강상관계 물질 연구단 소개

DOI: 10.3938/PhiT.26.001

이민철·노태원

Introduction to the Center for Correlated Electron Systems

Min-Cheol LEE and Tae Won NOH

The Center for Correlated Electron System (CCES) was established in 2012 on the campus of Seoul National University as one of the starting Institute for Basic Science (IBS) centers. The main research areas at the Center are to understand the novel ground states and the emergent phenomena in strongly correlated electron systems. We are trying our best to (1) fabricate high-quality correlated electron materials, (2) search for novel electronic phases by using structural, transport, and electrical measurements, (3) perform numerous spectroscopy and scattering experiments and (4) elucidate the newly-discovered novel phenomena. Currently, the Center (IBS-CCES) has three research groups, which are led by Prof. Tae Won Noh, Prof. Je-Geun Park, and Prof. Changyoung Kim, respectively. Additionally, it has six independent research teams, partly led by SNU professors. Four research professors, 20 post-doc researchers and 57 graduate students are working together to make new discoveries for humanity and science.

저자약력

이민철은 노태원 교수 연구실의 석박통합과정생으로, 2013년 IBS 연구단 소속 이후 강상관계 물질에서의 초고속분광학 연구를 전공으로 수학과 있다. (mclee@phy.snu.ac.kr)

노태원 교수는 미국 오하이오 주립 대학에서 1986년 고체물리학실험 전공으로 박사 학위를 취득한 이후, 1989년 귀국하여 서울대학교 교수로 현재까지 재직 중이다. 산화물 강유전체를 포함한 강상관계 물리 분야의 세계적인 전문가로서, 2010년에는 국가 과학자로 선정되었으며 2012년 물리학 분야로는 기초과학연구원 강상관계 물질 연구단장직에 선정되었다. (twnoh@snu.ac.kr)

연구단의 역사

2012년 본 연구단의 전신인 '강상관계 물질에서의 기능성 계면 연구단(Functional Interfaces of Correlated Electron Systems)'이 물리학 분야의 기초과학연구원(Institute of Basic Science: IBS) 외부연구단으로 선정되었다. 설립 초기에는 연구 단장인 필자와 박제근 교수를 중심으로 원자 단위 켄썬기 그룹(Atomic Scale Epitaxy group)과 새로운 강상관물질 그룹(Emergent Phenomena group)이 주축이 되어 연구단을 구성하였다. 서울대학교의 지원에 힘입어 자연과학대학 19동에 연구단의 기틀을 마련하였고, 본격적으로 강상관계 물질 분야의 순수기초 연구를 위한 장비 도입하고, 추가 연구 그룹 구성에 착수하였다.

이후 IBS 연구단과 같은 대형 연구 프로그램이 국내에의 강상관계 물질 관련 연구 분야 전반과 밀접한 유대관계가 필요하다는 판단 하에, 본 연구단의 이름을 현재의 '강상관계 물질 연구단(Center for Correlated Electron Systems)'으로 바꾸었다. 또한 계면 물성을 넘어 덩치 상태의 물질 연구로 그 분야를 확장하게 되었다. 2012년 설립 직후부터 서울대학교 이진호, 김미영 교수가 위탁 과제로 주사터널링현미경(Scanning Tunneling Microscope, STM)과 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)에 관한 공동연구를 진행하게 되었다. 2014년 다체계이론의 전문가인 정석범 박사가 IBS Young Scientist Fellow로 연구단 내에 독립 이론팀을 구성하게 되었다. 또한 2015년 전자 구조 측정 및 분석의 전문가인 김창영 교수가 부연구단장으로 연구단에 합류하여 본 연구단의 골격을 어느 정도 이룰 수 있었다. 2016년 초부터는 서울대학교 물리학과 양범정 교수와 신용일 교수가 '강상관계 양자물질 이론 연구팀'과 '양자 시뮬레이션 연구팀'을 형성하여, 현재의 연구단 구성에 이르게 되었다.

강상관계 물질 연구 분야는 응집물리학의 주요 분야로서 지난 70여 년 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 이에 따라 선진국에서는 응집물리학 분야의 최고의 과학자들이 모여 연구를 진행하고 있으며, 독일의 Max Plank Institute 및 일본의

RIKEN 등과 같이 우리 연구단보다 3-5배 큰 연구 집단이 이미 형성되어 오랜 동안 연구를 진행하여 왔다. 따라서 이러한 연구 분야에서 선진 연구 그룹이 유행을 일으킨 연구 주제를 따르며 이들과 직접적인 경쟁을 하는 것을 지양하는 것이 바람직하다. 우리가 독자적으로 제안한 아이디어(스핀-궤도 결합에 의한 새로운 $J_{\text{eff}}=1/2$ 기저 상태, 산화물 위상물질, 새로운 2차원 반데르발스 물질로 알려진 TMPS_3 물질, flexoelectric 현상 등)를 중심으로 창의적인 연구 주제를 발굴하여 집중적인 연구를 수행하고 있다. 더불어 우리 연구단만이 할 수 있는 새로운 측정 장비 및 기법을 개발하고 있다.

본 연구단에는 우수한 박막/단결정을 합성할 수 있는 연구자, 분광학 전문가, 그리고 이론 연구자들을 한 자리에 모아 집단 연구를 수행하기 시작하였다. 우리는 5년에 걸쳐, 최첨단의 시설을 구축하고 국내·외 우수한 강상관계 물질 연구자들을 고용하는 데 모든 노력을 기울였다. 또한 구축된 대부분의 시설을 국내 강상관계 물질 연구자들에게 개방하여, 국내 연구진들이 창의적인 아이디어를 구현하는 데 도움을 주고 있다. 연구단의 이러한 노력에 힘입어, 그간 설립 이후 활발한 연구 활동을 통해 세계적인 성과를 이룩할 수 있었다. Science, Nature, Nature Materials, Nature Physics를 비롯하여, Physical Review Letters, Advanced Materials, Applied Physics Letters, Nano Letters 등의 세계적 학술지에 지난 5년여간 총 150편의 연구 성과를 발표하였다.

강상관계 물질 연구의 필요성

1900년대 초중반 양자역학의 발전과 더불어 원자들이 주기적으로 배열되어 있는 고체에 대한 연구도 다양한 방향으로 진행되었다. 1960년대 이후 Density Functional theory를 중심으로 하여, 고체 물질의 전자구조를 전자 1개가 유효장 내에서 움직임으로 근사하여 계산하는 띠 이론(band theory)이 발전하여 왔다. 이러한 띠 이론을 통해 반도체의 물성을 예측하고 이를 이용한 소자의 디자인 및 개발이 가능케 되었고, 나아가 반도체 소자의 개발을 비롯한 다양한 응용 방면에서 활용되어 커다란 산업, 기술적 진보를 가져다주었다. 이로 인해, 띠 이론은 현대 과학 기술의 총아로 주목을 받아 왔다.

하지만 자연계에는 이처럼 성공적인 띠 이론으로 설명할 수 없는 현상들이 많이 존재하며, 강상관계 물질이 그 대표적인 예이다. 즉, 전자와 전자 사이의 Coulomb 상호작용이 중요해지면, 전자구조가 유효장 내에서 하나의 전자가 움직인다는 단일전자근사가 성립하지 않는다. 강상관계 물질에서는 전자 간의 강한 상호작용으로 인해 띠 이론으로 설명하지 못하는 새로운 물성-하나의 전자의 특성으로는 표시되지 못하는 집단

현상-이 발현된다. 고온 초전도 현상, 초거대자기저항, 강자성, 그리고 다강체 현상이 발현 현상의 대표적인 예이며, 현재까지도 그 근본 물성을 이해하기 위한 노력들이 활발히 진행되어 오고 있다. 반도체 물성의 이해를 통한 산업 사회의 혁명과 같이, 강상관계 물질에서의 발현 현상의 이해는 또 한 번의 과학 혁명을 위해 해결해야 할 필수 불가결한 과제임이 분명하다.

강상관계 물질 연구는 우리나라 응집물리학의 발전에 크게 기여하여 왔다. 1985년 고온초전도체가 Bednorz와 Müller에 의하여 발견된 이후, 전 세계적인 유행에 힘입어 우리나라 응집물리학계에서도 고온초전도체를 연구하는 연구진들이 많이 생겼다. 당시만 해도 우리나라 과학계의 연구 환경은 매우 열악하였다. 그러나 초전도 상전이온도가 매우 높은 고온초전도체를 연구하는 경우 초저온 냉각장치와 같은 고가의 기자재 없이도 연구를 수행할 수 있는 다양한 주제가 있었기에, 다양한 연구자들이 참여하여 국제 경쟁력이 있는 연구를 수행하였다. 따라서 이러한 고온초전도체 연구는 우리나라 강상관계 물질 연구의 시발점이며, 더불어 국내 응집물질물리학의 발전에 큰 기여를 하여왔다. 그러나 고온초전도체 연구의 열기가 식으면서, 우리나라의 강상관계 물질 연구 그룹들은 70여 년의 전통을 지닌 외국의 연구 그룹들과의 간격이 벌어지기 시작했다. 또한 각분해광전자분광학(Angle-resolved photoelectron spectroscopy: ARPES) 등과 같은 고가 장비들을 갖추기 어려운 국내의 연구 투자 여건 역시 이러한 간격을 벌리는 데에 기여하였다. 따라서 2010년대 초에는 국내의 우수 연구자들이 모여서 선진 연구 그룹과 경쟁할 수 있는 체제를 마련하는 것이 절실했었다.

연구단의 비전과 임무

기초과학연구원은 우리나라에서 기초과학 연구를 전담하는 최초의 국가연구기관이다. 기초과학연구원은 기초과학 분야의 발견 과학(discovery science) 연구를 수행하여, 인류 행복과 사회 발전에 기여하는 것을 비전으로 삼고 있다. 이를 통하여 미래 사회에서의 경쟁력을 확보하고, 다양한 교류 및 협력을 지원하여 세계적 수준의 연구를 진행할 수 있게 하며, 국내 다른 연구 기관과 적극적인 협력을 통해 시너지 효과를 발휘하고자 한다. 특히 수월성, 자율성, 창의성, 그리고 개방성을 추구하고 있으며, 집단연구의 시너지와 새로운 연구 도전을 목표로 하고 있다.

기초과학연구원의 비전, 임무, 철학을 바탕으로, 우리 강상관계 물질연구단의 비전과 목표를 설정하였다. 그림 1과 2에서 보여주는 바와 같이, 우리 연구단은 원자 수준의 제어와 시각

Fig. 1. Research areas and goal of IBS-CCES.

Fig. 2. Research fields of IBS-CCES.

화를 통한 다양한 시료의 제작, 정밀한 물성의 측정을 통한 새로운 발현 현상 모색, 다양한 분광학적 기법을 활용한 전자구조 연구, 실험과 연계된 이론 연구 등의 분야에서 조직적인 연구를 통해 강상관계 물질 물리에 대한 체계적인 이해를 추구하고자 한다. 그리고 이를 바탕으로 국내·외 강상관계 연구를 선도하는 구심점 역할을 할 것이다.

현재 IBS 강상관계 물질 연구단에는 설정된 연구 분야에 열정을 가진 우수 인재들이 모여 창의적인 연구를 조직적으로 수행하고 있다. 특히 우수 연구 인력들이 한 장소에 모여 상호 협력을 극대화함으로써, 시너지 효과를 높이고 있다. 또한 강상관계 국제학계 개최에 적극 참여하고 있으며, 국내외의 최첨단 장비를 활용 기회를 제공함으로써 우리나라 강상관계물리 분야의 역량을 증진시키는 데 기여하고 있다.

우리가 전 세계의 주목을 받을 수 있는 새로운 물질 상 또는 발현 현상을 발견한다면, 우리는 강상관계 연구 분야에서 세계적인 선도 연구단으로 도약할 수 있을 것이다. 또한 후속

세대를 이끌 젊은 유망 인력을 양성하고, 다양한 국내 연구진들과의 협력 연구 체계 구축을 통해 우리나라 기초과학의 발전에 구심점으로 거듭날 것이다. 그리고 더 나아가 이를 통해 인류와 사회에 공헌할 수 있을 것이다.

연구 그룹 소개

그림 2는 본 연구단의 주요 연구 분야를 체계적으로 보여주고 있다. 이러한 연구 분야를 다루기 위하여, 본 연구단에는 현재 총 3개의 실험 연구 그룹이 형성되어 있다. 제1그룹(‘강상관계 박막/이종구조’)은 노태원 교수가 중심이 되어서 고품질 산화물 박막 및 이종접합구조를 합성하고 적외선 분광학, 시간분해 들뜸 분광학 분야 연구를 수행하고 있다. 제1그룹에는 서울대학교 재료공학부의 김미영 교수가 참여하여 산화물 박막 및 이종접합구조물의 원자배열을 투사전자현미경으로 연구하고 있다. 제2그룹(‘새로운 강상관물성 그룹’)은 박제근 교수

가 그룹리더로 활동하며, 덩치시료 제작 및 물성 측정과 중성자 산란을 통한 발현 현상 탐색 연구를 수행하고 있다. 제3그룹(‘전자구조 그룹’)은 김창영 교수가 그룹 리더도 활동하며, ARPES 측정을 통하여 다양한 강상관계 물질들의 전자구조를 연구하고 있다. 또한 STM 전문가인 이진호 교수가 참여하여, 초전도체 표면에서 일어나는 발현 현상을 연구하고 있다. 각 실험연구 그룹에서 수행하는 연구 내용과 활동은 이번 특집호에서 따로 상세하게 설명하고자 한다.

3개의 연구 그룹 이외에도, 본 연구단에는 4개의 독립적인 연구팀들이 활동을 하고 있다. IBS 프로그램에는 본부에서 직접 예산을 지원을 받아 원하는 IBS 센터에 독립적인 팀을 형성할 수 있는 IBS Young Scientist Fellow 제도가 마련되어 있다. 이 프로그램 사상 첫 Fellow로 선정된 정석범 박사는 본 연구단에 합류하여 ‘다체계 이론 연구팀’을 구성하여, 강상관계 물성과 위상 물리의 다양한 현상을 다체계 이론으로 연구하고 있다. 또한 양자물질들의 위상 문제에 대한 이론적 이해를 담당하는 ‘강상관계 양자물질 이론 연구팀’(리더 양범정 교수), 밀도 함수 이론에 기반을 둔 컴퓨터 계산을 통해 다양한 물질들의 전자구조를 연구하는 ‘제일원리 계산팀’(리더 김충현 박사)이 있다. 이러한 3개의 독립적인 이론 연구팀들은 추후, 하나의 이론 그룹으로 발전시킬 예정이다. 이론 연구팀들의 연구 내용과 활동은 이번 특집호의 마지막 글에서 설명하고자 한다.

강상관계 물질로 대표되는 양자 물질은 자연계에 주로 단결정 형태로 존재하여 관측된다. 최근 다양한 실험 기법이 개발됨에 따라, 새로운 양자 물질 또는 양자상을 인위적으로 구현하고자 하는 노력들이 많이 진행되고 있다. 본 연구단의 제1그룹에서 수행하는 이중접합구조를 활용하는 접근이 그 대표적인 예이다. 한편 원자/분자물리학의 발전에 따라 원자 트랩(trap)을 활용하여 보존과 페르미온 특성을 지닌 초저온 원자 가스를 만드는 연구가 최근 많은 발전을 가지고 있다. 이렇게 만들어진 페르미온 원자 가스들을 2차원 격자 구조의 형태로 트랩하게 되면, Hubbard 모델과 같은 응집물리학의 주요한 해밀토니언에서 일어나는 물리 현상을 실험적으로 시뮬레이션할 수 있다. 이러한 초저온 원자 가스들은 다양한 물리 변수들을 제어하기가 용이한 깨끗한 물질계로 알려져 있어, 양자 다체계 현상을 연구하는 이상적인 플랫폼으로 받아들여지고 있다. 따라서 양자 시뮬레이션 연구들이 응집물질물리학의 새로운 영역으로 주목받고 있으나, 오랜 전통과 고가의 장비 등의 장벽으로 인하여 우리나라에서는 이러한 연구를 하는 연구진은 거의 없는 편이다.

다행히도 본 연구단에는 신용일 교수를 중심으로 초저온 양자 가스를 활용하여 양자 다체계 현상을 연구하는 ‘양자 시뮬레이션팀’이 있다. 4개의 독립적인 연구팀의 하나로 활동하는

In-situ ARPES system

W. Kyung and C. Kim *et al.*, Nature Materials 15, 1233 (2016)

Scanning Tunneling Microscope

S. H. Joo and J. Lee *et al.*, Nature 532, 343 (2016)

Ultrafast pump-probe spectroscopy

K. W. Kim *et al.*, Nature Materials 11, 497 (2012)

Fig. 3. State-of-art equipment in IBS-CCES.

이 연구팀은 페르미온 원자들을 레이저 빛을 이용하여 2차원 격자 형태로 트랩하여, 새로운 양자 상을 발견하거나 기존의 응집물리학이 해결하지 못한 도전적인 난제를 푸는 노력을 수행하고 있다. 특히 많은 노력을 통하여 Hubbard 모델을 구현하는 단계에 다다르고 있으며, Feshbach 공명 현상을 활용하여 전하의 Coulomb 상호작용의 크기를 조정하고 있다. 또한 다양한 실험 방법을 새로이 개발하여 2차원 페르미 가스 시스템의 양자 소용돌이(quantum vortex)를 만들어, 이들 간의 충돌 현상과 동역학적 변화에 대한 좋은 연구를 수행하여, Phys. Rev. Lett. 등의 우수 학술지에 발표하였다.

주요 장비 소개

국제 학계를 선도하기 위해서는 우리 연구단만의 자체 개발하여 연구하는 능력이 필요하다. 이러한 능력을 보유하기 위하여 본 연구단에서는 강상관계 물질 측정 및 분석을 위한 새로운 첨단 측정 장비를 자체 개발하여 운영하고 있다(그림 3). 강상관계 물질의 전자 구조를 직접적으로 관찰할 수 있는 각 분해광전자분광학(Angle-Resolved PhotoEmission Spectroscopy, ARPES) 시스템이 구축되어 있으며, *in situ*로 성장시킨

에피 박막에서의 측정이 가능하다는 차별성을 지니고 있다. 해당 장비는 김창영 교수가 이끄는 전자 구조 연구 그룹이 담당하고 있다. 더불어 이진호 교수가 구축한 초저온 고자기장 STM 장비를 통해 초전도 현상의 근간이 되는 쿠퍼쌍의 밀도파 측정 등의 초전도체의 근본 물성예의 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 구리 화합물 초전도체에서 위 방법을 적용하여 쿠퍼쌍의 밀도파를 세계 최초로 관측하였고 이 결과는 Nature지에 소개되었다.

또한 펄스 레이저 펄스를 이용한 시간 분해 분광기 장치가 해당 분야의 전문가인 충북대학교 김경완 교수의 협력 아래 연구단 내 구축이 완료되었다. 평형 상태의 측정만이 가능했던 기존 분광학 측정에서와 달리, 해당 시스템에서는 펄스초 시간 이내의 전자와 다른 자유도(궤도, 스핀, 격자)와의 실시간 상호 작용 연구가 가능케 되었고, 이는 강상관계 물질 내 발현 현상의 근본 메커니즘을 이해하는 데 새로운 시각을 부여할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

국내 연구 사회 기여

본 연구단은 강상관계 연구를 선도하는 국제적인 연구기관으로 도약을 목표로 하고 있으나, 국내의 관련 학회 및 과학계 전반에 대한 기여에도 심혈을 기울이고 있다. 우선 우리나라의 학문 후속 세대를 이끌 젊은 유망 인력을 키우는 데에 만전을 기하고 있다. 국내의 일반 대학들보다 박사 후 과정 인력(Post-doctors)들을 많이 고용하여 이들의 연구 참여도를 높임으로서, 보다 높은 수준의 연구를 수행하고 있다.

본 연구단은 강상관계 연구를 위한 다양한 기반 장비를 도입하고 관련 시설을 설치하여 운영하고 있다. 우리 IBS 연구단에 구축된 최첨단 장비들은 우리 연구단의 자산일 뿐 아니라, 우리나라의 과학자들을 위한 장비이다. 이에 따라 본 연구단은 대부분의 장비(오염 등이 우려되는 일부 장비들은 제외)

를 국내의 연구진들에게 개방하여 공동 활용하고 있다. 구체적으로 현재 우리 연구단에 설치된 60여 개의 장비 가운데, 86%에 해당하는 52개의 장비가 공동 활용이 가능한 상태이다. 특히 기자재 사용을 희망하는 외부 인력들을 위해서는, 기술지원팀에 의하여 장비에 대한 활용 및 안전 교육이 실시된다. 국내 타 연구기관에서 찾아보기 힘든 선진적인 시스템이며, 열악한 국내 기초과학계의 연구 환경을 개선하는 데에 큰 기여를 할 것으로 기대하고 있다.

마지막으로 본 연구단은 국내의 연구 분야 종사자들의 hub의 역할을 위한 많은 노력을 수행하고 있다. 한 예로, 10여 명의 국내의 젊은 교수들이 본 연구단의 세미나, 연구 모임에 참여하고 있다. 노태원, 박제근, 김창영 교수는 유전체 연구회, 양자 자성 모임, APRPES 모임 형성을 주도하여, 국내 연구자들의 다양한 인적 교류 네트워크 형성을 꾀하고 있다. 그리고 Workshop on Oxide Heterostructure를 매해 서울대에서 개최하고 있으며, 아태이론물리센터, 고등과학원, IBS 원자제어저자원 전자계 연구단과 함께 매년 Quantum Materials Symposium을 후원하고 있다.

맺는 말

강상관계 물질 연구단은 전략적인 연구 분야에서 발견 과학(discovery science) 연구를 수행하여, 새로운 물질상이나 발현 현상을 발견하고 그 근본 원리를 규명하여 응용 가능성을 제시하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 본 연구단에는 산화물 이중구조, 고체분광학, 중성자 산란, ARPES, STM, TEM, 초저온 양자 가스 분야의 실험 학자들이 참여하고 있으며, 여러 이론 학자들과 함께 한 장소에서 공동연구를 수행하고 있다. 이를 통해 우리 연구단은 국제학계에서의 가시성을 높이고 학계를 선도하는 그룹으로 발돋움하고자 하며, 우리나라의 기초과학의 전통을 새로이 정립하고자 한다.