이 흐를 수 있는 상태가 되면서 측정 가능한 전기 저항이 사라진다. 주로 아주 낮은 온도의 고체에서 일어나는 이러한 현상을 초전도성이라고 한다. 현재까지 다양한 종류의 초전도 상태가 발견되었으나 그 중에 초전도 원리가 만족스럽게 설명되는 종류는 아직 많지 않다. 대부분의 초전도체들은 Bardeen-Cooper-Schrieffer(BCS)라고 불리는 미시적 이론으로 훌륭하게 설명된다.^[4] 하지만 1911년 처음 수온에서 초전도 현상 발견 이후 이 첫 성공적인 이론이 정립되기까지 거의 반 세기가 걸린 만큼 초전도 현상의 설명은 아주 어려운 문제다.

여전히 BCS 이론은 새로운 종류의 초전도 현상의 이해를 위한 출발점으로 종종 이용된다. 이 이론은 미시적 관점에서 초전도 현상을 특정한 성질을 지닌 전자쌍 모임의 초유체화로 해석한다. 즉 초전도 상태의 전도 고체에서는 전자쌍들이 마치 초유체처럼 저항없이 흐를 수 있다. 따라서 근본적인 초전도성 연구의 핵심은 전자쌍의 성질에 대한 연구라고 할 수 있다. 초전도 상태에서의 전자쌍은 특별히 쿠퍼쌍(Cooper pair)이라고 불린다. 최초 발표되었던 BCS 이론에 따르면 두 전도 전자들 사이에 포논의 도움으로 인력이 작용하게 되어서, 전자쌍을 이루는 것이 에너지적으로 안정하게 된다. 저온에서 페르미언인 전도 전자들이 쌍을 이루게 되면서 보스 입자(Boson)가 되고

따라서 보스-아인슈타인 응축이 일어날 수 있게 된다. 결과적으로 저항없이 전류를 수송할 수 있게 된다. 이 과정에서 나타난 에너지만큼 페르미 준위를 기준으로 초전도 에너지틈(superconducting energy gap, 페르미 준위와 쿠퍼쌍을 이루는 준입자의 에너지 차이)이 나타나게 되는데, 이 에너지틈의 크기의 온도 의존성과 역자공간에서 운동량과의 함수 관계가 초전도 이해에 핵심적인 함수가 된다. BCS 초전도체의 경우 절대 영도에서 에너지틈의 크기는 상수이며 운동량에 대해 등방적이다. 그리고 쿠퍼쌍들은 특정한 양자 상태에 있게 된다. 이들의 운동량 벡터는 크기가 같고 방향은 반대이며 전자스핀은 항상 반대 방향으로 정렬한다. 이 쿠퍼쌍이 형성되기 시작하는 온도를 초전도 임계온도라고 한다.

스핀 1/2 페르미언의 양자 이체계

전자쌍의 좀 더 깊이 있는 이해를 위해서, 잠시 초전도 현상을 떠나서, 전자 두 개로 구성된 아주 일반적인 양자 체계를 생각해보자. 양자역학적 기술은 상호작용을 고려한 해밀토니언과 이에 대응하는 파동함수를 찾는 과정이다. 이러한 이체계의 완벽한 기술을 위해서 파동 함수는 실공간(또는 역공간)을 기술하는 부분과 양자 스핀을 기술하는 두 부분으로 나뉘진다. 그리고 페르미언인 전자를 기술하는 이체 파동 함수는 입자 교환 연산에 대해서 항상 반대칭성을 만족해야 하기 때문에 공간과 스핀 부분은 각각 반대의 대칭성을 가진다. 즉 만약에 실공간을 기술하는 부분이 짝함수이면 스핀 부분은 반드시 홀함수이어야 한다(그림 1 참조).

스핀이 1/2인 전자의 경우 한 가지 반대칭(홀함수) 그리고 세 가지 대칭적 결합(짝함수)의 스핀 이체 파동 함수가 가능하다. 전자를 초전도의 스핀 일중(singlet) 상태, 후자를 스핀 삼중(triplet) 상태라고 한다(그림 1 참조). 다시 말해서 양자 스핀 관점에서 보면, 초전도 상태의 전자쌍의 이체 파동 함수는 오로지 4가지의 가능성만을 가지고 있다.

실공간을 기술하는 파동 함수는 고체의 격자 구조 특성과 전자들의 허용된 원자 궤도 함수를 바탕으로 최종 결정된다. 따라서 쿠퍼쌍 파동 함수의 실공간 부분은 격자 구조의 대칭성에 많은 영향을 받는다. 현재까지 알려졌거나 제안된 쿠퍼쌍의 궤도 함수의 경우는 s-wave, p-wave, d-wave, f-wave, g-wave이다. 쿠퍼쌍의 상호작용은 대부분 격자 구조의 대칭성과 같은 경우가 대부분이지만 간혹 격자의 대칭성보다 낮은

REFERENCES

- [4] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).

Fig. 1. Superconducting states for spin-1/2 electrons. Colors for orbital parts represent the sign of wave functions.

경우도 있다. 전자를 일반적인(conventional) 그리고 후자를 일반적이지 않은(unconventional) 초전도체라고 한다.

최종적으로 초전도 쿠퍼쌍의 이체 파동 함수는 궤도와 스핀 함수의 곱으로 결정된다. 간혹 고체의 격자의 반전 대칭성이 깨어지는 경우가 종종 있는데, 이 경우는 위에서 언급했던 홀 짝성이 보존되지 않는다. 따라서 초전도 상태를 기술하는 파동 함수는 원칙적으로 두 경우를 모두 포함할 수 있다.

스핀-1/2 전자의 경우 초전도 상태에서 쿠퍼쌍이 가질 수 있는 총 스핀 각운동량은 $S=1$ 삼중 함수이고, 이 경우에 스핀 파동함수는 짝함수다. 따라서 공간함수 부분은 반드시 홀 함수가 되어야 하고 에너지적으로 가능하면서 안정한 홀 함수는 p-wave이다. 몇몇 초전도 물질에서 이 가능성이 제기되고 있지만, 현재까지 삼중 상태의 존재 여부는 확증되지 않고 있다.

높은 전자 스핀 상태 초전도

1990년대 초반에 저온 다원자계 실험 중에서 스핀이 1/2보다 큰 페르미온 원자들 사이의 쿠퍼쌍의 가능성이 제기되었다.^[5] 다원자계에서 원자를 대표하는 스핀은 핵스핀과 주변 전자들에 의해 발생한 전기장의 상호작용을 고려한 결과인 하이퍼파인(hyperfine) 스핀이다. 한 예로 동위원소 ^{23}Na 의 경우 하이퍼파인 스핀은 $f=5/2$ 이다. 이론적으로 높은 원자 스핀들의 쿠퍼쌍에 대해서 연구가 진행되었지만 그 존재 여부는 아직 논란의 대상이다. 이런 높은 스핀 쿠퍼쌍의 고체 내에서의 존재는 오랫동안 고려 대상조차도 아니었다. 과연 고체 상태에서 높은 전자스핀이 존재할 수 있는지가 첫 번째 질문이다. 엄밀하게 말해서, 고체에서 전자스핀은 좋은 양자수(good quantum number)가 될 수 없지만 일부 물질에서는 근사적으로 가능하다. 하지만 스핀궤도 결합이 강한 경우 마치 원자계의 하이퍼파인 스핀처럼, 스핀 s와 궤도 운동량 l을 고려한 총운동량 양

자수 $j=1+s$ 가 전자스핀을 대표하는 좋은 양자수이다. 그러면 1/2보다 큰 스핀을 가진 전도 전자가 아주 흔해야 할 것 같지만 많은 경우에 높은 총 각운동량들이 고체 격자의 불연속적 대칭성 때문에 작은 총 각운동량 상태로 나누어지거나 화학 퍼텐셜에서 아주 멀리 떨어져 있다. 단 일부 면방 격자의 경우 1/2보다 큰 경우가 가능하다. 이 점에서 하프-호이스러 RPtBi(R: 희소 금속) 물질들은 아주 특별한데, 높은 대칭성과 함께 스핀 궤도 상호작용에 의해서 전도 전자의 총 각운동량이 $j=3/2$ 가 된다. 따라서 RPtBi에서 초전도성이 실현된다면 총 각운동량(J)이 1보다 큰 쿠퍼쌍의 가능성이 있고 이론적으로 $J=2$ 오중(quintet)과 $J=3$ 칠중(septet) 상태까지 가능하다. 이를 위해서는 화학 퍼텐셜 근처에 $j>1/2$ 전자의 존재가 필수 조건이다. 따라서 이들의 에너지 띠구조의 이해가 아주 중요하다.

위상 준도체의 에너지 띠구조

고체 물질의 에너지 띠구조는 격자의 대칭성과 구성 원소들 사이의 상호작용에 의해서 결정된다. 하프-호이스러 물질의 격자 구조는 면심 입방의 일종이며 널리 알려진 암염 격자 구조와 징크블렌드(Zincblende) 구조의 복합체다. 후자의 경우 반전성이 깨어지기 때문에 하프-호이스러 물질들의 격자구조에서도 반전성이 깨어진다. 특히 RPtBi의 경우, 모든 구성 원자의 질량이 크기 때문에 스핀-궤도 결합의 영향이 두드러지게 크다. 따라서 에너지 띠구조에서 띠의 반전이 예상된다. 이 물질들의 에너지 띠구조는 얼핏 보면 IV, II-VI, III-V족 반도체들의 띠구조와 아주 유사하다(그림 2 참조). 하지만 Γ 점에서 에너지 간격이 스핀-궤도 결합의 세기에 비례하기 때문에 이 물질들의 경우 아주 강한 결합으로 인해서 Γ_6 가 Γ_8 의 상대적 위치가 바뀌게 된다. 그리고 불순물이 없는 이상적인 경우에 화학 퍼텐셜이 띠 접합 부분에 놓인다. 즉 $j=3/2$ 위상 준금속이 된다.^[6] YPtBi의 경우 실험적으로 밝혀진 화학 퍼텐셜은 접합 부분에서 30 meV 정도 아래에 놓이게 되고 증거로 양공 전도가 실험적으로 보였다.^[7] 화학 퍼텐셜의 위치가 접합 부분에 아주 가까운 관계로 전도에 참여할 수 있는 양공의 숫자가 일반적인 전도체들에 비해서 만 배 정도 작다. 이 작은 전도 전자의 밀도 때문에 YPtBi는 준금속적 특성을 보인다.

위에서 살펴본 바와 같이 면심 입방 격자구조와 강한 스핀 궤도 결합 때문에 생긴 이 에너지 띠구조의 두드러진 특징은 띠 반전과 화학 퍼텐셜의 위치이다. 이 띠에 속한 전도 양공들

REFERENCES

- [5] Tin-Lun Ho and Sungkit Yip, Phys. Rev. Lett. **82**, 247 (1999).
- [6] Stanislav Chadov *et al.*, Nat. Mater. **9**, 541 (2010).
- [7] N. P. Butch *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 220504 (2011).

Fig. 2. Evolution of band structure of a typical semiconducting material influenced by strong spin-orbit coupling. Strong spin-orbit coupling causes the inversion of bands, and the antisymmetric spin-orbit interaction due to lack of inversion symmetry lifts the spin degeneracy. This schematic is taken from Ref. [13].

이 띠 접합 부분 근처에 위치해 있는 관계로 $j=3/2$ 특성을 유지하고 있으며 이 높은 운동량 때문에 나타나는 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 띠 반전 때문에 기대되는 위상학적 표면상태와 화학 퍼텐셜 근처의 에너지 띠 사이의 상호작용 등으로 이 물질들에서 나타나는 전도적, 자기적 성질 그리고 초전도 상태의 연구가 많이 진행되고 있다. 초전도의 경우 $j=3/2$ 전도 양공이 쿠퍼쌍을 형성할 경우 높은 스핀 초전도체가 실현될 가능성이 있다. 이 글의 나머지 부분에서는 YPtBi에서 발견된 초전도성에 대해서 집중한다.

YPtBi 초전도성 발견과 기본 성질

위상적 물질이 큰 관심을 끌고 있는 이유 중 하나는 새로운 정보 통신 기술에 응용성 때문이다. 자연스럽게 위상적 물질에서 발견되는 초전도성은 아주 많은 관심을 끌게 되었다. 최근에 다양한 RPtBi 물질들에서 저온 초전도가 발견되었다. YPtBi의 초전도성은 지난 2010년 최초 보고되었다. 저온 실험 중 0.8 K 이하에서 전기저항이 급격하게 영으로 떨어지고, 동시에 반자성이 관측되었다.^[7] 이 두 성질은 초전도를 대표하는 성질로써 초전도 발견에 꼭 필요한 실험들이다. 반자성으로 대표되는 초전도의 자기적 성질에 대해서는 다음 절에서 다루기로 한다.

위상 준금속의 예측 후 YPtBi에서의 초전도성 발견은 아주 반가운 소식이지만, 초전도성에 대한 구체적 이해는 아직 부족하다. 우선 위에서 언급한 것처럼, 에너지 띠구조상으로 아주 흥미로운 초전도체이지만, 관측된 전이 온도가 BCS 이론을 통한 예상보다 천 배 이상 훨씬 높다. 사실 전도 전자 밀도만 고려하면 널리 알려진 짧은 거리의 전자-포논 상호작용에 의한

BCS 쿠퍼쌍 형성은 불가능하다.^[8,9] 초전도 원리를 완벽히 밝혀내기에는 아직 많은 연구가 필요하지만, 몇몇 실험결과들은 잘 알려진 이론을 이용해서 설명이 가능하다. 지금까지 잘 알려져 있는 YPtBi의 초전도 성질은 대부분 자기적 실험을 통한 결과이다.

마이스너 효과 그리고 자기장 침투

전기 저항이 영으로 떨어지는 성질이 초전도성을 대표하지만 엄밀히 말하면 이 현상을 완벽한 도체성만으로도 설명 가능하기 때문에, 초전도를 기술하기 위해서는 마이스너 효과(완벽한 반자성)를 반드시 언급해야 한다. 마이스너 효과란 초전도에 약한 자기장을 걸어 주었을 때 초전도 내부의 자기장이 완벽하게 영이 되는 현상이다. 거시적으로 봤을 때 초유체의 운동이 외부 자기장을 정확히 상쇄할 만큼의 초전류를 유도한다. 하지만 자기장 세기의 분포가 초전도 표면에서 불연속적일 수 없기 때문에 표면에 아주 얇은 깊이만큼 자기장의 침투를 허용한다(그림 3 참조). 이 침투 깊이는 온도가 높아질수록 증가한다. 이 현상은 초전도 이류체 모형 이론과 관련이 있다. 여기서 말하는 두 종류의 유체는 초유체와 일반 유체이며 초전도 물질에서는 쿠퍼쌍에 참여하는 전도 전자와 참여하지 않는 일반 전도 전자들의 모임을 각각 말한다. 절대온도 영도에서 쿠퍼쌍이 가장 많이 존재하고 온도가 증가할수록 쿠퍼쌍의 수는 줄어들면서 정상 전자들의 양이 증가한다. 이 두 종류의 유체는 온도와 자기장의 변화에 따라서 다양한 성질을 보이기 때문에 초전도성 연구에 아주 유용하다. 초전도 상태에서 자기장의 침투 깊이의 경우 초유체 밀도와 직접적으로 관계가 있다. YPtBi의 초전도성도 이 침투 깊이 실험이 아주 중요한 정보를 제공하는데, 다음 절에서는 이 침투 깊이를 비롯한 다른 물리량들을 이용해서 초전도 성질을 연구하는 과정에 대해서 소개한다.

초유체 밀도와 런던 침투 깊이

초전도의 침투 깊이는 런던 형제들에 의해서 처음 예측되고 실험적으로 발견되었다. 이후로 이 양은 런던 침투 깊이 (London penetration depth) λ_L 로 알려져 있으며 초전도 연구에 널리 이용된다.

$$\lambda_L^2 = \frac{m}{\mu_0 n e^2}$$

REFERENCES

- [8] Markus Meinert, Phys. Rev. Lett. **116**, 137001 (2016).
- [9] Lucile Savary *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 214514 (2017).

Fig. 3. Temperature-dependent London penetration depth in various superconductors. The figure is taken from Ref. [13]. Inset: schematic of penetration of magnetic fields into the bulk of a superconductor.

여기서 m , μ_0 , n , e 는 각각 전자 질량, 자기 투자율, 전도 전자 밀도, 전자의 전하량을 뜻한다. 런던 침투 깊이가 초전도 에너지틈 연구에 많이 이용되는 이유는 초전도 임계온도보다 아주 낮은 온도에서의 그 의존성이 에너지틈의 구조 또는 대칭성과 아주 밀접한 관련이 있기 때문이다. 런던 침투 깊이 외에 비열, 열전도도, 자기 공명 등의 물리량들도 많이 이용된다. 이 물성들의 경우 측정값이 정상 전도 전자들의 밀도에 비례한다. 위에서 언급한 바와 같이 YPtBi의 전도 전자의 밀도가 일반 전도 물질보다 만 배 정도 작다. 따라서 극저온에서 온도 상승에 따라 생성될 수 있는 정상 전자들의 양이 근본적으로 매우 작다. 결과적으로 이런 정상 전자를 이용한 초전도 성질 연구를 하프-호이슬러 초전도체의 경우에 성공적인 결과를 얻지 못하고 있다. 반면 런던 침투 깊이는 전도 전자 밀도에 반 비례한다. 이 점이 왜 런던 침투 깊이가 하프-호이슬러 초전도 물질에 유용한지 잘 보여준다.

런던 침투 깊이는 초유체를 이루는 전자의 결합이 얼마나 강한지에 그 기반을 두고 있다. 일반적으로 온도가 증가할수록 쿠퍼쌍의 밀도는 줄어들게 되고 자기장의 침투는 더 쉬워진다. 이 과정은 에너지틈의 구조와 밀접한 관계가 있다. 등방적인 BCS 초전도체의 경우 침투 깊이는 지수적(exponential) 온도 의존성을 보인다. 따라서 아주 낮은 온도에서는 그 변화가 아주 작다. 에너지틈이 등방적이지 않은 경우, 특히 특정 방향으로 에너지틈이 상대적으로 아주 작거나 심지어 없어지는 경우가 있는데, 이런 경우는 멱법칙(power-law)을 따른다. 특히 에너지틈에 선형의 교점(line node)이 있는 경우, 런던 침투 깊이는 온도에 선형적인 관계를 보인다. YPtBi에서 이런 선형적 관계가 관측되어서 초전도 에너지틈에 선형적 교점이 있을 것으로 판단된다(그림 3 참조).

하프-호이슬러 물질들처럼 전도 전자 밀도가 작은 초전도체는 온도가 증가할수록 초유체 성질이 급격하게 약해지기 때문에 보통의 초전도에 비해서 측정값 자체가 상당히 커질 수 있다. 한 예로 YPtBi에서 측정된 양이 다른 비슷한 성질을 보이는 초전도에 비해서 열 배 이상 큰 값을 보이고 있다(그림 3 참조).

초전도 에너지틈 구조와 초전도성 원리

쿠퍼쌍이 초전도의 성질을 결정하는 사실은 이제 자명하다. 쿠퍼쌍이 형성되는 과정에서 초전도 에너지틈이 형성된다는 것은 위에서도 이미 소개했다. 따라서 초전도의 근본 성질의 연구는 에너지틈의 구조에 대한 연구라고 해도 과언이 아니며, 그 대칭성이 쿠퍼쌍의 대칭성과 같기 때문에 에너지틈의 구조는 초전도에서 가장 근본적인 양이라고 할 수 있다. 반도체의 에너지틈과 구분하자면, 초전도 에너지틈은 주로 저온인 초전도 임계온도 아래에서만 존재하고 그 크기는 온도 의존성을 보인다. 즉 임계온도에서 0이 되고 그 이하에서 단조롭게 증가하며 절대영도에서 가장 큰 값을 가진다. 또 하나 중요한 점은 초전도 에너지틈은 방향성을 가질 수 있다는 점이고, 그 방향성의 결정은 초전도 원리 연구에 필수다. 이 마지막 절에서는 현재까지 이론적으로 제안된 YPtBi의 초전도 에너지틈 구조와 관련된 이론 연구 결과들 중 일부를 간략하게 소개한다.

초전도 상태의 흥미로운 점 중 하나는 정상 상태의 복잡한 에너지띠의 구조와 상관없이 대부분의 초전도체는 하나의 에너지틈으로 설명이 가능하다. 하지만 MgB_2 처럼 두 개의 에너지틈을 가진 초전도체도 적지 않게 알려져 있다. 그런 경우 초전도 에너지띠의 구조를 정확히 이해하기 위해서는 정상 상태의 에너지띠구조와 페르미 면의 이해가 필수적이다. 하지만 YPtBi의 페르미 면은 아직 실험적으로 밝혀져 있지 않다.

Brydon *et al.*은 $k \cdot p$ 모형을 이용한 해밀토니언으로 이론적인 페르미 면을 결정하고, 이 격자 구조의 대칭성 내에서 가능한 초전도 상태에 대해서 연구했다.^[10] 이 일에서 결정된 페르미 면은 거의 구형에 가까운 두 개의 면들이고 각각의 면은 다른 부호의 전자스핀에 대응한다. 이것은 반전 대칭성이 깨어지기 때문에 나타나는 결과이고, 이 경우 위에서 언급한 것과 같이 초전도 상태에서 두 종류 스핀 홀짝성을 모두 고려해야 한다. 그리고 $j=3/2$ 전도 양공에 의한 초전도성이기 때문에 원 칩상 총 양자회전운동량이 총 $J=3$ 까지 가능하다. 이 연구에서 Brydon *et al.*은 에너지적으로 가장 안정한 초전도 상태를 찾기 위해서 오중 그리고 칠중 상태까지 고려하였다. 그 결과,

REFERENCES

- [10] P. M. R. Brydon *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 177001 (2016).

(a) Time reversal breaking J=2 quintet (LuPtBi)

(b) Mixed parity J=0 singlet and J=3 septet (YPtBi)

Fig. 4. Various high spin superconducting energy gap structure in half-Heusler compounds. (a) Time-reversal symmetry breaking $J = 2$ quintet state in LuPtBi, which is taken from Ref. [10]. (b) High spin single ($J=0$)-septet ($J=3$) superconducting state with mixed parity in YPtBi. The figure is taken from Ref. [13].

오중 상태 초전도성의 에너지틈에 선형과 점형 교점이 존재하고 시간 역전 대칭성이 깨어지는 것을 밝혔다(그림 4(a) 참조). 선형 교점이 가능하기 때문에 런던 침투 깊이 실험 결과가 설명된다. 이 시간 역전 대칭성이 깨어지는 현상은 아주 특이한 경우지만 이 물질에서는 아직 실험적으로 증명되지 않고 있다. 반면에 허용된 칠중 상태는 시간 대칭성을 보존한다. 이 경우를 위해서는 공간대칭성이 깨어지는 사실을 이용하는데, 이 경우 가장 안정적인 s-wave와 에너지적으로 두 번째로 안정적인 칠중 상태 p-wave를 고려했다. 이 복합적 초전도 상태는 원형의 선형 교점을 가지게 되고 온도에 선형적 관계를 가진 런던 침투 깊이 실험 결과 설명이 가능하다(그림 4(b) 참조).

Brydon *et al.*이 고정된 점점 아래에 위치한 화학 퍼텐셜만 고려한 반면에 Savary *et al.*은 화학 퍼텐셜이 점점 위에 위치한 경우를 포함한 다양한 종류의 상호작용을 고려한 상태에서

어떤 초전도 상태가 안정한지를 연구했다.^[9] 기존의 초전도 연구는 주로 국소 상호작용의 관점에서 전자-포논의 상호작용을 고려했지만, 이 일에서는 극성 포논 모드에 의한 장거리 상호작용을 이용해서 실험적으로 관측된 임계 온도를 설명하고 있다. 그리고 이 종류의 위상 중금속 초전도체는 일반적인 초전도체와 근본적으로 다른 성질을 보이는 사실을 밝혔다. s-wave와 p-wave가 고려되었고 후자의 경우 초전도 에너지틈에 교점을 가진다. 일반적으로는 s-wave가 안정하지만, 전자 사이의 국소 반발력이 커질수록 p-wave 상태를 선호하게 된다. 이 경우에 실험적으로 보인 선형적 런던 침투 깊이가 설명 가능하다.

Boettcher-Herbut은 위에 소개한 일들과 같이 $j = 3/2$ 4-band Luttinger 해밀토니언을 이용해서 화학 퍼텐셜의 위치에 따른 상호작용과 가능한 초전도 상태에 대해서 연구했다.^[11] 특히 화학 퍼텐셜이 에너지 띠 접점에 아주 근접한 경우 에너지적으로 가장 안정한 상태를 찾기 위해서 Ginzburg-Landau 자유에너지의 6차항까지 고려해야 하는 것을 밝히고, 이 경우 변종의 d-wave의 초전도 상태가 나타날 수 있음을 밝혔다. 이 d-wave의 경우 통상과 달리 입방 대칭성이 깨어지기 때문에 축퇴에 의해서 초전도 접점이 사라지는 것을 고려할 필요가 없어지고, 이 경우에 입방격자 구조임에도 안정적인 d-wave가 가능하고, 에너지틈에 선형 교점이 가능하다. 따라서 이 이론은 실험적으로 관측되었던 온도에 대해 선형적인 런던 침투 깊이를 충분히 설명할 수 있다.

마지막으로 Q.-Z. Wang *et al.*은 이 절에서 소개되었던 다른 이론 논문들과 달리 Γ_6 띠까지 고려한 여섯 개의 띠를 고려한 Kane 6-band 모형을 이용해서 가능한 초전도 상태에 대해서 연구하였다.^[12] 특히 체적 초전도뿐만 아니라 표면에 동시에 존재할 수 있는 초전도 상태에 대해서도 연구하였다. 대칭성을 고려하였을 때 가능한 모든 초전도 상태를 연구하였으나, 홀짝성이 없어서 생길 수 있는 결과에 대해서는 고려하지 않았다. 그리고 어떤 초전도 상태가 가장 안정적인지에 대해서는 추후 연구 과제로 남겼다. 우선 체적 초전도 상태의 경우 국소 반발력의 방향 의존성에 의한 상호작용을 고려하면 실험적으로 관측되었던 선형 교점을 가진 초전도 에너지틈의 존재 가능성을 설명할 수 있다. 가장 두드러지는 결과는 위상적 표면 상태에 다양한 초전도 상태가 유도될 수 있고, 마조라나 페르미온의 존재 가능성을 밝혀내었다는 것이다.

REFERENCES

- [11] Igor Boettcher and Igor F. Herbut, Phys. Rev. Lett. **120**, 057002 (2018).
- [12] Qing-Ze Wang, Jiabin Yu and Chao-Xing Liu, Phys. Rev. B **97**, 224507 (2018).
- [13] Hyunsoo Kim *et al.*, Sci. Adv. **4**, eaao4513 (2018).