분광학적 접근을 통한 고온 초전도의 이해

DOI: 10.3938/PhiT.20.035

황정식·이진환·김창영

Review of Spectroscopic Studies on High-temperature Superconductors

Jungseek HWANG, Jhinhwan LEE and Changyoung KIM

A variety of experimental techniques have been used to find clues to understanding high-temperature superconductivity (HTSC). Spectroscopic techniques, such as photoemission, infra-red spectroscopy and scanning tunneling microscopy, have contributed tremendously to extracting vital information on HTSC materials. In this article, we review experimental accomplishments made through the three major spectroscopic techniques: the Fermi surface topology, electron orbitals that form the states at the Fermi level, and the superconducting gap symmetry. What is the pseudo-gap and what mediates the HTSC are also questions that we wish to answer in this short review article. We end the article with a perspective on HTSC research.

저자약력

황정식 교수는 플로리다 대학교에서 물리학 박사를 취득 후(2001), 맥매스터 대학(2001-2007) 및 플로리다 대학(2007-2009)에서 연구원으로 재직하였으며, 2009년부터 부산대학교 물리학과 교수로 재직 중이다
(jhwang@pusan.ac.kr)

이진환 교수는 서울대학교 이학박사(2002년)로서 서울대학교 반도체 공동 연구소(2002-2004) 및 코넬대학교(2004-2009) 연구원으로 재직 후 2009년부터 KAIST 물리학과 교수로 재직 중이다.
(jhinhwan@kaist.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)

고온 초전도 연구와 분광학

1986년 구리 산화물에서 고온 초전도가 발견되었을 때, 과학자들은 고온 초전도 현상을 설명하기 위해서는 Bardeen, Cooper 및 Schrieffer에 의해서 제안된 기존의 BCS 이론과는 다른, 새로운 이론이 필요하다는 것을 알게 되었다. 1911년 Onnes에 의해서 수은에서 처음 발견된 고전 초전도 현상(conventional superconductivity)을 설명하기 위한 BCS 이론이 탄생하기까지 많은 실험적 결과가 필요했던 것처럼, 고온 초전도 원리의 규명을 위해서도 이론에 실마리를 제공할 수 있는 많은 실험적 데이터가 필요할 것이다. 이를 위하여 고온 초전도체 연구를 위한 다양한 실험적 접근 방법이 시도되었는데, 고체 물리의 다른 분야와 마찬가지로 분광학적인 접근 방법은 많은 중요한 정보를 제공해 주었다. 분광학 실험을 통하여 얻을 수 있는 정보는 고체 물성의 이해에서 가장 중요한 밴드 구조를 포함하여, 전자의 궤도 정보 및 초전도 갭 등 매우 다양하다.

본 소켓글에서는 다양한 분광학적 기법 중 대표적 기법이라 할 수 있는, 각분해 광전자 분석(Angle resolved photoelectron spectroscopy or ARPES), 적외선 분광법(Infrared spectroscopy or IR) 및 주사 탐침 현미경(Scanning tunneling microscopy or STM)을 사용하여 수행된 구리 산화물 기반 고온 초전도의 근본 원리 규명을 위한 연구 및 주요 연구 결과를 소개하고자 한다. 좀 더 구체적으로는 분광학적 접근 방법을 통하여 구리 기반 고온 초전도체에서 “페르미면(Fermi surface)의 모양은 무엇이며 어느 전자 궤도에서 오는가?”, “초전도 갭 대칭성(Gap symmetry)은 무엇인가?”, “유사갭(Pseudo-gap)이 무엇이고 초전도 갭과는 어떤 관계가 있는가?” 및 “쿠퍼 전자쌍을 만드는 매개체는 무엇인가?”에 대한 연구 결과에 대하여 논의하고자 한다. 이러한 연구 결과는 고온 초전도 근본 원리의 이해에 반드시 필요한 귀중한 정보인데, 결과의 많은 부분은 많은 연구자들에 의해서 받아

Fig. 1. Fermi surface of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{10}$.^[2] Two Fermi surfaces AB and BB are from Cu 3d bonding and antibonding bands. Additional Fermi surfaces AB' and BB' are an artifact due to the superstructure in Bi2212, and thus should not be counted.

들여지고 있지만, 일부의 결과에 대해서는 아직도 논란이 되고 있다. 본 글에서는 지금까지 얻어진 분광학적 결과 중 가장 믿을 만한 결과를 소개하고자 한다.

페르미 준위 전자의 궤도 및 페르미면의 모양

고체 내부에서의 전기 전도 현상은 페르미 준위 근처의 전자에 의해서 이루어진다. 따라서 초전도 현상 역시 페르미 준위 근처의 전자가 중요한 역할을 하는데, 이러한 이유로 페르미 준위에서의 상태 밀도(Density of States or DOS)가 클수록 초전도의 임계온도가 올라가는데 유리하게 된다. 페르미 준위에서의 상태 밀도는 페르미면의 크기에 비례하므로, 높은 임계온도를 가지는 초전도체는 큰 페르미면을 가지고 있을 것으로 기대된다. 이에 고온 초전도체의 발견 초기에 자연스럽게 구리 산화물 고온 초전도 물질의 밴드 구조 및 페르미면의 모양에 대한 이슈가 부각되었다. 특히, 발견 초기에 수행된 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi2212) 물질에 대한 밴드 계산에서 Cu-O층뿐만 아니라 Bi-O층도 페르미면을 만든다는 결과가 발표되면서, 페르미면에 대한 논란이 있었다.^[1]

실험적으로 밴드 구조 및 페르미면을 가장 직접적이고 보편적으로 연구하는 방법은 각분해 광전자 분석을 이용하는 것이다. 각분해 광전자 분석법은 광전자 분석의 일반적인 약점인 표면 민감성(surface sensitivity)에도 불구하고 다양한 물질에 대한 밴드 구조 측정에 이용되고 있다. 고온 초전도의 경우 표면 특성이 좋아 각분해 광전자 분석법에 적합한 Bi2212가 특히 많이 이용되고 있다. 그림 1은 각분해 광전자 분석을 이용하여 측

Fig. 2. X-ray absorption spectra from $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.^[4] The left figure shows polarization dependent O K-edge spectra while the figure on the right depicts Cu L-edge data.

정한 Bi2212의 페르미면을 보여준다.^[2] 주목할 점은, 페르미면이 크기가 상당히 크며, 구리-산소 층이 이루는 사각 브릴루앙 존(Brillouin zone)의 (π, π) 점을 중심으로 하는 원형의 정공 포켓(hole pocket)이라는 것이다. 이러한 결과는 앞서 언급한 큰 페르미면을 확인시켜 주는 결과라 하겠다. 또한 초기의 밴드 계산 결과와는 다르게 Cu-O층에 의한 페르미면만을 보여준다. 이후의 향상된 계산에서는 실험 결과와 일치하는 결과를 보여주고 있어, 더 이상의 논란은 없는 상황이다.

이와 같이 Cu-O층에 의한 페르미면이 관측되었는데, 그 다음으로 살펴보아야 할 것은 페르미면 근처의 전자 상태가 과연 어떤 전자궤도로 이루어져 있느냐 하는 것이다. 이것이 중요한 이유는 전자 궤도에 따라 페르미면을 이루는 전자의 성질이 매우 다르며, 이는 고온 초전도를 설명하는 이론에 큰 영향을 주기 때문이다. 만약 페르미 준위의 전자가 구리의 3d 궤도에서 온다면 전자 간의 강한 상호 작용을 반드시 고려해야만 한다. 지금은 그림 1의 페르미면의 전자가 구리의 3d 궤도에서 온다는 것이 잘 알려져 있지만, 아직도 소수이기는 하지만 이에 동의하지 않고, 다른 궤도(예를 들어, BiO)에서 오는 것이라 주장하는 사람들도 있다. 하지만 광전자 분석에서 편광 의존성을 이용한 실험 결과로부터 페르미면의 전자들이 3d의 x^2-y^2 궤도의 성질을 가지고 있음을 알 수 있었다.^[3] 더 나아가 벨 연구소의

REFERENCES

- [1] S. Massida, J. Yu and A. J. Freeman, *Physica C* **152**, 251 (1988).
- [2] D. L. Feng, N. P. Armitage, D. H. Lu, A. Damascelli, J. P. Hu, P. Bogdanov, A. Lanzara, F. Ronning, K. M. Shen, H. Eisaki, C. Kim and Z.-X. Shen, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5550 (2001).
- [3] T. Yoshida *et al.*, *Phys. Rev. B* **63**, 220501(R) (2001).

C. T. Chen 등은 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 에 대한 X-선 흡수 분광 실험으로부터 페르미 준위 근처의 전자가 구리의 $3d\ x^2-y^2$ 궤도와 직접적인 관련이 있음을 보여주었다.^[4] 그림 2에서 보면, 도핑에 따라 O K- 및 Cu L-edge에서 모두 많은 변화가 있다. 거기에 더하여 편광 의존성(그림 2에서 ϕ 에 따라 세기에 많은 변화가 있음)은 도핑에 따라 변화가 많은 페르미 준위 근처의 전자가 $3d\ x^2-y^2$ 궤도특성을 가지고 있음을 보여준다.

초전도 갭 대칭성

우리는 위에서 페르미 준위의 전자가 구리의 $3d$ 궤도에서 오며, 구리 $3d$ 밴드의 구조는 크기가 큰 페르미면을 만든다는 것을 알았다. 여기에 더하여 초전도 근본원리를 규명하는 데 있어서 중요한 정보가 초전도 갭의 대칭성이다. 이는 갭의 대칭성이 초전도 특성에 큰 영향을 주며, 더욱이 쿠퍼 전자쌍(Cooper pair)을 매개하는 매개체가 무엇인가에 대한 귀중한 정보를 주기 때문이다. 예를 들어 고온 초전도체 이전에 발견된 초전도체의 대부분은 갭의 크기가 일정하고, 위상이 변하지 않는 s-wave임이 알려져 있으며, 이는 쿠퍼 전자쌍의 매개체가 포논일 가능성을 높여 준다. 이러한 이유로 고온 초전도체의 발견 초기부터 갭의 대칭성을 발견하기 위한 많은 시도가 있었다.

갭의 대칭성에 대해서도 아직도 약간의 논란은 있지만, 대체로 고온 초전도체의 갭 대칭성이 d-wave라는 것이 대부분의 연구자들에 의해서 받아들여지고 있다. d-wave가 s-wave와 다른 점은 페르미면을 따라 생기는 갭 함수(gap function) 위상의 부호가 페르미면을 따라 한 바퀴 돌게 되면 수소(d-) 궤도와 같이 4번 바뀌어야 한다는 것이다. 이렇게 위상의 부호가 바뀌게 되면 반드시 갭의 크기가 없어지는 마디(node)가 형성되어야 하므로, 이것이 s-wave와 d-wave의 큰 차이가 된다. 실험적으로는 갭의 크기를 페르미면을 따라서 측정하고, 이를 각 경우와 비교한다면 갭의 대칭성을 알 수 있을 것이다. 예를 들어 마디가 몇 개 존재하는가는 갭 대칭성 판단의 중요한 근거가 될 것이다.

분광 기법을 이용한 갭 대칭성의 측정은 먼저 90년대 초반에 각분해 광전자 분석을 이용하여 측정되었으며, 근래에는 분해능의 향상으로 인하여 상당히 정확한 측정이 이루어지고 있다. 그림 3의 오른쪽 그림은 Bi2212의 페르미면을 따라가면서 측정한 초전도 갭을 왼쪽에 정의된 각도에 따라 그린 것이다.^[5] 만약 구리 산화물 초전도체가 d-wave 초전도 갭을 가지고 있다면 갭의 크기는 $|\cos k_x a - \cos k_y a|$ 와 같은 모양을 가지고 있어야 한다. 그림에서 보면 갭의 크기가 d-wave에서 예상하는 것(실선)과 일치하는 것을 볼 수 있다.^[5] 물론 각분해 광전자 분석에 의해 측정된 갭에서는 위상을 볼 수 없어서 단순히 갭이

Fig. 3. Fermi surface and superconducting gap measured by ARPES.^[5] The Fermi surface angle on the right is defined as θ in the left figure.

일정하지 않은 것과 위상이 바뀌는 것을 엄밀히 구분하지는 못한다. 하지만 각분해 광전자 분석을 이용한 다양한 시료에 대한 갭 측정 결과 및 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 에 대한 갭의 위상에 민감한 트라이 크리스탈 실험에서 모두 일관되게 d-wave 갭이 측정되고 있다.^[6]

최근에는 주사 탐침 현미경의 데이터로부터 갭의 모양을 측정할 수 있는 방법이 개발되었다. 그림 4a는 STM을 이용하여 -10 meV에서 Bi2212의 실공간 이미지를 측정한 것이다. 이 이미지가 균일하지 않은 것을 볼 수 있는데, 이것은 Bi2212의 전자 구조에 대한 중요한 정보를 담고 있다. 그림 4b는 4a를 푸리에 변환을 한 것이다. 푸리에 변환된 이미지는 실공간의 이미지에 어떤 특정한 패턴이 있는가를 역공간에서 보게 하여 주는데, 4b의 이미지에서 어떤 특정한 부분이 강한 것을 볼 수 있다. 이것을 유사입자 간섭무늬(quasi-particle interference pattern or QPI pattern)라고 하는데, 주어진 에너지에서 이는 특정한 운동량을 가지는 전자의 산란 확률이 높기 때문에 일어나는 현상이다. 4c는 d-wave 갭 대칭성을 가질 경우 왜 특정한 운동량에서 높은 산란 확률을 가지는가를 나타내는 그림으로서, d-wave 갭 구조를 가정하고 있다. 이때 나타나는 운동량은 4b에 밝은 점으로 나타나는 운동량과 일치하여 QPI가 d-wave 갭 대칭성 때문에 나타남을 보여주고 있다. 이러한 QPI 패턴을 잘 조사하여 보면 d-wave 갭 구조를 측정할 수 있는데, 이를

REFERENCES

- [4] C. T. Chen, L. H. Tjeng, J. Kwo, H. L. Kao, P. Rudolf, F. Sette and R. M. Fleming, Phys. Rev. Lett. **68**, 2543 (1992).
- [5] H. Ding *et al.*, Phys. Rev. B **54**, 6978 (1996).
- [6] C. C. Tsuei *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 593 (1994).
- [7] K. McElroy *et al.*, Nature **422**, 592 (2003).

Fig. 4. Gap measurements from STM QPI pattern. (a) Real space STM image of Bi2212. (b) Fourier transform of the image in (a). Quasi-particle interference pattern emerges. (c) The expected wavevectors of quasi-particle interference patterns in a superconductor with d-wave gap structure like that of Bi2212. (d) A plot of the energy gap determined from the filled-state measurements, shown as open circles. The solid line is a fit to the data.

그림 4d에 그려 놓았다. STM을 통하여 측정된 갭 구조는 d-wave 갭 구조와 잘 일치하며, ARPES를 통하여 측정된 갭의 구조와도 일치함을 알 수 있다.

유사갭(Pseudo-gap)

고온 초전도체의 특이한 점 중의 하나는 유사갭(pseudo-gap)의 존재이다. 일반적으로 초전도 갭은 온도가 올라가면 작아지며, 임계온도가 되면 없어지게 된다. 하지만 고온 초전도체에서는 임계온도 이상에서 존재하는 갭이 발견되었는데, 이를 초전도 갭과 구별하기 위하여 유사갭(pseudo-gap)이라 부른다. 유사갭은 좀 더 일반적으로 말하면 임계점 이상에서 페르미 준위 근처의 상태밀도의 손실(suppression)을 보여주는 현상인데, 이의 존재는 핵자기 공명 실험으로부터 예견되었으나,^[8] 직접적인 관측은 ARPES,^[9] STM^[10] 및 IR^[11] 등에 의해서 이루어졌다. 유사갭이 생기는 원인에 대해서는 현재도 많은 논란이 있는데, 대체로 두 가지 의견이 지배적이다. 그 첫째는, 유사갭이 초전도가 아닌 또 다른 질서 파라미터(competing order parameter) 때문이라는 것이고,^[12] 두 번째는 임계온도 위에서 미리 형성된 쿠퍼 전자쌍(preformed

pair) 때문이라는 것이다.^[13] 두 번째 의견의 요점은, 쿠퍼 전자쌍이 이미 임계온도 위에서 만들어지지만 초전도 현상에서 반드시 필요한 위상의 결맞음은 임계온도에서 생긴다는 것이다. 유사갭이 초전도 갭과 관련이 있는지는 아직 확실하지는 않다. 특히 언더도핑 상태에 존재하는 유사갭과 초전도 갭과의 관계의 정확한 이해는 초전도 현상을 설명하는 미시적 모델을 규명하는 데 중요한 단서를 제공할 수 있을 것으로 기대되며 실험과 이론을 통해 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 하지만, 두 가지 의견 모두에서 유사갭은 고온 초전도와 연관성(전자와 초전도 매개체 상호작용의 발현 혹은 전자쌍의 형성)이 있을 것으로 믿어지고 있으며, 이에 그 중요성이 있다고 하겠다.

이제 유사갭이 분광학 데이터에 어떻게 보이는지 알아보기로 하자. 그림 5는 ARPES,^[9] STM^[10] 및 IR^[14]을 이용하여 측정된 유사갭을 보여준다. ARPES는 페르미 준위 아래만 볼 수 있기 때문에, 도체의 경우 페르미 준위까지 ARPES 데이터가 보이게 되지만, 갭이 있는 경우는 페르미 준위 근처에서 ARPES 신호가 없어지게 된다. 그림 5a는 ARPES를 이용하여 측정된 갭을 그려놓은 것인데, 가장 왼쪽의 그림과 같이 정의된 갭을 페르미면을 따라가면서 측정한 것이다. 그림에서 보면, 초전도 갭은 임계온도인 T_c 에서 없어지지만(45° 근처), 유사갭은 T_c 위에서도 없어지지 않고 남아있는 것을 알 수 있다(0° 및 90° 근처). 더욱 주목할 것은 유사갭의 크기는 온도와 상관없이 거의 일정하며, 브릴루앙존의 $(\pi, 0)$ 근처에서 크게 존재한다는 것이다.

운동량 분해능은 없지만, STM을 이용하면 좀 더 높은 에너지 분해능을 가지고 갭 측정이 가능하다. 그림 5b는 약 89 K 정도의 임계온도를 가지는 Bi2212에 대한 STM 데이터인데,^[10] 임계온도 아래에서는 확연한 갭이 보이며 갭 바깥쪽에는 매우 강한 봉우리(peak) 구조가 보인다. 온도가 올라감에 따라 봉우리 구조가 점점 약해지는 것을 볼 수 있는데, 놀랍게도 갭의 크기 자체는 그리 줄어드는 것처럼 보이지 않는다. 임계 온도 이상에서는 봉우리 구조는 없어졌지만, DOS가 늘려있는 갭 자체는 사라지지 않고, 상당히 높은 온도까지 존재

REFERENCES

- [8] H. Alloul *et al.*, Phys. Rev. Lett. **63**, 1700 (1989).
- [9] W. S. Lee, I. M. Vishik, K. Tanaka, D. H. Lu, T. Sasagawa, N. Nagaosa, T. P. Devereaux, Z. Hussain and Z.-X. Shen, Nature **450**, 81 (2007).
- [10] Ch. Renner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 149 (1998).
- [11] C. C. Homes *et al.*, Phys. Rev. Lett. **71**, 1645 (1993).
- [12] S. Chakravarty *et al.*, Phys. Rev. B **63**, 094503 (2001).
- [13] H.-B. Yang *et al.*, Nature **456**, 77 (2008).
- [14] A. Puchkov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 3212 (1996).

Fig. 5. (a) ARPES,^[9] (b) STM^[10] and (c) IR^[12] measurements of pseudo-gaps in cuprates.

하는 전형적인 유사갭 구조를 보여주고 있다. 하지만 에너지 분해능이 더 높은 최근의 고유 터널(intrinsic tunneling) 실험

에서는 초전도 갭과 유사갭의 크기가 다르다는 것을 볼 수 있는데, 이는 아래에 소개되는 ARPES에 의한 두 가지 갭 시나리오와 일치하는 결과이다.

IR을 통한 유사갭의 연구는 *c*-축 광학 전도도에서 처음으로 관찰되었다.^[11] 그림 5c는 다양한 도핑의 Bi2212에 대하여 IR을 이용하여 주파수에 따른 전기 전도도 및 광학 산란율을 측정된 것이다.^[12] 광학 산란율 데이터에서 보면 언더도핑의 경우 임계온도 이상에서도 산란율이 낮은 주파수 쪽에서 매우 약해져 있음을 볼 수 있다. 이는 광학 산란율의 낮은 에너지 영역에 나타나는 산란율의 갑작스러운(계단모양의) 증가는 보존모드(또는 자기공명모드)와 유사갭이 같이 기여하므로 주의를 필요로 한다. 또한 최근의 언더도핑 IR 데이터 분석으로부터 유사갭이 초전도에 저해현상으로 나타낼 수 있다는 것이 제시되기도 하였다.^[15]

쿠퍼 전자쌍의 매개체

고온 초전도를 설명하기 위하여 지금까지 매우 다양한 이론들이 제안되었다. 하지만 실험적으로 고온 초전도체에서도 여전히 쿠퍼 전자쌍이 형성되는 것이 관측되었으므로, 결국 고온 초전도의 근본원리 규명에서 가장 중요한 것은 '쿠퍼 전자쌍을 매개하는 것은 무엇인가?'라는 것이다. 고온 초전도체 발견 초기에서부터, 높은 임계 온도로 인하여 BCS 이론의 포논으로는 고온 초전도를 이룰 수 없고, 에너지가 높은 새로운 매개체가 필요하다는 의견이 개진되었다.^[16] 특히, 고온 초전도체의 모체(parent compound)는 반강자성 물질이며 도핑이 증가하면서 반강자성이 없어질 무렵에 초전도 현상이 보이기 때문에, 국소적 반강자성 정렬에 의한 스핀 요동이 자연스럽게 쿠퍼 전자쌍을 매개할 것으로 생각되었다. 특히, 스핀 요동에 의하여 매개되는 초전도는 자연스럽게 *d*-wave 갭 대칭성을 가지게 되므로 스핀 요동은 고온 초전도를 설명할 수 있는 가장 강력한 후보이다.^[16] 그림에도 불구하고, 고온 초전도체의 발견자를 포함하는 일부의 연구자들은 강한 전자-포논 결합이 높은 임계온도를 가지고 있을 수 있다고 믿고 있다.^[17] 하지만, 최근 일련의 연구 결과로 인하여 스핀 요동이 매개하는 고온 초전도 모델이 설득력을 얻어가고 있는 상황이다.

포논에 의하여 매개되는 초전도의 경우를 생각해 보면 어떤 보존(boson)이 쿠퍼 전자쌍을 매개하기 위해서는 우선 그

REFERENCES

- [15] J. Hwang *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 014507 (2011).
- [16] D. Pines, Physica C: Superconductivity **185-189**, 120 (1991).
- [17] A. Lanzara *et al.*, Nature **412**, 510 (2001).

Fig. 6. Kink structure in the experimental dispersion from Bi2212.^[18] Fermi surface is shown in the left. Data in b and c are from anti-nodal and nodal regions of Brillouin zone.

보존이 전자와 상호작용이 있어야 한다. 따라서 ‘무엇이 쿠퍼 전자쌍을 매개하는가?’라는 문제에 답을 하기 위해서는 전자가 어떤 보존과 상호작용을 하고 있는지를 알아보는 것이 출발점이 되겠다. 일반적으로 전자와 보존의 상호작용이 있는 경우에는 ARPES에 의해 측정된 밴드 구조에 꺾임(kink) 현상이 일어나게 되며, 자체 에너지(self energy)가 이러한 상호작용을 반영하게 된다. 따라서 ARPES 데이터의 모양을 분석함으로써 전자와 상호작용하는 보존에 대한 정보를 얻게 된다. 그림 6c는 Bi2212의 (0,0)-(π,π) 근처의 ARPES 데이터인데,^[18] 밴드가 70 meV 정도의 에너지에서 꺾임 구조가 보이고 있다. 이는 70 meV의 에너지를 가지는 보존이 전자와 강한 상호작용을 하고 있음을 보여주는 것이다. 70 meV는 Cu-O 포논 에너지에 해당하여, 데이터에서 보이는 밴드의 꺾임 구조는 전자와 포논간의 상호작용에 의한 것임을 알 수 있다.

(0,0)-(π,π) 방향의 ARPES에서 보이는 꺾임 구조가 포논에 의한 것이라는 것이 일반적으로 받아들여지고 있는 반면, 그림 6b에 있는 (π,0) 근처 데이터의 꺾임 구조에 대해서는 그 원인에 대하여 논란이 있다. 논란의 원인은 꺾임 구조의 에너지인 약 40 meV가 자기공명모드(magnetic resonance mode)와 포논의 에너지에 의하여 모두 설명될 수 있다는 것이다. 그런데 (π,0) 근처에서의 꺾임 구조가 중요한 것은, (π,0) 꺾임 구조가 임계온도 이하에서만 관측되며, 꺾임 구조로부터 유추한 상호작용이 매우 크다는 것이다. 이 두 가지 특성은 (π,0) 꺾임 구조가 초전도 현상과 밀접한 관계가 있으며, 관측된 강한 상호작용으로부터 고온 초전도와 같은 높은 임계온도를 만들 수 있다는 점에서 매우 중요하다 하겠다.

단순한 에너지의 크기가 아니라, 자체 에너지(self energy)를 분석하면 좀 더 많은 정보를 얻을 수가 있다. 그림 7은 넓은 도핑 정도에 있는 Bi2212의 광학 자체 에너지를 보여주는데, 광학 자체 에너지와 ARPES로 측정된 유사입자 자체

Fig. 7. Doping dependent $\alpha^2 F(\Omega)$ measured by IR spectroscopy.^[21]

에너지(quasiparticle self-energy)가 유사한 것으로부터 이 두 자체 에너지는 동일한 물리현상을 묘사함을 알 수 있다. 또한 LSCO의 광학 자체 에너지를 분석한 $\alpha^2 F(\Omega)$ 결과가 비탄성 중성자 산란으로 얻은 자기감수율과 여러 면에서 동일한 특성^[19]으로부터 IR이나 ARPES에서 얻은 자체 에너지가 보여주는 전자-전자 사이의 상호작용은 자기적인 성질을 가진 보존 즉, 스핀 요동에 의해 매개될 수 있다는 것을 시사한다. 또한 고온 초전도체의 발견 후 얼마 되지 않아 발견된 자기 공명모드^[20]와 모든 물질에 존재하는 격자진동모드인 포논^[17]이 전자-전자쌍을 이루는 중요한 힘을 매개하는 보존들로 초기에 지목되어 왔으나 그 둘은 직접적인 원인이 될 수 없고 대신 넓은 에너지 영역에 퍼져있으며 모든 도핑이나 온도 상태에 존재하는 넓은 배경(broad background)이 전자쌍을 이루는 힘이 될 수 있다는 것이 제시되었다.^[21,22] 그러나 여전

REFERENCES

- [18] T. Cuk *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 117003 (2004).
- [19] J. Hwang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 137005 (2008).
- [20] J. Rossat-Mignod *et al.*, Physica C **185**, 86 (1991).
- [21] T. Dahm *et al.*, Nature Physics **5**, 217 (2009).
- [22] J. Hwang, T. Timusk and G. D. Gu, Nature **427**, 714 (2004).

히 모든 온도와 도핑에 존재하는 포논이 고온 초전도체에서와 같이 고온 초전도체에서도 전자쌍을 이루는 매개보존으로 기여할 수 있다는 주장이 있으나 최근 동위원소를 이용한 ARPES 실험결과 분석은 포논의 기여가 $\sim 10\%$ 밖에 되지 않음을 제시하였다. 그 외 분광학에서 얻어진 $\alpha^2 F(\Omega)$ 가 포논이 존재할 수 있는 에너지 영역보다 훨씬 높은 에너지 영역까지 존재하므로 포논의 기여는 낮은 에너지 영역에 있는 $\alpha^2 F(\Omega)$ 의 일부에만 국한될 것으로 추정된다. 매개보존을 교환함으로써 전자쌍이 이루어진다는 접근방법을 반대하는 주장도 있으나, 전자쌍을 이루는 힘이 자기적인 성질을 가진 보존인 스핀 요동에 의해 매개될 것이라는 주장이 많은 연구자들에 의해 받아들여지고 있는 상황이다.

맺음말

지금까지 알아본 바와 같이 여전히 존재하는 논란에도 불구하고 분광학적 실험을 통하여 구리 산화물 기반 고온 초전도체의 기본적인 전자 구조, 초전도 갭 대칭성, 유사갭 및 쿠퍼 전자쌍의 매개체에 대한 전반적인 동의를 이루어져 가고

있는 중이다. 특히 그 동안 많은 논란이 있어왔던 초전도의 매개체가 넓은 에너지 대역에 존재하는 스핀 요동이라는 것이 받아들여지면서 고온 초전도체의 초전도 원리를 설명하는 미시적 모델을 찾기 위한 연구가 꾸준히 진행 중이다. 또한 최근 철계 고온 초전도체의 발견으로 고온 초전도체의 메커니즘을 밝히는 연구가 더욱더 활기를 띠고 있다.^[23] 하지만, 스핀 요동을 통하여 고온 초전도를 설명하려는 이론은 이미 고온 초전도가 발견된 직후부터 제안되었다는 것을 상기하여야 한다. 이에 진정한 고온 초전도 근본 원리 규명은 지금까지의 정성적 결과를 넘어서 정량적으로 임계온도를 예측할 수 있는 수준이 되어야 할 것이다. 이러한 면에서, 향후 고온 초전도의 완전한 이해에는 수치계산 기반의 이론이 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 컴퓨터의 발전과 더불어 고온 초전도의 근본 원리가 멀지 않은 미래에 규명되기를 기대해 본다.

REFERENCES

- [23] Y. Kamihira, T. Watanabe, M. Hirano and H. Hosono, J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008).