

Vol. 17

Department of Physics

Newsletter



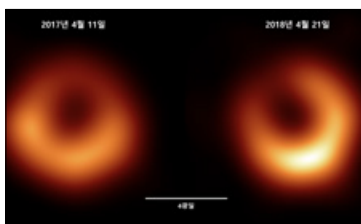
<http://physics.kaist.ac.kr>

Contents

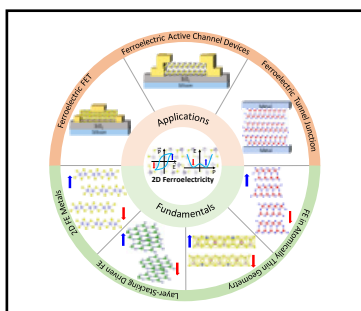
03 학과장 인사말

04 학과소식

- 학과소식
- 인터뷰 : 오한빛 연구원



p.5



p.15



p.21

14 Research Highlights

- 주양근 학생, 양희준 교수
- 박주연 학생, 박용근 교수
- 유인철 학생, 이상민 교수
- 최조열린 학생, 이해성 교수
- 이재욱 학생, 이해성 교수

20 연구실 소개

- 김갑진 교수 연구실
- 양희준 교수 연구실
- 조성재 교수 연구실
- 양찬호 교수 연구실
- 김은성 교수 연구실

26 심흥선 교수 기고문

31 학과 발전기금 안내



학과장 인사말

KAIST 물리학과 구성원 여러분, 안녕하십니까? 어느덧 다사다난한 2023년이 저물고, 새로운 봄이 찾아오고 있습니다. 따스한 햇살과 생동감 있는 교정에서 진리에 대한 탐구와 사회에 대한 기여를 위한 창의적인 활동이 활발히 이루어지길 소망합니다. 새로이 합류 하거나 떠나가는 구성원들 모두가 본인의 꿈을 찾아 도약하는 기회가 충만하길 기원하고, 사회 곳곳에서 활약하고 있는 졸업생 여러분들의 건승을 응원합니다.

지난 가을학기에는, 김준한 교수님이 부임하셨습니다. KAIST가 본격적으로 천문학 분야를 육성하는 시작점이 될 것입니다. 김교수님은 사건지평선망원경(Event Horizon Telescope; EHT) 프로젝트에 참여하시는 전파 관측 천문학자로서 M87 블랙홀의 촬영에 큰 기여를 하신 분입니다. 또한, KAIST 물리학과와 양자 도약을 가속하는, 양자 정보 기술의 연구가 활발히 이루어졌습니다. 안재욱 교수님은 100 큐비트급 리드버그 양자컴퓨터를 개발하고 조합 최적화 문제를 계산하여 세계적인 관심을 끌고 있습니다. 라영식 교수님의 손상된 양자 얽힘 복구 연구와 최재윤 교수님의 양자 시뮬레이터 얽힘 관측 연구도 KAIST 양자과학기술 발전을 한단계 도약시키는 흥미로운 결과들을 제시하고 있습니다. 더불어, 빅데이터 분야의 저명 학자인 정하웅 교수는 인공지능경망 모델을 활용해 사람 뇌에서 음악 본능이 나타날 수 있는 원리를 규명하였습니다.

또한 이번 학기에도 괄목할 만한 성과로 세상의 큰 주목을 받은, KAIST 물리학과와 인물들이 있습니다. 심흥선 교수님께서는 준입자 애니온 현상에 대한 업적을 인정받아 경암교육문화재단에서 수상하는 '제19회 경암상'을 수상하였고, 같은 연구실의 이준영 박사님은 한국 물리학회 '응집물질물리학 젊은과학자상'을 수상하여 연구 성과를 널리 알렸습니다. 그리고 홍성우 교수님께서는 기초과학 연구를 지원하는 포스코사이언스펠로십에 선정되었으며, 양희준, 서민교 교수님께서는 한국과학기술한림원의 차세대 젊은 과학자(Y-KAST) 회원으로 선출되어 KAIST 물리학과와 저력을 널리 알렸습니다.

물리학과와 연구 성과가 괄목하게 성장함으로써 KAIST의 물리과학(Physical Sciences) 분야의 랭킹이 급격히 상승하게 되었습니다. 연구 성과를 집중적으로 조명하는 네이처 인덱스(Nature Index) 순위에 따르면 세계 20위권에 진입하였습니다. 대한민국 대표 물리학 과로서의 입지를 다지고 수월성 높은 연구와 교육으로 인류에 기여하기 위해서는 보다 큰 규모의 학과로 나아가야 합니다. 이를 위해 '과학난제 및 양자 연구원동'의 신축을 추진하고 있습니다. 이를 위한 다각도의 노력이 이루어지고 있고 구성원 여러분들의 관심과 후원이 미래 도약의 밑바탕이 될 것입니다.

KAIST 물리학과는 학생, 교수, 연구원, 직원, 동문 여러분의 바램과 소망을 항상 응원하며, 그 자리에 묵묵히 서 있겠습니다. 여러분들의 가정에 건강과 행복이 함께 하시길 바라겠습니다.

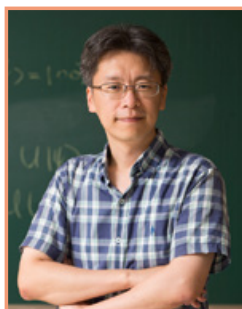
2024년 3월 3일
물리학과장 양찬호 드림

학과소식

2023년의 가을 학기동안 있었던 소식을 전달합니다. 우리 학과의 뛰어난 연구 성과가 여러 언론 매체에 소개되어, 많은 주목을 받고 있습니다.

심흥선 교수

[제 19회 경암상] 수상



우리 학과 심흥선 교수님께서 경암교육문화재단에서 발표하는 제 19회 경암상을 수상하였습니다.

심흥선 교수는 새로운 입자의 존재를 입증하고 스핀 구름을 발견해 현대 물리학의 미해결 난제를 해결했다는 점에서 높은 평가를 받았습니다. 양자 물리 이론 연구로 기초과학 발전과 국가 미래 산업의 토대 구축에 의미 있는 기여를 하고 있다고 재단을 전했습니다.

경암교육문화재단은 고 송금조 태양그룹 회장이 사재를 출연해 설립한 공익재단으로, 2004년부터 경암상을 제정해 각 학문 분야에서 뛰어난 업적을 이룬 학자에게 매년 시상하고 있습니다.

시상식은 11월 3일 오후 3시 30분 경암교육문화재단 경암홀에서 열렸으며 수상자에게는 국내 최고 수준인 2억원의 상금과 상패가 수여되었습니다.

서민교 교수

한림원, 2024년도 한국 차세대과학기술한림원 (Y-KAST) 회원 선출

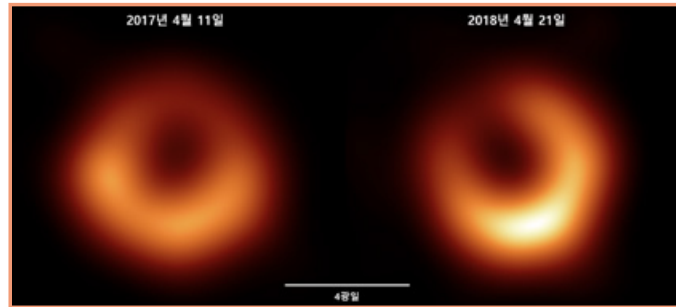


우리 학과 서민교 교수님께서 2024년도 한국차세대과학기술한림원 (Y-KAST) 회원으로 선출되었습니다.

우리나라 과학기술계 최고 석학기관인 한국과학기술한림원은 과학기술 분야에서 탁월한 연구성과를 발표하며 두각을 나타내고 있는 젊은 과학자 24인을 2024년도 한국차세대과학기술한림원(Young Korean Academy of Science and Technology, 이하 Y-KAST) 회원으로 선출했습니다.

* Y-KAST 회원은 만 43세 이하의 젊은 과학자들 중 학문적 성과가 뛰어난 연구자를 선발하며, 특히 박사학위 후 국내에서 독립적 연구자로서 이룬 성과를 중점 평가함으로써 우리나라 과학기술 발전에 기여할 가능성이 높은 차세대 과학기술리더를 최종 선출한다.

김준한 교수 M87 블랙홀의 1년 뒤 모습은?

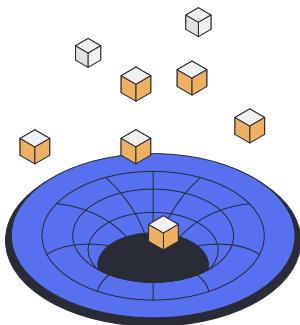


우리 학과 김준한 교수님께서 포함된 사건지평선 망원경(EHT, Event Horizon Telescope) 국제 공동 연구진이 M87 은하 중심에 위치한 초대질량 블랙홀을 관측한 결과를 발표했습니다.

한국의 연구진 및 연구기관들이 참여한 국제 공동 연구진이 사건지평선 망원경(EHT)으로 M87 은하 중심에 위치한 초대질량 블랙홀의 그림자와 빛의 고리 구조를 또다시 포착했습니다. 이번 영상은 2018년 관측 데이터로부터 얻었으며 이는 2017년 인류 역사상 최초로 포착해 2019년에 발표한 M87 블랙홀의 1년 뒤 모습입니다.

2018년 포착한 블랙홀 그림자와 빛의 고리 구조 크기는 2017년과 일치했지만, 고리 구조의 가장 밝은 부분의 위치에 차이가 있었습니다. 아인슈타인 일반 상대성 이론에 의하면 블랙홀 고리 구조의 크기는 시간이 흐름에 따라 일정하게 관측될 것으로 예상되지만 고리 구조의 밝기 분포는 블랙홀 주변 플라즈마에 존재하는 난류 등의 효과로 인해 변할 수 있기 때문입니다.

연구진은 2017년과 2018년 관측 영상을 비교·분석해 일반 상대성 이론 및 M87 블랙홀의 존재를 다시 한 번 검증했으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 후속 연구를 통해 고리 구조의 밝기 변화를 분석함으로써 블랙홀 주변 물질 유입 및 방출 과정에 대한 더 큰 실마리를 찾을 것으로 기대됩니다.



EHT는 2017년을 시작으로 2018, 2021, 2022년에 M87을 관측했으며 2024년에도 관측을 수행할 예정입니다. 특히 올해는 한국천문연구원 운영하의 한국우주전파관측망(KVN, Korean VLBI Network)이 관측에 직접 참여하며, 연구진은 KVN의 참여로 더 정확한 블랙홀 영상을 얻을 수 있을 것으로 기대한다고 밝혔습니다.

라영식 교수 연구실 손상된 양자얽힘을 되돌리는 기술 개발 성공

현시대 컴퓨터로는 풀기 어려운 문제를 해결하려는 기술이나 고전적으로는 도달할 수 없는 높은 정밀도의 구현, 그리고 원천적으로 해킹이 불가능한 통신 기술들의 공통점은 바로 양자정보 기술을 활용한다는 것입니다. 현재 많은 관심을 받고 있는 양자정보 기술의 대부분은 양자얽힘이라는 양자적 특성을 기반으로 합니다.

우리 학과 라영식 교수 연구팀이 약한 양자측정을 양자얽힘 검증에 도입해 양자얽힘의 직접적 검증을 진행하고, 이 과정에서 손상된 양자얽힘을 되돌림 측정을 이용해 양자얽힘을 원래대로 되돌리는 기술 개발에 성공했다고 10일 밝혔습니다.

양자얽힘은 고전 물리로 설명될 수 없는 양자 물리의 고유한 특성으로서 서로 멀리 떨어져 있는 두 입자 중 한쪽의 상태가 결정되는 순간 다른 쪽의 상태가 결정되는 독특한 현상을 나타냅니다. 양자얽힘의 존재는 양자측정을 사용하여 검증해야 하지만, 이러한 측정 과정 자체가 양자얽힘을 파괴하는 문제가 있어 검증이 완료된 양자얽힘 상태를 차후 양자기술에 활용하는데 어려움이 있었습니다.

하지만, 연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 양자얽힘을 완전히 파괴시키지 않는 ‘약한 양자측정’을 도입하여 양자얽힘을 검증하였고, 이 과정에서 손상된

양자얽힘을 ‘되돌림 측정’을 이용해 원상태로 되돌리는 기술을 개발하였습니다.

‘약한 양자측정’이란 양자상태를 측정할 때 양자상태에 가해지는 변화를 줄이면서도 필요한 정보를 얻어낼 수 있는 양자측정 기술입니다. 약한 양자 측정을 양자얽힘 검증에 도입할 경우, 양자얽힘을 완전히 파괴하지 않고도 양자얽힘이 존재하는지 확인할 수 있습니다.

약한 양자측정 이후 양자상태에 남아 있는 양자얽힘의 양은 원래의 양보다는 적습니다. 연구진은 ‘되돌림 측정’을 도입해 줄어든 양자얽힘을 원래대로 되돌릴 수 있음을 보였습니다. 약한 양자측정의 역과정에 해당하는 되돌림 측정은 손상된 양자상태를 일정 확률로 원래대로 되돌려 양자얽힘을 원상태로 복구할 수 있습니다. 이러한 복구 과정은 앞서 시행한 양자얽힘 검증과 상호 교환 관계가 있어, 연구팀은 두 값을 적절히 조정할 시 양자얽힘의 존재를 검증함과 동시에 되돌려진 양자얽힘을 다시 활용할 수 있음을 보였습니다.

라영식 교수는 “이번 연구를 활용하여 검증된 양자상태를 양자 암호 키 분배, 양자 원격 전송과 같은 다양한 양자 기술 분야에 적용할 수 있을 것이라고 연구의 의의를 설명했습니다.



정하웅 교수 연구실 KAIST, 인간의 음악 본능을 인공지능으로 밝혀냈다!

우리 학과 정하웅 교수님 연구팀이 인공지능망 모델을 활용해, 사람 뇌에서 특별한 학습 없이도 음악 본능이 나타날 수 있는 원리를 규명했다고 밝혔습니다.

기존 학자들은 다양한 문화권에 존재하는 음악의 보편성과 차별성을 규명하고, 어떻게 이런 공통성이 나타날 수 있는지에 대해 이해하고자 시도해 왔습니다. 2019년 세계적인 과학 저널 '사이언스'에 게재된 연구를 통해 민족지학적으로 구분된 모든 문화에서 음악을 만들어 내고, 유사한 형태의 박자와 멜로디가 사용된다는 것이 발견되었습니다.

또한, 신경과학자들은 우리 뇌의 청각 피질(Auditory cortex)에 음악 정보처리를 담당하는 특정한 영역이 존재한다는 것을 밝혀냈습니다.

연구팀은 인공지능망을 사용해 음악에 대한 학습 없이도 자연에 대한 소리 정보 학습을 통해 음악 인지 기능이 자발적으로 형성됨을 보였습니다.

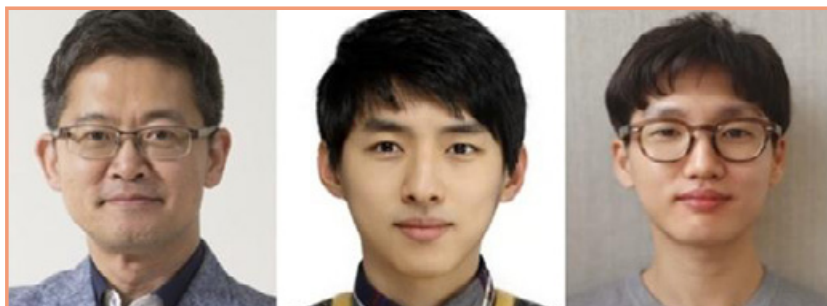
연구팀은 구글에서 제공하는 대규모 소리 데이터(AudioSet)를 활용해, 인공지능망이 이러한 다양한 소리 데이터를 인식하도록 학습하였습니다. 흥미롭게도 연구팀은 네트워크 모델 내에 음악에 선택적으로 반응하는 뉴런(신경계의 단위)이 발생함을 발견했습니다. 즉, 사람의 말(speech), 동물 소리, 환경 소리, 기계 소리 등의 다양한 소리에는 거의 반응을 보이지 않으나 기악이나 성악 등 다양한 음악에 대해서는 높은 반응을 보이는 뉴런들이 자발적으로 형성

된 것입니다.

이 인공지능망 뉴런들은 실제 뇌의 음악정보처리 영역의 뉴런들과 유사한 반응 성질을 보였습니다. 예를 들어, 인공 뉴런은 음악을 시간적으로 잘게 나누어 재배열한 소리에 대해 감소된 반응을 보였습니다. 이는 자발적으로 나타난 음악 선택성 뉴런들이 음악의 시간적 구조를 부호화하고 있음을 의미합니다. 이러한 성질은 특정 장르의 음악에만 국한된 것이 아니라, 클래식, 팝, 락, 재즈, 전자음악 등 25개에 달하는 다양한 장르 각각에 대해서도 공통적으로 나타났습니다.

심지어 네트워크에서 음악 선택성 뉴런의 활동을 억제하게 되면, 다른 자연 소리에 대한 인식 정확도를 크게 떨어뜨릴 수 있음을 보였습니다. 즉, 음악 정보 처리 기능이 다른 자연 소리 정보처리에 도움을 주며, 따라서 '음악성'이란 자연 소리를 처리하기 위한 진화적 적응에 의해 형성되는 본능일 수 있다고 설명할 수 있습니다.

연구를 주도한 정하웅 교수님은 "이러한 결과는 다양한 문화권에서 음악 정보처리의 공통된 기저를 형성 하는데, 자연 소리 정보처리를 위한 진화적 압력이 기여했을 수 있음을 시사한다"며, "사람과 유사한 음악 성을 인공적으로 구현하여, 음악 생성 AI, 음악 치료, 음악 인지 연구 등에 원천 모델로 활용될 수 있을 것으로 기대한다"고 연구의 의미를 설명했습니다. 그러나 "현 연구는 음악 학습에 의한 발달 과정을 고려하고 있지 않으며, 발달 초기의 기초적인 음악 정보처리에 대한 논의임을 주의해야 한다"고 연구의 한계를 덧붙였습니다.



최재윤 교수 연구실 양자 시뮬레이터로 양자얽힘 관측 도전

고온 초전도물질은 수십 년이 지난 지금도 어떠한 물리적인 기작으로 초전도가 형성되는지 명확하게 규명되지 않았습니다. 광격자 양자 시뮬레이터는 이러한 문제를 풀기 위한 새로운 접근 방식으로 이미 고전 컴퓨터가 연산할 수 없는 영역에 우위를 보여주었으며, 최근 고온 초전도체에서 관측된 반강자성을 관측하는 등 미래에 고온 초전도 문제를 풀 수 있는 강력한 후보입니다.

우리 학과 최재윤 교수님 연구팀이 포항공대 조길영 교수 연구팀과 공동연구를 통해 중성원자 양자 시뮬레이터의 오류 정정 기술을 개발해 최초로 2차원에서의 비국소 질서 변수를 측정함으로써 향후 위상 물질과 고온 초전도체 물질 특성을 알아낼 수 있도록 하는 데 성공했다고 밝혔습니다.

이러한 양자 시뮬레이터의 큰 단점은 관측 과정 및 양자 상태 준비 과정에서 발생하는 결함으로(예: 원자 손실), 이를 체계적으로 파악하고, 정정하는 것이 매우 어렵습니다. 이러한 결함은 특히 위상물질의 특성을 규정짓는 비국소 질서변수를 측정하는데 큰 걸림돌이 되며, 2차원에서는 그 효과가 더욱 커져 큰 시스템에서 비국소 질서 변수의 실험적 관측을 어렵게 만드는 주요 요소입니다.

일반적으로 우리가 관측하는 물리량은 국소성을 띄기 때문에, 이러한 양자역학적 특이성인 양자 얽힘

(entanglement)이 물성을 지배하는 물질인 위상 물질의 비국소 질서 변수를 측정하는 것은 간단하지 않습니다. 더욱이 2차원, 3차원 물질의 경우 실험적 노이즈에 의해 그 신호가 급격하게 약해지기 때문에 이를 실험적으로 관측하기는 매우 어렵습니다.

최재윤 교수님 연구팀은 양자 시뮬레이터에 비국소 질서 변수가 측정 가능하고 실험적인 결함도 함께 찾아내는 방법을 개발하였으며, 또한 연구팀은 2차원에서도 양자얽힘의 위상 물질의 물성을 규정짓는 것도 가능함을 보여주었습니다. 시뮬레이터 실시 과정에서 발생한 결점까지 제거하는데 성공한 이후, 위상물질의 2차원 비국소 질서변수는 급격하게 (100배 이상) 증가하는 양상을 보였으며, 원자 수에 무관하게 측정값이 일정하게 유지되는 것을 확인하는 등 이론적으로 예측된 경향을 모두 확인할 수 있었습니다.

해당 기술은 여러 가지 중성원자 양자 시뮬레이터에 활용이 가능합니다. 원거리 상호작용이 주요한 양자 시뮬레이터의 경우, 양자 스핀 액상과 같은 2차원 위상 물질의 물성을 규정하는데 적용 가능하며, 고온 초전도체 물질을 흉내 내는 양자 시뮬레이터에도 해당 기법을 응용할 수 있을 것으로 기대한다고 밝혔습니다.

최재윤 교수님은 “이번 연구는 중성원자 양자 시뮬레이터에 존재하는 실험적 결함을 보정하는 것이 가능함을 보여준 최초의 연구이며, 향후 위상 양자 연산에 이용되는 양자 스핀 액상과 같은 고차원 위상 물질 발견 및 물성 규정에 주요하게 활용될 것”이라고 밝혔습니다.



안재욱 교수 연구실 100큐비트급 양자컴퓨터 계산데이터 전격 공개



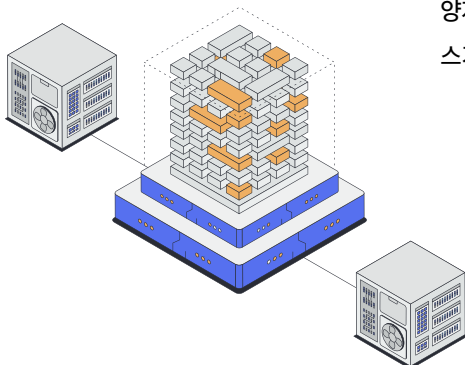
양자컴퓨터는 양자역학의 원리를 활용해 기존의 컴퓨터로는 풀기 어려운 계산을 할 수 있는 컴퓨터입니다. 양자컴퓨터는 암호 해독, 배터리 소재 개발, 신약 개발 등 다양한 분야에서 그동안 풀지 못한 난제들을 해결할 미래 기술로 주목받고 있습니다.

우리 학과 안재욱 교수님 연구팀이 100큐비트급 양자컴퓨터로 조합 최적화 문제를 계산해 계산 결과 데이터베이스와 계산 프로그램을 공개했다고 밝혔습니다.

조합 최적화 문제 중 하나인 최대 독립집합 문제(Maximum independent set problem)는 SNS상에서 가장 영향력 있는 인물을 찾는 문제, 전력망을 가장 효율적으로 분배하는 법을 찾는 문제 등 다양한 응용이 가능한 문제입니다. 지난 2023년 KAIST 연구진은 20큐비트급 리드버그 양자컴퓨터를 이용해 최대 독립집합 문제의 풀이를 시연한 바 있습니다.

일반적으로 100큐비트급 양자컴퓨터의 데이터를 얻기 위해서는 직접 양자컴퓨터를 제작하거나 클라우드 서비스 업체를 이용할 수밖에 없습니다. 이번에 KAIST 연구진이 공개한 데이터는 관련 분야 연구자뿐 아니라 양자 컴퓨터에 관심 있는 모든 사람이 무료로 데이터에 접근할 수 있게 되었다는 점에서 중요하다고 할 수 있습니다. 최대 141큐비트를 활용해 70만 종류 이상의 그래프 최적화를 계산했고, 양자컴퓨터의 계산 결과와 데이터분석 프로그램 일체를 공개했습니다.

연구를 주도한 안재욱 교수님은 “이번 연구를 통해 100큐비트급 양자컴퓨터를 활용한 난제 계산 결과 및 계산 프로그램을 모두 공개하여 그동안 양자컴퓨터에 접근이 어려웠던 연구자를 비롯한 많은 사람이 양자 컴퓨팅 연구에 참여할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러, 고성능 양자컴퓨터 개발에 필요한 잡음 분석에도 연구팀이 계산한 데이터베이스가 활용될 수 있을 것이라 생각한다”고 밝혔습니다.



인터뷰 오한빛 연구원



Education

2016~2023 : Dep. of Physics, KAIST (Ph.D in Physics)

2010~2014 : Dep. of Physics, KAIST (B.S. in Physics)

Experiences

2023~present: Dep. of Physics, Johns Hopkins University, Post-doctoral fellow

Q1. 안녕하세요, 연구원님. 먼저 귀한 시간 내주셔서 감사드립니다. 물리학과 뉴스레터 발행을 맡고 있는 고병윤이라고 합니다. 연구원님께서 하셨던 연구와, 대학원 생활, 그리고 현재 연구원님께서 하시는 연구 등의 경험을 학생들에게 공유하고 싶습니다. 먼저 드리고 싶었던 질문은 연구 분야에 관한 내용입니다. 연구원님께서 연구하고 계신 분야를 간략하게 설명해 주실 수 있으신가요?

A1. 안녕하세요, 카이스트 물리학과에서 박사 졸업하고, 현재 존스홉킨스대학에서 박사후연구원으로 있는 오한빛입니다. 카이스트에서 박사과정으로 있을 때는 문은국 교수님 연구실에서 고체 이론 분야에서 연구를 했었어요. 그 중에서도 특히 강상관계, 즉 강한 상호작용을 가지는 시스템을 다루는 이론을 만들고, 연구했었죠. 이런 고체물리학에서는 상전이(phase transition)를 매우 중요하게 다루는데, 열적 그리고 양자적인 상전이에 대한 연구를 해왔어요. 그 중에서도 특히 재미있게 다뤘던 시스템은, Bogoliubov Fermi-surface 라고 하는 특별한 위상 초전도 상전이에 대한 것이었어요. 그리고 박사후연구원으로 와서는 니켈레이트(Nickelate)라고 하는, 니켈 기반 고온 초전도 물질에 관한 이론 연구를 진행 중입니다.

Q2. 이 분야를 선택하게 되신 계기가 무엇인가요? 또한, 이 분야에 흥미로운 부분이 무엇인가요?

A2. 사실 지금까지 강상관계 이론 분야에서 풀리지 않는 몇 가지 난제가 있어요. 그중 구리산화물 기반 초전도 현상 관련 이슈가 많은 관심을 받고 있습니다. 제가 특별히 니켈레이트 기반 초전도 현상에 관심을 가지는 이유는, 이게 구리산화물과 비슷한 관계를 가지고 있어요. 초전도 임계 온도가 특히 높다는 점도 그렇고, 기존의 모든 초전도 현상을 양자역학적으로 설명했던 BCS 이론으로 잘 설명되지 않는다는 점도 그래요. 그래서 이를 통해 구리산화물 기반 초전도 현상에 접근이 용이할 수 있을 것이고, 특히 최근엔 니켈레이트 이중층에서 재미있는 초전도 현상을 볼 수 있다는 실험 결과가 있고, 다중 오비탈, 훈트 상호작용이 중요하게 들어온다는 점에서 구리 초전도체를 넘어서는 새로운 물리를 발견 할 수 있을거라 기대 중입니다. 사실 고체물리학 연구는 굉장히 넓은 범위의 연구를 포함하지만, 때에 따라 사람들에게 선호되는 트렌드가 있거든요. 현재 고체 이론 분야 특히 현상론 분야에서는 이 물질이 아주 중요한 주제 중 하나인 것 같습니다.

Q3. 연구원님께서 생각하시는 이 분야의 미래나 전망은 어떠한가요? 또, 앞으로 하고 싶으신 연구가 있나요?

A3. 제가 생각하는 저희 분야의 중요한 전망 중 하나는, 전 세계적인 양자 정보 열풍에 힘입어 고체 이론 학계에서도 양자 정보와 엮으려는 움직임이 많아졌다는 것입니다. 과거부터 고체 이론 연구자들은 고체가 가지는 강자성, 상자성 등과 같은 수많은 '상'들에 대해 정의하고, 이를 분석해 왔어요. 그래서 이러한 상들이 어떤 특징을 가지는지, 그리고 상들이 서로 어떻게 상전이가 되는지는 상당히 많은 것을 알고 있습니다. 그래서 현재 사람들이 관심을 가지는, 그리고 관심을 가져야만 하는 주제는 양자적인 결맞음(decoherence)현상에 대한 것이예요. 고체의 순수 상태(pure state)에 대한 특성은 이미 잘 알려져 있는 데 반해, 실제 실험적으로 구현 가능한 환경에서, 즉 외부와의 상호작용이 불완전성으로 작용했을 때의 현상에 대해서는 아직 연구할 여지가 많이 남아 있습니다. 실제로 순수 상태에서 일어날 것으로 예측했던 흥미로운 현상들이 외부와의 상호작용 후에도 여전히 일어날지, 위상학적인 상을

유지할 수 있을지 등에 대한 것은 확신할 수 없기 때문이죠.

첫 번째 방법으로, 기존에는 온도와 압력을 제어해서 상전이 현상을 관측하고 연구해 왔는데, 최근 연구에서 양자 측정을 통한 양자 상태 붕괴를 통해 상전이를 일으키는, measurement-induced phase transition이라는 현상을 관측했어요. 그리고 이를 양자 정보 분야에 활용하는 방법이 최근 화두가 되고 있죠.

두 번째 방향은 양자 시뮬레이터와 관련된 연구입니다. 응집물질물리학에서는 기존에 존재하는 고체의 특성을 연구한다면, 원하는 특성을 가지는 양자 시뮬레이터를 구성하고 그로부터 원하는 현상을 만들어내는 방법이라고 할 수 있죠. 이러한 방향은 제가 현재 연구하는 분야와도 아주 밀접한 관련이 있어요. 제가 최근 연구 중인 니켈레이트를 초저온 원자양자 시뮬레이터로 만들어 강자성훈트 상호작용을 모사할 수 있다면, 더 높은 온도에서의 초전도 현상을 끌어 낼 수 있다는 결과를 얻어, 현재 논문을 작성 중입니다. 현재 미국에서 양자 정보 분야가 정말 큰 관심을 받고 있기에, 정말 다양한 분야에서 양자 정보 관련 연구에 뛰어들고 있고, 고체 이론 분야에서도 이러한 움직임이 더 활발해질 것으로 생각해요.

Q4. 현재 미국에 박사후연구원으로 계시는데, 미국으로 떠나신 이유가 있나요? 미국의 연구실은 어떤 특징이 있나요?

A4. 일단 제가 연구하는 분야에서는 미국 현지에서 연구를 진행했을 때 얻는 이점이 분명해요. 일단 고체 이론 현상론 분야에서는 대체로 실험 결과를 뒷받침하는 이론을 만드는 경우가 많은데, 한국에서 연구할 경우 실험 연구실과 매우 긴밀한 관계가 있지 않은 이상, 적절한 실험 논문이 나올 때까지 기다려야만 하거든요. 특히 국내가 아니라 미국의 연구실에서 연구 중인 주제에 대해서는 더욱 소식을 듣기 어렵죠. 하지만 제가 직접 미국에서 연구하게 될 경우, 우리 연구실과 관계가 있는 실험 연구실의 결과를 바로 받아볼 수 있고, 혹은 직접 협업을 하게 될 기회도 훨씬 많죠. 저 같은 경우 이런 면에서 미국에서 할 수 있는 일이 더 많은 것 같아요. 그리고 여기서 연구를 해 보며 느낀 것이지만, 나라마다 학풍이 다른 것 같아요. 굳이 한국과 비교를 해 보자면, 연구 주제에 관한 토론과 토의에 있어서 더 자유로운 분위기를 가지고 있어요. 하

지만 개인주의적인 성향도 강해서, 지도 교수님 혹은 동료들과의 관계가 상대적으로는 긴밀하지 못하다고 느낄 수 있고요. 이러한 점들은 사람마다 장점이 될 수도, 단점이 될 수도 있을 것 같아요. 그리고 당연한 말이지만 한국이든 미국이든 연구실마다 분위기가 많이 다를 수 있고, 이 또한 제 개인적인 소감이기 때문에, 참고 정도만 부탁드립니다.

Q5. 미국으로의 박사후연구원을 지원하기 위해 어떤 준비를 해야 하나요? 그리고 해외 유학 준비를 하는 학생들을 위한 조언이 있나요?

A5. 해외로의 박사후연구원 진출을 생각하고 있다면 기회를 많이 만드는 것이 중요합니다. 박사과정 중에 국제 학회에 참가할 기회들이 있을 것인데, 아마 자주 있지는 않을 겁니다. 그 기회를 놓치지 말고, 그곳에 모인 교수님들, 박사님들께 본인을 최대한 어필해 보세요. 특히 미국은 '추천인'을 우대하는 경향이 매우 크기 때문에, 미국 학계에 본인을 소개할 수 있는 지인을 만들어 두는 것이 좋습니다. 연구실을 운영하는 교수님 관점에서 박사후연구원은 매우 비싼 인력이기 때문에, 연구 실적이 좋다고 해서 누군지 모르는 사람을 채용하기는 힘들어요. 또한, 교수님 대부분이 생각하는, 연구하는 데 있어 매우 중요한 덕목 중 하나가 대인관계와 사회성이기 때문에, 지인을 통해 추천받으려는 경향이 강한 것 같아요. 해외 학회에서 처음 뵙는 교수님들께 본인을 어필하는 것은 처음엔 상당히 어려운 일일 수 있어요. 명망 있는 교수님들과 대화하려는 사람들이 매우 많기 때문에, 만나서 대화하는 것부터 쉬운 일이 아닙니다. 그래서 미리 메일로 연락도 시도해 보고, 여러 교수님께 접촉을 시도해 보세요. 꼭 박사후연구원으로 가지 않더라도, 나중에 크게 보답 받을 수 있을 겁니다.

그리고 또 한 가지, 고년차가 되면 꼭 어딘가에 지원하지 않더라도, 본인의 CV를 한번 만들어 보세요. 본인의 경력에 어느 부분이 약점인지, 그리고 어느 부분이 강점인지 한눈에 쉽게 들어올 거예요. 졸업 시점이 되어 꼭 필요할 때 만들게 된다면 약점을 보강하기엔 조금 늦었을 수 있어요. 그래서 미리 한 번 만들어 보고, 졸업 시점이 되었을 때 더 좋은 CV를 만들 수 있도록 전략을 짜볼 기회가 될 겁니다.

해외에서의 박사후연구원으로 지내는 경험은 여러 가지로 좋은

면이 있는 것 같아요. 특히 한국의 대학에서는 해외에서의 연구 경험을 중요하게 보는 것 같기도 해요. 왜냐하면, 이러한 경험을 통해, 전혀 새로운 환경에서도 적응하고 주도적으로 연구를 할 수 있는지에 대한 판단을 하게 될 수 있으니까요. 또한, 한국이 아닌, 전혀 새로운 문화에서 사는 경험은 그 자체만으로도 재밌는 일이라고 생각해요. 저도 여기서 문화적으로 다양한 스펙트럼의 친구를 사귀고, 다양한 경험을 하면서 재미있게 지내고 있거든요. 그리고 미국에서의 박사후연구원의 경우 아주 풍족하지는 않더라도 생활하는 데 불편함이 없는 정도로 경제적인 지원을 해주기 때문에, 경제적인 부분에서는 큰 걱정은 하지 않으셔도 될 것 같아요. 본인이 미국으로의 박사후연구원을 생각하고 있다면, 학계의 교수님들과 미리 안면을 트고 본인을 어필하는 것이 가장 중요한 부분일 것 같아요.

Q6. 연구원님의 대학원 생활이 궁금합니다. 어떤 마음으로 연구에 임하셨는지, 여쭙 봐도 될까요?

A6. 대학원 생활이 재미있지만 했다고 하면 거짓말이겠죠. 처음 연구할 때 가장 힘들었던 부분은, 공부와 연구의 괴리였어요. 학부 때까지는 보통 주어진 교과서의 글을 읽고, 이해하는 식의 공부를 했던 것이지, 연구하지는 않거든요. 그리고 연구는 좁은 범위의 학문을 깊게 파고들어야 하는데, 저는 관심 분야가 많아서 알아보고 싶은 게 너무 많아 좁은 분야를 깊게 파고드는 게 어려웠어요. 이러한 간극을 좁히고 연구에 저를 맞추는 과정이 처음엔 제일 힘들었죠. 그리고 아시는 분들은 아시겠지만, 연구라는 게 대체로 잘 풀리지 않잖아요. 연구 주제가 정해지면 물리적 직관에 대한 예측이 있는데, 이러한 예측이 완전히 빗나갔을 때는 정말 절망스러웠어요. 저년차 때는 이렇게 연구에서 실패를 겪었을 때의 실망감이 저를 정말 오래 괴롭히곤 했어요. 그런데 고년차가 되면서는 이러한 상황에 대한 맷집이 길러진 것인지, 실망하는 시간도 짧아지고 그 다음 과정을 생각하게 되더라고요. 그리고 생각하는 관점을 바꾸니 연구에서의 실패가 항상 꼭 실패만을 의미하는 것은 아니기도 하고요. 한때는 제가 연구에 맞지 않는 기질인가 하는 고민도 했었는데, 돌아켜 보니 이러한 기질도 주어진 환경에 의해 충분히 바뀔 수 있는 것 같아요. 대학원 생활이 길고 힘들겠지만, 묵묵히 열심히 하다 보면 원하는 목표를 이룰 수 있을 것으로 생각해요.

Q7. 물리학과 대학원에 진학하고자 하는 학생들, 그리고 재학 중인 학생들에게 졸업생으로서 조언해 주실 수 있나요?

A7. 물리학만큼 근본적인 질문에 대해 생각해 볼 수 있는 학문이 많이 없을 것으로 생각해요. 본인이 이러한 것을 질문하고 생각하기를 좋아한다면, 물리학과에 도전해 보는 것도 좋겠죠. 돌이켜 보면 대학원 때가 가장 열정이 넘치고, 빛나는 시기였다는 생각이 들어요. 그렇기에 본인이 하고 싶은 일을 도전해 봐야 한다고 생각해요. 그리고 과거에는 물리학과에 들어가면 취직이 잘되지 않는다는 등, 현실적인 부분에 있어서 부정적인 인식이 많았어요. 그렇지만 사회적 인식은 앞으로 어떻게 될지 예상하지 못하는 것 같아요. 공학의 분야만 보더라도, 제가 입학했을 때 선호되던 학과와 현재 선호되는 학과는 분명한 차이가 있거든요. 물리학과도 현재 양자 정보에 대한 열풍에 힘입어 그 위상이 많이 올라갔죠. 과거 취업 걱정을 하던 학과였는데, 현재의 위상을 봤을 때 사람 일은 정말 모르는 것 같아요.

Q8. 끝으로 물리학과 학생들과 대학원생들에게 하고 싶은 말 부탁드립니다.

A8. 순간순간에 본인의 행복을 찾을 수 있었으면 좋겠어요. 대학원에 있는 시간도 본인의 삶이고, 연구보다 중요한 것은 본인의 삶과 행복이거든요. 그래서 연구가 아니더라도, 본인이 좋아하는 것이 무엇인지 찾으려고 노력해야 합니다. 연구는 결코 단거리 질주가 아니기 때문에, 뚝딱하기 위한 노력이 중요한 것 같아요. 인생에 있어 짧지 않은 시간인 만큼, 행복하게 대학원 생활을 마무리할 수 있기를 바랍니다.

연구원님의 아주 귀중한 조언들과 비전을 잘 새겨들었습니다! 카이스트 물리학과에 열정적인 물리 꿈나무들이 많이 모여 앞으로 좋은 연구 결과를 많이 내기를 소망하면서 이번 인터뷰를 마치도록 하겠습니다.



Research Highlights

양희준 교수 연구실
주양근 학생

박용근 교수 연구실
박주연 학생

이상민 교수 연구실
유인철 학생

이혜성 교수 연구실
최조열린 학생

이혜성 교수 연구실
이재옥 학생

REVIEW

**ADVANCED
ELECTRONIC
MATERIALS**
Open Access

www.advelectronicmat.de

Memory and Synaptic Devices Based on Emerging 2D Ferroelectricity

Yanggeun Joo, Eunji Hwang, Heemyoung Hong, Suyeon Cho,* and Heejun Yang*

현대의 전자기기들에 사용되는 메모리는 현재를 살아가는 우리에게 아주 중요한 요소이다. 하지만, 기존의 디지털 방식의 메모리는 에너지 효율적인 측면에서 발전이 요구됐고, 집적도와 유지 시간과 같은 어려움을 겪고 있다. 이에 새로운 소재와 기술에 관한 연구의 필요성이 대두됐다.

강유전이란 외부 전기장에 의한 분극 형상이 외부 전기장이 없을 때도 유지되는 물리적인 특성이다. 대표적인 강유전 물질로는 페로브스카이트 구조를 가지는 3차원 물질이 있다. 커패시터에 강유전 물질을 활용한 1T-1C (1 트랜지스터-1 커패시터) 구조를 가지는 Ferroelectric Random Access Memory (FeRAM)가 존재하지만, 기존의 강유전 물질의 낮은 유전율과 저품질로 인해 짧은 유지 시간과 파괴적인 읽기 쓰기 과정을 가지게 되어 상용화가 되기 어려웠다.

최근 2차원 물질들도 강유전 특성을 가질 수 있다는 것이 밝혀져 기존 3차원 강유전 물질들의 문제를 해결할 수 있는 방향이 제시되었다. 대표적으로 집적도, 에너지 효율, 탈분극, 누설 전류 등이 그 예시이다. 이러한 2차원 물질들은 기존의 1T-1C 구조가 아닌 Ferroelectric Field-Effect Transistor (Fe-FET), Ferroelectric Semiconductor Field-Effect Transistor (FeS-FET), Ferroelectric Tunnel Junction (FTJ)의 3가지 구조에서 2차원 강유전 물질을 활용될 수 있다. 위의 3가지 구조들은 2차원 물질의 특성과 더불어 1T-1C 구조의 집적도와 유지 시간 등에 있어서 단점을 극복할 수 있게 되었다.

이에 나아가 새로운 소자 기술로써 뉴로모픽 소자 또한 많은 연구가 진행되었다. 뉴로모픽 소자는 사람의 뇌를 모방하여 기존의 디지털 메모리의 한계를 극복할 수 있는 소자이다. 이러한 흐름에 따라 2차원 강유전 물질을 활용한 뉴로모픽 소자도 많은 연구가 진행되었다.

저전력 구동 및 고집적도가 가능한 2차원 강유전 물질을 활용한 메모리 또는 뉴로모픽 소자에 관해 수많은 연구가 진행되었지만, 아직 상용화를 위해 풀어야 할 과제들이 남아있다. 2차원 강유전 물질은 3차원 물질들에 비해 작은 분극을 가지고 있고 고품질의 대면적 합성에 있어 아직 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 양희준 교수 연구팀은 최초로 2차원 강유전 물질을 활용한 메모리와 뉴로모픽 소자의 구동 원리를 소자 구조로 분류하여 그 원리와 특성에 대해 정리하였다. 이를 통해 연구자들에게 관련 연구의 과거, 현재, 미래를 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

양희준 교수 연구팀의 주양근, 황은지, 홍희명 대학원생이 저자로 참여한 본 연구는 2023년 08월 Advanced Electronic Materials 지에 게재되었다.

[DOI:<https://doi.org/10.1002/aelm.202300211>]

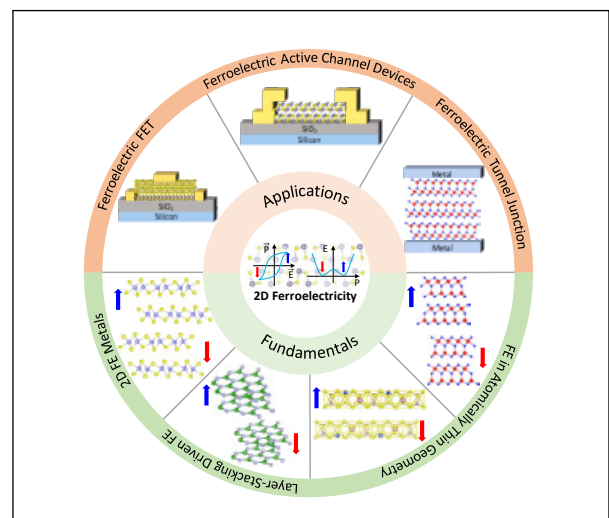


그림1. 2차원 강유전 물질의 원리와 응용을 나타내는 도식도

Artificial intelligence-enabled quantitative phase imaging methods for life sciences

박용근 교수 연구팀은 염색이나 고정 등 전처리 없이 세포와 조직의 정밀한 내부 구조를 측정할 수 있는 홀로그래픽 현미경과 이를 체계적으로 분석할 수 있는 인공지능을 결합한 의생명공학 연구의 활용 방안 및 문제점을 심도 있게 분석했다.

의생명공학 연구에 일반적으로 사용되는 현미경 기술들은 염색이나 유전자 조작을 해야만 관찰할 수 있다는 한계가 있다. 홀로그래픽 현미경은 이런 전처리 없이 세포나 조직을 살아 있는 상태 그대로 관찰할 수 있는 현미경 기술이다.

연구팀은 기존 현미경 기술 대비 홀로그래픽 현미경의 이미지 복원 기술이 시간을 많이 필요로 한다는 점을 지적했다. 또한, 전처리 없이 세포나 조직을 찍을 수 있다는 장점이 있지만, 대신에 그만큼 결과물 분석에 많은 시간과 노력을 들여야 한다고도 분석했다.

박용근 교수 연구팀은 이런 문제점을 홀로그래픽 현미경과 인공지능과의 통합을 통해 해결할 수 있다는 방법론을 제시했다. 인공지능을 통해 홀로그래픽 이미지를 복원하고, 세포의 종류와 상태를 구분하고, 염색 없이 측정된 결과물에 가상으로 염색 정보를 재생산 해내는 등의 연구를 통해 기존의 홀로그래픽 현미경 기술의 효율을 극대화하는 전세계 연구들을 분석하고 활용 방안과 문제점을 다뤘다.

홀로그래픽 현미경 기술 소개에 더불어 인공지능의 결합이 광범위한 의생명공학 연구에 활용돼 온 내용을 총망라한 이번 리뷰 논문은 제시된 방법론의 혁신성을 인정받아 생명과학 분야의 권위 학술지인 `네이처 메소드(Nature Methods)`에 2023년도 10월에 출판됐다. (논문명: Artificial intelligence-enabled Quantitative Phase Imaging Methods for Life Sciences)

본 연구는 캘리포니아대학교 로스앤젤레스(UCLA) 아이도칸(Aydogan Ozcan) 교수팀, 토모큐브(Tomocube) 인공지능 연구팀과 공동 집필했으며, 연구재단의 리더연구사업, 과학기술정보통신부의 홀로그램핵심기술지원사업, 나노 및 소재 기술개발사업의 지원을 받아 수행됐다.

[DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-023-02041-4>]

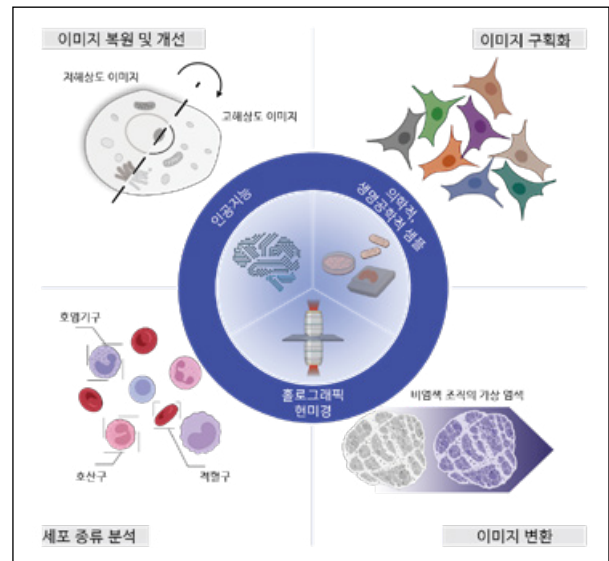


그림1. 홀로그래픽 현미경과 인공지능을 결합하여 수행할 수 있는 다양한 의학적, 생명공학적인 활용 방안. 홀로그래픽 이미지 복원과 해상도 개선, 측정된 결과의 구획화 및 세포의 종류 구분, 그리고 이미지 변환을 통한 세포 및 조직 내 가상 염색 영상 재생산을 수행함으로써 다양한 의학적, 생명공학적인 연구의 효율을 높일 수 있다.

Local Rigidity by Flexibility: Unusual Design for Organic THz-Device Materials

Dong-Joo Kim, In Cheol Yu, Mojca Jazbinsek, Chaeyoon Kim, Woojin Yoon, Hoseop Yun, Sang-Wook Kim, Dongwook Kim, Fabian Rotermund,* and O-Pil Kwon*

THz 파는 포논, 마그논과 같은 들뜸 모드들을 직접적으로 관측할 수 있어 물리학적 의의가 있으며, 다음 세대의 광통신 기술, 비파괴 바이오 이미징과 같은 다양한 분야에서 활용될 수 있어 기계/전기/생물 분야에서도 자주 다뤄지는 주제이다. 다만 대부분의 연구 및 산업 단계에서 활용되는 안테나, 플라즈마 기반 혹은 광결정의 비선형 전기 쌍극자 기반 THz 파의 경우 높은 효율, 넓은 대역폭, 그리고 낮은 제작 난이도를 모두 갖춘 광원의 부재로 활용 단계에서 어려움을 겪고 있다.

이러한 기존 THz 광원의 한계를 극복할 방법으로 유기결정 주목을 받고 있다. 유기결정 역시 비선형 쌍극자 기반으로, 기존의 무기 결정 대비 빠른 전자 응답성과 높은 비선형성 덕분에 넓은 진동수 대역에서 강한 THz 파를 얻을 수 있다. 또한 제작단계에서 양이온과 음이온의 조합을 통해 편광 특성과 물질 구조를 바꿀 수 있기에, 목적에 맞게 최적화할 제어 요소가 많다는 점 역시 주요한 장점이다.

다만 자주 언급되는 단점으로 대역폭 자체는 넓지만 포논에 의한 자체 흡수 때문에 스펙트럼이 들쭉날쭉하고, 효율을 극대화하려면 1.3~2 μm 의 적외선 펌프가 필요한데 해당 대역 펌프가 흔하지 않아서 장비 접근성이 낮다는 문제가 있다.

이상민 교수 연구팀은 이러한 스펙트럼 문제를 해결하고자, 기존에 알려진 물질의 음이온에 회전유연성이 있는 $-(\text{CH}_2)-$ 파트를 추가하였다 (그림1 a). 이 때문에 격자 사이 빈 공간이 줄어들게 되고 격자 진동에 의한 THz 자가 흡수가 줄어들게 된다 (그림1 b). 이 효과는 그림1 c, d의 THz 스펙트럼에 직관적인 영향을 미치는데, 기존의 OHQ-T 결정의 경우 1.4, 2 THz 대역에 커다란 흡수가 존재하지만, $-(\text{CH}_2)-$ 파트를 추가하는 것만으로 OHQ-EBS에서 2 THz 대역 흡수가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

사용된 OHQ-EBS 결정의 경우 상용화된 펌프가 존재하는 1 μm 에 가까운 파장에서도 좋은 성능을 보였기 때문에 장비 접근성도 높고, 기존에 자주 쓰이는 무기결정 대비 10배 이상 높은 효율을 보였기 때문에 광원으로써 가치가 높다. 또한 본 연구에 사용된 아이디어가 해당 샘플뿐만 아니라 다른 샘플에도 쉽게 적용가능하므로 물리/화학적 의의가 있다. [DOI: <https://doi.org/10.1002/adom.202300807>]

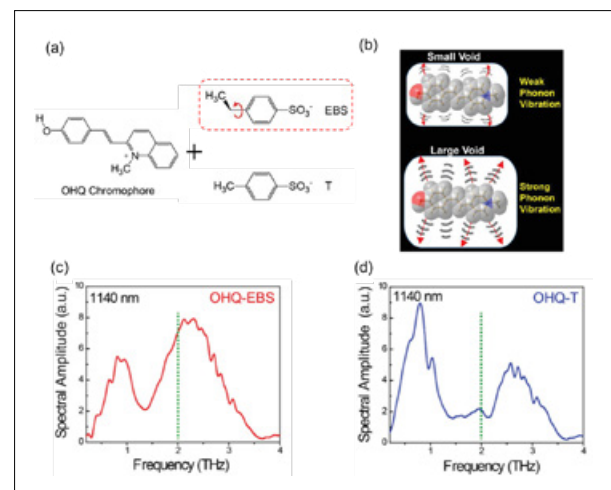


그림1. a) THz 광원에 사용하는 유기결정 구조. b) THz 자가 흡수가 줄어드는 원리. c,d) THz 스펙트럼의 변화.

Dirac-Majorana neutrino type oscillation induced by a wave dark matter

YeolLin ChoeJo^{✉,*}, Yechan Kim^{✉,†}, and Hye-Sung Lee^{✉,‡}

Department of Physics, KAIST, Daejeon 34141, Korea

중성미자(Neutrino)가 Dirac particle인지 Majorana particle인지의 여부는 입자물리학의 오랜 관심사이다. 이해성 교수 연구팀은 중성미자와 암흑물질, 그 중에서도 질량이 매우 가벼운 종류인 wave dark matter와의 상호작용을 통해 중성미자가 Majorana 질량을 얻게 되는 경우, 암흑물질의 진동에 따라 중성미자의 상태가 Dirac과 Majorana 상태 사이를 주기적으로 오갈 수 있음을 제시하였다.

중성미자의 일반적인 질량 Lagrangian은 Dirac term과 Majorana term으로 구성된다. 만약 Dirac term이 Majorana term보다 매우 크면 중성미자의 left/right chirality 상태 간의 mixing angle이 커지고, 중성미자는 quasi-Dirac(유사-Dirac) 입자처럼 행동하게 된다. 반대로 Majorana term이 훨씬 클 경우, mixing angle은 작아지고 중성미자는 Majorana 입자로 관측된다. 이 연구에서는 중성미자의 Majorana 질량이 wave dark matter와의 상호작용으로 주어지게 함으로써, Majorana 질량값 자체가 암흑물질과 함께 진동하고 따라서 Majorana와 Dirac 질량 간의 비율이 시간에 따라 변한다고 가정하였다.

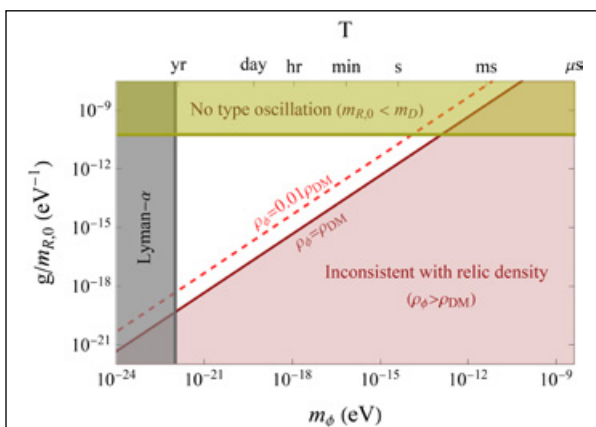


그림1. Dirac-Majorana type oscillation이 발생하는 암흑물질의 질량과 coupling 범위

계산 결과, 암흑물질의 질량과 coupling이 특정한 범위 조건을 만족하면 중성미자의 Dirac 및 Majorana 질량 간의 비교우위가 wave dark matter의 진동에 따라 변하고, 따라서 암흑물질의 진동 주기에 맞추어 Dirac과 Majorana

상태를 오갈 수 있다는 것이 확인되었다. 이 현상을 중성미자의 Dirac-Majorana type oscillation이라 명명하였다.

이러한 type oscillation이 발생할 경우, neutrinoless double beta decay와 같은 Majorana 중성미자 관측 실험들에서는 event rate에 특징적인 모양이 나타날 것으로 예상된다. 중성미자가 Majorana 범위에 있을 때에는 신호가 정상적인 세기로 관측되지만, 암흑물질의 진동 반주기에 맞추어 Majorana 질량이 감소한 시점에서는 중성미자가 Dirac 입자처럼 행동하여 신호 세기가 강하게 감소하는 패턴을 반복하게 된다.

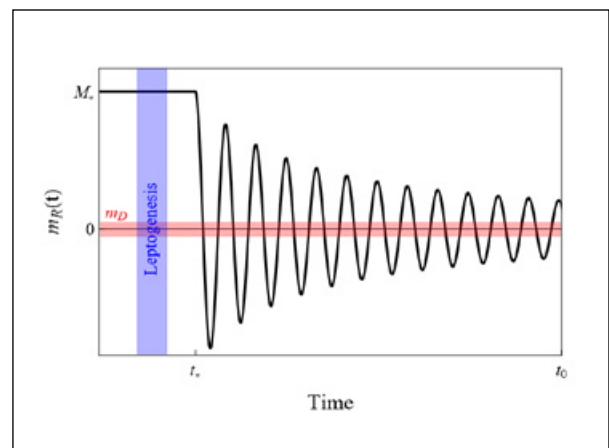


그림2. 해당 모델을 적용하였을 때 우주의 역사에 따른 중성미자 Majorana 질량의 정성적 변화

이러한 형태의 중성미자 질량 모델은 무거운 중성미자를 동반하는 초기 우주 현상론에도 큰 연관이 있다. 우주 팽창에 따라 암흑물질의 밀도, 그리고 진폭이 감소하기 때문에 중성미자의 Majorana 질량이 암흑물질과의 상호작용으로 주어지는 경우 이도 마찬가지로 시간이 흐름에 따라 감소하는 형태를 보인다. 일반적으로 우주 초기 매우 무거운 중성미자의 붕괴로 인해 경입자 생성(leptogenesis) 등이 일어났다고 여겨지는데, 이 연구의 모델을 사용하면 초기 중성미자의 질량과 type oscillation을 일으키는 현재 중성미자의 질량 간의 관계식을 구할 수 있다.

[DOI: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.108.095028>]

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics

An IOP and SISSA journal

Misalignment mechanism for a mass-varying vector boson

우리 우주의 에너지의 95%는 아직 밝혀내지 못한 암흑 물질과 암흑 에너지로 이루어져 있다. 여러가지 연구가 이뤄지고 있는 암흑 물질에 비해 암흑 에너지에 대한 연구는 많이 이루어져 있지 않다. 최근 기존의 우주 모형인 Λ CDM 모델에 여러 가지 문제점이 등장하고 있는데, 이혜성 교수 연구팀은 이에 대해 암흑 에너지의 대칭성과 상호작용을 도입하여 이 문제의 실마리를 찾고자 하고 있다.

이를 위해 연구팀은 암흑 에너지 모델인 퀸테센스(Quintessence) 모델에 게이지 대칭성을 도입하는 게이지드 퀸테센스(Gauged Quintessence)모델을 학계에 제시하였고, 관련 연구를 이어나가고 있다. 이 모델에는 마치 광자(photon)과 같은 암흑 게이지 보손(dark gauge boson)이 존재하여 암흑 에너지인 퀸테센스와 상호작용한다. 이 암흑 게이지 보손은 우주에 암흑 물질의 일부분으로 존재할 수 있는데, 이번 연구에서는 어떻게 이 암흑 물질이 우주에 생겨날 수 있는지에 대해 연구했다.

연구팀은 미스얼라인먼트(misalignment)라는 방법을 이용하였는데, 기존의 이 방법은 스칼라 보손(scalar boson)에 대해서는 잘 작동하지만 암흑 게이지 보손과 같은 벡터

보손(vector boson)에 대해서는 잘 작동하지 않는다고 알려져 있다. 하지만 게이지드 퀸테센스 모델에서는 암흑 게이지 보손의 질량이 시간에 따라 증가하는데, 이 효과가 에너지 밀도를 증폭시켜 충분한 양의 암흑 게이지 보손이 현재 우주에 존재할 수 있음을 밝혀냈다. 또한, 몇몇 양자적 효과들에 대해서 연구하여 우리 우주에 충분한 양의 암흑 게이지 보손이 존재할 수 있는 가능성을 확인하였다.

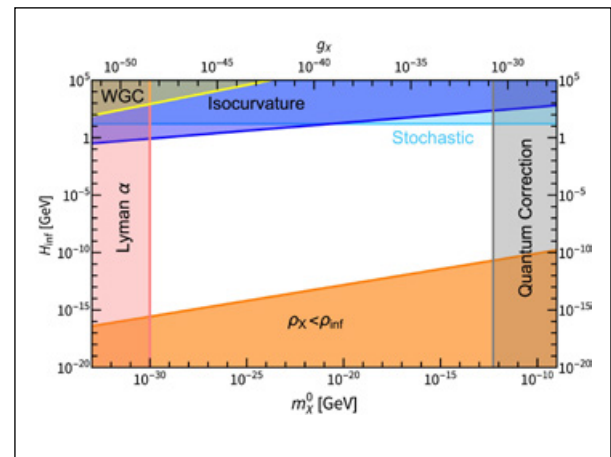


그림2. 암흑 게이지 보손의 현재 질량과 인플레이션 당시 허블 파라미터의 변수 공간. 공백 부분에 해당하는 매개변수들은 현재 우주에 충분한 양의 암흑 게이지 보손을 남길 수 있다.

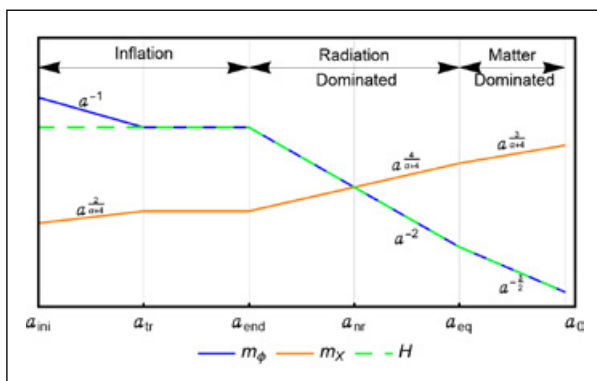


그림1. 퀸테센스와 암흑 게이지 보손의 질량 변화. 시간이 갈수록 암흑 게이지 보손의 질량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

특히 이렇게 충분한 양의 암흑 게이지 보손이 암흑 에너지인 퀸테센스와 상호작용을 하면, 최근 천문학에서 떠오르고 있는 허블 상수 불일치(Hubble tension) 문제에 긍정적인 효과를 줄 수 있는 것으로 알려져 있어, 앞으로의 성과가 기대된다. 본 연구는 2023년 9월 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics에 게재되었다.

[DOI: 10.1088/1475-7516/2023/09/017]

연구실 소개

물리학과 실험 연구실

김갑진 교수 연구실

초고속 스핀 동역학 연구실
Ultrafast Spin Dynamics Lab

양희준 교수 연구실

양자 에너지 소자 연구실
Quantum Energy Device Laboratory

조성재 교수 연구실

양자 전송 연구실
Quantum Transport Laboratory

양찬호 교수 연구실

재료 물리 실험실
Material Physics Laboratory

김은성 교수 연구실

초전도 양자회로 연구실
Superconducting Quantum Nanoelectronics Laboratory



초고속 스핀 동역학 연구실

Ultrafast Spin Dynamics Lab

구성원

김갑진 교수, 박민규 박사, 박정민 박사, 이택현 박사, 원운재, 김현규, 이근희, 유무진, 송무준, 양지석, 지유빈, 고산, 백건우, 순영선, 최준영

연구분야

우리 연구실에서는 전자의 spin 성질을 이용해 소자를 만들고자 하는 스핀트로닉스 연구를 진행합니다. 스핀트로닉스 분야는 공학적으로도, 물리적으로도 접근할 수 있어, 연구에 다양성이 넓은 분야인데 그 중에서도 구체적으로 저희는 다양한 spin texture들을 연구합니다. 그 중에서 자성 메모리 소자로서의 응용 가능성이 있는 skyrmion, domain wall, bloch wall에 전류를 인가하고 이들의 dynamics를 magneto-optical Kerr effect (MOKE) 현미경으로 이미징하는 연구를 진행중입니다. 뿐만 아니라 spin wave의 입자 버전인 magnon을 이용한 연구도 진행하는데, phonon 및 photon과 커플링을 시키거나 magnon 자체에 대한 물리, 예를 들면 magnon BEC 등을 연구하고 있습니다.. 또한 최근에 새로운 물리로 각광 받고 있는 orbital Hall effect에 의해 나타날 수 있는 magneto resistance 분야도 연구하고 있습니다.

최근관심분야

Magnon hybrid system, Orbitronics, Spintronics, Spin texture, Magneto resistance



양자 에너지 소자 연구실 Quantum Energy Device Laboratory

구성원

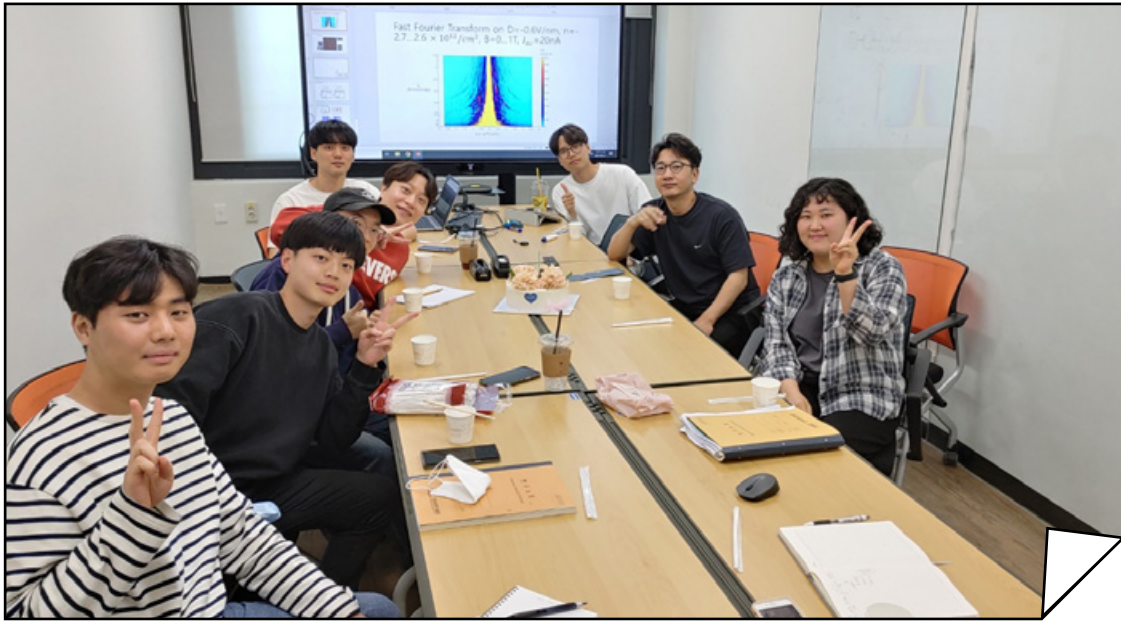
양희준 교수, Juhi Pandey 박사, Lijun Li 박사, 김도현 박사, 이용준, 정주영, 주양근, 조우현, 황은지, 홍희명, 유호연, 여상수

연구분야

양자 에너지 소자 연구실에서는 크게 세 분야의 연구를 수행하고 있습니다. 첫째는 양자 뉴로모픽 소자 연구로 사람의 뇌를 모사하는 고집적/초저전력/초고속 인공지능 양자소자 개발을 목표로 하고 있습니다. 두 번째는 다양한 양자상 (위상 절연체, 스핀 정렬 등) 제어를 통한, 포스트 실리콘, 새로운 로직 소자 구현입니다. 세 번째는 원자 단위 양자 물질 제어를 통해 고효율 수소/열전 에너지 소자 (촉매, 센서 등) 개발입니다. 이러한 연구의 공통점으로는 현재 과학 기술의 바탕을 이루는 실리콘 기반 소자로는 달성하기 어렵다는 점입니다. 또한 인류의 가장 중요한 문제인 에너지, 환경 등과 깊은 관련이 있다는 공통점도 있습니다. 우리 연구실에서는 저차원 (양자점, 나노튜브, 층상구조 소재 등) 등에서 발현되는 다양한 양자 현상으로 위와 같은 인류의 중요한 과학 기술적인 문제들을 해결하고자 합니다. 또한, 소자 성능에 관한 연구에서 그치지 않고 저차원 소재 합성 및 물성 분석을 통해 소자 구동 원리와 성능 개선을 위한 방향 제시를 하고 있습니다. 이러한 연구를 위한 주요 활용 장비 및 기술로는 주사 탐침 현미경, 저온/광 transport 측정, 2차원 소재 합성, 촉매 성능 측정 등을 꼽을 수 있으며, 고체물리학 이론 연구팀, 광학연구팀, 재료/화학공학 연구팀과 활발한 공동연구를 진행하고 있습니다.

최근관심분야

Energy-intelligent quantum devices based on low-dimensional materials, Quantum Neuromorphic devices, Interface logic devices by quantum phase engineering, Atomic-scale manipulation of energy devices, 2D magnetism, spintronics and ferroelectricity



양자 전송 연구실

Quantum Transport Laboratory

구성원

조성재 교수, 임홍식, 진태혁, 성경환, 이태훈, 구동범, 서강혁, 김진규

연구분야

우리 연구실에서는 나노미터에서 마이크로미터 단위 소자의 양자 수송을 연구합니다. 우리 연구실은 특히 그래핀 및 층상 칼코제나이드를 포함한 반데르발스 물질의 위상, 양자 위상 전이 및 스핀트로닉 특성에 관심이 많습니다. 반데르발스 물질은 기계적 박리를 통해 저차원 구조로 쉽게 얻어지는데, 이는 잘 알려지지 않은 새로운 양자 특성을 가질 것으로 예상됩니다. 최근, 나노 구조의 칼코제나이드는 새로 발견된 물질의 위상(위상학적 불변성을 특징으로 하는 위상) 때문에 상당한 관심을 끌었습니다. 우리 연구실은 반데르발스 재료로부터 새로운 나노 구조를 만들기 위해 순서에 따라 원자층을 이중 구조로 적층하는 것을 포함한 나노 제조 공정을 진행합니다. 우리 연구실의 궁극적인 목표는 저차원 소자의 양자역학적 효과를 이해하고 새로운 양자 소자를 만드는 것입니다.

최근관심분야

Quantum phase transitions, Spin transport, Topological quantum devices, Van-der-Waals heterostructures



재료 물리 실험실

Material Physics Laboratory

구성원

양찬호 교수, Duc Duy Le 박사, 박흥식, 서정훈, 권용준, 김지훈, 이재현, 강민호, 방희찬, 이주현, 정한석, 구전서, 양희빈

연구분야

산화물은 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 물질로 초전도 현상, 금속-절연체 전이, 초거대 자기저항 효과 등 재미있는 물리 현상들이 많이 일어납니다. 이런 산화물들을 박막으로 얻을 경우, 기판의 변형(strain)과 격자구조 방향에 따라서 새로운 물성을 얻을 수도 있습니다. 저희 연구실은 기판 위에 산화물 박막을 증착시켜 새로운 물리 현상에 대해 연구합니다. 실험실에는 Pulsed laser deposition(PLD) system, Scanning probe microscopy(SPM), Physical property measurement system(PPMS), Raman microscopy, Electrical measurement system, Photolithography, DC sputtering/Ar ion milling chamber 다양한 장비가 구비되어 있습니다.

최근관심분야

Topological defects in ferroelectric materials, Oxide-ionic transport, Ferroelasticity, Hydrogenation, Crack tunneling device



초전도 양자회로 연구실

Superconducting Quantum Nanoelectronics Laboratory

구성원

김은성 교수, 황혁 박사, 강용민, 이겸, 주태건, 강지원, 박민제, 임송빈, 이지욱

연구분야

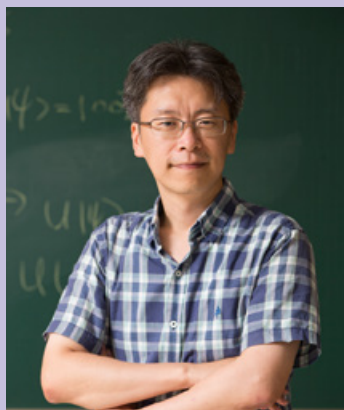
저희는 초전도 기반 양자 회로를 이용하여 양자역학적 현상을 구현, 제어 및 측정하는 연구를 수행하고 있습니다. 구체적으로, (1) 조셉슨 접합을 이용한 인공 원자를 이준위계(two level system)로서 활용하고 초전도 마이크로파 공진기와와의 상호작용을 통해 제어 및 측정하는, 초전도체 기반 양자컴퓨터를 구현하는 연구와 (2) 그래핀을 이용한 역학적 공진기를 조화 진동자(harmonic oscillator)로서 활용하고 마이크로파 공진기와와의 상호작용을 통해 측정하여 양자 센서로 활용하는 연구를 진행하고 있습니다.

초전도 양자컴퓨터는 최근 전 세계적으로 활발히 연구되고 있는 주제로, 저희 연구실에선 새로운 양자 게이트 구현, 정보 누화(crosstalk)를 줄이는 방법, 광대역 양자 증폭기 등 보다 효율적인 초전도 양자컴퓨터 구현을 위한 방법을 다방면으로 연구하고 있습니다.

최근관심분야

Quantum computing, Quantum sensing, Transmon qubit, Circuit QED, Josephson Parametric Amplifier(JPA), Quantum random walk, Gate fidelity

Anyons



심흥선 교수

자연의 모든 기본 입자들은 보손 (boson)이나 페르미온 (fermion)인 것으로 알려져 있다. 하지만, 2차원에는 보손/페르미온의 특성을 따르지 않는 특이한 준입자들이 존재할 것으로 예측되었다 [1,2]. 이들은 애니온 (anyon)이라고 불리우며, 가환 애니온 (Abelian anyon), 비가환 애니온 (non-Abelian anyon)으로 분류된다 [3]. 애니온은 분수 양자 홀 계 (fractional quantum Hall effects)나 위상 초전도체 (topological superconductors)에서 들뜸 (excitation) 현상으로 나타날 수 있다. 학계의 많은 노력 끝에, 가환 애니온의 증거들이 최근 관측되었다 [4-6]. 애니온 관측법으로 간섭계 (interferometer)나 빔 분할기 (beam splitter; quantum point contact)를 활용하는 두 방법들이 알려져 있는데, 그 중 빔 분할기 방법의 근본 원리가 본 이론 그룹에 의해 발견되었다 [6-8]. 애니온 관측을 위한 학계의 노력들을 아래에 소개한다.

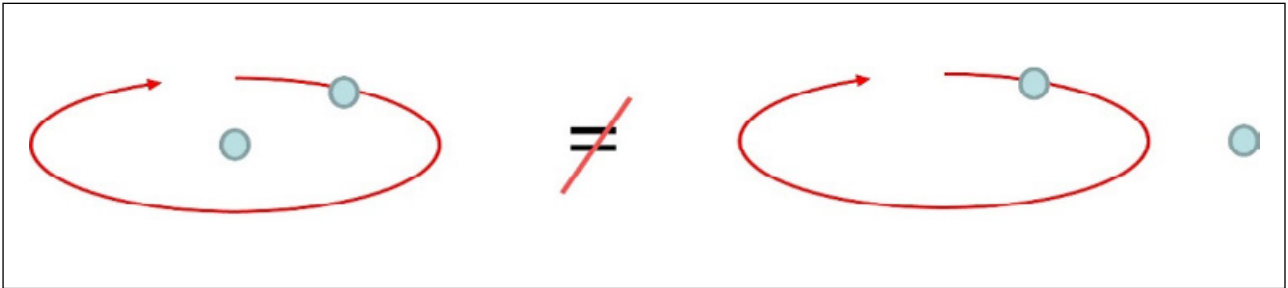


그림1. 이차원 평면 위에 두 개의 동일한 입자들이 있다. 왼쪽 그림: 이들 중 한 입자가 다른 입자 주위를 매우 천천히 한바퀴 돌아서 원래 위치로 오는 행위를 braiding이라고 한다. 입자의 경로는 원 모양일 필요는 없으며, 두 입자의 파동함수가 공간 상에서 서로 겹치지 않는 경우를 고려한다. 오른쪽 그림: 한 입자가 경로를 따라 매우 천천히 움직여서 원래 위치로 온다. 이 닫힌 경로 안에 다른 입자가 없다. 애니온의 경우는 왼쪽 행위와 오른쪽 행위가 다른 결과를 준다.

애니온의 기본 특성은 braiding이라고 불리우는 특정한 행동으로 표현된다 (그림 1). 보손이나 페르미온의 경우에는 그림 1 왼쪽의 braiding을 하고나면, 두 입자의 상태가 braiding 전의 상태와 동일하다. 이는 학부 양자역학에서 배우는 보손 통계 (bosonic statistics)와 페르미온 통계 (fermionic statistics)에 따라 이해된다. 동일한 두 입자의 파동함수를 생각해보자. 두 입자의 위치를 맞교환하면 보손의 경우는 $+1$ 인자가, 페르미온의 경우는 -1 인자가 파동함수에 곱해진다. braiding의 행위는 입자 위치를 두 번 맞교환한 것과 위상학적 (topological) 측면에서 동일하여, 보손이든 페르미온이든 braiding 후에 두 입자의 파동함수는 $(\pm 1)^2 = 1$ 인자를 얻게 되어 파동함수에 변화가 없다. 즉, 보손이나 페르미온은 그림 1의 왼쪽 행위를 한 경우나, 오른쪽 행위를 한 경우나, 아무런 행위를 하지 않은 경우와 같은 상태에 있게 된다. 이들에게는 braiding이 특별한 의미를 지니지 않는다.

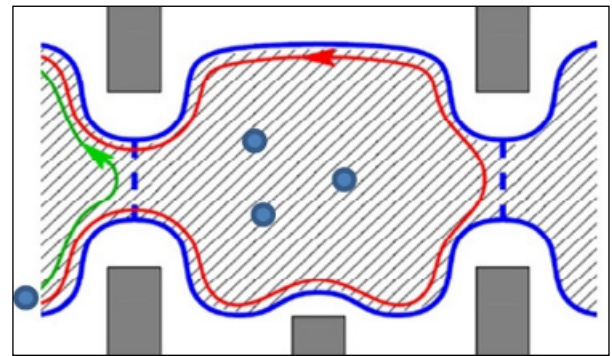


그림2. 애니온 Fabry-Perot 간섭계. 이차원의 가장자리 일차원 경로 (파란색 실선)를 따라서 애니온 (녹색 점)이 움직인다. 이차원 상단, 하단에 각각 일차원 경로가 있고, 두 경로가 서로 근접한 위치 (수직 점선들, quantum point contact)에서 애니온이 한 경로에서 다른 경로로 뿔 수 있다 (tunneling). 간섭계에 입사한 애니온 (왼쪽 하단의 점)은 녹색 경로 (하단 파란색 실선 → 왼쪽 수직 점선 → 상단 파란색 실선) 또는 붉은색 경로 (하단 실선 → 오른쪽 수직 점선 → 상단 실선)를 따라서 왼쪽 상단으로 간다. 이 애니온이 왼쪽 하단에서 왼쪽 상단으로 갈 확률은 녹색 경로를 따른 파동함수와 붉은색 경로를 따른 파동함수의 간섭 (interference)에 따라 결정된다. 이 간섭에서는 녹색 경로와 붉은색 경로가 조합된 경로 (하단 실선 → 오른쪽 수직 점선 → 상단 실선 → 왼쪽 수직 점선)를 따라서 애니온이 간섭계 가장자리를 한바퀴 돌게 되는데, 간섭계 내부에 위치한 애니온들을 감싸고 돌아서 braiding이 일어난다 [11].

하지만, 애니온의 경우에는 braiding을 하면 상태가 바뀐다. 가환 애니온 경우에는 braiding 후에 절대값이 1인 복소수 인자 $e^{2\pi i \nu}$ 가 두 애니온 상태에 곱해진다. 여기에서 ν 는 $1/3$ 과 같은 특정 분수이다 (보손의 경우는 $\nu=0$, 페르미온은 $\nu=1/2$ 에 대응된다). 숫자가 곱해지기 때문에, 이러한 특성을 갖는 애니온을 가환 (Abelian) 애니온이라고 부른다. 비가환 애니온의 경우는 braiding 후에 두 애니온 상태가 아예 다른 상태로 변한다. 심지어는 처음 상태와 직교하는 상태로

변하기도 한다. 수식으로 표현하면, 처음 상태에 어떤 unitary matrix가 곱해진 꼴로 표현된다. 행렬이 곱해지기 때문에 비가환, 즉, non-Abelian 애니온이라고 불린다. 다양한 가환 애니온, 비가환 애니온이 존재할 것으로 예측되고 있으며, 분수 양자 홀 상태나 위상 초전도 상태의 들뜸 현상으로 애니온이 발현될 것으로 기대되고 있다. 이러한 braiding에 의한 상태 변이는 우리가 익히 알고 있는 입자들, 예를 들면, 광자 (photon), 전자 (electron) 등을 생

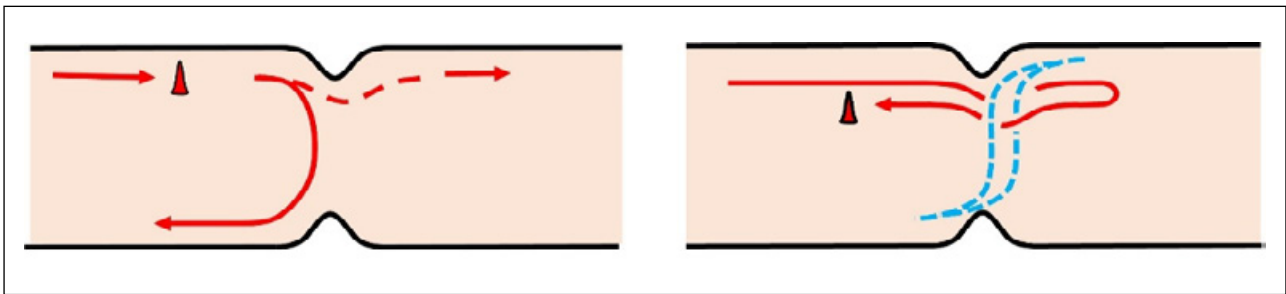


그림3. 애니온 빔 분할기 (beam splitter). 이차원 상단과 하단 가장자리에 애니온의 일차원 경로 (검은색 실선)가 각각 있다. 두 경로는 중앙 위치 (quantum point contact)에서 서로 근접하는데, 이 위치에서 애니온이 한 경로에서 다른 경로로 뚫 수 있다 (tunneling). 왼쪽 그림은 보통의 빔 분할을 나타낸다. 왼쪽 상단에서 입사된 애니온 (붉은색 삼각형)의 파동함수는 중앙에서 둘로 분할된다. 즉, 애니온이 상단 경로를 따라서 오른쪽 상단으로 가거나 (점선 화살표), 중앙 위치에서 하단 경로로 뛰어서 왼쪽 하단으로 움직인다 (실선 화살표). 오른쪽 그림은 anyon braiding에 의한 빔 분할을 나타낸다. 왼쪽 상단에서 입사된 애니온은 상단의 일차원 경로를 따라 오른쪽 상단으로 움직인다. 이 애니온의 파동함수는 분할되지 않는다. 그 대신, 이 애니온이 중앙 위치 (quantum point contact)를 지날 때, 중앙 위치에서 다른 애니온의 들뜸 현상이 양자 요동에 의해 나타난다. 이 들뜸 애니온은 입사된 애니온 (붉은색 실선 고리)을 braiding한다 (파란색 점선 고리) [7,8].

각할 때 매우 이상한 것이다. braiding 전, 후의 입자들의 위치는 변함이 없는데, 두 입자의 양자역학 상태가 애니온의 경우에는 바뀐다! Braiding은 비국소적 (nonlocal)이며, 위상학적 (topological)인 것이다. 참고로, 이러한 위상학적인 것은 3차원에서는 잘 정의되지 않는다. 3차원에서는 그림1의 왼쪽과 오른쪽을 비교하는 것이 무의미하다. 3차원에서는 애니온 상태가 잘 정의되지 않는다.

분수 양자 홀 현상이 1982년에 발견된 이래로, 애니온을 발견하기 위한 시도가 지속적으로 있었다. 애니온의 분수 전하가 1997년에 측정되어 애니온의 존재 가능성에 대한 기대감이 높아졌다 [9,10]. 전자의 전하량 e 와 비교해서, 분수 양자 홀 영역의 애니온은 $e/3$ 과 같은 분수 전하를 갖는다. 애니온의 본질적 특성인 braiding 현상들은 그동안 많은 노력에도 불구하고 발견되지 않다가, 가환 애니온의 braiding 현상들이 2020년에 두 실험 그룹들 (프랑스 소르본느 대학 Gwendal Fève 교수팀 [4], 미국 퍼듀 대학 Michael Manfra 교수팀 [5])에 의해 서로 다른 방법들을 기반으로 관측되었다. 이 현상들은 고순도 이차원 전자계에 고자기장 (10 Tesla)을 인가하고 극저온 (10 mK)에서 측정해야 관측된다.

Manfra 교수팀은 분수 양자 홀 영역에 구현된 간섭계 (quantum interferometer)를 이용하였다. (그림 2). 애니온을 이 간섭계에 입사시키면, 애니온은 그림 2의 녹색 경로나 붉은색 경로를 따라 이동한다. 두 경로를 따른 양자 파동함수들이 간섭하여 간섭계를 통과하는 전류에 영향을 준다. 이 간섭 현상의 애니온 경로는 간섭계의 가장 자리를 따라 한바퀴 도는 것인데, 이 경로는 간섭계 내부에 위치한 애니온들을 감싸고 돌게 되어서 braiding이 일어나고, 결과적으로 간섭계 전류의 간섭 무늬에 특이한 신호를 만든다 [5]. 한편, Fève 교수팀은 분수 양자 홀 영역에 구현된 빔 분할기 (beam splitter; quantum point contact)를 이용하였다. 빔 분할기에 두 개의 애니온들을 입사시켜서 어떻게 분할되는가를 관측했다. 입자가 보존이나 페르미온인 경우와는 매우 다른 실험 결과가 얻어졌고, Fève 교수팀은 입사된 애니온이 서로 충돌해서 나타난 것으로 실험 결과를 해석하였다 [4].

하지만, 이 해석은 학계의 통상적인 예측을 따른 것인데, 이 해석이 틀렸음이 본 이론 연구진에 의해 밝혀졌다 [7,8]. 애니온들 간의 충돌은 일어나지 않고, 그 대신에 braiding이 일어난다. 애니온들 간의 충돌 현상이 아니므로, 애니온을 한 개만 입사시켜도 braiding이 일어난다. 빔 분할기에

보존 또는 페르미온 한 개를 입사시키면, 그림 3의 왼쪽과 같은 빔 분할이 일어난다. 하지만, 애니온 한 개를 입사시키면, 빔 분할기에 다른 애니온이 양자 요동에 의해 나타나서 입사된 애니온을 braiding 한다. (그림 3 오른쪽). 이 braiding은 이차원 공간에서 닫힌 경로를 따라서 일어난 것이 아니라, 일차원 경로 상에서 시간 축 (time axis)의 도움을 받아서 일어난다. 본 연구진은 이를 time-domain anyon braiding이라고 명명하였다. 본 연구진은 이스라엘 와이즈만 연구소의 Moty Heiblum 교수 실험팀과 공동연구를 수행하여, 애니온을 한 개만 빔 분할기에 입사시키는 경우에 time-domain anyon braiding에 의한 신호를 발견하였고, 본 연구진의 이론을 입증하였다 [6].

애니온 braiding 현상들이 여러 실험팀들에서 재현되었고, 이에 따라 학계에서 애니온 연구에 박차를 가하고 있다. 이번에 입증된 현상들은 가환 애니온들의 braiding에 의한 것이다. 보다 기묘한 비가환 애니온들의 braiding은 아직 발견되지 않은 채 남아있다. 비가환 애니온 braiding은 위상 양자 컴퓨터 (topological quantum computing)의 원리인 만큼 [3], 애니온 연구는 이제 새로운 전기를 맞이하고 있다.

참고문헌

- [1] J. M. Leinaas and J. Myrheim, On the theory of identical particles. *Il Nuovo Cimento B Series* 37, 1 (1977).
- [2] D. Arovas, J. R. Schrieffer, and F. Wilczek, Fractional statistics and the quantum Hall effect. *Phys. Rev. Lett* 53, 722 (1984).
- [3] C. Nayak, S. H. Simon, A. Stern, M. Freedman, and S. Das Sarma, Non-Abelian anyons and topological quantum computation. *Rev. Mod. Phys.* 80, 1083 (2008).
- [4] H. Bartolomei et al., Fractional statistics in anyon collisions, *Science* 368, 6487 (2020).
- [5] J. Nakamura et al., Direct observation of anyonic braiding statistics, *Nat. Phys.* 16, 931 (2020).
- [6] J.-Y. M. Lee, C. Hong, T. Alkalay, N. Schiller, V. Umansky, M. Heiblum, Y. Oreg, and H.-S. Sim, Partitioning of diluted anyons reveals their braiding statistics, *Nature* 617, 277 (2023).
- [7] B. Lee, C. Han, and H.-S. Sim, Negative excess shot noise by anyon braiding, *Phys. Rev. Lett.* 123, 016803 (2019).
- [8] J.-Y. M. Lee and H.-S. Sim, Non-Abelian Anyon Collider, *Nat. Commun.* 13, 6660 (2022).
- [9] R. de-Picciotto et al., Direct observation of a fractional charge, *Nature* 389, 162 (1997).
- [10] L. Saminadayar et al., Observation of the $e/3$ fractionally charged Laughlin Quasiparticle, *Phys. Rev. Lett.* 79, 2526 (1997).
- [11] C. de. C. Chamon et al., Two point-contact interferometer for quantum Hall systems, *Phys. Rev. B* 55, 2331 (1997).

Vol. 17

Department of Physics

Newsletter

<http://physics.kaist.ac.kr>

물리학과 미래도약 건축기금

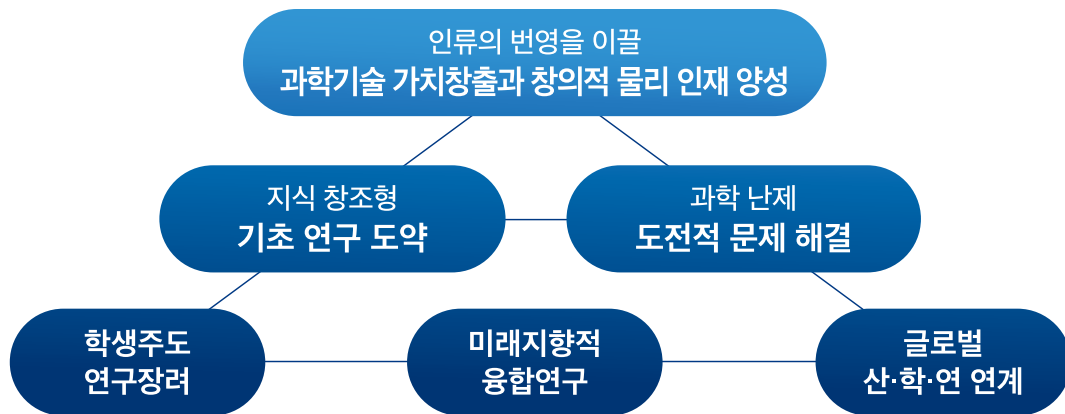
대한민국 과학의 미래는 튼튼한 기초과학 위에서
Expanding Horizons of Human Knowledge from Atoms to Universe

KAIST 물리학과는 인류의 당면 과제와 난제들을 해결하고,
기초학문을 선도하는 세계 최고의 지성을 키워내는 학과가 될 것입니다.

더 높이 비상하는 KAIST 물리학과의 날개가 되어주세요.



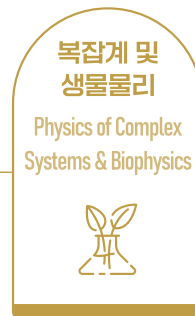
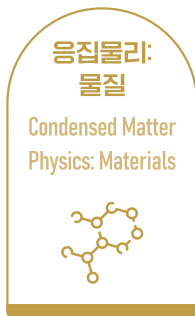
KAIST 물리학과 비전



KAIST 물리학과 중점 미래 발전 전략

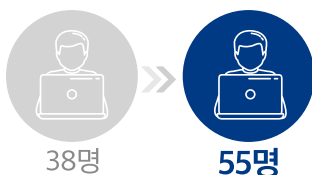


주요 연구 분야

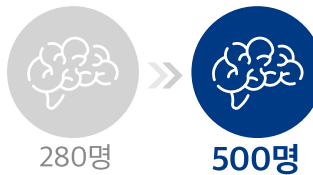


NOW and 10 YEARS LATER

● 현재 ● 10년 후



전임교원



학문후속세대(대학원생, Post.doc)



글로벌 랭킹

과학난제 및 양자연구원동 배정 중점 연구실



양자기술
연구실



융합과학기술
연구실



고에너지/우주천문
연구실



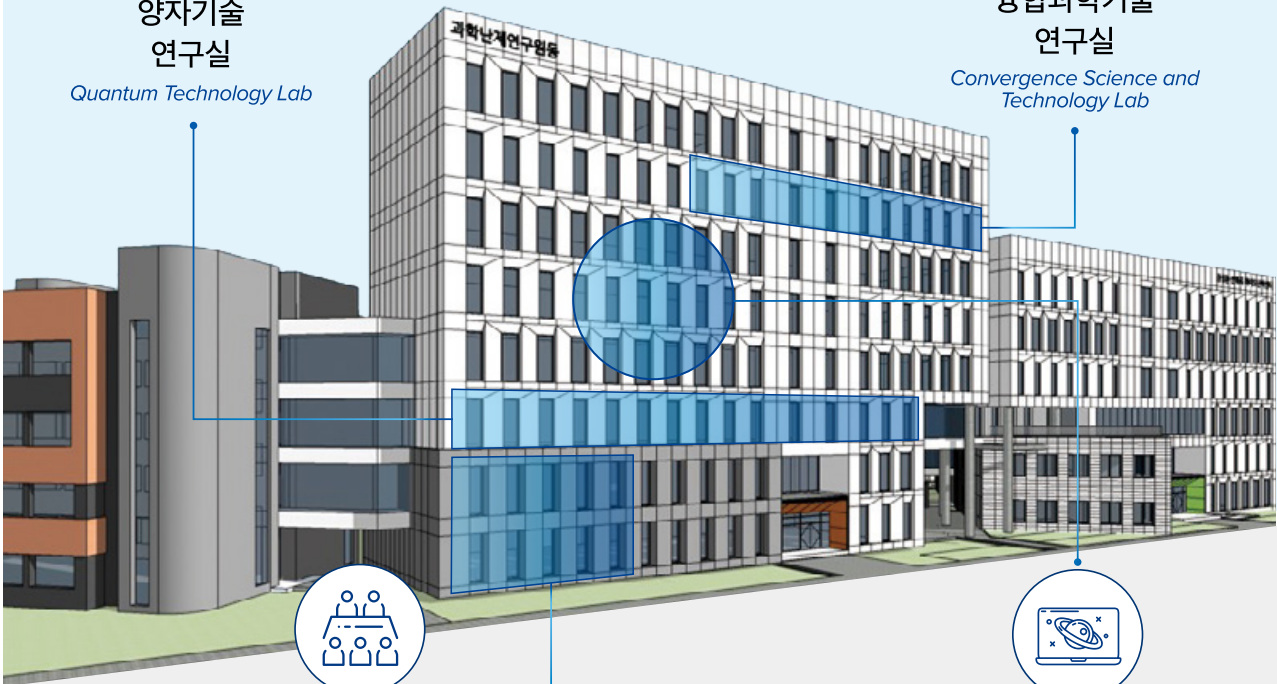
다목적 국제
회의실



양자기술
연구실
Quantum Technology Lab



융합과학기술
연구실
*Convergence Science and
Technology Lab*



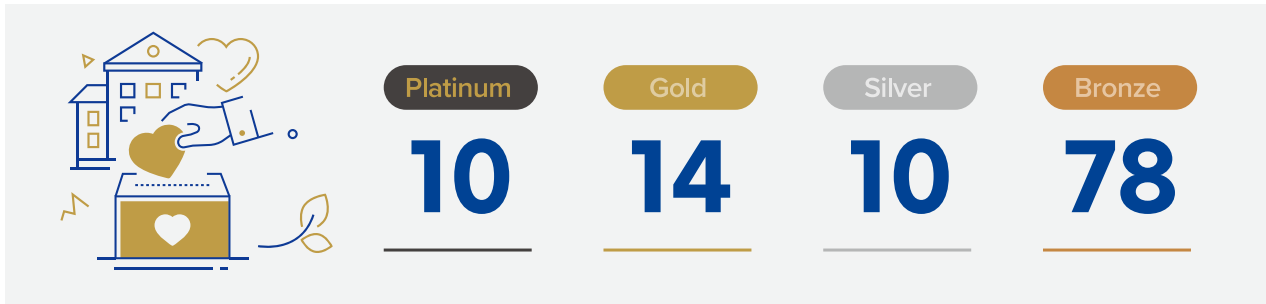
다목적 국제
회의실
(최고 기부자 회의실 명명)



고에너지/우주천문
연구실
*High Energy &
Space Astronomy Lab*

기부자 현황

기준: 인원



기부방법

참여방법

- 약정서 작성 (별첨)
- 휴대전화로 약정서 촬영
- 1666-5095 문자전송
- 입금 : 우리은행 270-003359-01-005 (한국과학기술원)

문의

• 물리학과 T. 042-350-2599

• 발전재단 T. 042-350-4500

기부자 예우

물리학과는 물리학과 미래도약 건축기금 후원에 동참하시는 분들을 영원히 기억하겠습니다.

공통예우



개인 3천만 원
기업 1억원 이상



개인 1천만 원
기업 5천만 원 이상



개인 5백만 원
기업 3천만 원 이상



개인 1백만 원
기업 1천만 원 이상

- 기부자 연말 행사초청
- 감사패 증정
- 물리학과 건물 내 기념 명판 게시
- 공간 네이밍

기업예우

- 물리학과 주최 강연 및 세미나 참석 가능
- 졸업생 대상 취업 설명회 개최 우선 배려

※ 기업예우의 경우는 기업에게만 부여하는 특별 예우로 개인에게는 해당하지 않습니다.

KAIST 물리학과 미래도약 건축기금 약정서

작성하신 약정서를 **휴대전화로 촬영 후 문자수신전용 1666-5095로 전송**하시면 접수됩니다.

인적사항

※ 귀하의 개인정보는 기부금 납부내역 세무신고 이외 다른 목적으로는 사용되지 않습니다.

성명 (단체명)	주민번호 (사업자번호)		(* 기부금영수증 신청을 희망하지 않는 경우 생년월일 6자리만 기재)		
기부자 구분	<input type="checkbox"/> 동문	학과:	입학년도:		
	<input type="checkbox"/> 학부모	학생이름:	학과:	입학년도:	
	<input type="checkbox"/> 교직원	부서:	<input type="checkbox"/> 일반	<input type="checkbox"/> 기업	<input type="checkbox"/> 단체
E-mail			휴대전화		
주소	(우편번호)				

약정내용

※ 유증, 부동산등 기타 현물자산 기부를 희망하실 경우 담당자가 방문 상담해 드립니다.(Tel. 042-350-4500)

금액	금	원정 (₩)
용도	물리학과 미래도약 건축기금		

납부방법

※ 입금계좌 : 우리은행 / 270-003359-01-005 / 한국과학기술원

일시불	<input type="checkbox"/> 무통장입금	년	월	일	입금자명:			
	<input type="checkbox"/> 현물							
분할납부	기간	년	월	~	년	월 (개월)	매월	원
	<input type="checkbox"/> CMS자동이체(자동 인출) 거래은행:		계좌번호:		예금주:			
	<input type="checkbox"/> 이체일		<input type="checkbox"/> 10일		<input type="checkbox"/> 25일			
	<input type="checkbox"/> 급여공제(KAIST교직원에 한함)							

개인정보 수집 및 제공 동의 (*동의 여부 체크)		<input type="checkbox"/> 동의함	<input type="checkbox"/> 동의하지 않음
필수정보	성명, 약정금액, 기금용도, 기부금 원금보존 여부, 납부방식 및 기간(일시납, 분할납), 무통장입금(이체 예정일자, 입금자명), 방문접수(방문예정일자), CMS 자동이체(은행명, 계좌번호, 예금주명, 이체일), 교직원 급여공제		
선택정보	기부자구분(본교와의 관계), 동문(학과, 입학년도), 학부모(학생 이름, 학과, 입학년도), 교직원(부서), 우편주소(자택/직장), 전화번호(자택/직장/휴대전화), 이메일		
고유식별정보	주민등록번호(기부 내역 국세청 신고 및 세액공제용 기부영수증 발급 목적)		
제3자 정보제공	후원자 정보 관리 및 기부자 통계, 기부금 CMS 자동 이체 납부 및 예우품, 소식지, 행사 안내 등 우편 발송		

※ 상기 개인정보는 개인정보보호법에 따라 보호되며, CMS 자동이체, 기부금영수증 발급, 기부금 발급명세 작성, 기부금 통계 및 우편물(기부금영수증, 예우품, 소식지 등) 발송을 위한 용도 이외로 사용되지 않습니다.
 ※ 정보주체는 개인정보 수집 및 제공, 이용 목적에 동의하지 않을 수 있으며, 이 경우 기부금영수증 발급 및 기부자 예우 서비스 등이 제한될 수 있습니다.
 ※ 개인정보 수집 근거: 소득세법 제160조의3, 소득세법 시행령 제113조 제1항, 제208조의3, 소득세법 시행규칙 제58조, 법인세법 제112조의2 등
 ※ 개인정보 보유 및 이용기간: 기부금영수증 발행 등을 위한 관계 법령에서 정한 일정 기간 동안 보유하며, 본인 요청시 즉시 삭제



KAIST 발전재단
KAIST Development Foundation
 Tel. (042)350-4500 Fax. (042)350-3500
 E-mail. foundation@kaist.ac.kr
 http://giving.kaist.ac.kr

년 월 일

※ 발전기금 약정과 동시에 KAIST 발전 후원회의 회원이 됩니다.

약정인 (서명)

발전기금 모금안내

Physics Department Donors

2024.02.29 기준

Platinum (개인 3,000만원, 기업 1억원 이상)



김병윤, 김재관, 신창재, 이용희, 정하웅, 홍영은, 에스케이하이닉스 주식회사,
(주)셈테크놀로지(공홍진★), (주)플라즈마트(장홍영★), (주)LG이노텍(조용훈★)

Gold (개인 1,000만원, 기업 5,000만원 이상)

공홍진, 김은성, 남창희, 도영규, 민경욱, 박용근, 박정호, 신성철, 이성재, 이현성, 장석복, 장홍영,
(재)동화산업장학재단, (주)한빛레이저(공홍진★)

Silver (개인 500만원, 기업 3,000만원 이상)

배지은, 선흥규, 심흥선, 양찬호, 윤춘섭, 이상민(FABIAN ROTERMUND), 조용훈, 최형순,
(주)하이로닉(공홍진★), (주)주성엔지니어링(장홍영★)

Bronze (개인 100만원, 기업 1,000만원 이상)

David Helfman, 고재룡(고민수), 김갑진, 김광수(김희주), 김남익, 김병규, 김상규,
김성도, 김수용, 김영걸, 김용우, 김용운, 김용현, 김윤수, 김윤식, 김을임, 김필한,
김휘민, 라영식, 류제경, 박상희, 박재필, 방몽숙, 백희태, 서기석, 서명은, 서민교,
석현정, 성건용, 성주연, 소민호, 신중훈, 안경원, 안재욱, 안화수, 양문승, 오명숙,
유금숙(이정일), 유승협, 유승화, 유장현, 윤동기, 윤태영, 이선민, 이성진, 이수종,
이순철, 이영훈, 이원희, 이은강, 이재형, 이진환, 이한석, 이해웅, 이해성, 임형준,
장기주, 장충석, 정경숙, 정광화, 정규수, 정동인, 정선은, 정용우, 정호승, 조병현,
조영주, 차대길, 최광욱, 최덕현, 최삼관, 최성진, 최원호, 최재윤, 하진원, 한동일,
한우현, 황종택

*기부유치 장려자

저희 KAIST 물리학과는 발전과 도약을 위한 노력에 후원을 부탁드립니다.
여러분들의 후원에 최고의 과학인재 양성으로 보답하겠습니다.
후원 방법은 물리학과 사무실 (042-350-2599)로 전화주시면 상세히 안내해 드리겠습니다.

34141 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원 E6-2 / E6-6

Telephone. 042-350-2599 Fax. 042-350-2510 Homepage. <http://physics.kaist.ac.kr>