원자제어 저차원 전자계 연구단

원자제어 저차원 전자계 연구단의 소개

DOI: 10.3938/PhiT.24.035

염 한 웅

Introduction to the Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems

Han Woong YEOM

The Center for artificial low dimensional electronic systems (CALDES) is the sixth physics research center of the Institute for Basic Science. It was established in 2013 and succeeds the Center for Atomic Wires and Layers (2003-2012) and the Center for Low Dimensional Electronic Symmetry (2012- 2013) of the Creative Research Initiative. CALDES aims to explore frontier research areas of atomically-controlled one- and two-dimensional electronic systems based on atomic wires, atomic layers, layered materials, and their heterointerfaces. The major experimental tools are scanning probe microscopy and angle-resolved photoelectron spectroscopy. Three flagship instruments with challenging technical specifications such as a 10-mK scanning tunneling microscope, a 300-mK atomic (magnetic) force microscope, and a new type of spin-/angle-resolved photoelectron spectroscopy system are under construction. We believe that these instruments symbolize a new level of condensed matter physics research in Korea. At present, about 70 researchers, including 8 professors in three research groups, are working together at the CALDES. This article re-

views the research scope, the research plan, and the current status of CALDES.

연구단 짧은 역사

원자제어 저차원 전자계 연구단(Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems)은 기초과학연구원(Institute of Basic Science)의 13번째 신규사업단으로 2013년 6월에 선정되어 본 저자를 단장으로 하여 포스텍을 근거지로 창립되었다. 물리학 분야로는 서울대, 광주과학기술원, 대전 본원, 성균관대를 이어 6번째 실험 분야의 연구단이 되며 이후에 두 개의 이론 분야 연구단이 대전 본원에 추가되었다. 본 원고에서는 이미 널리 알려지고 논의되어온 기초과학연구원 자체에 대한 자세한 소개는 생략하도록 하겠으나, 간략하게 언급하면, 기초과학연구원은 순수기초과학 연구주제에 대한 장기적인 대형 그룹연구를 지향한다. 기존 대학의 연구실들은 소규모 연구실과 소형과제들로 분화되어 긴밀하고 집중적인 협동연구를 필요로 하는 장기적이고 규모가 큰 연구가 불가능했으며, 기존의 출연 연구소들은 중대형 협동연구그룹을 보유하고 있으나, 순수기초과학 연구주제에 대한 장기적인 연구가 가능하지 않은 구조를 지니고 있음은 주지의 사실이다.

본 연구단의 전신은 2003년부터 2010년까지 연세대학교에서, 이어서 그리고 2010년에서 2012년까지 포스텍에서 활동한 창의연구단 원자선원자막연구단(Center for Atomic Wires and Layers)과 2012년에서 2013년까지 포항공과대학교에서 활동했던 창의연구단 저차원전자대칭성연구단(Center for Low dimensional Electron Symmetry)이 된다. 원자선원자막연구단은 9년간의 활동기간 동안 실리콘 기반 위에 자기조립방법을 통하여 형성되는 금속 원자선과 금속 단원자막을 주요 연구 대상으로 하였으며, 방사광가속기를 활용한 고분해능광전자분광, 실험실 자외선광원을 기반한 각도분해광전자분광, 그리고 변온형/저온형 주사터널현미경을 주된 연구방법으로 구사하였다. 특히 국내 최초로 제대로 된 각분해광전자분광설비를 자체적으로 구축 활용하였다. 원자선원자막연구단은 9년간의 기

저자약력

염한웅 교수는 1996년 일본 토호쿠대학에서 고체물리학실험을 전공하여 박사학위를 취득한 후, 동경대학교 조수, 전임강사를 역임 후 2000년 귀국, 연세대학교 물리학과 조교수, 부교수, 교수를 거쳐 현재 포스텍 물리학과 교수로 재직 중이다. 2003-2012년 창의연구단 원자선원자막연구단장을 지냈고, 2012년 두 번째 창의연구단 저차원전자대칭성연구단장을 거쳐 2013년 6월부터 기초과학연구원 원자제어저차원전자계연구단장직을 수행하고 있다. 광전자분광과 주사터널현미경을 사용한 표면, 나노 및 저차원물질계 연구가 전문분야이며, 세계적으로 원자선전자물성분야를 개척하고 발전시켜 왔다. (yeom@postech.ac.kr)

간 동안 매우 활발한 연구활동을 벌여 Phys. Rev. Lett 16편, Phys. Rev. B 39편 등의 연구 성과를 발표하였으며, 국제적으로 자기조립원자선분야를 개척하고 선도하는 역할을 하였다. 이 연구단을 벤치마킹하고 그 연구내용을 계승하여 수년 전부터 유럽에 원자선 관련 대형프로젝트들이 만들어져 현재 활발히 활동하고 있다. 저차원전자대칭성연구단은 금속 원자선 및 단원자막에 대한 원자선원자막연구단의 연구를 계승하면서 이를 현재적으로 확대발전시키고자 하였다. 즉, 2010년 이후 응집물질물리학의 큰 흐름을 형성하기 시작한 위상절연체의 에지상태와 같은 새로운 저차원전자계의 연구를 포함한 보다 광범위한 물질계와 보다 복잡하고 흥미로운 물성을 가지는 저차원전자계 연구에 도전하려 하였다. 2012년에서 2013년 전반기까지의 짧은 연구기간동안 전하밀도파를 보이는 일차원 물질계에서의 위상학적 에지 상태를 최초로 실험공간에서 관측하였고, 0.9 K까지 도달하며 3 T 자기장이 인가되는 극저온주사터널현미경을 구축하는 등 활발한 연구 활동을 이어나갔다. 저차원전자대칭성연구단은 또한 연구단 형태에서도 진화를 하여 독립된 단일 교수에 의한 연구단 체제가 아니라 전임교원 3명 규모의 연구단을 구성하였으며, 이러한 형태의 연구단 구조는 자연스럽게 아래에서 설명할 기초과학연구원 연구단으로 이어질 수 있었다.

연구내용의 개요

본 연구단은 앞서 언급한 저차원전자대칭성연구단이 목표하였던 금속원자선(일차원전자계)과 위상절연체 에지상태(일/이차원전자계) 연구를 보다 넓고 깊게 확장하여 오랫동안 현대 응집물질물리학의 핵심대상이자 미해결의 핵심난제이기도 한 저차원전자물성을 새로운 물질과 첨단 방법론 그리고 현대적인 시각으로 풀어가려 한다. 새로운 물질이란, 결정의 성장과정에서 자발적으로 또는 인위적으로 형성되는 저차원 구조체들을 말하는데, 단원자막, 단원자선, 단원자막대 등과 같은 원자단위 구조가 해당하며 이들의 조합으로 만들어지는 다양한 이중(हे테로)접합 구조체들을 말한다. 특히 van der Waals 힘으로 결합된 층상물질의 성장과 박리를 중심으로 다양한 새로운 저차원 물질계를 창조하는 것이 최근 수년간 가능해져, 원자수준에서 연구 가능한 새로운 저차원계물질이 매우 다양하게 확대되었다. 새로운 방법론이란 1980년대 이후 급속하게 발전하여 온 주사터널현미경(STM)에 기반한 분광학(Scanning tunneling spectroscopy)과 각분해광전자분광(Angle-resolved photoelectron spectroscopy)을 말한다. 이들 실험방법들은 2008년 이후 그래핀(Graphene) 및 위상절연체(Topological insulator)와 같은 새로운 저차원전자계를 연구하는 가장 중요한 실험방법으

Fig. 1. Goal of Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems (CALDES).

로 자리잡았으며, STM의 경우는 극저온(약 100 mK)과 고자기장(15 T) 하의 실험이 가능해지고, 각분해광전자분광의 경우는 스핀을 분해한 전자밴드구조의 측정이 용이해지는 기술적인 진보가 진행되고 있다.

본 연구단은 삼차원위상절연체와 이차원반도체디락물질 연구에 그 중심을 두고 있는 현재의 저차원 응집물질 연구의 주요 흐름과는 차별되게, 일차원 및 이차원 위상절연체, 그리고 복잡한 물성을 가지는 이차원원자막(층상물질)과 이들간의 헤테로접합이라는 새로운 연구의 흐름을 만들어내고자 하는 아이디어를 2013년에 제안하였다. 이미 2년 정도 지난 현 시점에서 복잡한 전자물성을 가지는 이차원층상물질계의 연구는 반도체디락물질 연구의 뒤를 이어 새로운 흐름으로 점차 가시화되고 있어 이러한 아이디어의 선도성이 확인되고 있다. 또한 본 연구는 새로운 저차원전자계에 대하여 원자단위의 조절과 조작을 통하여 보다 혁신적인 형태의 일차원과 이차원 위상물질을 창조하고자 하며 이들로부터 기존에 연구된 저차원전자물성연구에 대한 새로운 통찰, 새로운 전자물성의 개념, 그리고 새로운 기능성을 끌어내려 한다. 아울러 원자수준에서 제어된 원자막을 다양한 상호작용을 가지는 저차원결정계와 이중접합할 경우 근접장효과를 통해 완전히 새로운 이차원 계면 전자계를 구현할 수 있다는 독창적인 아이디어를 테스트하려고 한다. 여기에서 원자수준의 제어란 단원자 수준의 불순물 제어와 관측, 또한 단원자/단원자막 수준에서 제어된 헤테로 접합을 의미한다. 이러한 헤테로접합에서 서로 다른 상호작용이 근접장효과에 의해 보다 복잡하고 흥미로운 상호작용과 전자물성으로 '발현'하여 저차원전자계 물리연구에 새로운 돌파구가 마련되기를 기대한다.

연구장비 개발계획의 개요

저차원전자계에 대한 원자수준의 연구는 실험방법론의 고도

화를 통하여 더욱 높은 수준으로 발전할 수 있다. 특히 본 연구단은 뒤이어서 상세히 설명될 세 가지 세계 최고 또는 유일 무이한 성능의 플래그쉽 장비들을 자체 제작하여 한국물리학의 기술적 수준을 한 단계 높이고 국제적으로 응집물질물리학 발전에 공헌하려 한다. 이들은 우선 세계 최저온도의 STM과 세계 최저온도의 원자힘현미경(AFM/MFM)이며 각각 목표 온도는 7 mK 그리고 300 mK가 되며 9+2+2 Tesla의 벡터자장을 활용할 수 있다. 이러한 장비들은 현재 존재하지 않으며, 극저온 STM의 경우는 올해 말 완성 예정, 그리고 극저온 AFM/MFM의 경우는 이미 지난해 말에 완성되어 현재 실질적인 실험에 활용되고 있다. 또한 최근에 일본에서 새롭게 개발된 고효율 저에너지전자스핀검출기를 세계최초로 3세대방사광 광전자분광설비와 결합하여 세계에서 가장 측정효율이 높은 스핀/각분해광전자분광장치를 올 가을을 목표로 포항방사광가속기 내에 설치하게 된다. 이 장치가 성공적으로 완성되면, 국내 최초의 스핀/각분해광전자분광장치가 되며, 기존에 측정효율이 매우 낮아 어려움이 있었던 스핀/각분해광전자분광 연구에서 세계적인 breakthrough가 되어, 전 세계적으로 높은 수준의 공동연구가 진행될 것이라 믿고 있다. 본 저자는 이러한 세계 최고수준의 장비개발이 한국물리학 역사에 있어서의 중요한 전환점이 될 것이라 믿고 있다.

위에 서술한 연구 내용을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

- (1) 원자수준에서 조절된 신물질 제작기법을 동원하여, 원자 수준의 저차원 신물질계인 원자선, 원자막 등을 제작하고 이들과 기존의 저차원물질계와의 이종접합계면을 창조한다.
- (2) 이러한 원자수준 저차원 신물질과 이종접합계면의 물성을 정밀하게 측정할 수 있는 원자수준의 물성측정 기법을 확립한다.
- (3) 새로운 원자수준 저차원 물질계와 이들의 이종접합계면에 대한 원자수준의 물성연구를 통하여 저차원위상물질 연구에 새로운 돌파구를 마련하며 나아가 대칭성, 위상특성, 그리고 전자상호작용의 복합적 작용에 기초한 새로운 저차원전자물성을 발견한다.
- (4) 이를 통하여 혁신적이고 미래적인 저차원전자계 기반 전자소자의 개발을 위한 기초를 마련한다.

제안과제의 창의성

본 과제는 실험물리학의 관점에서 현재까지 맹아적인 단계에 머물고 있는 일차원 및 이차원 위상물질, 그리고 이들과 강한 상호작용을 가지는 저차원 전자계의 헤테로접합을 연구한다는 점에서 매우 프론티어적인 과제이다. 특히 국제적으로 이 분야의 관심이 매우 높지만 아직 관련분야의 주요 선도연구그룹들

Fig. 2. Research objects of CALDES.

이 삼차원위상물질 연구와 단순한 이차원반도체물질에 집중하고 있다는 점에서 새로운 영역을 선도적으로 개척하는 과제가 될 것이다.

본 과제는 새로운 저차원물질의 구현을 인위적으로 원자수준에서 조절하여 만들어지는 신물질구조(원자선, 나노선, 원자막, 수층의 원자막 헤테로구조 및 이들의 조합)로 해결하려 한다는 점에서 기존의 삼차원위상물질 연구 및 반도체헤테로 구조에 기반한 기존의 저차원물질 연구와 분명히 차별화되며 독창성과 창의성을 가진다 하겠다. 또한 원자막과의 이종접합계면을 활용하여 서로 다른 상호작용이 근접장효과로 공존하는 물질계를 만들려는 창의적인 제안을 포함하고 있다.

이러한 창의적인 연구 제안은 본 연구진이 지난 10여 년간 원자수준에서 성장되고 조절된 일차원 및 이차원 신물질의 연구에 집중하여 국제적으로 해당 분야를 개척하고 선도해 온 연구 경험과 연구 능력에 의해 비로소 실현가능성과 국제적인 경쟁력을 지닌다고 하겠다. 특히, 본 연구 그룹은 원자제어 물질성장기법과 함께 저차원전자물성 연구에 결정적으로 중요한 각분해광전자분광과 주사터널현미경 기법을 각각 전인미답의 수준으로 끌어올리는 계획을 제시하고 있어서 실험기법의 면에서도 높은 국제적 선도성을 가진다 할 수 있다. 나아가 이러한 두 가지 중요한 기법을 동시에 높은 수준에서 구사하는 연구 그룹이 세계적으로 매우 드물다는 점에서 국제적으로 유례없는 연구능력을 보유하게 된다.

연구진 구성과 연구비 현황

본 연구단은 애초 연구단장이 직접 운영하는 광전자분광/주사터널현미경 중심의 물리연구 그룹과 (연 예산 약 30억 원/년) 재료물리, 재료화학, 전도물성의 3개의 그룹리더 연구그룹(연구비 각 10~15억/년)으로 구성된다. 정상운영상태로 운영될 경우 연구원 70여 명(대학원생 포함) 연구비 70여억 원/년으로 계획되었다. 현재까지는 연구단장 그룹과 재료물리 및 재

Fig. 3. CALDES organization.

료화학의 3개 그룹이 구성 완료되어 활동 중이며 올해 제3의 그룹 즉 전도물성그룹을 구성하기 위하여 그룹리더 공모를 진행 중이다. 현재 교수급 참여인력은 단장과 부연구단장, 그룹리더 1인 그리고 조/부교수급 인력 5인으로 총 8명이 되는데, 이 중 6명은 포항공대로부터의 파견형태이며 (3명 신입임용교수) 나머지 2인은 기초과학연구원 정년보장트랙 연구원에 해당한다. 후자의 인력은 정해진 기간 후에 정년보장심사를 거쳐 기초과학연구원과 정년보장계약을 체결하게 되고 기초과학연구원 교수 직위를 부여받게 된다. 올해 말 최종적으로 4개의 그룹 구성이 완료될 경우 9~10명의 교수들이 다른 연구과제에의 참여없이 몰입하여 장기적으로 협동연구를 하는 기존에는 없던 새로운 형태의 대형 연구집단이 탄생하게 된다. 현재의 연구진 구성은 위의 표 1과 같으며, 요약하면 교수급인력 8명, 포스트닥급 인력 11명, 대학원생 54명, 행정인력 4명, 기술인력 1명의 구성이 된다.

연구비는 위에서 언급한 바와 같이 정상상태의 경우 70여억 원/년 규모가 되며, 현재는 60억 원/년 규모로 운영되고 있다. 이와 별도로 초기 장비구축예산으로 2013-2015년 3년간 약 100억 원을 집행할 계획으로서, 위에서 언급한 3개 플래그쉽 장비에 52억 원, 그리고 기타 장비 및 인프라구조 구축에 48억 원의 예산이 소요될 예정이다.

지난 2년간의 연구성과

이 자리를 빌어 지난 2년간의 연구성과를 간략하게 정리하면 (재료물리 및 재료화학 그룹의 연구성과는 별도로 기술되므로 여기에서는 주로 연구단장의 물리그룹 연구성과를 소개함), 우선은 위에서 언급한 바와 같이, 약 3개의 그룹에 60여 명의 연구원/행정원/기술원으로 구성된 연구단 구성이 단기간에 이루어졌고, 높은 수준의 전문적인 전임연구인력들이 확보되었다. 또한 연구단의 핵심전략이라 할 세 가지 플래그쉽장비 제작과

Table 1. Present composition of the CALDES man power.

인력구분		인원
교수	연구단장	1
	부연구단장	1
	그룹리더	1
	학연교수	3
	영년직 연구위원	2
포스트닥	비영년 연구위원	11
학생	대학원생	54
운영지원	행정 · 기술원	5
총원		78

구축이 상당부분 진전되어 0.3 K 극저온 AFM/MFM이 완성되었으며 다른 두 가지 장비는 올해 말 완성 및 2016년 중 운영시작을 목표로 차질없이 진행되고 있다. 이들 중 세계 최고 성능의 주사현미경들을 위한 무진동 건물과 액체헬륨공급기 또한 올해 초에 건설이 완료되었고, 스핀/각분해광전자분광설비를 위한 포항방사광가속기 빔라인의 업그레이드도 약 15억원의 포항방사광가속기 예산이 투입되어 완료되었다. 이 과정에 포항방사광가속기연구소와 나노기술융합원의 큰 도움이 있었다.

연구의 성과로는 2013년 TI(탈륨) 이차원 단원자막에서 새로운 형태의 스핀밸리구조를 발견하여 Nature Communication에 출간하였으며, 2014년에는 Bi 이차원위상절연체의 에지전자상태를 세계 최초로 관측하였으며(Phys. Rev. B 2014), 스핀궤도상호작용이 강한 층상물질 IrTe₂에서의 stripe order를 관측하고 이들의 국소전자상태를 규명하였다(Phys. Rev. B 2014). 2015년에는 Bi 이차원위상절연체를 삼차원위상절연체 위에 성장시켜 이를 통해 삼차원위상절연체의 에지상태를 표면 금속단원자막에 전이시킬 수 있음을 실증하고 이를 topological surface state transformation이라는 새로운 개념으로 정리하였다(Phys. Rev. B 2015). 스핀궤도상호작용이 강한 층상물질 IrTe₂에 대한 연구는 2015년에도 이어져, stripe charge order에 대한 상세한 연구결과가 Nature Communication에 출간되었으며, 세계 최초로 stripe order와 경쟁하는 hexagonal charge order를 발견하였다(Phys. Rev. Lett. 리뷰 중). 아울러 전자-전자상호작용과 전자-포논상호작용이 동시에 강한 (Mott-CDW 계) 이차원층상물질인 1T-TaS₂에 대한 주사터널링현미경 연구를 진행하여, Mott-CDW 상태를 나노스케일에서 조절하는 것에 성공하였다(Nature Communications 리뷰 중). 또한 새로운 층상반도체물질로 각광을 받고 있는 black phosphorous의 밴드갭을 조절하는 방법을 개발하여 주목을 끌고 있다(Science 2015). 이와 같은 연구들이 새롭게 전개하는 이차원물질(이차원위상절연체와 복잡한 상호작용을 내포하는 층상물질)에 대

한 연구라면, 기존에 이미 세계적으로 연구분야를 선도해온 자기조립원자선에 대한 연구도 활발히 진행하여, 금속원자선 배열의 strain engineering을 세계 최초로 실현하여 strained atomic wire array라 명하였고 (Phys. Rev. Lett. 리뷰 중), 금속원자선을 유한한 길이로 잘라내 만드는 금속원자막대의 양자 우물 상태를 역시 세계 최초로 관측하였다 (Phys. Rev. Lett. 리뷰 중). 아울러 전하밀도파(CDW) 상태의 원자선에 대한 연구를 통하여 일차원위상절연체 상태를 구현하고 그 예지상태인 솔리톤전자여기를 실공간에서 관측하였으며, 이러한 솔리톤 상태가 원자격자구조 대칭성의 미묘한 붕괴를 통하여 새로운 형태의 솔리톤, 즉 카이랄성질을 가지는 솔리톤이 됨을 이론적으로 규명하였다 (Science 리뷰 중). 이 연구는 저차원위상절연체 연구에 중요한 전환점이 될 것으로 기대하고 있다. 위와 같이 만 2년이 되지 않는 짧은 기간이지만 향후의 전망을 밝게 비추어주는 몇몇 중요한 연구성과가 산출되고 있다.

특히 이러한 초기 연구성과들은 연구단이 제안한 선도적이고 창의적인 연구아이디어가 큰 성공으로 이어질 가능성이 높음을 확인해주고 있으며, 동시에 연구단의 초기 인적구성과 연구조직구성이 성공적으로 이루어졌음을 보여주고 있다. 앞으로 전도물성그룹이 추가되고 물리/재료/화학 그룹간의 공동연구가 보다 활성화되면 더욱 더 높은 수준의 연구성과가 산출될 것이라 기대된다. 또한 2016년 또는 2017년을 시작으로 기초과학연구원 포항캠퍼스가 포항방사광가속기 인근의 부지에 착공되어 새로운 연구원건물이 수년 내에 완공되면, 모든 연구그룹들이 하나의 공간에 집중되어 이러한 공동연구를 더욱 심화시킬 수 있을 것이다.

요 약

본 연구단은 기존의 원자선원자막연구단 그리고 저차원전자대칭성연구단에서 축적한 원자수준의 저차원 물질계 제작 노하우와 원자수준 물질성장 기술을 바탕으로 하여, 원자 단위의 물질 조절을 통하여 새로운 저차원전자계를 창조하고 이들이 지니는 저차원전자의 대칭성과 위상질서를 미시적으로 연구한다는 창의적인 아이디어를 제시한다. 이러한 아이디어와 자체

Fig. 4. Bird view image of the IBS Pohang Campus building to be constructed.

적으로 구축할 세계 최고 수준의 첨단 측정장비를 토대로, 세계적으로 아직 맹아적 단계에 머물고 있는 저차원 위상물질과 상호작용이 강한 저차원전자계 헤테로구조 연구에 새로운 방향을 개척하고, 이 분야를 세계적으로 선도하게 될 기초적이며 선진적인 연구를 진행할 것이다. 이를 통하여, 국제적으로 물리학발전에 공헌할 독창적인 연구성과를 산출함과 동시에, 응집물질물리학, 특히 표면 및 나노 물리학 분야에서 세계 최고 수준의 연구 인력을 배출하여, 한국 응집물질물리학의 기술적, 인적 수준을 한 차원 더 높이 향상시키고자 한다. 지난 20여년간 한국의 물리학이 비약적으로 발전한 것은 사실이나, 이러한 발전이 양적(space) 성장에 치우쳐 있고, 독창적인 연구성과를 중심으로 한 질적 성장이 미진하였음 또한 사실이다. 이러한 상황 속에서 한국물리학의 질적인 발전에 무엇이 가장 중요하며 무엇이 가장 적절한 방법인가는 여러 가지 다른 생각이 있을 수 있다. 하지만 본 저자는, 무언가 지금까지와는 다른 새롭고 혁신적인 시도가 절실히 필요하다고 생각하며, 기초과학연구원이라는 다소 과할 수도 있는 형태의 시도 또한 시도해 볼 가치가 충분하다고 생각한다. 기왕에 시작된 기초과학연구원이 한국물리학의 토양에 충분히 스며들어 지금까지 가능하지 않았던 큰 나무를 키울 수 있도록 물리학회 회원 여러분의 많은 관심과 끊임없는 지도편달을 바란다.