



Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems (CALDES)

CONTENTS

단장 인사말 Message from Director	03
올해의 성과 2017 Achievement	04
연구단 조직 CALDES Structure	04
연구성과 Research Highlight	05
연구논문 Research Papers	13
해외 학술발표 International Conference Presentations	14
연구협력 Collaborations	16
학술회의 개최 Conferences Hosted	18
주요장비 & 연구시설 Equipment & Research Facilities	18
연구비 집행 Research Expenses	20
주요장비 & 시설현황 Equipments & Facilities	21
연구단 구성 CALDES Members (2018.2)	22
연구단 활동 Activities	23

단장 인사말 Message from Director



원자제어 저차원 전자계 연구단은 저차원 위상물질과 새로운 저차원 전자계 연구에 있어서의 한계 상황을 국제적인 선도성과 경쟁력을 가지고 있는 원자수준의 저차원 물질계 제작, 제어 및 물성 측정기술, 그리고 창의적인 신개념을 바탕으로 돌파하여 응집물질물리 연구에 새로운 장을 열고자 합니다.

CALDES challenges the major physics problems of low dimensional electronic materials that have been the central issues of modern condensed matter physics since 1970's. In this long pursued discipline with the glory of quantum Hall effects, high temperature superconductors, and graphene, CALDES would pioneer new types of materials with state-of-the-art measurement technologies.

The new materials systems are low dimensional systems controlled and grown in atomic scale precision, such as atomic layers, atomic wires, atomic rods, and, in particular, their heterointerfaces. The state-of-the-art measurement technologies include scanning tunneling microscopy below 10mK, and ultra bright spin-and angle-resolved photoelectron spectroscopy.

These frontier instruments can address the electronic and spintronic properties of atomic-scale low dimensional systems in truly single atom and single spin precision. With the atomically controlled low dimensional materials under atomically-resolved probes, CALDES investigates and manipulates exotic electronic and spin channels and topological excitations such as solitons, quantum spin Hall edge states, non Fermi liquids, skyrmions, quantum spin liquids and so on. CALDES aims to establish full understanding of these low dimensional electronic phenomena and to discover new physics and new functionality emerging from atomically designed low dimensional electronic materials.

기초과학연구원 원자제어 저차원 전자계 연구단장 **염 한 웅**

Han Woong Yeom

Director, Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems, Institute for Basic Science

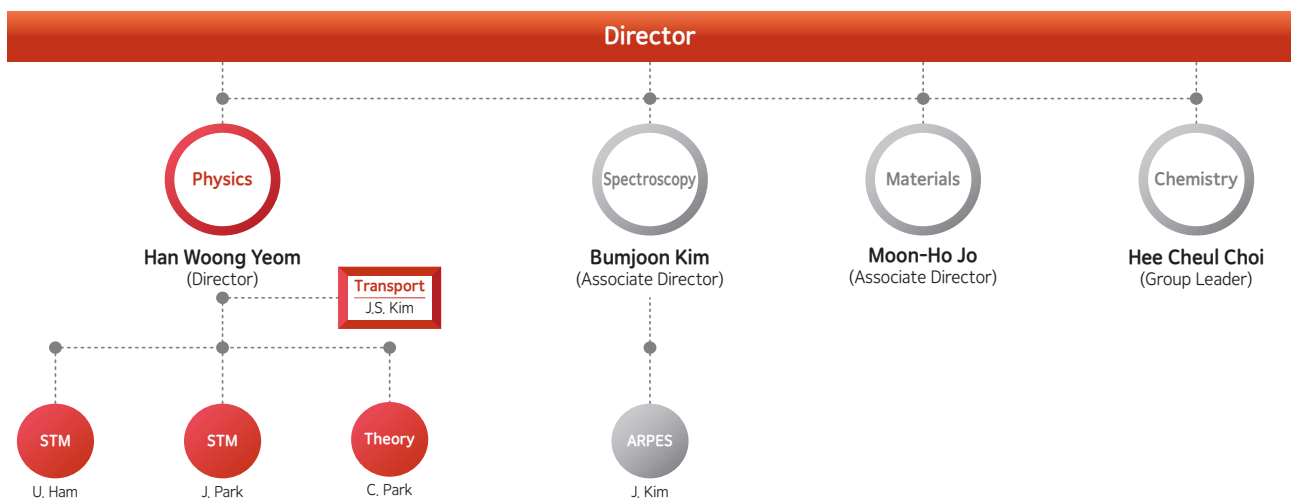
올해의 성과 2017 Achievement

CALDES가 2013년 말 연구진 구성을 마친 이후 4년간의 연구활동이 마무리되었고, 여기에 그 네 번째 연간 activity report를 발행합니다. 그 동안 CALDES는 초저온 STM, 극저온 MFM, 스핀분해각분해광전자분광장치 (ARPES) 등 플래그십 장비들의 건설을 추진하였고 개별 PI들의 연구 프로그램 및 연구진 간의 공동연구 프로그램 구축에 노력하였습니다. 2017년에는 6개국 12개 연구기관과의 국제 공동연구도 진행하였습니다. 스핀분해 ARPES의 경우 일부 공동이용연구에 투입 중이고 초저온 STM의 경우 핵심파트의 도입이 완료되어 2018년 중 완성을 목표로 하고 있습니다. 또한 올해에는 두 번째 부단장이 이끄는 분광연구그룹이 구성되었습니다. 아울러 본지에 소개된 바와 같이, 솔리톤을 이용한 연산의 기본 개념을 확립하였고 일차원전자계와 이차원전자계에서 다양한 이종접합구조를 구현하였고 새로운 성질을 갖는 단일층 물질들을 발견하여, 이를 Nature Physics, Nature Materials, Nature Nanotechnology 등에 발표하였습니다.

This is CALDES's fifth year report on its research activities. CALDES was established in June of 2013 and active research activities started 2014 after 7 principal investigators (PI's) joined at the end of 2013. Since then, our major effort was to the following goals; (i) to establish large-scale flagship instruments such as ultralow-temperature scanning tunneling microscopy (STM), ultralow-temperature high magnetic field magnetic force microscopy (MFM), and ultrabright spin and angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) systems, (ii) to establish research projects of individual PI' with a coherent long-term direction, and (iii) to establish practical research collaboration between PI's. The present report summarizes the progress in these different aspects.

The main achievement of 2017 is the partial construction of spin- and time-resolved ARPES's and an ultralow temperature STM. Especially, new spectroscopy group focusing low-dimensional spin systems is launched. This year's research highlights are the establishment of basic concept of the solitronics, the fabrication of exotic one- and two-dimensional heterostructures and the synthesis and characterization of new topological and ferromagnetic layered materials. These results are published in journals such as Nature Physics, Nature Materials and Nature Nanotechnology.

연구단 조직 CALDES Structure (2017. 12)



연구성과 Research Highlight

Switching chiral solitons for algebraic operation of topological quaternary digits

Nature Physics **13**, 444 (2017)

손지기 (chirality, 카이랄성)는 수학, 화학, 물리학, 생물학 등 다양한 과학 분야에서 비대칭성을 가리키는 용어이며, 손을 뜻하는 그리스어에서 유래하였다. 왼손과 오른손이 서로 겹칠 수 없는 거울상 대칭이기 때문이다. 이런 손지기는 일상생활뿐만 아니라, 다양한 연구 분야에서 흥미로운 현상으로 나타난다. 특히 응집물질물리 분야에서 이런 손지기가 위상학적 들뜸 (topological excitation)의 한 형태이며 위상학적으로 보호되어 있기 때문에 외부 간섭에도 쉽게 변하지 않아 차세대 정보 전달 매체로 응용할 수 있다는 가능성이 보고되었다.

본 연구단은 2015년 폭 1nm의 부도체 나노 인듐원자선에서 손지기 솔리톤 (chiral soliton, Fig. 1a-c 참조)의 존재를 세계 최초로 규명한데 이어, 후속 연구를 통해 그 손지기 솔리톤 사이의 변환을 관찰함으로써 위상학적 들뜸을 이용한 정보전달매체로서의 가능성을 세계 최초로 밝혔다 (2017년).

이번 연구에서 인듐 일차원 원자선에서 존재하는 손지기 솔리톤의 서로 다른 위상 상태를 바꿀 수 있는 방법을 찾았다. 그 방법은 다른 종류의 손지기 솔리톤을 이용한 것이다. 이런 손지기 솔리톤의 위상 상태가 위상 전하 (topological charge)와 대응되기 때문에 이번 연구를 바탕으로 위상 전하의 산술적인 연산 (algebraic operation)도 가능함을 밝혔다.

결과적으로 외부 간섭으로부터 영향을 거의 받지 않는 솔리톤으로, 안전하게 위상 전하를 전달하고 또한 산술 연산도 가능하여 앞으로 관련 연구에 새로운 방향을 제시하였다는데 큰 의미가 있다.

Chirality is a scientific term representing a property of asymmetry in several fields of science including mathematics, biology, chemistry, and physics. The word is derived from Greek $\chi\epsilon\iota\rho$, which means a 'hand'; because no matter how the two hands are oriented, it is impossible for all the major features of both hands to coincide across all axes. Such chirality emerges as very interesting phenomena in various research fields. In condensed matter physics, some topological excitations appear as chirality. Since they are topologically

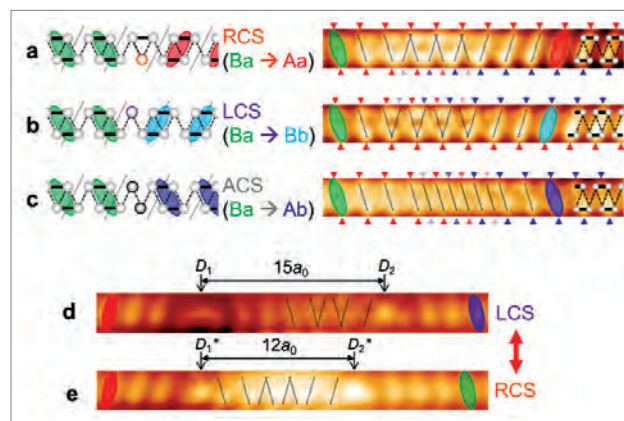


Figure 1

a-c, schematics (left) and scanning tunneling microscopy images (right) of chiral solitons. d, e, switching between chiral solitons trapped by two defects.

protected, they can be used as future information carriers without being perturbed against external noise.

In 2015, we first proved the existence of chiral solitons (Fig. 1 a-c) experimentally and theoretically. Through the following research, we finally discovered the switching between chiral solitons in 2017. This result gives us a new opportunity to use chiral solitons as information carriers.

The main result of our study is to find an experimental method for switching topological states or chirality of chiral solitons. The method is using other chiral solitons for switching. Since each chirality of solitons corresponds to each topological charge, we can do algebraic operation with topological charges in principle.

In this study, we proposed a novel approach to send and manipulate topological charges with robust chiral solitons, which possibly leads to a future electronics called solitonics.

연구성과 Research Highlight

Violation of Ohm's law in a Weyl metal Nature Materials **16**, 1096 (2017)

고체의 특이한 위상학적인 구조에 의해 일어나는 비정상적인 전도 현상은 최근 응집물리분야의 핵심적이고 도전적인 주제중의 하나이다. 특히 최근 활발히 연구되고 있는 위상 준금속의 경우, 다양한 종류의 위상특이점에 의한 베리곡면이 역격자 공간에 존재하게 되고, 전도 전자가 베리곡면을 따라 움직일 때는 가상의 자기장을 느끼게 되기 때문에 결과적으로 특이한 운동 양상을 띠게 된다. 예를 들어 와일 금속의 경우 위상학적 특이점이 역격자 공간에서 짝으로 존재하는데, 이러한 와일 점을 하나를 감싸는 페르미 면에 대해서는 전류보존법칙이 더 이상 유지되지 못하게 되고, 대신 두 개의 와일점을 동시에 고려해야만 전류보존이 가능해진다. 이는 역격자 공간에서 짝을 이루는 두 개의 와일점을 따라서 손실이 전혀 없는 전도 통로가 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 두 개의 와일점과 나란한 방향으로의 전자의 흐름이 매우 용이하게 되고, 음의 자기저항과 같은 비정상적인 전도현상이 발현된다. 이처럼 카이랄 전도에 의한 전자의 거동은 기존의 드루드나 란다우 모델로는 이해할 수 없기 때문에, 위상학적인 전도현상에 대한 새로운 이해가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 와일 금속의 경우, 위상학적인 구조에 의한 카이랄 전도효과 및 전하 펌핑 현상으로 옴의 법칙이 더 이상 만족하지 않는다는 것을 밝혀내었다. 연구에 사용된 $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ 단결정의 경우, 자기장을 인가하였을 때 자기장 방향으로 두 개의 와일 점이 생성되는데, 전류의 방향이 두 개의 와일점과 나란하게 되었을 경우에만 비선형적인 전류-전압 특성을 보이는 것이 관측 되었다. 이는 손실 없는 전류통로가 비선형적 전류생성에 직접적인 원인이라는 것을 의미한다. 이러한 실험적인 결과는 위상전도특성에 따른 전하펌핑 효과를 고려한 볼츠만 전도이론을 통해 잘 설명될 수 있으며, 동일한 원인으로 발현되는 음의 자기저항과도 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 발견한 비선형적인 전도특성은 와일 준금속을 특징짓는 고유특성임과 동시에 이를 이용한 새로운 비선형 전자소자나 광학소자 개발 및 란다우 페르미 이론을 넘어서는 새로운 위상전도 이론 발전 등으로 나아가는 시발점이 될 것으로 기대된다.

The role of a topological structure on anomalous transport phenomena is currently one of the challenging questions. Particularly in topological semimetals possessing various types of point or line nodes singularities in the momentum space, the resulting Berry curvatures produce a fictitious magnetic field

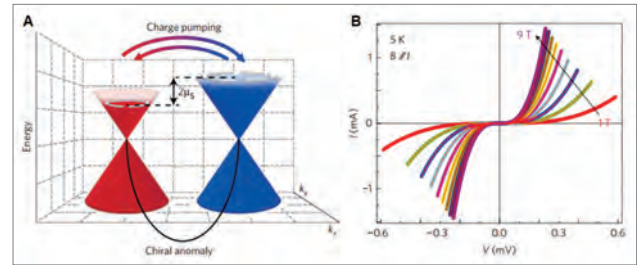


Figure 2

Nonlinear I-V characteristic of the topological semimetal phase of $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$.

and significantly affect electron's motion. While the chiral anomaly was observed as a negative longitudinal magnetoresistivity, its consequence in electronic transport has been unclear. So far, all existing discussions have been limited to the linear response regime, governed by Ohm's law. We found, however, that in a Weyl metal, Ohm's law breaks down due to a topological structure of the chiral anomaly with the charge pumping effect. We take $\text{Bi}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$ single crystal as a model 3D Dirac semimetal, which becomes a Weyl semimetal under magnetic field. The nonlinear I-V characteristics in the diffusive limit occurs only for a magnetic-field aligned to an electric field, in which dissipation-less conduction channel connecting two paired Weyl points contributes to the electrical transport. The Boltzmann transport theory with the charge pumping effect reveals the topological nonlinear conductivity, and it leads to a universal scaling function of the longitudinal magnetoconductivity, which completely describes our experimental observations. As a hallmark of Weyl metals, the nonlinear conductivity provides a venue for nonlinear electronics, optical applications, and the development of a topological Fermi-liquid theory beyond the Landau Fermi-liquid theory. This work thus puts an important stepstone in understanding the physical consequence of topology in a new class of topological materials.

연구성과 Research Highlight

Coplanar semiconductor-metal circuitry defined on few-layer MoTe₂ via polymorphic heteroepitaxy

Nature Nanotechnology **12**, 1064 (2017)

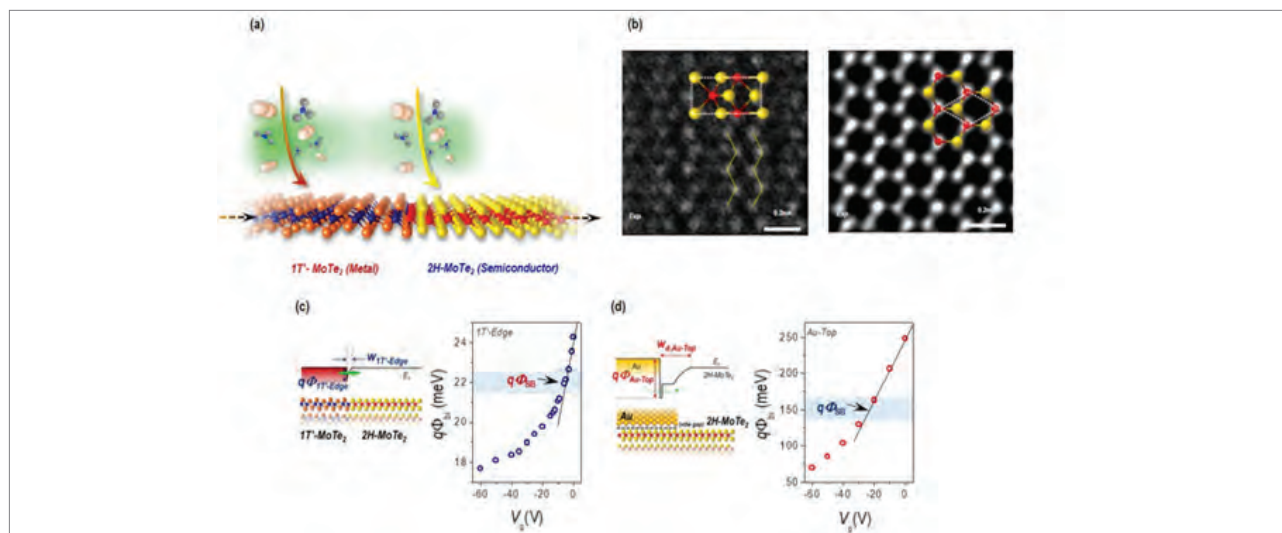


Figure 3

Polymorphic integration of few-layer 1T'/2H-MoTe₂ crystals within the same atomic planes by sequential lateral heteroepitaxy. (a) Sequential growth scheme for coplanar heteroepitaxy of 1T'/2H-MoTe₂ polymorphs. (b) HAADF-TEM image of 1T'/2H-MoTe₂ and 2H-MoTe₂. effective $q\Phi_{bi}$ as a function of V_g in the 1T'-coplanar contact (c) and Au-top contact (d), where $q\Phi_{SB}$ is the Schottky barrier height.

본 연구에서는 금속성과 반도체성을 보이는 다형상 MoTe₂ 물질의 선택적 합성에 성공하고, 이를 연속적인 에피 성장을 통해 원자층에 반도체-금속 접합 전자 소자를 구현하였다. 이러한 새로운 1차원 접합은 그동안 2차원 물질 연구에서 난제로 파악되는 고 접합 저항 문제를 해결하였고, 특히 20 meV 정도의 극소 저항 접합을 갖는 2차원 전자 소자를 구현하였다. 제시된 연구는 원자층 수준에서의 합성을 통하여 동일한 물질에서 반도체와 금속 성질을 선택적으로 갖도록 하는 조작이 가능함을 예시할 뿐 아니라, 이러한 연속 합성법을 통해 집적 전자 소자의 구현, 즉 물질 조작에 의한 "synthetic electronics"가 가능함을 보여주는데 그 의미가 있다.

We report on the polymorphic integration of distinct metallic (1T') and semiconducting (2H) MoTe₂ crystals within the same atomic planes by heteroepitaxy. Crystal polymorphism

selectively stabilizes the electronic phase of atomically thin transition-metal dichalcogenides (TMDCs) as metallic or semiconducting, suggesting the potential to integrate these polymorphs as circuit components in two-dimensional electronic circuitry. Developing a selective and sequential growth strategy for such two-dimensional polymorphs in the vapour phase is a critical step in this endeavour. The realized polymorphic coplanar contact is atomically coherent, and its barrier potential is spatially tight-confined over a length of only a few nanometres, with a lowest contact barrier height of ~25meV. This direct formation of electronic device with sequential synthetic suggest the pathway of synthetic electronics.

연구성과 Research Highlight

Correlated electronic states at domain walls of a Mott-charge-density-wave insulator 1T-TaS₂

Nature Communications **8**, 392 (2017)

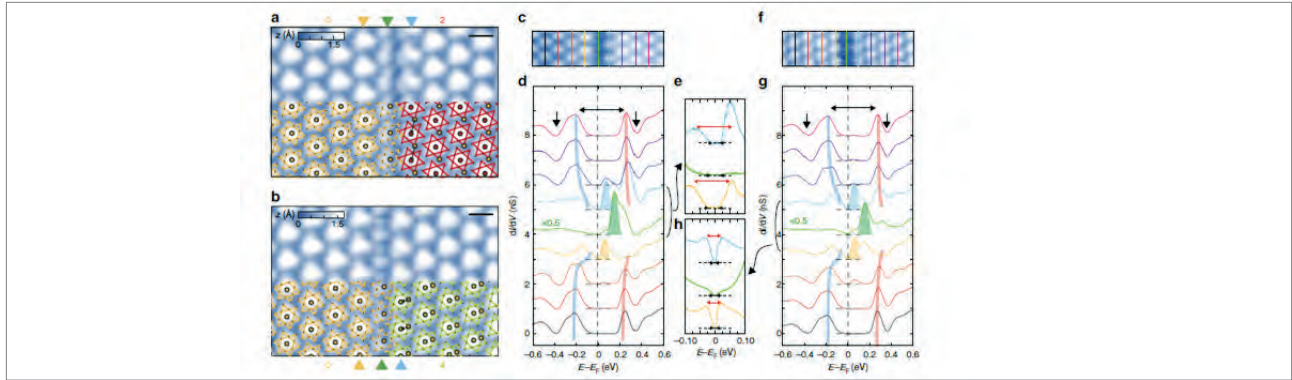


Figure 4

Atomic and electronic structure of domain walls of 1T-TaS₂. Spatially resolved dI/dV spectra shows the evolution of the incoherent peaks displayed by the semitransparent blue and red curves.

본 연구진은 지난 4년간 전자들의 상호작용이 강한 총상물질을 새로운 이종접합계면을 창출하기 위한 기판으로서 연구해왔다. 그 중 가장 주목하고 있는 물질계는 1T-TaS₂로서 이 물질은 2차원 전자계의 특성이 전하밀도파와 더불어 강한 상호작용에 의한 Mott 절연체상이 됨이 알려져 있다. 특히 이 물질의 경우는 강한 압력과 극저온 상태에서 Mott 절연체로부터 초전도현상이 발현하면서 전하밀도파가 억제되는 현상을 보이나 그 상관 관계는 아직 규명되지 않았다. 이러한 초전도성의 발현에는 전하밀도의 질서를 파괴하는 domain wall이 중요한 역할을 한다고 알려져 왔으나, 이 domain wall의 특성이나 구조에 대해서는 밝혀진 바가 없었다. 본 연구에서는 세계최초로 1T-TaS₂ CDW 상의 domain wall의 원자구조와 전자구조를 밝혔다. 특히 domain wall에 국소적으로 존재하는 Mott gap 내부의 in-gap 전자구조를 세계최초로 확인하였으며, 전자구조계산을 통하여 이러한 in-gap state의 특성이 전자들의 강한 상호작용을 고려하지 않으면 기술될 수 없음을 보였다. 특히 지금까지 오랫동안 믿어져왔던 domain wall in-gap state가 금속적이라는 통설을 부정하였다. 이러한 비금속적인 in-gap state는 domain wall 내부의 원자구조의 변형과 전자상호작용에 의하여 발생한다. 이 결과는 오랫동안 여러 가지 물성을 설명하기 위해 사용되어온 금속적인 in-gap state의 가설을 뒤집음과 동시에 domain wall 내부

전자들의 강한 상호작용이라는 새로운 개념을 제시하고 있어, 향후 1T-TaS₂의 연구 뿐만 아니라 domain wall의 역할이 중요한 다양한 고체물질의 전자물성연구에 중요한 지표가 될 것이다.

1T-TaS₂ is a strongly correlated two-dimensional material showing charge density waves and Mott transition depending on the temperature. Especially, under a high pressure and low temperature, it becomes superconductor with suppressed charge density wave. Domain wall structures of charge density wave is expected to do an important role in understanding this phenomena and we revealed atomic and electronic structures of the domain wall by scanning tunneling microscopy studies. Along the domain walls, localized in-gap states of Mott insulator phase was observed and the strong correlation is indispensable for the existence of those states. Atomic distortion and electron interaction is the origin of the domain wall formation and especially, in-gap states are not metallic contrary to the common belief. Interactions between electrons in the domain wall will be an important concept in the understanding of 1T-TaS₂ and also of numerous materials with domain wall structures.

연구성과 Research Highlight

Frustration-driven C_4 -symmetric order in a naturally-heterostructured superconductor Sr_2VO_3FeAs

Nature Communications **8**, 2167 (2017)

전도 전자가 자성에 직접 관여하는 자성 금속의 경우, 종종 자성 상호작용간의 경쟁으로 인해 다양한 기저상태가 나타날 수 있다. 특히, 구리산화물이나 철계 초전도체와 같이 스핀, 전하, 오비탈의 자유도가 매우 복잡하게 관여된 물질계는 기저 상태가 외부요인에 민감하기 때문에 계면 효과에 의해 매우 풍부한 상 그림을 만들고, 기존의 물질에서 발견되지 않은 새로운 기저상태를 만들기도 한다. 본 연구에서는 상호작용인 충분한 전도전자와 국소스핀이 공존하는 철계초전도체 중에 하나인 Sr_2VO_3FeAs 에서, 초전도층과 모트-절연층간의 계면효과에 의해 기존 물질에서 보고되지 않은 특이한 기저상태를 가지는 것을 최초로 보고 하였다. Sr_2VO_3FeAs 에서 관측된 상전이는 자기 정렬없이 사각격자구조를 유지하는 상전이로 시간역전과 C_4 회전 대칭이 깨지지 않은, 전형적인 숨겨진 정렬 (hidden order) 상태이다. 이번 발견을 통해 철계초전도체와 같이 강상관 전도전자계가 또다른 강상관 국소전자계와 적층되었을 때, 이들 간의 계면 상호작용의 결과로 그 기저상태가 매우 다양하게 변화할 수 있음이 실험적으로 확인되었다. 이는 향후 다양한 강상관 이종접합계의 양자물성연구로 발전될 것으로 기대된다.

In the spin systems such as metallic magnets with itinerant electrons forming magnetic moments, various types of Fermi surface instabilities are often frustrated, which stabilizes complex magnetic phases with broken time-reversal or lattice symmetries or even hidden phases without breaking any of them. Particularly, in strongly correlated electron materials, including cuprates and iron-based superconductors (FeSCs), the balance between competing interactions are extremely sensitive to external perturbations. Therefore, when the proximity-coupled layer is strongly correlated and magnetically active, additional interfacial spin interaction may induce distinct ground states in FeSCs, which however has not been explored so far. In order to create new types of quantum matter in atomic scale heterostructures, we take a heterostructured FeSCs, Sr_2VO_3FeAs , as a model system, consisting of a

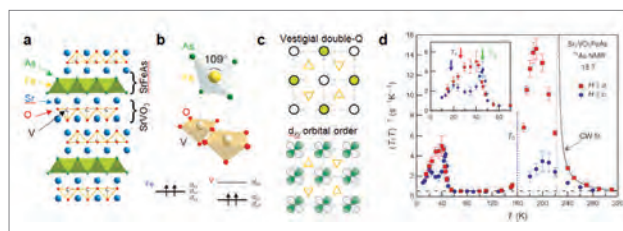


Figure 5

Illustration of a correlated heterostructure of an iron-based superconductor ($SrFeAs$) and a Mott insulator ($SrVO_3$) (b) Local crystal and electronic structures of a $FeAs_4$ tetrahedron and a VO_5 pyramid. (c) Possible C_4 -symmetric charge/orbital orders in the $FeAs$ layers. (d) The spin-lattice relaxation time as a function of temperature, revealing C_4 -symmetric orders.

superconducting iron pnictide layer and a Mott-insulating vanadium oxide layer. Each constituent layers usually host distinct magnetic orders, the stripe antiferromagnetic/nematic order in iron pnictide layer and the Néel antiferromagnetic order in vanadium oxide layer. We find however that an unusual charge/orbital order, without either static magnetism or broken C_4 -symmetry. Such an unprecedented "hidden" order is due to frustration of the otherwise dominant iron stripe and vanadium Néel fluctuations via interfacial magnetic proximity coupling. Our findings therefore manifest that the physics of itinerant correlated system can become even richer in the proximity of other correlated systems and also offer a new avenue for exploring unusual ground state in the correlated heterostructures.

연구성과 Research Highlight

Spin-resolved ARPES end station

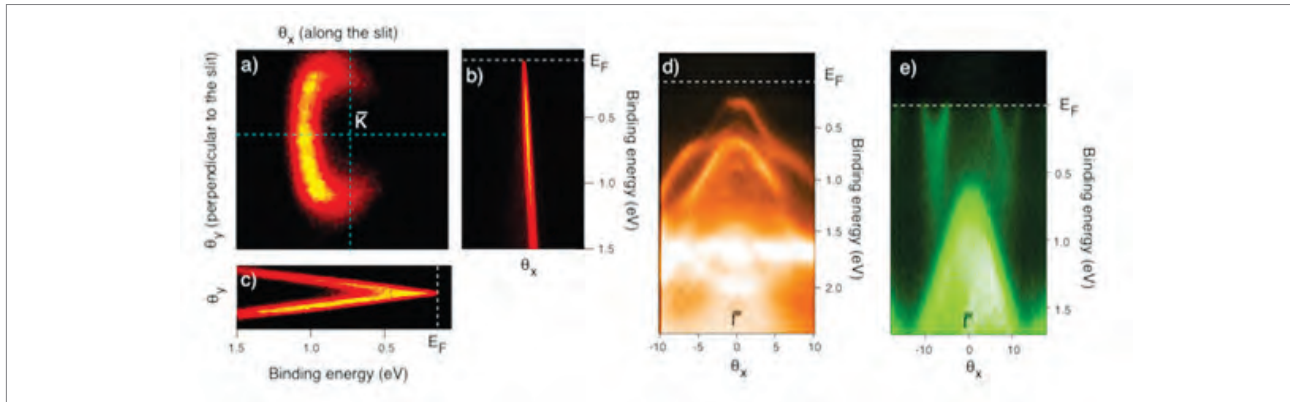


Figure 6

Selected test data from the Spin ARPES (a)(b)(c) Band structure of graphene taken with the deflection mode of DA-30 analyzer (d)(e) Band structure of Ta_2NiSe_5 & NbS_2 .

본 연구단에서 개발 중인 스핀 및 각도분해 광전자분광 장비는 고체 내의 에너지 밴드 구조를 에너지와 운동량에 따라 측정할 수 있는 장치로, 특히 감도가 뛰어난 교환산란 방식의 스핀 검출기를 장착하여 밴드별 스핀상태의 측정도 동시에 가능하도록 설계되었다. 별도의 장소에서 셋업을 완료한 이 장비는 2017년 초반까지 포항 가속기의 4A2 빔라인으로의 이전, 설치를 완료하였다. 그 후 수개월 간의 정렬 및 커미셔닝 작업을 통해 통째로 실제 방사광을 이용한 각도분해 광전자 분광 실험이 가능하게 되었다. 또한 하반기부터는 연구단 내부뿐만 아니라, 외부의 이용자들에게도 이를 공개하여 수차례의 외부 실험에도 사용되었다. 그림 6은 이 장비를 통해 얻어진 graphene 및 양자물질들에 대한 실제 밴드 구조 측정결과이다. 교환 상호작용 방식의 스핀 검출기 또한 대부분의 부품 설치를 완료하였으며, 2018년 초반에는 그 성능을 테스트하고 최적화하는 작업을 시작할 예정이다.

The installation of spin and angle-resolved photoelectron spectroscopy (Spin ARPES) end-station at the 4A2 beamline of Pohang Accelerator Laboratory (PAL) was completed. The system makes it enable to directly investigate the electronic structures of various materials by detecting the

energy, momentum, and spin of individual electrons within them. In particular, the state-of-the-art electron analyzer simultaneously reveals the three dimensional space of energy and momenta in two direction, and the VLEED-type spin detector enhances the spin detection efficiency by orders of magnitudes compared to the conventional Mott-type spin detector. In early 2017, the entire system was moved to the beamline port and the commissioning with the real synchrotron radiation was done by summer. After that, it was opened to the inside researchers and outside users as well. A few experiments have done by them and selected spectra are shown in figure 6. Left panel shows the band mapping results of graphene and right panel shows band structures taken for Ta_2NiSe_5 and NbS_2 . They show well that the construction of a high-performance ARPES system was completed. Also, most of parts of spin detector were delivered and installed at the system. Evaporator, Helmholtz coils, and transfer system for the spin detector have been tested and characterized in 2017. The detector will be tested and optimized before summer in the first half of 2018.

연구성과 Research Highlight

Construction of Ultralow Temperature High Magnetic Field Scanning Tunneling Microscope

2017년 5월, 본 연구단의 극저온 고자기장 주사 터널 현미경을 위한 초전도 자석을 장착한 희석식 냉동기의 조립을 마치고, 그 시험 운용을 성공적으로 수행하였다(그림 7). 냉동기 운용 조건을 최적화하여 냉동기 쿨드 팁의 최저온도는 5.9 mK 까지 내려감을 확인하였고, 100 mK에서 600 μ W의 강력한 냉각파워를 확인하였다. 제작사에서 테스트 할 때 문제가 되었던 벡터형 초전도 자석의 성능도, 문제 해결 뒤에는 최대 자기장 (9+2+2 테슬라)이 안정적으로 가동됨을 확인하였다.

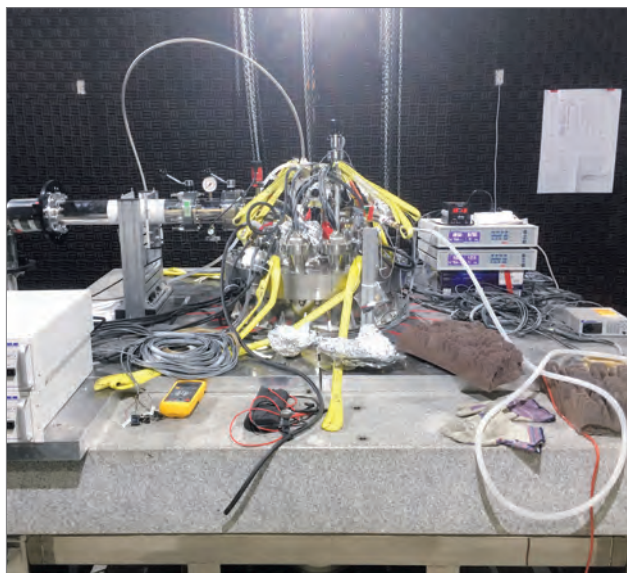


Figure 7

Upper view of our dilution refrigerator.

샘플 내의 전자온도를 최대한 낮추기 위해, 현미경 헤드의 크기를 최대한으로 줄이는 노력을 하였다. Koala 드라이브 형태의 z 모터를 자체 개발하여 사용하려 한다(그림 8). 이 극저온 냉동기에 장착될 주사터널 현미경의 헤드와 이의 운용을 위한 10 K 소형 액체 헬륨 냉동기, STM 헤드 매니퓰레이터, 그리고 x, y, z 트랜슬레이터의 디자인을 끝내서 부품 제작에 착수하였다.

In May 2017, our dilution refrigerator with a superconducting magnet was assembled and tested successfully in the

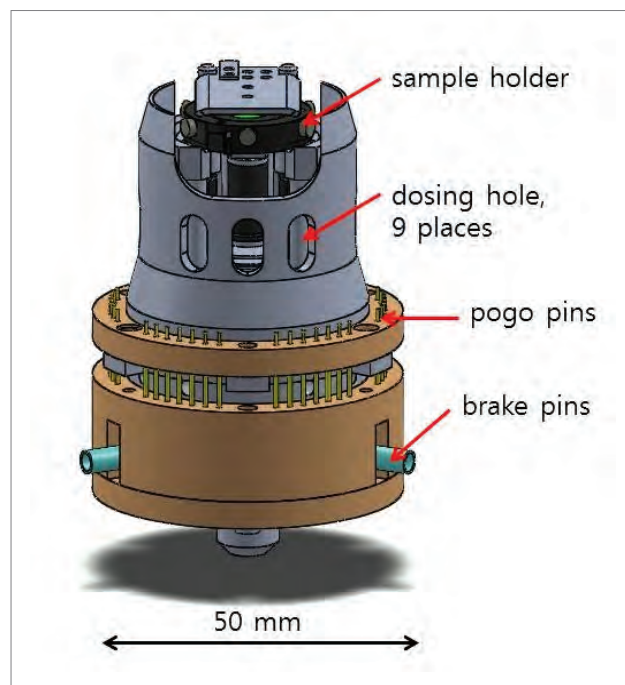


Figure 8

schematic of the scanning tunneling microscope head.

laboratory (Figure 7). By optimizing the operation variables for the cryostat, we confirmed that the base temperature is 5.9 mK, and the cooling power at 100 mK is more than $\sim 600 \mu$ W. We confirmed that the superconducting magnet, which had a problem in the manufactory site last year, work well up to the maximum magnetic field strength (9 + 2 + 2 Telsa).

In order to reach minimum electron temperature in the sample, we try to minimize the size of our scanner. We designed and constructed adapted Koala drive STM z motors (Figure 8). The design of a small-sized ~ 10 K liquid helium cryostat, STM head manipulator, and x, y, z translation stages have been completed, and now various parts for those components are being fabricated.

연구성과 Research Highlight

Compact variable temperature scanning tunneling microscope

활용 중인 전기전도도 측정용 가변온도 주사터널현미경은 전기전도도 측정과 원자 분해능 주사터널현미경 측정이 동시에 가능하다. 반면 상대적으로 큰 주사터널현미경 헤드라서, 주어진 냉동기로 온도를 충분히 떨어뜨리기가 어렵다. 현재 액체 헬륨(끓는점 4.2 K)을 이용하여 도달 가능한 최저 온도는 13 K으로, 그 온도보다 더 낮은 온도의 상전이 현상을 관찰할 수 없다.

이런 문제점을 보완하고자, 주사터널현미경 헤드를 구조를 최소화하였다. 그 결과 줄어든 무게 (Fig. 9)로 기존 냉동기 성능을 최대로 활용할 수 있어, 냉매의 끓는점에 가까운 샘플/탐침의 온도를 구현하고자 소형 가변온도 주사터널현미경을 구축 중에 있다.



Figure 9

Size comparison between existing and newly designed STM heads.

소형화의 핵심은 여섯 개의 피에조 스택으로 이루어진 탐침 이동 장치를 작은 피에조 튜브 2개로 교체한 것이다 (Fig. 10 왼쪽). 이와 더불어 주사터널현미경 헤드 본체의 크기를 줄이고 꼭 필요한 기능만을 살려 무게를 최소화하였다 (Fig. 10 가운데). 마지막으로 기존 알루미늄 열 차단 실드를 열전도도가 더 좋은 구리로 제작하여 냉동기를 통한 냉각이 원활하게 되도록 하였다 (Fig. 10 오른쪽).

현재 최종 조립이 이루어지고 있어 1-2개월 내로 성능 테스트를 할 수 있을 것이라 전망한다. 본 장비가 구축 완료된 뒤에는 그래핀 및 2차원 물질의 온도에 따른 상전이 현상을 연구하는데 활용하고자 한다.

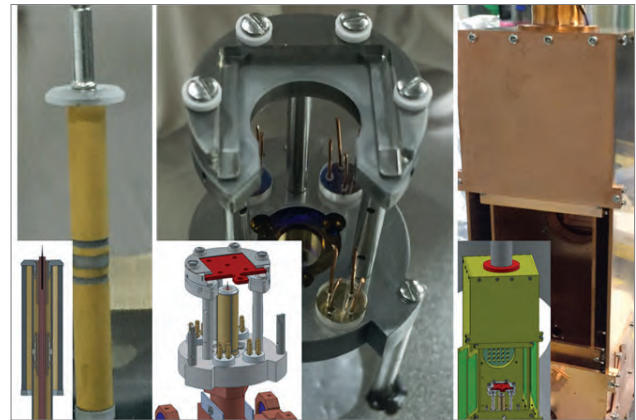


Figure 10

(left) tip coarse motion device, (middle) STM head, (right) thermal shields surrounding STM head.

We can perform scanning tunneling microscopy and transport measurements simultaneously with our variable scanning tunneling microscope (VTSTM) with transport capability. However, it has a drawback due to large STM head for multifunctionality. With liquid helium (boiling temperature: 4.2 K), we can cool the VTSTM head down to only 13 K, so we can't observe any phase transition below 13 K.

In order to overcome this limitation, we redesigned a much smaller STM head for lower working temperature. We estimated the base temperature would be very close to the boiling temperature of liquid cryogen thanks to the lower weight (Fig. 9).

The key of miniaturization is to replace six feet of piezo stacks with tiny piezo tubes (Fig. 10 left). As well, we fully redesigned the STM head with only functionalities required to STM operation (Fig. 10 middle). Lastly, we used thermal shield made of copper instead of aluminium for better thermal conductivity (Fig. 10 right).

Currently, we are assembling the STM head for test run. Once it is installed, we will use it to study temperature-induced phase transitions of graphene as well as 2D materials.



연구논문 Research Papers

Author	Title	Journal	Volume, page
Hoseok Heo et al. (M.-H. Jo)	Frank-van der Merwe Growth versus Volmer-Weber Growth in Successive Stacking of a Few-Layer Bi ₂ Te ₃ /Sb ₂ Te ₃ by van der Waals Heteroepitaxy: The Critical Roles of Finite Lattice-Mismatch with Seed Substrates	Advanced Electronic Materials	3 , 1600375
Ji Ho Sung et al. (M.-H. Jo)	Ultrafast Hot-Carrier Photovoltaics of Type-I Monolayer Heterojunctions in the Broad Spectral Ranges	ACS Photonics	4 , 429-434
D. Wulferding et al. (Jeehoon Kim)	Domain engineering of the metastable domains in the 4f-uniaxial-ferromagnet CeRu ₂ Ga ₂ B	SCIENTIFIC REPORTS	7 , 46296
Yohwan Park et al. (H.C. Choi)	Reverse Anti-solvent Crystallization Process for the Facile Synthesis of Zinc Tetra (4-pyridyl)porphyrin Single Crystalline Cubes	SCIENTIFIC REPORTS	7 , 2582
Tae-Hwan Kim et al. (H.W. Yeom)	Switching chiral solitons for algebraic operation of topological quaternary digits	NATURE PHYSICS	13 , 444-447
Doohee Cho et al. (H.W. Yeom)	Correlated electronic states at domain walls of a Mott-charge-density-wave insulator 1T-TaS ₂	NATURE COMMUNICATIONS	8 , 392
Sofia-Michaela Souliou et al. (BJ Kim)	Raman Scattering from Higgs Mode Oscillations in the Two-Dimensional Antiferromagnet Ca ₂ RuO ₄	PHYSICAL REVIEW LETTERS	119 , 067201
BJ Kim et al.	Resonant inelastic x-ray scattering operators for t _{2g} orbital systems	PHYSICAL REVIEW B	96 , 085108
Soyoung Kim et al. (H.C. Choi)	Rapid Photochemical Synthesis of Sea-Urchin-Shaped Hierarchical Porous COF-5 and Its Lithography-Free Patterned Growth	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	27 , 1700925
Tae-Eon Park et al. (M.-H. Jo)	Electrical spin transport in cylindrical silicon nanowires with CoFeB/MgO contacts	APPLIED PHYSICS LETTERS	111 , 062402
Sung Hwan Kim et al. (H.W. Yeom)	Atomically Abrupt Topological p-n Junction	ACS Nano	11 , 9671-9677
Hyo Sung Kim et al. (H.W. Yeom)	Moiré Superstructure and Dimensional Crossover of 2D Electronic States on Nanoscale Lead Quantum Films	SCIENTIFIC REPORTS	7 , 12735
H. J. Park et al. (J.S. Kim)	Electrodynamic properties of the semimetallic Dirac material SrMnBi ₂ : Two-carrier-model analysis	PHYSICAL REVIEW B	96 , 155139
Ki-Seok Kim et al. (Miok Park)	Emergent geometric description for a topological phase transition in the Kitaev superconductor model	PHYSICAL REVIEW D	96 , 086015
Hao Zhang et al. (JW Park)	Postprocessing Algorithm for Driving Conventional Scanning Tunneling Microscope at Fast Scan Rates	SCANNING	2017 , 1097142

연구논문 Research Papers

Author	Title	Journal	Volume, page
Dongwoo Shin et al. (Jeehoon Kim)	Violation of Ohm's law in a Weyl metal	NATURE MATERIALS	16 , 1096-1099
Ji Ho Sung et al. (M.-H. Jo)	Coplanar semiconductor-metal circuitry defined on few-layer MoTe ₂ via polymorphic heteroepitaxy	Nature Nanotechnology	12 , 1064-1070
Seokhwan Choi et al. (J.S. Kim)	Switching Magnetism and Superconductivity with Spin-Polarized Current in Iron-Based Superconductor	PHYSICAL REVIEW LETTERS	119 , 227001
Jong Mok Ok et al. (J.S. Kim)	Frustration driven C-4 symmetric orders in a naturally heterostructured superconductor Sr ₂ VO ₃ FeAs	NATURE COMMUNICATIONS	8 , 2167
Jimin Kim et al. (Keun Su Kim)	Two-Dimensional Dirac Fermions Protected by Space-Time Inversion Symmetry in Black Phosphorus	PHYSICAL REVIEW LETTERS	119 , 22680

해외 학술발표 International Conference Presentations

Presenter	Title	Conference	Date	Note
J.S. Kim	Ferromagnetic Van der Waals Metal Fe ₃ GeTe ₂ : from Bulk to Atomically Thin Crystals	Annual Meeting of the PSROC Taiwan 2017 (New Taipei City, Taiwan)	2017.01.17	Invited
J.S. Kim	Ferromagnetic Van der Waals Metal Fe ₃ GeTe ₂ : from Bulk to Atomically Thin Crystals	2017 Quantum Materials Symposium (Pyeongchang, S. Korea)	2017.02.23	Invited
J.S. Kim	Frustration-driven C4 symmetric orders in a heterostructured iron-based superconductor	International Workshop on Recent Progress of Superconductivity (Pyeongchang, S. Korea)	2017.07.04	Invited
H.W. Yeom	Chiral solitons in atomic wires: towards multi-digit topological computation	16th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI) 2017 (Hannover, Germany)	2017.07.06	Invited
BJ Kim	Unconventional magnetic excitation in pyrochlore and honeycomb lattice iridates	International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES) Conference (Prague, Czech)	2017.07.21	Invited



해외 학술발표 International Conference Presentations

Presenter	Title	Conference	Date	Note
M.-H. Jo	Coplanar Electrical Circuitry define donan Atomically Thin Semiconductor Layer by Polymorphic Heteroepitaxy	Recent Progress In Graphene&2D Materials Research(RPGR) 2017 (Singapore)	2017.09.20	Invited
H.W. Yeom	Chiral solitons and their fusion for topological informatics	The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (Tsukuba, Japan)	2017.10.24	Invited
H.W. Yeom	Atomistic view into and manipulation of domain walls in complex 2Dmaterials	The 3rd IBS-Royal Society Conference (Daejeon, S. Korea)	2017.11.06	Invited
J.S. Kim	Upper critical fields of iron-based superconductors	Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (Jeju, S. Korea)	2017.11.06	Invited
JW Park	Probing electric properties of hetero-interface at graphene / hexagonal boron nitride in-plane junction	The 3rd East-Asia Microscopy Conference (Busan, S. Korea)	2017.11.10	Invited
J.S. Kim	Ferromagnetic Van der Waals Metal Fe ₃ GeTe ₂ : from Bulk to Atomically Thin Crystals	International Conference on Advanced Materials and Devices (Jeju, S. Korea)	2017.12.07	Invited
H.W. Yeom	Solitons in atomic wires for topological computation	The 10th International Conference on Advanced Materials and Device (ICAMD) 2017 (Jeju, S. Korea)	2017.12.08	Invited
M.-H. Jo	Monolithic 2D Integrated Circuitry by Atomic Epitaxy	ICON-2DMAT 2017 (Singapore)	2017.12.12	Invited

연구협력 Collaborations

국제연구교류 Foreign Collaborations

Institution	Research Activity
Hiroshima University, Hiroshima Synchrotron Radiation Center (Japan)	VLEED spin ARPES 장비구축 및 연구 사례 Benchmark for the construction and research applications of VLEED spin ARPES
Institute for Molecular Science, UVSOR (Japan)	연구소 내에 위치한 UVSOR 방사광가속기를 활용하여 Ta ₂ NiSe ₅ 및 TaS ₂ 시료의 ARPES 실험 수행 ARPES study of Ta ₂ NiSe ₅ and TaS ₂ using UVSOR Synchrotron facility
Institute of Physics of the Academy of Science Czech Republic (Czech)	1차원 원자선 Si(553)-Au에서 나타나는 극저온 기저상태의 특성을 밝히기 위해 원자힘현미경 실험과 이론적 논의 AFM study of ground state properties of a prototypical 1D nanowire Si(553)-Au
Rutgers University (USA)	IrTe ₂ , TaS ₂ 전자구조 및 상전이 연구를 위한 시료공급 (Nature Communications 2016, Nano Letters 2016) Sample synthesis of high-quality IrTe ₂ and TaS ₂ for the study of electronic structure and phase transition
Chinese Academy of Science (China)	전자상호작용이 강한 이차원 층상화합물의 초전도 현상 공동연구 Superconductivities in strongly correlated 2D layered materials
Harvard University (USA)	원자층 이종 접합 결정에서의 단일 원자점 결함에서의 단일 광자 검출과 이들의 양자 광학적 연구 Detection of a single photon and quantum optics of atomic vacancy in layered heterostructure
Chicago University (USA)	4-in 웨이퍼 크기의 단일 반도체 적층 양자 구조 합성을 위한 기초 데이터를 공유와 논의 Basic studies for a synthesis of 4-inch wafer-scale single crystalline semiconductor stacking structure
National High Magnetic Field Lab, Tallahassee (USA)	30T 급 고자기장하에서의 양자물성 연구 Quantum matter under a static 30T magnetic field
Institute of Solid State Physics (Japan)	60T 급 펄스 고자기장하에서의 양자물성 연구 Quantum matter under a pulsed 60T magnetic field
Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter (Germany)	저차원 전자계 분야의 세계적 연구자들과 현재 연구 중인 주제와 실험 기술에 대한 의견 교환 Discussion of research topics and technics in low-dimensional electron system with world-class leading researchers
University of Strathclyde/ University of Cambridge (England)	최근 연구동향을 파악하고 관련 전문가 네트워크를 구축 Catching recent research trends and Building expert network
Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Center for Nanophase Materials Science (CNMS) (USA)	STM 을 이용한 MoTe ₂ 단위자막 과 측단면 연구 STM study for MoTe ₂ monolayer, Cross sectional scanning tunneling microscopy



연구협력 Collaborations

방문 연구자 Visiting Scientists

Name	Affiliation	Period	Note
Sungkyun Choi	Max Planck Institute	2017.01.05	Spin dynamics and magnetic order in $A_2\text{IrO}_3$ ($A=\text{Na, Li}$) honeycomb iridates: implications for Kitaev physics
Hae-Young Kee	University of Toronto	2017.01.05	Topological semimetal in Iridates with strong spin-orbit coupling
Changwon Park	University of Tennessee	2017.03.23-03.24	Energetics of molecular assemblies and realistic scanning tunneling spectroscopic (STS) simulation of two-dimensional materials
Joseph G. Checkelsky	Massachusetts Institute of Technology	2017.04.13-04.14	Transport in Strong Spin-Orbit Coupled Antiferromagnets
Jong-Woo Kim	Argonne National Laboratory	2017.05.09.-05.15	Exploring 2-dimensional 3d-5d interaction with x-ray resonant scattering and spectroscopy
Nakheon Sung	LosAlamos National Laboratory	2017.07.02-07.07	Synthesis and physical properties of strontium iridate single crystals
Jaehong Jeong	Laboratoire Léon Brillouin, UMR12 CEA-CNRS	2017.07.26	Time-reversal symmetry breaking hidden order in $\text{Sr}_2(\text{Ir, Rh})\text{O}_4$
Min Gyu Kim	Rutgers University	2017.09.07-09.09	The FeAs-based superconductors: what make them superconducting?
Seung-Ho Baek	IFW Dresden	2017.10.12-10.17	Nuclear Magnetic Resonance measurements of the spin-relaxation
Jooseop Lee	Cornell High Energy Synchrotron Source	2017.10.23-10.25	Neutron and X-ray scattering study on a heavy fermion system UPt_2Si_2
Pavel Jelinek	Institute of Physics Czech Academy of Science	2017.10.26.-10.28	High-resolution AFM / STM / IETS imaging and its applications
Jung Ho Kim	Argonne National Laboratory	2017.11.06-11.11	공명 비탄성 X-선 산란 분광기 설계 논의
Samindranath Mitra	Physical Review Letters	2017.12.04	Physics after the lab and the desk: Your work in PRL

학술회의 개최 Conferences Hosted

Sort	Conference	Area	Period	Person	Countries	Location
Int'l.	APCTP-Quantum Materials Symposium 2017 inconjunction with 17th Korea-Taiwan-Japan Workshop on SCES&APW	Strongly correlated electron systems	2017.02.19 - 02.24	200	10	Pyeongchang, S. Korea
Int'l.	The 19th International Conference on Recent Progress in Many-Body Theories	Condensed matter physics, Nuclear physics, Atomic physics	2017.06.25 - 06.30	70	19	Pohang, S. Korea
Int'l.	The 9th International Workshop on Nanoscale Spectroscopy and Nanotechnology	Nanometer regime	2017.09.24 - 09.28	70	14	Gyeongju, S. Korea
Int'l.	The 10th International Conference on Advanced Materials and Devices	Advanced materials and device	2017.12.05 - 12.08	600	10	Jeju, S. Korea
Dom.	The 8th Condensed Matter Physics Summer School	Condensed matter physics	2017.08.21 - 08.24	160	1	Danyang, S. Korea

주요장비 & 연구시설 Equipment & Research Facilities

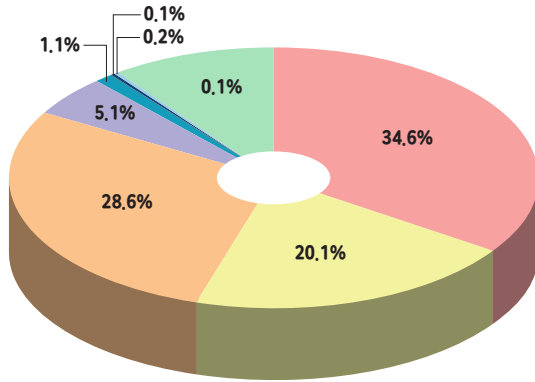
Item	Price (Unit: Million KRW)	Installation	Use	Location
고성능 컴퓨팅 클러스터 시스템 High Performance Computing Cluster System	170.0	2014.01.24	Quantitative prediction of materials properties based on quantum mechanical principles	POSTECH Science Building 3-201
전자-이온 이중빔 리소그래피 장비 Electron-Ion Dual Beam Lithography Machine	754.7	2014.05.13	High-quality sample preparation for atomic scale phenomena	POSTECH Research Building 2-312
저온자기힘 현미경 Low Temperature Magnetic Force Microscope	797.9	2015.01.30	Magnetic domain imaging with a 10-nm spatial resolution at sub-Kelvin	POSTECH Science Building 3-004

주요장비 & 연구시설 Equipment & Research Facilities

Item	Price (Unit: Million KRW)	Installation	Use	Location
근접장 주사 라만/발광 이미징 장비 Near Field Scanning Raman Imaging System	437.8	2014.12.09	Quantitative prediction of materials properties based on quantum mechanical principles	POSTECH Science Building 1-312
고자기장 극저온 냉동기 High Field Magnet / Dilution Refrigerator System	662.8	2015.04.23	Electrical property measurements at high magnetic fields and low temperatures	Building for Low Vibration Laboratory
저온터널공명검출기 Low Temperature Tunnel Diode Oscillator Detector	171.0	2015.07.14	Measurement of London penetration depth in superconductors and probe of magnetic transition as small as 2 K	POSTECH Research Building 2-308
초고속 레이저와 파장 분할 펄스 스위치 장비 Ultrafast Laser and Harmonic Generator / Pulse Switch	251.0	2015.08.04	Time-resolved optical characterizations at higher energy optical excitations with higher order harmonics	POSTECH Science Building 1-312
스핀분해광전자 분광장치 Spin-resolved and Angle-resolved Photoemission Spectroscopy	1,565.4	2016.05.06	Establishing the foundation to directly observe the spin-resolved band structure / Researches on new condensed matter properties with electron spins	PAL Storage-ring Laboratory 4A
원자층 이중구조 합성용 클러스터 형 금속유기 화학기상 증착 시스템 Cluster-type MOCVD System for Synthesis of Atomic Layer Heterostructures	401.6	2015.12.31	Syntheses of atomically thin heterostructures in large-scales with MOCVD	POSTECH Science Building 1-406-1
극저온 고자기장 주사 터널링 현미경 Scanning Tunneling Microscopy with Ultra Low Temperature and High Magnetic Field	1,987	2016.12.16	Electronic property measurement at high magnetic field (<10T) and low temperature (>10mK)	Building for Low Vibration Laboratory
주사형 탐침 현미경을 위한 무진동설비 Vibration Isolator Facility for Scanning Probe Microscopy	587.2	2014.12.15	Establishing vibration-free environment (vibration amplitude <1 pm) for STM	National Center for Nanomaterials Technology - STM
Helium Gas Recovery System	277.9	2015.06.02	Helium gas recovery, compression and filtration for He reliquification	PAL Storage-ring Laboratory

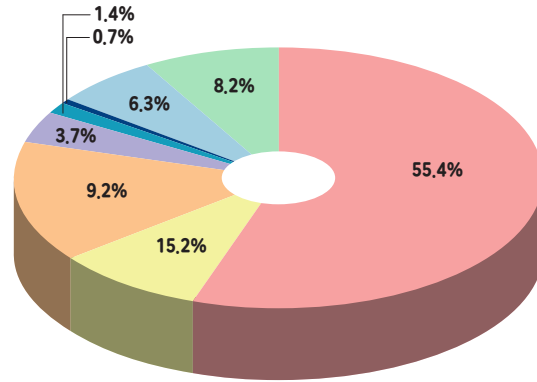
연구비 집행 Research Expenses

2017 운영예산 (2017 Operating Budget)



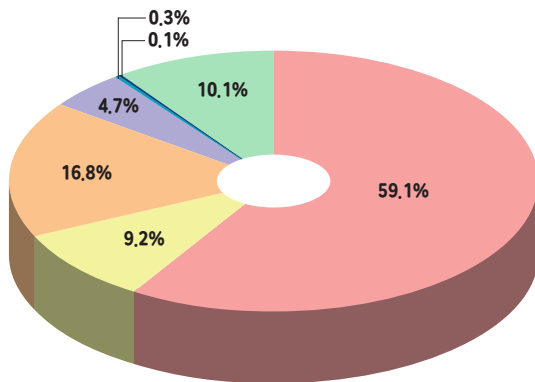
- 인건비(Labor Costs)
- 장비시스템구축비(Equipment Costs)
- 장비관리, 재료비(Material Costs)
- 연구활동비(Cost for Research Activities)
- 연구과제추진비(Research Project Operating Costs)
- 연구수당(Research Allowance)
- 부대경비(Others)
- 간접비(Indirect Costs)

제 1세부과제_Physics Group
39.6억원(3.96 Billion KRW)



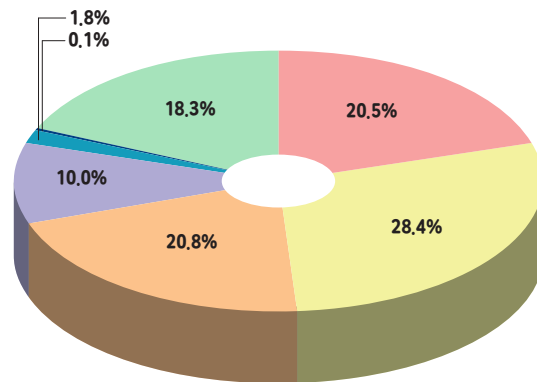
- 인건비(Labor Costs)
- 장비시스템구축비(Equipment Costs)
- 장비관리, 재료비(Material Costs)
- 연구활동비(Cost for Research Activities)
- 연구과제추진비(Research Project Operating Costs)
- 연구수당(Research Allowance)
- 위탁연구비(Outsourced research fundings)
- 간접비(Indirect Costs)

제 2세부과제_Materials Group
15.97억원(1.597 Billion KRW)



- 인건비(Labor Costs)
- 장비시스템구축비(Equipment Costs)
- 장비관리, 재료비(Material Costs)
- 연구활동비(Cost for Research Activities)
- 연구과제추진비(Research Project Operating Costs)
- 연구수당(Research Allowance)
- 부대경비(Others)
- 간접비(Indirect Costs)

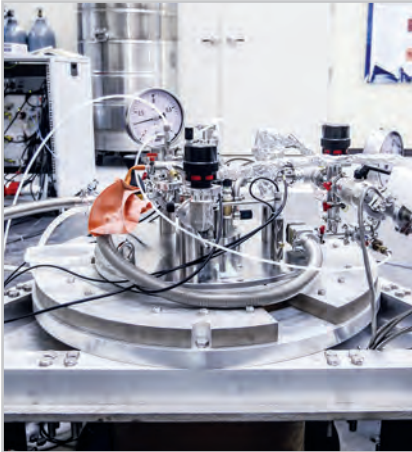
제 3세부과제_Chemistry Group
7.05억원(0.705 Billion KRW)



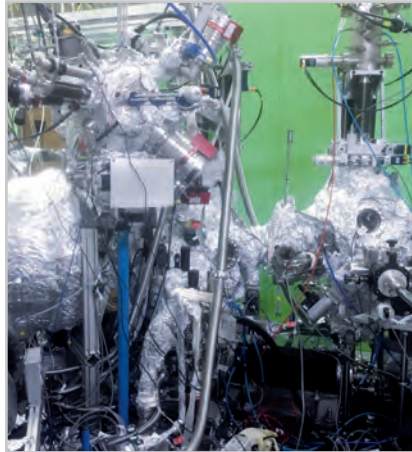
- 인건비(Labor Costs)
- 장비시스템구축비(Equipment Costs)
- 장비관리, 재료비(Material Costs)
- 연구활동비(Cost for Research Activities)
- 연구과제추진비(Research Project Operating Costs)
- 연구수당(Research Allowance)
- 부대경비(Others)
- 간접비(Indirect Costs)

제 4세부과제_Spectroscopy Group
9.28억원(0.928 Billion KRW)

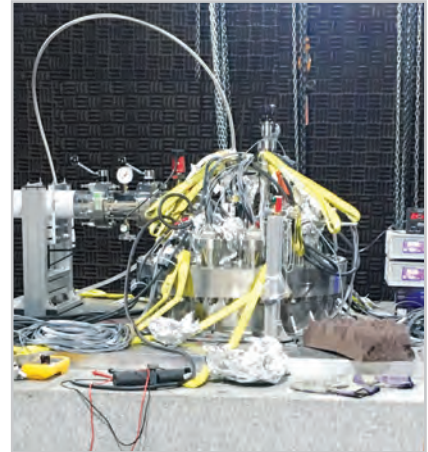
주요장비 & 시설현황 Equipments & Facilities



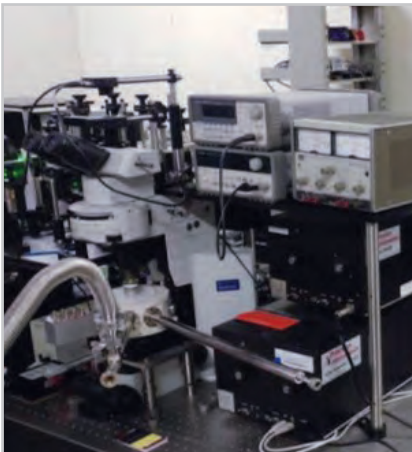
High Magnetic Field/
Dilution Refrigerator System



Spin-resolved ARPES



Ultra Low Temperature High Magnetic
Field STM



Ultrafast Laser and Harmonic Generator/
Pulse Switch



Near-field Scanning Raman/
Photoluminescence(PL) Imaging System



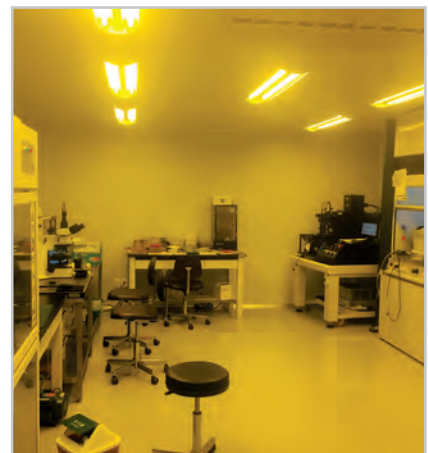
Building for Low Vibration Laboratory



Electron-Ion Dual Beam Lithography
Machine



High-Performance Computing Cluster
System for Data Analysis



Clean Room

연구단 구성 CALDES Members (2018.2)

단장 Director		도익환 Eui Hwan Do	한철희 Cheol Hee Han
염한웅 Han Woong Yeom		이진원 Jinwon Lee	박민영 Minyoung Park
부단장 Associate Director		양우일 Wooil Yang	최송빈 Song Bin Cui
조문호 Moon-Ho Jo		오은석 EunSeok Oh	양우인 Woo In Yang
김범준 Bumjoon Kim		한세희 Sehee Han	김형국 Hyoungkug Kim
P.I.		정지원 Jiwon Jung	안태민 Taemin Ahn
박창원 Changwon Park		계경철 Gyeong Cheol Gye	윤태석 Taeseok Youn
김준성 Jun Sung Kim		권창일 Chang Il Kwon	이동국 Dong Guk Lee
박제욱 Jewook Park		김소영 So Young Kim	김도욱 Dowook Kim
김재영 Jaeyoung Kim		김용현 Yong Hyeon Kim	정승교 Seung-Gyo Jeong
함웅돈 Ungdon Ham		김호일 Ho Il Kim	박요한 Yohwan Park
연구위원/연구원 RESEARCH FELLOW/RESEARCHER		서준호 Jun Ho Seo	송인택 In Tek Song
최희철 Hee Cheol Choi		안은수 Eun Soo An	권태연 Taeyeon Kwon
Keisuke Fukutani		유정상 Jung Sang You	윤태경 Taekyoung Yoon
JianHua Gao		전호성 Hoseong Jeon	이진호 Jinho Lee
Roland Stania		김진광 Jinkwang Kim	김소영 Soyoung Kim
박재한 Jae Whan Park		김 훈 Hoon Kim	박지원 Ji Won Park
김규형 Gyu Hyeong Kim		박선욱 Sunwook Park	안유림 Yoolim Ahn
박선규 Sunkyu Park		이하령 HaRyeong Lee	조혜연 Hyeyeon Cho
옥종목 Jong Mok Ok		오관석 Gwanseok Oh	윤영관 Youngkwan Yoon
Tuan Anh Pham		김주호 Ju Ho Kim	행정/기술원 ADMINISTRATOR/ENGINEER
박광현 Kwang Hyun Park		신호철 Hocheol Shin	
구진영 Jin Young Kook		김동휘 DongHwi Kim	
대학원생 GRADUATES		서승영 SeungYoung Seo	
송선규 Sun Kyu Song		진강태 Gangtae Jin	이지은 Ji Eun Lee
		이창수 Chang-soo Lee	이정화 Jung Wha Lee
		박재현 Jaehyun Park	노승균 SeungKyun Noh
		안현수 Heon Su An	배정순 Jungsun Bae
		오원석 Won Seok Oh	정지혜 Jihye Jung
		이석호 Suk Ho Lee	서주은 Jueun Seo
			총원 Total 76

연구단 활동 Activities



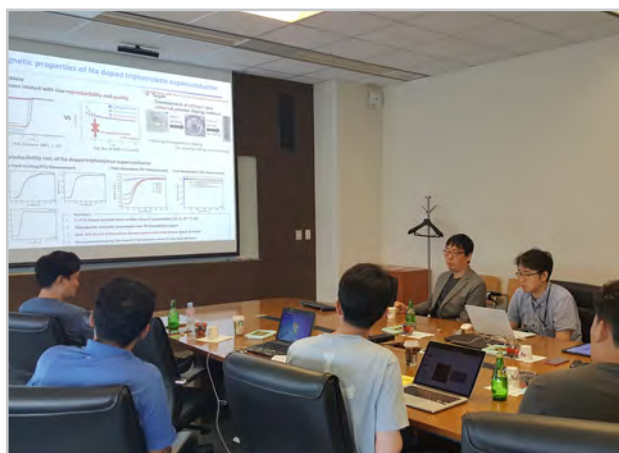
2017 CALDES Research Workshop (2017.01.16-17, Muju, S. Korea)



QMS 2017 (2017.02.19-02.24, Pyeongchang, S. Korea)



2017 CALDES Spring Workshop(2017.04.14, Uljin, S.Korea)



2017 PI Meeting (2017.08.01, Pohang, S. Korea)



NSS-9(2017.09.24-09.28, Gyeongju, S. Korea)



ICAMD 2017(2017.12.05-12.08, Jeju, S. Korea)



Institute for Basic Science

77 Cheongam-Ro Nam-Gu,
Pohang Gyeongbuk, South Korea,
37673

