초전도체의 철기시대

DOI: 10.3938/PhiT.22.005

김용관·김창영·방윤규

Iron Age in Superconductivity

Yeong Kwan KIM, Changyoung KIM and YunKyu BANG

A new high-temperature superconductor based on Fe was discovered in 2008. Since then, intensive and extensive research has been performed on the subject. In this article, we describe the general features of iron-based superconductors, as well as recent developments in theoretical efforts to understand the microscopic mechanism. We first describe some important aspects of iron-based superconductors. We then discuss the synthesis of various materials, as well as their properties. Finally, we address the most up-to-date theoretical effort to understand the microscopic mechanism based on $\pm s$ -wave gap symmetry.

철 기반 고온 초전도체 소개

Introduction to iron-based superconductors

초전도 현상은 극저온에서 고체의 저항이 0이 되는 현상을 말한다. 1911년 Onnes에 의해 처음 발견되었으며 30년 뒤 Bardeen, Cooper, Schrieffer에 의해 발현 원리가 규명되었다. BCS 이론이라 불리는 이 이론은 고체 내 두 전자가 격자 떨림에 의해 묶여 하나의 쿠퍼쌍(Cooper pair)을 형성하고 이들이 저항이 없이 전류를 흐르게 한다고 말하고 있다. 또한 BCS 이론은 초전도 현상을 설명하는 동시에 초전도 임계 온도(T_c)를 한계 짓는데 이는 대략 40 K으로 BCS limit으로 알려져 있다.

하지만 1987년 이 BCS limit를 뛰어넘어 초전도 현상을 보이

저자약력

김용관 연구원은 2008년 연세대학교 물리학과를 졸업하고, 현재 연세대학교 물리학과 박사과정에 재학 중이며, 철 기반 초전도체 연구를 수행하고 있다. (myrni@yonsei.ac.kr)

김창영 교수는 스탠포드 대학교 응용 물리학 박사(1995)로서 스탠포드 방사광 가속기 연구소 연구원을 거쳐(1995-2001) 현재 연세대학교 물리학과 교수(2001-현재)로 재직 중이다. (changyoung@yonsei.ac.kr)

방윤규 교수는 미국 뉴저지주립대학(Rutgers) 이학박사(1991)로서 Max-Planck Inst, Stuttgart, ICTP, Trieste 등지에서 포스트닥터 연구원을 거쳐 1995년부터 전남대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (ykbang@jnu.ac.kr)

Fig. 1. Phase diagrams of (a) cuprate and (b) iron pnictide superconductors.^[2] (T^* is the transition temperature for the nematic phase in iron pnictides and cuprates.)

는 물질이 발견되었다. 구리 산화물계 초전도체가 그것인데 최대 임계 온도 163 K를 보여 기존의 BCS로는 설명이 불가능하다. 이런 BCS 이론으로 설명되어지지 못하는 초전도현상을 따로 고온초전도현상 혹은 물질이라고 한다. 고온초전도현상의 원리를 규명하기 위해 1987년 발견 이후부터 수많은 연구가 진행되어 왔지만 메커니즘은 아직까지도 밝혀지지 않은 채 남아있다.

2008년, 오랜 시간의 지난한 과정을 통해 고온초전도현상 연구가 그 추진력을 잃어가고 있을 때, 새로운 물질에서 고온초전도 현상이 나타났다. 이번엔 철을 기반으로 하는 물질에서 고온초전도 현상이 나타났다.^[1] 철 기반 초전도체의 발견은 고온초전도현상의 새로운 활력소가 되었고 수많은 연구진들이 다시 고온

REFERENCES

- [1] Yoichi Kamihara *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008).
- [2] S. Kasahara *et al.*, Nature **486**, 382 (2012).

Fig. 2. Time table of discoveries of various superconductors.

초전도현상을 규명하기 위해 이 새로운 분야에 뛰어 들었다.

철 기반 초전도체 발견의 의의는 단순히 새로운 고온 초전도 물질이 추가된 것에 그치지 않는다. 이 신물질의 발견으로 고온 초전도현상을 이해할 수 있는 새로운 전기가 열렸다. 기존의 BCS 이론에 의하면 두 개의 전자가 모여 쿠퍼쌍을 이룰 때, 전자의 스핀은 반대가 되어 전체 쿠퍼쌍의 스핀은 0이 되게 된다. 이 때문에 초전도 현상은 자성물질에서는 발현되기 힘들 것이라는 것이 학계의 일반적인 통념이었다. 하지만 대표적인 자성물질인 철 기반 물질에서 초전도 현상이 발견됨으로써 이런 통념이 깨어지게 되었다. 이로 인해 격자 떨림이 아닌 자성요동 (spin fluctuation)이 새로이 고온 초전도현상을 발현시킬 수 있는 요인으로 다시 한번 주목 받게 되었다.

실제로 자성요동은 구리 산화물계 고온초전도체 연구에서도 먼저 주목을 받았었다. 구리 산화물계의 고온 초전도 현상은 반강자성 현상이 전하 도핑이나 압력 등의 외부요인에 의해서 약해질 때 나타난다. 고온초전도 현상과 반강자성 현상과의 관계는 상도표에서 확인할 수 있다(그림 1(a)). 반강자성의 양자 상전이 점에서 최대 임계온도를 가짐으로써 반강자성의 들뜬 상태, 자성요동의 역할이 주목 받게 되었다. 하지만 앞서 말한 통념에 의해 자성요동 역할론은 쉽게 받아들여지지 못하고 있었다.

발견된 철 기반 초전도체는 구리 산화물계 물질과 같이 반강자성 현상과 고온 초전도 현상을 보인다. 그림 1(b)의 상도표를 보면 두 물질의 상도표가 같은 것을 확인할 수 있다. 새로이 발견된 고온 초전도 현상 역시 반강자성과 같이 발현되며 기반물질이 자성물질인 것으로 말미암아 자성요동이 고온초전도현상의 매개체로 주목 받게 되어 고온초전도 현상 연구의 방향이 바뀌게 되는 계기가 되었다.

더 나아가 철 기반 초전도체는 고온 초전도 연구에의 전혀 새로운 가능성을 제시하는데 이는 철 기반 초전도체의 고유성에 기인한다. 구리 기반 초전도체와는 다르게 철 기반 초전도체의

Fig. 3. Critical temperatures of various 1111-phases.^[5]

전자구조는 다중 오비탈에 의한 다중 밴드를 갖는다. 이러한 다중 오비탈-밴드구조는 철 기반 초전도체에서 나타나는 물리현상, 반강자성과 고온 초전도현상에서의 오비탈 자유도의 역할을 암시하게 된다. 실제로 철 기반 초전도체에서는 망간 산화물에서와 같이 오비탈 정렬 현상이 나타난다는 것이 최근에 밝혀졌다.^[3] 이러한 오비탈 정렬의 들뜬 상태 혹은 집단 모드가 고온 초전도현상을 매개할 수 있을 것이라는 이론적 모델도 제안되었다.^[4] 기존에 전혀 고려되지 않았던 오비탈 자유도의 역할이 대두된 것이다.

이처럼 새로운 철 기반 초전도체의 발견으로 인해 고온초전도 연구는 새로운 국면으로 접어들게 되어, 고온 초전도 연구가 청동기(구리 기반 초전도체) 시대에서 철기(철 기반 초전도체) 시대로 넘어간 것에 비유될 수 있다. 최초의 발견 이후로 약 5년 동안 수천 편의 논문이 발표되었으며 기존의 구리 기반 초전도체 연구 과정에서 얻어진 이론적/실험적 연구 결과가 접목되어 많은 철기반 고온 초전도체가 만들어졌다(그림 2). 지금까지 다섯 가지 물질 군의 철 기반 초전도체가 발견되었으며 이들의 기본적인 물성은 밝혀져 있으며 세부적 이슈에 대한 합의에도 도달해있다. 기초학문적인 측면에서 보면 이제 철 기반 초전도체 연구는 고온 초전도 현상의 근본을 밝히는 것이 남아있다. 고온초전도 질서변수의 대칭성, 고온 초전도의 매개체 및 미시 원리가 그것이다. 자성 요동과 추가로 오비탈 요동이 철 기반 초전도체의 고온 초전도 현상을 이해함에 있어 결정적 역할을 할 것으로 기대된다. 나아가 구리산화물을 포함한 고온초전도 현상의 일반론적 메커니즘 규명이 가능할 것으로 기대된다. 초

REFERENCES

- [3] Y. K. Kim *et al.*, arXiv:1112.2243.
- [4] Seiichiro Onari *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 144510 (2010).
- [5] Kiichi Miyazawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 034712 (2008).

Fig. 4. Crystal structures of (a) 1111-phase,^[6] (b) 122-phase,^[7] (c) 111-phase,^[8] and (d) 11-phase.^[9]

전도 연구에서의 새로운 시대의 시작이라 할 수 있다.

다양한 철기반 초전도 물질의 합성 및 특성 Synthesis and properties of various materials

2008년 최초로 합성된 철 기반 초전도체는 $\text{La}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{FeAs}$ 로 초전도 임계온도는 26 K이다. 최초의 발견 이후로 임계온도는 빠르게 증가하여 최대 56 K를 기록하였다. 이와 같은 빠른 증가는 이전 구리 산화물계 초전도체에서 얻어진 결과를 토대로 이루어졌다. 기존 구리 산화물계 초전도체 물질 연구에서 알려진 바에 의하면 격자 구조가 2차원에 가까워질수록 T_c 가 올라간다. 같은 방식으로 란타늄보다 크기가 큰 다른 란탄 계열의 원자를 치환함으로써 임계온도를 상승시킬 수 있었다. 그림 3은 다양한 란탄계 원소로 만들어진 LnOFeAs 의 임계온도를 보여준다.^[5] 이런 란탄계열 원소가 다른 여러 물질들을 묶어 1111-phase라 한다.

이후 Rotter에 의해 새로이 BaFe_2As_2 가 추가로 철 기반 초전도체로써 제안되었다.^[7] BaFe_2As_2 는 1111-phase에서 보이는 FeAs층을 갖고 있어(그림 4(b)) 초전도 현상이 나타날 것으로 예상되었고 실제로 Ba를 K으로 치환하였을 경우 임계 온도 38 K의 초전도 현상이 발견되었다. 이후 비슷한 CaFe_2As_2 및 SrFe_2As_2 에서도 초전도 현상이 추가적으로 발견되었으며 치환 원소도 Co, Ni, Ru, P 등 다양하게 발견되었다. 이들 물질을 통틀어 122-phase라 한다. 122-phase는 다른 phase에 비해 결정 성장이 용이하며 다양한 치환 물질 군이 존재하여 대다수의 철 기반 초전도체 연구가 122-phase 물질을 사용하여 이루어져 왔다.

Fig. 5. Relationship between the critical temperature and crystal structure (bonding angle or anion height).^[11,12]

122-phase의 발견 이후 FeAs층의 중요성이 부각되었으며 FeAs층을 갖는 다른 물질들을 찾기 시작하였다. 이로 인해 새로이 세 가지 phase가 철 기반 초전도 물질 군에 추가되게 된다. 1111- 및 122-phase 내의 FeAs층은 물질 내에서 각각 $(\text{LnO})^+(\text{FeAs})^-$, $\text{Ba}^{2+}(\text{FeAs})_2^-$ 로 전자 하나를 추가로 받게 된다(그림 4(a)). 새로운 물질들은 이러한 전하분포를 이룰 수 있는 물질로 탐색되었으며 111-phase(그림 4(c)) 및 11-phase(그림 4(d))라 명명된 물질이 추가될 수 있었다. 111-phase 물질은 LiFeAs 와 NaFeAs 로 각각 임계온도 18 K와 7 K를 갖는다. 11-phase는 As 대신에 칼코겐, 산소족 원소 중 Se와 Te이 Fe와 결합하여 FeSe 혹은 FeTe층을 이룬다. 11-phase는 FeSe 혹은 FeTe층으로만 이루어져 있으며 Se 및 Te은 As보다 전자를 하나 더 가지므로 $(\text{FeAs})^-$ 의 전하분포를 만족한다.

마지막으로 FeAs층 사이에 산화물 층을 삽입한 복잡한 화학식의 물질 군이 발견되었으며 이는 역시 구리 산화물계 연구 결과에서 얻어진 2차원 격자구조에서의 임계온도 상승을 고려하여 시도되었다. 대표적으로 바나듐 산화물 층을 삽입한 $\text{Sr}_2\text{VO}_3\text{FeAs}$ 가 있다. 이 물질은 임계온도 37 K^[10]을 갖는다.

위와 같이 다섯 가지의 군으로 대표되는 수많은 종류의 철 기반 초전도체들이 발견되었다. 각각의 물질은 초전도 임계 온도도 다를 뿐만 아니라 세부적으로 다른 물질들을 보이기도 한다. 그렇다면 전체 철 기반 초전도 물질을 아우르는 일반적인 특성이 있을까? 만일 없다면 철 기반 초전도 물질 군은 각각 개별적, 독립적으로 이해되어야 할 것이다.

다행히 모든 철 기반 초전도체의 물질들은 특이한 격자구조 의존성을 보인다. 각 물질 내의 FeAs 층의 As-Fe-As 원자간 결

REFERENCES

- [6] H. Takahashi *et al.*, Nature **453**, 376 (2008).
- [7] Marianne Rotter *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 020503(R) (2008).
- [8] X. C. Wang *et al.*, Solid State Commun. **148**, 538 (2008).
- [9] F.-C. Hsu *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **105**, 14262 (2008).
- [10] Xiyu Zhu *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 220512® (2010).

합각에 따라 임계온도를 표시해보면 이 특이한 의존성을 확인할 수 있는데(그림 5), 특정한 결합각을 갖는 물질이 최대의 임계온도를 보이는 것을 알 수 있다.^[11] 또한 이 특이한 의존성은 As 혹은 Se 원자의 Fe층에서부터의 높이로 임계온도를 표시할 경우에도 나타난다.^[12] 이런 특이한 경향성은 격자구조와 임계온도 간의 강한 상관관계를 암시해주며 모든 철 기반 초전도 물질에서 나타나는 초전도 현상이 하나의 메커니즘으로 설명될 수 있음을 시사해 준다.

그럼에도 불구하고 지금까지의 연구결과는 이런 철 기반 초전도체에서 발견되는 고온 초전도현상에 일반적으로 적용될 수 있는 원리를 제시하고 있지는 못하다. 2008년 발견 이후, 수많은 연구진에 의해 천 편이 넘는 연구 결과들이 보고되었지만 대부분의 초기 연구는 물질의 발견 및 비저항, 열전도율 등의 기본 물성 측정에 그쳤다. 많은 숫자의 물질 군으로 인하여 대다수의 연구가 독립된 연구진에 의해 개별적으로 진행되어 초전도 현상 및 자성현상에 일반적으로 적용될 수 있는 이해는 아직까지는 이루어지고 있지 않다. 하지만 철 기반 초전도체의 발견이 2008년임을 상기했을 때 5년간의 짧은 연구기간에 수많은 물질이 발견되었고 대부분의 기본 물성 측정 및 세부적인 이슈에 대한 합의가 이루어진 것은 고무적인 결과라 할 수 있다. 이는 수많은 연구진의 노력의 결과이고 앞서 말했듯이 수십 년에 걸쳐 쌓여진 구리 산화물계 연구 노하우 및 실험장비의 발전이 있었기에 가능했다.

이제는 우리에게는 비밀을 품고 있는 수많은 퍼즐조각을 눈앞에 두고 있다. 이제 철 기반 초전도체 연구는 이러한 퍼즐 조각을 맞춰 큰 그림, 초전도 현상의 미시원리를 그려나갈 때이다.

철 기반 초전도의 이론

d-wave superconductivity universality

2008년 $\text{La}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{FeAs}$ 초전도 물질의 발견으로 시작된 철-기반 초전도체에 관한 연구는 가히 폭발적이었다고 말할 수 있다. 이유는 이미 앞 장에서 설명한 대로 지난 25년간 구리 기반 고온 초전도를 연구하면서 아마 어마한 양의 실험 및 이론 연구의 경험과 know-how들이 축적되어 있는 상태였기 때문이다. 이러한 지식들이 워낙 어려운 문제인(이 문제가 어려운 이유는 실질적인 문제와 심리적인 문제가 뒤섞여 있다) 구리-기반 고온 초전도 연구에서는 별로 힘을 발휘하지 못하다가, 유사하지만 보다 단순한(이것 또한 보는 관점에 따라서 다를 수 있지만) 물질인 철 기반 초전도 물질을 만나서 마치 연습문제 풀듯이(왜냐하면 구리-기반 초전도체를 대상으로 이미 다 해본 메뉴들이었으므로) 세계 각국의 연구실에서 논문들을 쏟아내게 되었다. 이러한 사정은 실험 연구뿐만 아니라 이론 연구에서도 마찬가지 상황이었다.

본 장에서는 간략하게 지난 5년간 진행되어온 철-기반 초전도체의 초전도 이론 연구와 구리-기반 고온 초전도체의 초전도 이론과의 관계, 그리고 남은 문제점 등에 관하여 논의하고자 한다.

1. 철-기반 초전도체의 초전도 갭 대칭성: $\pm s$ -wave pairing state

최고 임계온도 약 55 K($\text{SmFeAs}(\text{FO})$)의 고온 초전도체이지만, 철-기반 초전도체와 구리-기반 고온 초전도체의 가장 큰 차이점은 소위 undoped 상태인 모 물질에서 Mott 부도체가 아닌 금속이라는 사실이다. 이 점은 구리-기반 초전도와 철-기반 초전도체가 모두 구리 또는 철 이온의 *d*-orbital 전자가 전도띠를 이루는 강상관계 물질이지만, 상대적으로 철-기반 초전도 물질의 강상관계가 훨씬 약하다는 것을 의미한다. 하지만, 유사점도 있는데, 두 물질 군이 모두 *d*-orbital 전자들이 지배하는 물질이며, 각각 철 이온과 구리 이온의 실 공간의 *ab*-plane 상에서의 배열이 직각 격자를 형성하는 같은 결정구조 때문에, 두 물질 모두 모 물질에서 반강자성 질서(antiferromagnetic long-range order, AFM)를 보인다. 그림 1의 상도표에서 보듯이, 전자이든 홀(hole)이든 carriers를 도핑하면, 반강자성 질서가 약화되면서 질서가 깨지는 지점 부근에서부터 초전도 상전이가 일어남을 볼 수 있다. 이러한, 반강자성 질서의 약화와 초전도 상전이의 나타남은 구리-기반 고온초전도체, 철-기반 초전도체뿐만 아니라, 임계온도가 극도로 낮은(1 mK에서 1 K 정도) 중페르미온(heavy fermion) 초전도 물질에서도 공통적으로 나타나는 보편적인 현상이다. 이 공통점은 뒤에 논의하게 될 *d*-wave superconductivity universality의 주요한 근거이다.

따라서 2008년 철-기반 초전도체가 발표되자마자, 수 주일 사이에 몇몇 이론가들이 철-기반 초전도체에 관한 이론을 발표하였고, 지금까지도 이 초기이론이 큰 수정 없이 올바른 이론으로 받아들여지고 있다. I. Mazin^[13]과 K. Kuroki^[14]의 논문이 가장 빠른 이론논문이었는데, 기본적인 아이디어는 다음과 같다. 먼저, 강상관계를 무시한 표준적인 LDA 밴드계산 결과 대부분의 철-기반 초전도체는 그림 6에 보이는 것과 같은 구조의 Fermi Surface(FS)를 지닌다. 즉, Brillouin Zone 내에 두 그룹의 서로 떨어져 있는 FS가 형성되는데, 그 떨어져 있는 거리가 - 역 공간에서의 거리 - 대략 (π, π) 정도 떨어져 있다. 이러한 FS의 구조는 소위, nesting이라고 불리는 조건을 만족하는데,

REFERENCES

- [11] Chul-Ho Lee *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 083704 (2008).
- [12] Y. Mizuguchi *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23**, 054013 (2010).
- [13] Mazin I. I., Singh D. J., Johannes M. D. and Du M. H., Phys. Rev. Lett. **101**, 057003 (2008).
- [14] K. Kuroki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 087004 (2008).

Fig. 6. Simplified two band Fermi surfaces of iron pnictides (red/blue solid lines) and $\pm s$ -wave gap solution (red/blue dashed lines).^[15]

이 조건이 만족될 경우, FS 저 에너지 전자들 간의 여기가 특히, 운동량 전이 $Q=(\pi, \pi)$ 정도의 차이가 날 경우 매우 왕성하게 일어남을 뜻한다. 즉, 스핀 감수율 $\chi(\omega \approx 0, Q)$ 가 발산하게 된다. 이런 조건이 만족되면, 따라서 전자의 스핀들이 (π, π) 정렬을 하게 되며, 이를 반강자성 정렬이라고 하고, 실제로 대부분의 철-기반 초전도 물질이 도핑이 되지 않았을 경우 반강자성 정렬을 한다(그림 1). 다만, 철-기반 초전도체는 반강자성 정렬을 하더라도 부도체가 되지 않고 금속상태로 남아있는데, 이러한 이유로 철-기반 초전도체의 반강자성 정렬을 itinerant SDW(spin-density wave) 정렬이라고 한다. 이제 모 물질에 도핑을 하면 반강자성 정렬의 긴 범위 정렬은 깨어지지만 상당한 도핑 범위까지 스핀 감수율 $\chi(\omega \approx 0, Q)$ 가 매우 큰 값을 유지하게 될 것이다. 이는 전자들간에 강한 반강자성 요동이 교환된다는 의미이며, 이제 가장 간단한 그리고 표준적인 초전도 이론인 BCS 이론을 일반화하여, 주어진 FS의 전도전자들과 강한 반강자성 요동을 결합한 초전도 겹 공식을 다음과 같이 쓸 수 있다.^[14]

$$\begin{aligned}\Delta_h(k) &= -\sum_{k'} [V_{hh}(k, k')\Delta_h(k')\chi_h(k') \\ &\quad + V_{he}(k, k')\Delta_e(k')\chi_e(k')] \\ \Delta_e(k) &= -\sum_{k'} [V_{eh}(k, k')\Delta_h(k')\chi_h(k') \\ &\quad + V_{ee}(k, k')\Delta_e(k')\chi_e(k')]\end{aligned}$$

위 방정식에서 두 개의 겹, Δ_h, Δ_e 를 가정한 이유는 그림 6에서 보듯이 두 개의 FS를 가정했기 때문이며, $V_{(h,e)}$ 등은 정공 밴드, 전자밴드 사이의 쌍 상호작용이며, 운동량 공간에서 이들 $V_{(h,e)}(k, k')$ 은 항상 positive(repulsive)이다. 이 반발 작용의 미시원리는 앞에 설명한 반강자성 요동이며, 위 방정식에 사용한 쌍 포텐셜의 모양은 다음과 같다.

$\pm s$ -wave = d -wave

Fig. 7. Topological equivalence between $\pm s$ -wave and d -wave gaps: In each case, strong repulsive interaction $V_{(h,e)}(Q)$ ($Q=(\pi, \pi)$) connects the “+” and “-” parts of the superconducting gap.

$$V(k, k') = V_M \frac{\kappa^2}{|\vec{k} - \vec{k}' - \vec{Q}|^2 + \kappa^2}$$

위의 결합된 겹 공식을 풀면, 그림 6에 보이는 소위, sign-changing-wave 겹 solution($\pm s$ -wave 겹)을 얻게 된다. 이 $\pm s$ -wave 겹의 특성은 두 겹 사이의 부호가 서로 다르다는 것을 제외하면, 각 밴드에 대하여는 full s -wave 겹과 같은 특성을 가진다. 그러나 대부분의 실험 데이터를 이해하려면 불순물 충돌 효과 등을 고려해야 하는데, 이때 두 겹 사이의 $\pm$ 부호가 매우 특별한 역할을 하기 때문에, 기대했던 단순한 full s -wave 겹 특성이 근본적으로 바뀌게 된다. 그러나 무엇보다 중요한 사실은 그림 6의 $\pm s$ -wave 겹은 반강자성 요동에 의한 쌍결합의 관점에서 볼 때, 구리-기반 고온 초전도체의 겹 대칭성인 d -wave 겹과 정확히 같은 원리에 의한 것이라는 점이다. 쌍결합의 원리는 같지만, 두 물질은 FS의 구조가 다르다는 -- 한 경우는 두 개의 작은 FS가 서로 떨어져 있고, 다른 경우는 하나의 큰 FS가 Brillouin zone을 따라서 대부분 연결되어 있다 -- 단순한 차이 때문에 결과적으로 매우 다른 초전도 겹을 갖게 된 것이다. 이 원리는 그림 7에서 두 개의 겹을 비교해 놓은 것을 보면 쉽게 알 수 있다.

2. $\pm s$ -wave state의 초전도 특성들

쌍결합의 원리는 같지만, 어쨌든 $\pm s$ -wave 겹은 d -wave 겹과 열역학적 특성이 전혀 다른 초전도 상태이다. 특히, 중요한 차이는 $\pm s$ -wave 겹은 nodal point(s)가 없는 등방성 s -wave 겹이나, d -wave 겹의 경우에는 nodal point(s)가 존재한다는 것인데, 이는 여러 가지 열역학적 초전도 특성 - 예를 들면, 비열, 자기장 침투 깊이, 핵자기공명 실험 등의 온도 의존성 - 에서 매우 중요한 차이점을 만들어 낸다. 2008년에 제시된 철-기

REFERENCES

- [15] Y. Bang and H. Y. Choi, Phys. Rev. B **78**, 134523 (2008).

Fig. 8. Schematic of continuous evolution from $\pm s$ -wave gap to nodal gap. Gap symmetry is kept unchanged during the evolution.

반 초전도체의 이론인 $\pm s$ -wave 갭 이론은 꽤 설득력이 있는 이론이었고, 초기의 실험들이 fully opened s -wave 갭 특성을 관측함으로써 - 자기장 침투 깊이, 각분해능 광전자 분석 실험, 터널링 실험 등등 - 실험적으로 이론의 정당성이 상당히 확인 되는 듯하였다. 그러나 곧 이어 발표된 실험들이 nodal-갭 초전도의 특성들을 보여주면서 실험적 도전을 받게 되었다. 그 주요한 도전을 열거하면 다음과 같다.

- (1) NMR $1/T_1$ relaxation rate $\sim T^3$ 또는 T^α ($\alpha=3-5$).
- (2) 자기장 침투 깊이 $\lambda(T) \sim T^\beta$ ($\beta=2-3$).
- (3) Thermal conductivity $\kappa(H)$ 또는 비열 $C/T(H)$ 의 자기장 의존성: $\kappa(H)$, $C/T(H) \sim H^\delta$ ($\delta=0.5-1$).

간단히 생각해서, $\pm s$ -wave 갭 상태는 초전도 상태에서 위에 열거한 온도 또는 자기장 의존성이 지수함수적으로 flat하여야 한다. 위에 열거한 온도 또는 자기장의 멍승 관계(power law)는 구리-기반 고온초전도체를 연구하면서 잘 알려진 nodal 갭 초전도의 특성들이다. 이러한 심각한 모순적 상황은 $\pm s$ -wave 갭 상태의 불순물 충돌에 대한 특이한 반응과,^[16] 또한 다중 갭 s -wave 초전도체($\pm s$ -wave 갭이 이에 해당함)의 특이한 Volovik 효과^[17]에 대한 이론적 연구에 의하여, 매우 자연스러운 $\pm s$ -wave 갭 초전도체의 거동임이 밝혀졌다. 따라서 $\pm s$ -wave 갭 모델을 위협하던 실험사실들이, 이론적 연구에 의하여 $\pm s$ -wave 갭 모델을 강화하는 증거로 바뀌어 버린 것이다. 이 글을 쓰는 현재로서는 지금까지 발견된 30여 종이 넘는 철-기반 초전도체의 거의 대부분은 $\pm s$ -wave 갭 모델에 매우 잘 부합되는 특성들을 보여준다. 다만, 아직도 논란이 되는 몇 개의 예외가 있는데, LaFePO , $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, KFe_2As_2 , LiFeP 등은 실험연구자들에 의해서 꾸준히 nodal 갭초전도 또는 d -wave 초전도 상태라고 주장되고 있다. 하지만, 필자의 최근의 분석에 의하면,^[18] 이들 중 LaFePO 와 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ 은 오히려 $\pm s$ -wave 갭 모델에 잘 부합되며, nodal 갭초전도일 가능성은 없다고 판명되었다. 다만, KFe_2As_2 와 LiFeP 은 nodal 갭 초전도일 가능성이 있다고 생각된다. 그러나 이들 두 물질이 nodal 갭 초전도체라고 하더라도,

Progress of d -wave superconductors

HF SC (1 K) → HTSC (100 K)	
1978	1986
HF SC (1 K) → Pu115 SC (20 K) → HTSC (100 K)	
	2002
HF SC (1 K) → Pu115 SC (20 K) → Fe-SC (50 K) → HTSC (100 K)	
	2008

Fig. 9. History of representative d -wave superconductor discoveries.

여전히 $\pm s$ -wave 갭 모델의 연속적인 변형에 의한 node(s)의 형성일 가능성이 매우 높다(그림 8 참조).

3. 결론과 남은 문제들

지금까지 설명한 바와 같이, 철-기반 초전도체의 쌍 대칭성은 $\pm s$ -wave 갭임이 이론적으로나 실험적으로 거의 확실히 증명되었다. 또한, 쌍 결합의 원인으로는 반강자성 요동의 스핀 요동을 매개로 하는 반발력이 가장 유력한 후보이다. 마지막으로, 그림 7에서 보여주듯이, 이는 d -wave 초전도 쌍결합의 원인과 정확히 같은 원리이다. 이제, 초기에 언급하였듯이 우리가 알고 있는 표준적인 포논에 의해서 매개되는 s -wave 초전도체 이외에 지난 30년간 발견된 non-phonon 초전도체는 한두 개의 p -wave triplet 초전도체(예, Sr_2RuO_4)를 제외하고는 모두 반강자성 불안정성 근처에서 형성되는 d -wave 초전도체이다. 이제, 철-기반 초전도체의 $\pm s$ -wave 갭을 쌍 결합 원리의 관점에서 d -wave 초전도체와 같은 범주로 분류한다면, 그림 9와 같은 도표를 그릴 수 있다.

이로써, 우리는 반강자성 요동에 의해 매개되는 non-phononic 초전도체는 모두 d -wave 초전도체를 형성한다는 보편성(Universality of the Unconventional Superconductivity)을 추론할 수 있다. 앞으로 남은 문제는 크게 두 가지로 요약할 수 있다. (1) 왜, 이러한 보편성(universality)이 형성되는가? (2) 이러한, 보편성의 법칙에 따라서, 임계온도(T_c)를 더욱 증가시킬 수 있는 방법은 무엇인가? 이 두 가지 문제는 미래의 초전도 연구의 가장 중요한 이슈이자 동력이다. 지난 5년간의 철-기반 초전도체의 발견과 연구의 가장 중요한 결실은 이러한 d -wave 초전도체의 보편성 법칙에 결정적인 힌트를 준 것이라고 할 수 있다.

REFERENCES

- [16] Y. Bang and H.-Y. Choi and H. Won, Phys. Rev. B **79**, 054529 (2009).
- [17] Y. Bang, Phys. Rev. Lett. **104**, 217001 (2010).
- [18] Y. Bang, Supercond. Sci. Technol. **25**, 084002 (2012).