구리산화물에서 고온초전도성과 양자특이성

DOI: 10.3938/PhiT.23.012

박 기 수

High-temperature Superconductivity and Quantum Criticality in the Cuprates

Kee-Su PARK

Starting with a brief review of many of properties in cuprate physics, we describe the basic concepts, ideas and theories of high-temperature superconductivity in many complex phases of the cuprates. Two classes of theory on pseudogap phases and electric orders, as well as superconducting phase, have been claimed to exist. In the standard picture of a quantum phase transition, we construct a designing principle for a unified representation of the D-wave superconducting phase, pseudogap phases and electronic orders at a generic quantum critical point. The designing scheme will enable us to seek a unified theory of high-temperature quantum-phase transitions for transforming electronic orders and pseudogap phases into superconducting phase due to quantum fluctuations in the vicinity of a hidden quantum critical point on the cuprates.

서론: 연구주제의 중요성과 동기

구리산화물에서 고온 초전도가 발견된 후 고온초전도의 기본 원리를 이해하는 것은 상당히 흥미 있고 중요한 연구 주제이다.^[1,2] 특히 양자역학을 기반으로 일반적인 양자특이점에서 낮은 에너지 물리학으로부터 높은 에너지로 올라가면서 다양한

질서들 혹은 위상들이 나타나는 양자물질의 기본법칙을 이해하고 고온초전도의 근본원리와 복잡한 질서 내지 위상들의 근본문제를 연구하는 것은 매우 소중하다. 다체계 물리학의 기반 위에서 다양한 전기 및 자기적인 질서들과 고온초전도의 상호 연관된 관계성을 찾고 강한 상호작용 하에서 쿠퍼전자쌍(Cooper electron pairing) 문제의 기본원리를 정립하여 페어링 매개물질(pairing glue)의 근원을 이해하는 측면에서 구리산화물의 고온초전도성을 공부하는 것은 매우 중요하다.

양자특이점은 과거 20 – 30년 동안 매우 흥미 있는 연구 주제이다. 온도가 0 K인 조건들에서 물리계가 특정한 한계점에 도달했을 때 양자 변동(quantum fluctuation)들은 가장 강하고 그리고 이 강한 양자 변동들은 물질상태들을 불안하게 만든다. 다체계 물리학과 양자상전이 현상들의 기반 하에서 낮은 에너지들로부터 나타나는 다양한 질서들과 위상들은 양자특이점들의 물질들로부터 상당히 심오한 영향을 받게 된다.^[2] 특히 구리산화물을 포함하여 금속전이 산화물의 고온초전도성, 준틈새(pseudogap) 위상들과 다양한 질서들에 숨겨진 양자 임계현상과 양자 임계점을 연구하는 것은 매우 중요하다.

이 특집에서는 구리산화물에서 양자역학의 근본과 EPR(Einstein, Podolsky, Rosen; 양자상태의 두 대상들이 적당한 거리를 유지하면서 유령 같은 작용(the spooky action at a distance)을 토대로 형성하는 비국소적인(nonlocal) 관계의 양자 얽힘의 양자 얽힘 문제^[3]를 토대로 구리산화물 고온초전도의 다양한 특성들과 이론들을 폭넓게 살펴보고 양자물질의 다양하고 복잡한 위상들과 질서들을 전반적으로 간략하게 조사한다. 복잡한 질서들과 위상들이 고온 초전도와 뒤얽히고 설킨 상태에서 고온 초전도성과 양자 특이점의 근본원리를 이해하려

저자약력

박기수 박사는 일리노이 대학(Urbana-Champaign)에서 2001년 이학박사(고체물리) 학위를 받고 현재 포항공대 전기전자과에 재직 중이며, 응집물리, 양자생물, 수리물리, 양자장론, 양자철학 분야들이 연구의 주 관심사다. (kpark@postech.ac.kr)

REFERENCES

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller, Z. Phys. B **64**, 189 (1986).
- [2] M. R. Norman, Science **332**, 196 (2011).
- [3] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935); S. Sachdev, Scientific American **308**, 44 (2013).

고 한다. 구리산화물의 양자위상전이 현상들과 다양한 이론들을 바탕으로 전이금속산화물들에서 나타나는 복잡한 위상들의 질서들을 하나로 통합하는 디자인 원리(designing principle)를 정립하는 문제를 간단하게 다룬다. 그리고 구리산화물초전도의 숨겨진 양자특이점 근처에서 양자변동들에 의해 준틈새 상태들과 다양한 위상질서들이 높은 온도에서 D-wave 고온 초전도로 통합하는 양자임계현상의 근원문제를 논의하고자 한다. 그리고 이 특집은 제한된 공간에 고온초전도와 양자특이점에 초점을 맞추어 주제를 다루다 보니 고온초전도에 상당히 훌륭한 많은 기여들이 있었으나 소개하지 못한 부분들이 있다는 것을 언급하고 본론에 들어가기로 하자.

고온 초전도의 구리산화물

1. 전자구조 및 다양한 특성들

1986년 독일의 쾰히(Zürich)에 있는 아이비엠(IBM) 연구소의 작은 실험실에서 여러 층의 평면 전자구조들로 형성된 구리산화물 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 에서 초전도 전이 임계온도가 거의 40 K에 도달하는 고온초전도가 베드놀츠(Bednorz)와 뮐러(Müller)에 의해 발견되었다.^[1] 처음에 이 결과는 큰 주목을 받지 못했다. 왜냐하면 과거에도 이런 유형의 실험결과들이 상당히 많았지만 다 거짓으로 판명되었기 때문이었다. 그러나 일본의 다나카 그룹(Tanaka group)을 포함하여 여러 실험실에서 다양한 관측들을 통해서 금속산화물 고온 초전도가 자연에 존재한다는 사실을 실험적으로 증명하게 되었다. 이 검증이 이루어진 후에 전 세계의 응집물리 연구자들은 산화물의 고온초전도성의 발견에 큰 충격과 함께 새로운 물리학의 도래에 흥분되어 있었다. 최초로 고온초전도가 발견된 후 1987년 추(P. Chu) 그룹에서 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 의 구리산화물에서 초전도 임계온도가 액화질소온도보다 높은 90 K 위로 올라가는 획기적인 전기가 마련되었고 외부에서 압력을 가해줄 때 임계온도가 164 K 까지 올라가는 고온초전도가 관측되었다.

구리산화물에서 초전도가 발견된 이후 현재까지 다양한 흥미 있는 새로운 이슈들이 제기되었고 아직도 해결되지 않고 논란의 중심에 있는 여러 이슈들이 있지만 전반적으로 큰 틀에서는 잘 이해되고 있다. 구리산화물들에서 큰 논란의 여지없이 잘 알려진 고온 초전도의 전자구조 및 다양한 특성들을 먼저 살펴보고 현재 활발하게 진행되는 연구주제들은 뒤에서 다루도록 하자.

구리산화물은 2차원 평면들로 형성되었고 각 평면은 CuO_2 단위 셀들로 구성되어 있다. CuO_2 평면의 기본 전자구조는 구리 3d와 산소 2p 오비탈들에 의해서 대부분이 결정된다. 여

Fig. 1. Crystal structures of cuprates: electron doped cuprate $\text{RE}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ vs. hole doped cuprate $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.^[4]

기서 구리의 $d_{x^2-y^2}$ 오비탈은 각 위치에 존재하는 쿨롱작용 힘들에 의해서 에너지를 토대로 전자들이 하나나 혹은 둘로 배열된다. 이와 같은 전자구조 배열 때문에 구리와 구리 사이에서 서로 초교환(superexchange)을 통하여 강한 반강자성의 특성을 갖게 되고 동시에 전하와 전하 사이에 강한 상호작용에 의해 전기가 통하지 않는 전하전달(charge-transfer) 모트부도체(Mott insulator)라는 물질이 자연에 존재하게 된다. 모트부도체에서 홀 도핑은 산소 원자들로부터 전자들을 제거할 때에 만들어진다. 홀 도핑은 CuO_2 홀들의 수를 의미하고 이 홀들을 x 로 표현하자. 홀을 도핑할 경우에 다양한 위상들이 모트의 부도체로부터 나타나고 x 에 관한 함수로 위상들의 그림을 개략적으로 그릴 수 있다. 반강자성체는 $x < 2 - 5\%$ 일 경우에 나타나고 초전도는 $5 - 10\% < x < 25 - 30\%$ 의 도핑범위에서 나타난다. 그리고 $x > 25 - 30\%$ 일 때 페르미 액체 상태가 된다. 가장 높은 초전도 임계온도 T_c 는 소위 최고도핑인 $x \sim 16\%$ 정도에서 일어난다.

다음은 구리산화물 초전도의 일반적인 특성들을 살펴보자. 조셉슨 효과(Josephson effect)와 자속 양자화(flux quantization)를 측정하는 실험 방법들을 바탕으로 구리산화물 초전도들에서 이 물리량들을 관측하면 낮은 들뜬 에너지 영역에서 전자들이 서로 상호작용하여 쿠퍼쌍(Cooper pair)들을 형성하면서 전하가 $2e$ 인 보손들을 만들어 초전도에 기여하고 동시에 10^{23} 개의 모든 쿠퍼쌍들이 똑같은 기저상태의 파동함수에 들어가게 된다. 이때에 전자들은 2차원 구리산화물 평면들에 존재하면서 고온초전도의 기본원리(fundamental mechanism)를 대부분 결정한다. 그리고 여러 층으로 형성된 구리산화물들은 각 층이 독립적으로 쿠퍼전자쌍들을 형성한다. 쿠퍼쌍들을 만드는 중요

REFERENCES

- [4] N. P. Armitage *et al.*, Rev. Mod. Phys. **82**, 2421 (2010).

Fig. 2. Schematic diagrams of various phases on the high temperature cuprates.^[7,8]

한 근본원리는 아직 완전하게 정립되지는 않았지만 몇 가지 중요한 후보이론들을 토대로 논쟁 중이며 전자와 이온들의 상호작용을 기본토대로 하는 고전초전도의 BCS(Bardeen, Cooper, Scieffer) 쿠퍼쌍 기본원리가 적용되지 않는다.^[5,6] 구리산화물들의 쿠퍼전자쌍들이 갖고 있는 고유한 스핀양자상태는 스핀 단쌍(spin singlet)을 형성하고 D-wave의 대칭성을 갖고 있다. 이들의 크기는 10 – 30 Å 정도로 보스 아인슈타인 압축(Bose-Einstein condensation)과 BCS 초전도 중간 정도의 크기이다. 그리고 이 전자쌍들은 BCS 쿠퍼쌍들과 같이 시간역전환 상태(time-reversed states)들의 시간대칭성을 갖고 있는 전자들로 만들어진다.

2. 다양한 위상들과 복잡성

구리산화물은 다양한 상호작용들을 갖고 있는 복잡전자계이다. 구리 복잡계에 전자나 혹은 홀로 도핑을 하게 되면 반강자성의 닐(Neel) 정돈상태가 깨지게 된다. 먼저 구리산화물에 홀을 도핑하고 온도를 변화시키면서 다양한 실험 방법들로 고온 초전도들을 측정하면 닐(Neel) 강자성이 깨진 후 다양하고 복

Fig. 3. Intrinsic complexity and various mysterious phases of quantum matter emerging from the high temperature superconductors in a schematic diagram of temperature T (y -axis) with respect to chemical doping y (x -axis).^[9]

잡한 물리적인 위상들이 나타난다. 복잡한 위상들을 온도와 도핑의 함수들로 그리게 되면 다양한 영역들이 그림 2, 3들에서 보여주는 것과 같이 나타난다. 특히 고온초전도의 복잡성과 위상들을 다르게 해석할 때 물리적인 특성들이 그림 3에서 보듯이 온도와 도핑의 함수들이 다른 형태들로 나타난다. 그림 3 하단에 비대칭이고 홈이 약간 파인 반타원형의 D-wave 초전도 위상이 나타나고 그리고 초전도 임계온도가 가장 높은 위치에 대응되는 도핑 값을 x_{max} 라 표시하자. 이 값을 중심으로 도핑을 증가하면서 오른쪽으로 수송현상들의 특성들을 측정할 때 페르미 액체이론을 만족하지 않는 이상한(strange) 혹은 나쁜(bad) 금속의 위상상태가 존재한다. 방금 언급한 금속의 영역으로부터 부정합 전하밀도와 질서(incommensurate charge-density-wave order)가 나타나 초전도상태 영역으로 들어가 이 밀도와 질서가 초전도와 서로 서로 뒤얹히면서 존재한다. 계속해서 도핑을 통해 오른쪽으로 접근할 때 페르미 액체이론을 따르는 영역과 이 이론을 만족하지 않는 영역들이 그림 2와 그림 3에서 보여주는 것과 같이 구리산화물들에 따라서 좋은 혹은 나쁜 금속 상태들이 존재한다. 초전도상태의 가장 오른쪽

REFERENCES

- [5] H. K. Onnes, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden 120b, 122b and 124c (1911).
- [6] J. Bardeen *et al.*, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).
- [7] M. R. Norman *et al.*, Ads. Phys. Phys. **54**, 715 (2005).
- [8] N. E. Hussey, J. Phys. Condens. Matter **20**, 123201 (2008).
- [9] E. Fradkin *et al.*, Nature Phys. **8**, 864 (2012).

끝 지점으로부터 도핑을 증가하면 페르미 액체이론을 따르는 영역이 나타난다.

초전도 상전이온도가 최고인 지점으로부터 왼쪽으로 접근할 때 더 복잡한 위상상태들이 나타난다. 이상한 혹은 나쁜 금속 위상상태에서 온도를 준틈새 온도인 T^* 로 낮추면 준틈새 상태가 나타나고 더 낮추어 준틈새 온도와 초전도 상전이온도 사이에서 준틈새가 전하밀도와 질서와 만난다. 준틈새 온도와 T_c 사이에 다양한 위상들과 전자 질서들이 뒤얹히면서 나타나고 그리고 전하 및 스핀밀도 질서들을 포함한 많은 질서들이 이상한 혹은 나쁜 금속의 특성들을 가진다. T_c 이하에서는 숨겨진 양자특이점들 근처들에서 초전도상태, 부정합 스핀 및 전하밀도와 질서들, 네메틱(nematic) 혹은 스메틱(smectic) 질서들 그리고 준틈새가 서로 뒤얹히고 경쟁하면서 존재한다. 도핑을 감소하면서 왼쪽으로 더 접근할 때 반강자성의 모트부도체, 초전도, 정합 스핀밀도와, 스핀틈새, 네마틱 질서, 스메틱 질서, 스핀유리(spin glass)상태들이 서로 서로 공존하고 경쟁하면서 얹히고 설켜서 나타난다.

다음은 구리산화물에 전자를 도핑할 경우를 논의하기로 하자. 전자가 도핑된 구리산화물들에서도 고온초전도가 역시 일어난다. 홀을 도핑할 경우보다 전자를 가지고 구리산화물에 도핑할 때 도핑의 범위가 넓은 영역에서 정합(commensurate) 반강자성 위상이 존재한다. 전자도핑 고온초전도의 물리적인 특성들은 홀 도핑할 때와 유사하게 다양한 위상 질서들이 경쟁하고 동시에 서로 얹히고 설키면서 존재한다. 숨겨진 양자특이점 근처에서 뒤얹힌 복합위상들에 관한 기본원리를 간단히 논의하면 전자도핑 초전도위상 질서 속에 전자와 전자들 사이의 EPR 양자얹힘을 바탕으로 초전도와 스핀밀도효과가 서로 서로 뒤얹히고 경쟁하면서 반강자성과 질서가 양자특이점으로부터 나타난다. 그리고 양자특이점으로부터 금속은 이상한 금속의 특성을 갖고 초전도 질서 위로 다양한 위상들 및 질서들과 함께 나타난다. 더 흥미 있는 사실은 이상한 금속은 기본적으로 페르미 액체이론을 만족하지 않고 때로는 질량이 없는 전자들이 물리적인 특성들을 지배하고 특별한 조건들에서 뒤얹힌 다양한 상들의 질서들 속에서 보스금속(bose metal) 상태로 존재할 가능성도 있다.

고온 초전도의 기본이론들

1. RVB 이론과 EPR 양자얹힘

고온초전도가 발견된 1년 뒤에 앤더슨(P. W. Anderson)은 그가 과거 70년대에 금속전이 산화물들에서 얻은 연구 결과들을 토대로 전자와 전자 사이의 강한 쿨롱힘이 작용할 때 부도체가 되는 모트성(Mottness)을 구리화합물 초전도에 적용하

Fig. 4 Unified phase diagrams of electron doped and hole doped cuprates.^[4]

는 상당히 혁신적인 제안을 한다.^[10] 앤더슨의 주장에 의하면 구리산화물들은 준2차원(quasi-two dimensional) 물질계의 구조를 형성하고 구리 이온들은 스핀 1/2을 갖고 2차원 평면 위에 각각 위치에 규칙적으로 존재하고 구리 전자의 스핀 방향들은 위와 아래의 정반대 방향으로 향하면서 전자와 전자 사이에 양자역학적으로 스핀단쌍들을 만들어 10^{23} EPR 양자얹힘을 토대로 RVB(resonating valence bond) 상태를 제안했다. 이 RVB 가설이 갖는 독특한 특성은 강한 상호작용이 존재하는 전자물질계들에서 반강자성(antiferromagnetism)의 닐(Neel) 격자구조는 고체상태에서 녹아 스핀액체(spin liquid) 상태로 상전환이 된다고 앤더슨은 생각했었다. 앤더슨 이론을 추종하는 학파들은 이 가설을 토대로 구리산화물에 홀을 도핑할 때 스핀단쌍들이 전하를 얻게 되고 저항이 없는 초전도 상태가 된다고 보았다. 앤더슨의 기본 아이디어는 강한 상호작용에 참여하는 전자들이 집단적으로 들뜬상태들을 형성하여 스핀자유도가 1/2인 스핀온(spinon)과 전하를 가진 홀온(holon)들로 전자가 구성되어 있다는 파격적인 가설을 전제하고 있다. 그러나 구리산화물 초전도들에서 실험을 통하여 앤더슨의 파격적인 가설들을 직접적으로 검증할 수 있는 실험증거들이 제한적인 여건들에서 앤더슨의 고온초전도 기본 시나리오는 반대하는 학파와 지지하고 확장하는 학파들로 나누어지게 되었다.

1990년대에 앤더슨을 포함하여 젊은 소장파들을 중심으로 RVB이론은 좀 더 발전하여 스핀온과 홀온들로 나누어진다는 가정 하에서 스핀온들은 페르미 표면을 형성하고 전자나 혹은 홀을 가지고 도핑을 하게 되면 가장 낮은 에너지의 기저상태는 스핀단쌍(spin singlet)들로 구성된 D-wave 액체 상태가 된

REFERENCES

- [10] P. W. Anderson, Science **235**, 1196 (1987).

다고 제안하게 된다. D-wave 스핀액체들은 온도와 도핑의 조건에 따라서 스핀 들뜬 스펙트럼 속에서 D-wave 에너지 틈새(gap)를 만든다. 전하를 가진 홀온들은 상결합(phase coherence)의 특성을 갖고 있으며 페르미 액체이론(Fermi liquid theory)을 잘 만족한다. 그리고 도핑을 조절하면서 온도를 초전도 임계온도 이하로 낮추면 스핀과 전하가 재결합하여 D-wave 초전도가 그림 2에서 보여주는 것과 같이 다양한 위상들과 함께 나타난다는 것이 앤더슨의 RVB이론을 토대로 한 고온초전도의 기본 이론이다.^[11]

2. 스핀 변동 이론과 EPR 양자얽힘

반면에 양자역학의 기본 법칙과 EPR 양자얽힘을 만족하는 전통적인 BCS 초전도이론을 기반으로 구리산화물 고온초전도를 이해하려는 노력들이 란다우(Landau) 학파와 바딘(Bardeen) 학파들을 중심으로 초유체의 헬륨과 무거운 페르미온 초전도들의 연구결과를 바탕으로 전자들의 쿠퍼쌍을 매개하는 물질(pairing glue)을 포논(phonon) 대신에 매우 강한 전자와 전자 사이의 당기는 힘을 매개하는 비포논의 전자쌍 매개체를 고려하는 것이었다. 여러 아이디어들이 제시되었지만 강력한 좋은 아이디어는 전자스핀 변동 이론(spin fluctuation theory)이었다. 그리고 1985년 무거운 페르미온 초전도체의 비탄성 중성자 산란실험에서 강한 반강자성 스핀 관계성들이 관측되었고 대부분 무거운 페르미온 초전도는 반자성특성을 갖고 있고 일부는 초전도와 공존하고 있었다. 1986년에 반강자성 스핀변동(antiferromagnetic spin fluctuation)들이 D-wave 초전도성의 근원이라는 이론이 제시된다.^[12-14]

이 이론들을 확장하여 파인즈(D. Pines)와 스칼라피노(D. Scalapino)가 구리산화물 초전도의 쿠퍼쌍 매개체는 반강자성 스핀 변동들의 교환에 의해서 진행된다는 이론을 1990년에 제시했다.^[15] 무작위 위상 근사방법을 토대로 동력(dynamical) 스핀감수율을 계산하면 페어링 작용은 스핀감수율에 비례한다. 국소 밀도근사 방법(LDA)으로 구리의 페르미 표면을 계산하면 등우리(nesting) 특성들을 갖게 된다. 이 같은 등우리 특성들은 운동량이 큰 부분들에서 스핀 변동들을 강하게 증가시키고 그리고 스핀변동들을 연결하고 교환하는 쿠퍼전자쌍의 작용 힘들은 운동량의 함수가 된다. 방금 언급한 스핀변동량들은 D-wave 초전도상태의 질서 변수들을 크게 증진시키고 더 좋아지게 만든다. 위상에 민감한 실험 방법들을 바탕으로 구리산화물 고온 초전도성의 페어링 대칭성을 측정한 결과 D-wave로 검증되면서 반강자성 스핀변동이론들이 좀더 신뢰를 얻게 되었다. 그러나 여전히 고온초전도의 쿠퍼전자쌍 기본원리와 페어링 매개체는 완전히 해결되지 못하고 그 근원에 대해서는 논쟁 중이다.

양자물질의 복잡성: 준틈새와 전자 질서들

준틈새(pseudogap)는 보통 페르미 표면에 부분적으로 틈이 생기고 자라면서 금속이 부도체가 되는 현상이다. 그러나 구리산화물의 준틈새는 도핑이 낮은 구리산화물 초전도들의 대부분에서 나타나는 기본 특성이며 쿠퍼전자쌍의 근원원리를 이해하는 아주 중요한 문제이다.^[16] 일반적으로 BCS 초전도들은 초전도 전이가 되는 T_c 에서 초전도 틈새가 열리면서 2Δ 의 에너지 틈새가 갑자기 나타난다. 그러나 구리산화물 고온 초전도들은 초전도 상태가 되는 T_c 보다도 상당히 높은 온도인 준틈새 온도, T^* 에서 2Δ 의 에너지 틈새가 형성된다. 구리산화물들의 T^* 에서 나타나는 에너지 틈새 상태들은 양자이론과 EPR 양자얽힘의 근원을 토대로 고온 초전도성의 쿠퍼전자쌍 기본원리와 초전도가 되기 전인 정상상태(normal state)의 근원적인 양자물질의 특성들과 아주 밀접하게 연결되어 있다. 이 준틈새들은 다양한 실험들을 통해서 관측되었고 잘 이해가 되지 않는 매우 중요하고 흥미 있는 연구주제이다.^[16]

각분해방출 스펙트럼(ARPES)실험, 스펙트럼 터널측정(STM) 방법, AC 및 DC 수송현상과 광학 측정 방법, 비탄성 중성자 산란실험들, 핵자기공명(NMR) 실험기법들을 바탕으로 T^* 에서 측정된 준틈새들은 크게 2가지 유형의 틈새상태들로 분류할 수 있다. 이 양자물질 유형 중의 하나는 T^* 에서 초전도가 되기 전에 쿠퍼전자쌍이 미리 형성된 예비전자쌍(preformed pair)의 예비초전도(precursor) 양자물질로 생각하는 학파가 있다. 또 다른 학파는 준틈새들의 실험 결과들을 완전히 다르게 해석하는 유형의 학파로서 고온 초전도성의 쿠퍼쌍 기본원리와는 관계없는 초전도 전단계인 정상상태가 갖고 있는 고유한 양자물질의 복잡한 물리적인 특성들이 나타나고 있다고 생각한다.

고온 초전도의 RVB이론을 선호하는 학파는 첫 번째 유형의 해석을 바탕으로 준틈새를 예비전자쌍 이론을 바탕으로 D-wave 스핀틈새로 표현하여 준틈새가 쿠퍼전자쌍의 근원으로 보고 초전도의 틈새와 준틈새는 같다는 하나의 틈새이론을 제안한다. 반면에 스핀변동이론들을 추구하는 학파는 두 번째 유형의 해석을 통해서 초전도의 틈새와 준틈새는 다르다는 두 개의 틈새 이론을 제시한다. 특히 두 가지의 준틈새들 중에 하나는 초

REFERENCES

- [11] P. Lee *et al.*, Rev. Mod. Phys. **78**, 17 (2006).
- [12] K. Miyake *et al.*, Phys. Rev. B **34**, 6554 (1986).
- [13] M. T. Bael-Monod *et al.*, Phys. Rev. B **34**, 7716 (1986).
- [14] D. J. Scalapino *et al.*, Phys. Rev. B **34**, 8190 (1986).
- [15] N. E. Bickers *et al.*, Phys. Rev. Lett. **62**, 961 (1989).
- [16] T. Timusk and B. Statt, Rep. Prog. Phys. **62**, 61 (1999).

전도 틈새의 근원으로 보고 에리아슈버그(Eliashberg)의 공식을 바탕으로 반강자성의 스핀변동 및 교환들에 의해서 스핀틈새를 포함해 다양한 쿠퍼쌍 매개물질들이 형성된다고 보고 있다. 그러나 스핀변동이론을 추구하는 일부의 연구자들은 하나의 틈새 시나리오를 주장하는 전문가들도 있다. 대체로 준틈새의 물리학을 두 번째 유형으로 해석하는 학파는 두 개의 준틈새 이론을 추구한다.

일반적으로 준틈새 물리학을 접근하는 많은 전문가들은 다양한 전기 및 자기적인 질서들과 복잡한 위상 질서들은 대칭성들과 밀접하게 연결되어 있다고 보고 있다. 구리산화물의 복잡한 물리적인 질서들과 위상들은 대칭성들이 깨지면서 다양하고 복잡하게 뒤얽히고 공존하면서 때로는 경쟁하면서 존재한다. 그러므로 대칭성들의 기본원리를 바탕으로 복잡한 위상들을 하나로 통합하는 디자인 기본원리를 수립하여 자연의 복잡성을 정리함으로써 복잡한 고온 초전도 물리학의 근원을 이해하는데 매우 중요하다. 예를 들면 정사각형격자의 4배 회전대칭성이 2배 회전대칭성으로 깨지면서 형성되는 네마틱(nematic)상태나 혹은 구리와 2개의 산소가 만든 단위 셀들로부터 시간대칭성이 깨지면서 나타나는 오비탈 루프전기가 생성하는 반강자성의 근원을 찾는 문제가 좋은 예이다.

고온초전도의 중요 이론들

지금까지 토론했던 구리산화물 고온 초전도는 매우 복잡하고 다양한 상들의 질서들로 존재하고 있다는 사실을 설명했다. 복잡한 문제를 단순화하는 가장 중요한 원리는 대칭성과 양자역학을 토대로 자연으로부터 나타나는 복잡한 위상질서들의 대칭성을 찾고 복잡한 질서들의 통합된 표현방법들을 수립하는 것이다. 통합된 디자인 기본원리를 정리하기 전에 구리산화물의 고온초전도 안에서 발전시킨 중요 이론들을 살펴보자. 먼저 구리산화물의 초창기 이론은 쿨롱척력을 가진 정사각형격자 위에 도입한 허바드모델(Hubbard model)을 기본모델로 정의하고 원자크기의 미시계를 기술하는 해밀토니안(Hamiltonian)으로 CuO_2 평면의 물리적인 현상들을 표현한다. 강한 상호작용을 하는 영역에서는 이 허바드모델은 가장 간단한 t-J 모델로 표현된다. 구리산화물의 물리는 낮은 에너지 영역에서 물리적인 전자 연산자를 전기전하를 갖고 있는 노예보손(slave boson)인 전하입자(chargeon)와 스핀이 1/2인 페르미온인 스핀온의 곱으로 노예보손 기술 방법을 도입하여 표현하자. 이때 나타나는 게이지 장(emergent gauge field)은 전하입자와 스핀온(spinon)에 아주 강하게 상호 작용한다. 게이지 이론을 토대로 게이지 대칭성들을 효율적으로 조절하면서 노예보손 평균장 이론들을 바탕으로 고온초전도이론을 이(P. Lee)와 웬(X.-G. Wen)이 입

안했다.^[11] 그리고 유사한 방법으로 위그만(P. Wiegmann) 및 후레드킨(E. Fradkin)도 그들의 동료들과 함께 고온초전도에 연관된 기초이론을 제시하였다.

아홀렉트(I. Affleck)와 마스돈(B. Marsdon)은 D-wave 초전도 이외에 비틀거리는 자속위상(staggered flux phase)이 보존평균장 이론 안에서 이론적으로 존재한다고 제안한다. 이 자속위상이 비자성의 전기들을 정사각형 격자구조의 장식판(plaquette) 위에 비틀거리는 형태로 유도된다. 투영된 대칭성 표현방법(projected symmetry representation)을 바탕으로 D-wave 초전도와 자속위상들은 게이지이론에 관한 표현공간의 부피를 증가시키면 자연스럽게 게이지 변환들을 보존하는 고온초전도이론을 갖게 된다. 이때 도핑을 하게 되면 게이지가 보존되는 조건들이 제거되면서 자속위상과 D-wave 초전도 사이에 서로 서로 경쟁관계를 갖고 SU(2) 게이지 표현방법 안에서 들뜬 상태의 자속들이 초전도 안에서 집단적으로 진동하는 모드들이 존재해야 한다고 제안되었다.

그리고 나약(C. Nayak)은 좀더 일반적인 조건들에서 비틀거리는 자속위상들의 조건들을 찾아 초전도에서 앤더슨이 개발한 준스핀 SU(2) 표현 방법을 토대로 전자와 전자의 쿠퍼쌍 채널에서 초전도를 고려하고 전자와 홀의 채널에서 전하밀도파를 표현하는 방법을 이용하여 D-wave 초전도의 SU(2) 표현 방법에 대응하는 D-밀도파(D-density wave)가 자연에 존재한다고 제안했었다. 이 D-밀도파질서는 초전도와 경쟁하는 숨겨진 준틈새 질서의 근원으로 주장하지만 아직 실험적으로 검증되지 않는 이론이다.

자넨(J. Zaanen)을 포함하여 에머리(Emery), 키벨손(S. Kivelson) 그리고 후레드킨(E. Fradkin)이 전이금속 산화물의 초전도는 전자와 전자 사이의 상호작용을 포함하여 다양한 힘들이 작용하여 상당히 복잡한 관계성을 토대로 아주 복잡한 위상들의 전자질서들을 구성한다고 제안하였다. 그들의 중요한 아이디어는 도핑하기 전에는 구리산화물의 공간들은 전자와 전자들간의 강한 쿨롱 힘과 반강자성체가 공간 전체에 존재한다. 그러나 도핑을 하게 되면 전체의 힐버트 공간들이 쿨롱 힘이 밀어내는 영역들과 서로 서로 당기는 공간으로 나누어진다. 이때 나타나는 다양한 힘들에 의해서 나노 및 중시계 영역에서 병진(translation)과 회전(rotation)대칭성들을 토대로 위상 분리현상(phase separation)들이 일어난다고 보고 네마틱 질서, 스메틱(smectic) 질서, 스핀밀도 줄무늬질서(stripe order), 전하밀도 줄무늬질서 그리고 그들간의 복합체들로 금속산화물 초전도에 존재한다고 제안했다.^[17]

REFERENCES

- [17] S. A. Kivelson *et al.*, Nature **393**, 550 (1998).

고온 초전도 양자 임계성

고온 초전도 물리학에서 양자 임계성이 연구의 주요 관심사로 주목하게 된 계기는 앤더슨이 모트성(Mottness)과 판 블랙(van Vleck)의 자성을 바탕으로 구리산화물 초전도의 자기적인 특성들은 RVB이론을 바탕으로 이해해야만 한다고 주장했던 것이 중요한 동기가 되었다. 앤더슨의 주장을 반박하는 이론을 차크라바티(S. Chakravarty), 넬슨(D. Nelson) 그리고 할퍼린(B. Halperin) (CNH) 등이 O(3) 양자 비선형시그마 모델(quantum nonlinear sigma model)을 1988-89년 제안한다.^[18] CNH의 기본 철학은 구리산화물의 양자자기성질은 양자진행과정(quantum procession)의 준고전(semiclassical) 방법에 의해서 나타난다고 보았다. 그리고 낮은 에너지 물리학의 영역 안에서 온도가 0 K인 경우에 잘 만족하는 양자역학적인 축척불변성(scale invariance)을 토대로 낮은 에너지가 지배하는 물리적인 현상들을 통제 및 조절하면서 온도를 증가하면 양자임계점의 원뿔 영역으로 들어가는 양자상전이 현상들의 중요한 아이디어를 CNH가 제안했다.

양자상전이 이론이 제기된 후 1992-93년 사츠데프(S. Sachdev)와 추브코브(A. V. Chubkov)가 비선형 시그마 모델의 양자상전이 이론의 확장을 시도한다. 그리고 동시에 도핑이 낮은 구리산화물 초전도에 이 시그마 모델을 응용하여 핵자기공명(NMR) 실험 결과들에 관한 이론적인 해석을 하게 된다. 이 주제는 고온초전도를 연구하는 많은 전문가들에게 널리 알려지게 되었고 사츠데프와 그의 연구 동료들은 고온초전도를 포함하여 다양한 물리시스템들에 양자임계이론들을 발전시키는 기여를 하게 된다.^[19]

1990년대 중반 이후에 창(S. C. Zhang)과 뎀러(E. Demler)가 파인즈-스칼라피노의 반강자성 스핀 변동 혹은 교환이론과 비선형시그마 모델을 바탕으로 구리산화물 고온 초전도의 비탄성 중성자 산란(neutron scattering) 실험결과들을 해석하여 초전도질서와 스핀밀도와 질서들이 뒤얹히고 공존하는 비선형 시그마 SO(5) 모델을 제시하나 중성자 실험결과들 이외의 다른 실험결과들은 잘 설명되지 않는 모델로서 고온에너지 물리학분야에서 인스턴톤(instanton) 초전도 이론으로 이미 잘 알려진 모델이다.

양자 임계성과 복합위상 통합이론

고온 초전도의 합의된 이론이 없지만 위에서 언급한 다양한 위상들이 뒤얹히고 공존하면서 경쟁하는 관계성을 이해하고 그리고 초전도 질서와 준틈새 질서들의 대칭성들을 바탕으로 양자 임계성과 복합위상 질서들의 통합이론을 생각하기로 하자.

구리산화물이 갖고 있는 전기적인 구조가 복잡하기 때문에 2가지 큰 종류로 나누어 생각하자. D-wave 초전도 질서를 형성하는 양자물질을 DG라 부르고 준틈새 상태들과 그리고 모든 질서들을 만드는 양자물질들을 PG라 표현하자. PG 양자물질 상태들은 초전도의 쿠퍼전자쌍 원리와 관계없이 초전도와 공존하고, 경쟁관계를 가지면서, 그리고 서로서로 뒤엎어서 형성하는 물질 상태들로 DG를 제외한 물질들의 모든 대상들로 정의하자. DG 물질의 특성은 초전도에 대응되는 대칭성이 깨질 경우에 쿠퍼전자쌍을 만들고 EPR 양자얽힘을 만족하는 준입자들의 양자물질로서 U(1) 게이지 대칭성을 갖고 있다. 대칭성과 양자역학의 기본법칙을 토대로 PG물질들을 디자인하고 표현하는 힐버트 공간을 M이라 정의하자. M공간 위에 DG와 PG를 통합하는 디자인 근본원리로서 시간대칭성을 포함하고, 회전대칭성과 연관된 네메틱, 회전 및 병진 대칭성들과 연관된 스메틱, 스핀밀도, 전하밀도 등으로 구성된 N 개 성분의 양자물질들을 다양한 표현방법들 중에 하나로서 SO(N) 대칭성을 이용하여 DG와 PG의 양자물질들을 표현하자. 여기서 N 은 $N = \sum_i^n \sum_\alpha^3 N_{i,\alpha}$ 로 정의된다. 그리고 디자인 근본원리의 란다우 자유에너지는 $F = (X_x, X_y, X_z, Y_{1,x}, Y_{1,y}, Y_{1,z}, \dots, Y_{n-1,x}, Y_{n-1,y}, Y_{n-1,z})$ 로 표현하자. 임의의 $\alpha = x, y, z$ 와 $i = 1, \dots, n-1$ 일 경우에 란다우 에너지함수 안에 X_α 와 $Y_{i,\alpha}$ 는 각각 DG와 PG에 속하는 양자물질들의 질서들이다.

예를 들면 초전도와 스핀밀도와 질서와는 SO(5) 대칭성으로 표현하고 그리고 최근에 구리산화물의 x-ray에서 발견된 부정합 전하밀도와 질서와 초전도는 디자인원리 표현방법 하에서 SO(6) 대칭성으로 쓸 수 있다. 낮은 에너지 물리학 범주 안에서 일반적인 양자특이점 근처로부터 나타나는 부정합 D-wave bond 질서와 D-wave 초전도와는 2개의 SO(4) 회전대칭성들을 토대로 표현된다. 이 회전대칭성들은 앞에서 이미 소개했던 다양한 이론들 중에 모트부도체(Mott insulator)에 관한 준스핀 SU(2)게이지 불변들의 이론들과 밀접하게 연결된다. 따라서 논의중인 대칭성들을 토대로 CNH의 비선형시그마모델을 확장하여 일반적인 양자특이점 근처에서 고온초전도 위상과 준틈새 및 복잡한 질서 위상들의 근원을 하나로 디자인하는 통합된 근본이론을 구축할 수 있다.

구리산화물에서 양자특이점은 초전도를 포함하여 다양한 위상들 때문에 숨겨져서 존재한다. 잘 알려진 양자 상전이 현상을 토대로 현재 토론 중에 있는 우리의 양자임계현상은 초전

REFERENCES

- [18] S. Chakravarty *et al.*, Phys. Rev. B **39**, 2344 (1989).
- [19] S. Sachdev, *Quantum Phase Transitions*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 2011).

도, 준틈새 위상들, 그리고 복잡한 밀도와 위상들을 하나로 표현하여 통합하는 디자인 근본원리를 구리산화물에서 실현할 가능성이 있다. 그러므로 구리산화물들에 숨겨진 양자특이점에서 양자변동들에 의해서 복잡한 밀도 위상들과 준틈새들이 높은 온도에서 초전도 위상 속으로 양자위상전이를 하는 근원을 이해할 것으로 본다.

결 론

구리산화물에서 고온 초전도성과 양자특이점들을 살펴보았다. 구리산화물의 구조, 일반적인 특성들, 복잡한 위상들을 기술하였다. 고온 초전도의 기본이론들을 복습하고 복잡성과 관계된 다양한 이론들을 조사해 보았다. 준틈새와 고온 초전도의 근원 문제들을 고찰하여 쿠퍼전자쌍의 근원 원리와 연결 지어 현상론적으로 2가지 준틈새들이 자연에 존재하고 하나는 초전도에 기여하고 다른 하나는 초전도와 관계없이 초전도 상전이 온도 위에서 준틈새 상태를 만든다고 보았다. 고온 초전도의 근본원리와 다양한 전자 질서들 및 준틈새들과 연관 지어 구리산화물이 갖고 있는 복잡성을 고온 초전도 안에서 통합하는 디자인 원리가 가능하고 구리산화물의 숨겨진 양자특이점에서

모든 위상들이 초전도 위상 속으로 양자상전이 현상이 가능하다고 제안했다.

구리산화물의 복잡한 질서들 속에서 고온초전도성의 물리적인 근원에 대해 합의된 이론이 없다. 일반적으로 고온 초전도성은 초전도가 되기 전의 정상상태가 불안한 상태가 형성되고 동시에 쿠퍼전자쌍들을 만들어 초전도상태로 들어간다. 쿠퍼 페어링에 관여하면서 서로 교환하는 보존매개체의 존재성에 정확한 이해가 필요하다. 에리아쉬버그(Eliashberg)공식을 토대로 제한한 보존매개체로서 반강자성 스핀변동교환, 자기공명모드, 마그논(magnon), 포논, 폴라론(polaron), 엑스톤(exton) 등이 있지만 복잡한 위상들과 강한 쿨롱 상호작용의 페어링 문제를 정확하게 이해하여야 한다. 끝으로 이 쿠퍼페어링 문제들은 양자역학의 근원문제와 그리고 EPR 모순성과 같은 자연의 근본적인 문제와 연결되어 있지 않나 생각한다.

감사의 말

이 기고는 기초과학연구자 프로그램[Grant No. 2011-0031558] 연구 후원으로 얻은 결과들을 바탕으로 나온 결과다.