

2025. 6. 6.(금) 03:00

보도시점

(국제 엠바고)

배포 2025. 6. 5.(목) 09:00

(2025. 6. 6.(금) 조간)

머리카락 굵기 백만분의 일 ‘양자거리’ 측정 성공

- 연세대 김근수 교수와 서울대 양범정 교수 공동 연구성과, Science지 게재
- 양자컴퓨팅, 양자 감지(센싱) 등 다양한 양자기술에 적용 기대

머리카락 굵기의 백만분의 일, 원자보다 작은 미시세계의 거리를 수치화해 측정할 수 있는 ‘양자거리’ 측정 방법이 국내 연구진에 의해 개발되었다.

과학기술정보통신부(장관 유상임, 이하 ‘과기정통부’)는 연세대학교 김근수 교수 연구팀과 서울대학교 양범정 교수 연구팀이 세계 최초로 고체 물질 속 전자의 양자거리 측정에 성공했다고 밝혔다.

양자거리란 미시세계* 입자들 간의 양자역학적 유사성, 즉 ‘얼마나 닮았는가?’를 수치로 나타내는 물리량이다. 두 입자가 완전히 똑같은 양자 상태일 때 최솟값 0, 완전히 다르다면 최댓값 1이 되는데, 양자 컴퓨팅과 양자 감지(센싱) 분야에서 양자 연산의 정확도 평가와 상태변화 추적을 위해 필수적인 정보로 여겨진다.

* 미시세계: 머리카락 굵기의 백만분의 일 수준으로 원자만큼 작은 세계. 과학자들은 미시세계에서 입자의 운동을 양자역학으로 설명함.

또한, 최근 고체 물질 속 전자의 양자거리는 물질의 기본 성질을 표현하는 것을 넘어서, 초전도와 같은 난해한 물리 현상들과 밀접한 연관이 있다는 것이 밝혀지고 있다.

이에 따라 전 세계적으로 이를 정확히 측정하려는 연구가 활발히 진행되고 있지만, 현재까지는 고체 속 전자의 양자거리를 간접적으로 측정한 사례만 보고되었을 뿐 직접적으로 측정하는 방법은 아직까지 밝혀지지 않았다.

기존 한계를 극복하고, 고체 속 전자의 양자 거리를 직접적이고 완전하게 측정한 이번 연구 성과는 양범정 교수의 이론그룹과 김근수 교수의 실험 그룹이 각각 5~10년 동안 꾸준히 발전시켜 온 전문성을 토대로 이론그룹과 실험그룹의 긴밀한 협력 연구 끝에 창출해 낸 것이어서 더욱 의미가 크다.

양범정 교수 연구팀은 미국 메사추세츠 공과대학(MIT)과 협력하여 양자거리를 근사적으로 측정한 결과를 네이처 피직스지(Nature Physics)에 게재하는 등 이론 연구에 대한 뛰어난 전문성을 가지고 있으며, 김근수 교수 연구팀은 각분해광전자분광*과 흑린에 대한 실험 연구 결과를 '24년도에 네이처지(Nature)에 게재한 바 있다.

* 각분해광전자분광(ARPES): 물질에 빛을 조사할 때 튀어나오는 광전자의 에너지와 운동량을 분석하는 실험 기법

공동 연구팀은 구조가 비교적 단순한 물질인 흑린에 주목하고 연구를 고도화 시켜나갔다. 먼저, 이론그룹인 양범정 교수 연구팀은 흑린의 단순한 조성과 대칭 구조로 인해 전자의 양자거리가 위상차*에 의해 결정된다는 사실을 밝혀냈다.

* 위상차(phase difference): 파장이 동일한 두 파동의 최댓값 사이의 위치 간격. 미시 세계의 입자는 파동적 성질을 갖기 때문에 전자 파동의 경우에도 위상차가 존재함

이후 실험그룹인 김근수 교수 연구팀은 각분해광전자분광 실험에서 편광된 빛을 이용하면 전자 간 위상차에 따라 검출 신호의 세기가 달라진다는 점에 착안하여, 흑린 속 전자의 위상차를 정밀하게 측정하고, 이를 통해 양자거리를 정밀하게 추출하는 데 성공하였다.

김근수 교수와 양범정 교수는 “건축물을 안전하게 세우기 위해 정확한 거리 측정이 필수인 것처럼, 오류없이 정확하게 동작하는 양자 기술 개발에도 정확한 양자거리 측정이 반드시 필요하다”며, “이번 연구성과는 양자 컴퓨팅, 양자 감지(센싱)와 같은 다양한 양자 기술 전반에 기초 도구로 활용될 수 있을 것이다”라고 연구의 의의를 밝혔다.

과기정통부 기초연구사업(리더연구, 선도연구센터)의 지원으로 수행한 이번 연구 성과는 세계 최고 권위의 국제학술지 「사이언스(Science)」에 6월 6일(현지시간 6.5.(수) 14시, 동부일광절약시간<EDT>) 게재*되었다.

* 논문명 : Direct measurement of the quantum metric tensor in solids.

담당 부서	기초원천연구정책관 기초연구진흥과	책임자	과 장	송완호 (044-202-4530)
		담당자	주무관	허정현 (044-202-4537)
유관 기관	연세대학교 물리학과	교신저자	교 수	김근수 (02-2123-2609)

내일을 만드는 과학기술
내일을 채우는 디지털·AI

대한민국
지책브리핑



주요내용 설명

<작성 : 연세대학교 김근수 교수>

논문명	Direct measurement of the quantum metric tensor in solids
저널명	Science
키워드	Quantum distance (양자 거리), Black phosphorus (흑린), Phase difference (위상차), ARPES (각분해광전자분광)
DOI	https://doi.org/ (6월 5일 게재 예정, online at 7pm [UK시간])
저자	김근수 교수(교신저자/연세대학교), 양범정 교수(교신저자/서울대학교), 김선제 연구원(제1저자/서울대학교), 정윤아 연구원(제1저자/연세대학교), 유틱 킴안(Yuting Qian) 연구원(제1저자/서울대학교)

1. 연구의 필요성

- 물리학자들은 머리카락 굵기의 100만분의 1 수준으로 작은 입자들의 운동을 ‘양자역학’으로 설명한다. 우리 주변의 물질들 속에도 양자역학으로 운동을 설명해야 하는 작은 입자들이 존재하는데 대표적으로 전자가 있다. 이론 물리학자들은 물질 속 전자의 양자역학적 유사성(얼마나 서로 닮았는가?)를 수치로 표현한 물리량을 도입하였는데, 이를 양자거리(quantum distance)라 한다. 전자들이 서로 같은 양자 상태에 있으면 최솟값 0이 되고, 서로 다른 양자 상태에 있으면 최댓값 1이 되는 것이다.
- 최근 물리학자들은 물질 속 전자의 양자거리가 비단 물질의 기본 성질 뿐만 아니라 초전도와 같은 신비로운 양자 현상과 밀접하게 연결된다는 사실을 인지하기 시작함에 따라 양자거리를 실험적으로 측정하는 방법을 개발하는 데 큰 관심이 모였다. 고체 물질 속 전자의 양자거리를 근사하여 간접적인 측정에 성공한 사례가 보고*되기도 하였으나, 어떠한 근사없이 완전하게 양자거리를 측정하는 것은 미완성 과제로 남아있었다.

* 이번 연구의 공동 교신저자인 양범정 교수 연구팀은 미국 MIT 실험그룹과의 공동 연구를 통해 양자 거리에 대한 간접적인 측정 방법을 개발하였고, 이 연구 결과는 지난 1월 네이처 피직스에 게재되었다 [Nature Physics 21, 110 (2025)].

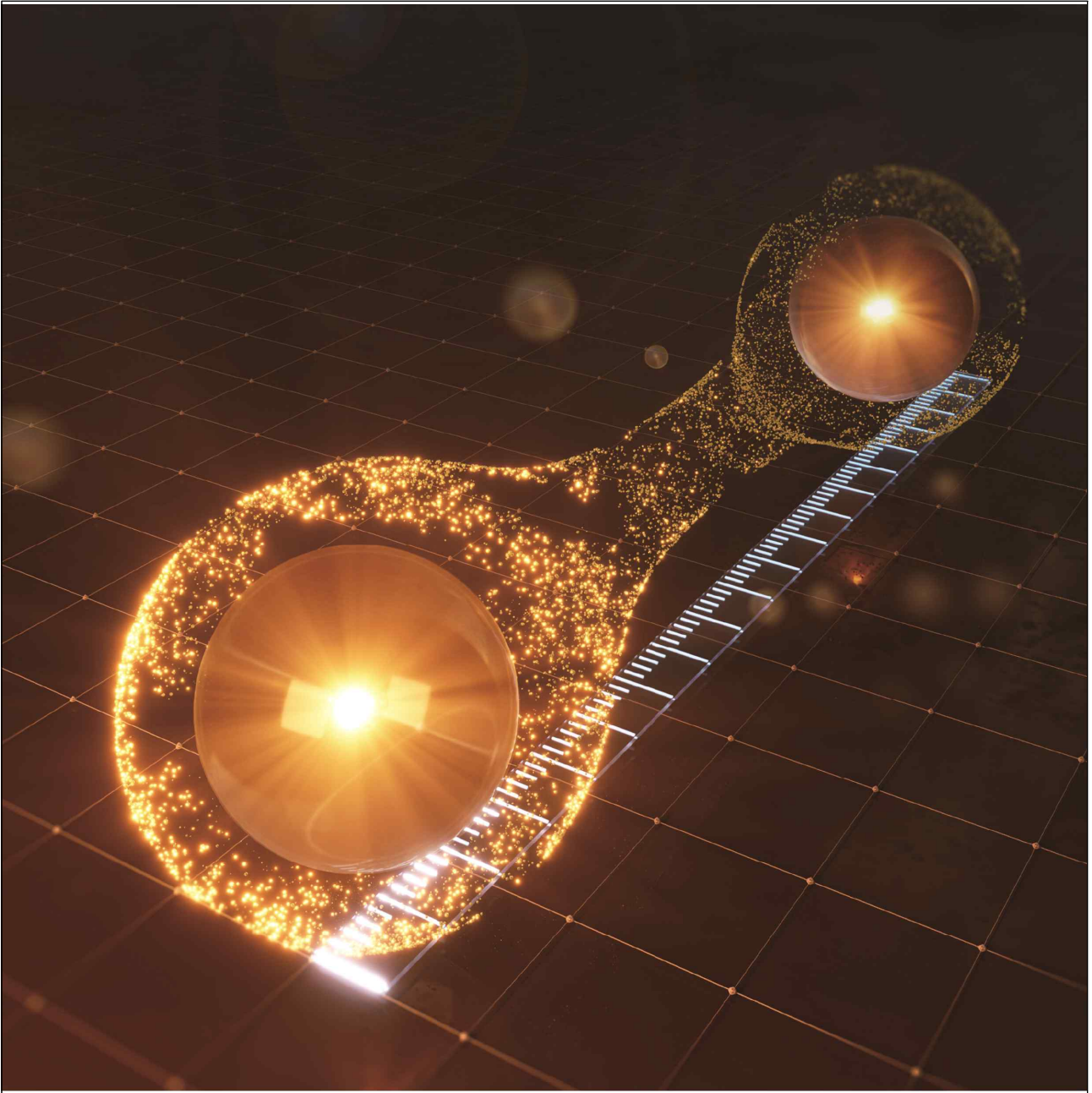
2. 연구내용

- 이번 연구에서는 서울대 양범정 교수가 이끄는 이론그룹과 연세대 김근수 교수가 이끄는 실험그룹 간의 긴밀한 협력 연구를 통해 세계 최초로 물질 속 전자의 양자 거리를 근사없이 완전하게 측정하는 데 성공하였다.
- 연구팀은 구성과 구조가 단순한 물질 중 하나인 흑린(black phosphorus)*에 주목하였다. 이론그룹은 흑린의 단순한 구성과 대칭 구조로 인해 전자들의 양자거리가 근사없이 전자간 위상차*로 결정됨을 알아 내었다. 실험그룹은 방사광가속기와 각분해광전자분광*을 이용하여 흑린 속 전자들의 위상차를 정밀하게 측정*하였고, 이 데이터로부터 양자 거리를 직접적이고 완전하게 추출해 내는 데 성공한 것이다.
- * 흑린 : 인(phosphorus) 원자로 구성된 층상 구조의 물질로 검은 빛깔을 띄기 때문에 흑(黑)린이라 부른다. 탄소 원자로 구성된 층상구조의 물질 흑연(연필심)과 비슷하다.
- * 위상차 : 파장이 동일한 두 파동의 최댓값 사이의 위치 간격. 미시 세계의 입자는 파동적 성질을 갖기 때문에 전자 파동의 경우에도 위상차가 존재한다.
- * 각분해광전자분광(ARPES) : 물질에 빛을 조사할 때 튀어나오는 광전자의 에너지와 운동량을 분석하는 실험 기법. 주로 방사광가속기로 만들어 낸 밝은 빛을 이용한다.
- * 연구팀은 각분해광전자분광 실험에서 편광된 빛을 이용하면 전자간 위상차에 따라 신호 세기가 달라진다는 점에 착안하여 전자의 위상차를 측정할 수 있었다.

3. 연구성과/기대효과

- 안전한 건축물을 건설하기 위해서 반드시 정확한 거리 측정법이 필요한 것과 같이, 정교한 양자 기술 개발을 위해서는 반드시 정확한 양자거리 측정법이 필요하다. 양자 측정 기술은 이제 태동 단계로 물질 속 전자들의 기본적인 양자 거리 조차 근사없이 측정하는 방법이 존재하지 않았다. 이번 연구를 통해 양자 거리를 직접적이고 완전하게 측정하는 기본 방법론을 제공함에 따라 같은 원리를 바탕으로 양자 컴퓨팅, 양자 센싱과 같은 양자기술 개발 및 양자산업 전반에 폭넓은 영향을 줄 것으로 기대한다.
- 물질 속 전자들의 양자거리는 물질의 기본적인 전기적, 광학적 특성뿐만 아니라 초전도와 같은 신비로운 양자 현상과도 밀접하게 관련된다. 따라서 물질 속 전자들의 양자 거리를 측정하는 기술 개발은 인류가 양자 물질을 깊이 이해하고 활용하는 데 폭넓은 영향을 미칠 것으로 기대한다.

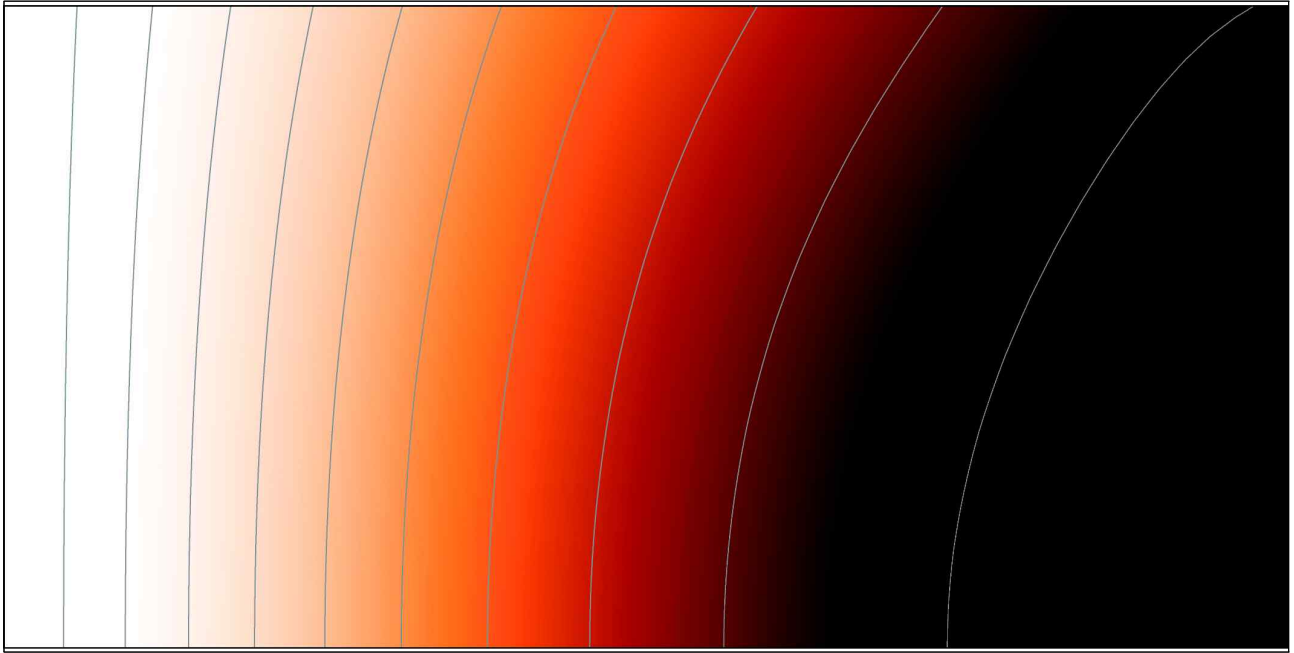
그림 설명



(그림1) 양자거리 측정 개념도

두 개의 노란 공은 전자를 나타내며, 그 아래 흰색 눈금은 거리를 측정한다는 의미로 ‘자’를 표현한 것이다. 전자 간의 유사성을 의미하는 양자 거리는 실제 거리와 약간 다른 개념이지만 ‘양자거리 측정’을 직관적으로 표현하기 위한 그림이다.

그림설명 및 그림제공 : 연세대학교 김근수 교수



(그림2) 양자거리 측정 실험 데이터

흑린 속 전자들의 양자거리 분포를 에너지와 운동량에 따라 측정한 실험 데이터로, 흰색은 양자거리가 0이고 검은색은 양자거리가 1이다. 회색 선들은 양자거리가 같은 지점을 0.1 간격으로 이어서 나타낸 것이다.

그림설명 및 그림제공 : 연세대학교 김근수 교수

연구 이야기

<작성 : 연세대학교 김근수 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

이번 연구 성과의 원동력은 이론과 실험의 긴밀한 협력이라 할 수 있다. 양범정 교수(서울대학교) 그룹은 고체 속 전자들의 양자거리에 관한 이론 연구에 전문성을 갖고 있다. 2020년 물질에 자기장을 걸어 양자거리를 측정하는 방법을 고안하여 네이처(Nature)에 게재하였고, 2024년 미국 MIT 실험 그룹과 협력하여 양자거리를 근사적으로 측정한 결과를 네이처 피직스(Nature Physics)에 게재하였다. 김근수 교수(연세대학교) 그룹은 각분해광전자분광(ARPES)과 흑린에 관한 실험 연구에 전문성을 갖고 있다. 2020년 흑린의 전자간 위상차를 측정한 연구 결과를 네이처 머터리얼스(Nature Materials)에 게재하였고, 2024년 흑린에 도핑된 전자들이 만드는 위그너 결정립을 발견하여 네이처(Nature)에 게재하였다. 이번 연구는 흑린의 전자간 위상차 측정을 통해 양자거리를 근사없이 완전하게 추출하는 데 성공한 것으로 지난 5-10년간 두 그룹이 각자 꾸준히 발전시켜 온 전문성이 융합되어 꽃을 피운 연구 성과라 할 수 있다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

고체 물질 속 전자들의 양자거리가 기본적인 물성 뿐만 아니라 양자 현상과 밀접하게 관련있다는 사실을 인지하면서 실험적인 양자거리 측정의 필요성이 대두되었으나 측정에 성공한 사례는 매우 드물다. 유일한 사례로 언급할 수 있는 것이 올초(2025년 1월)에 이번 연구의 공동 교신저자 중 하나인 양범정 교수(서울대학교) 그룹이 미국 MIT 실험 그룹과 협력하여 양자거리 측정한 것이다. 하지만 이 연구는 이론적인 근사에 의거하여 양자거리의 네가지 핵심 요소 중 하나만 간접적으로 측정한 것에 해당한다. 이번 연구는 그러한 이론적 근사없이 양자거리의 네가지 핵심 요소를 완전하게 측정하는 데 성공했다는 점에서 기존 연구와 다르다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

기초과학 연구 성과인 만큼 즉각적이고 구체적인 실용화를 언급하기는 어렵지만, 양자 과학 기술은 아직 초기 발전 단계라 기초과학의 영역에서 선결해야 할 과제가 많이 남아있다. 안전한 건축물을 만들기 위해서 반드시 정확한 측량 기술이 필요한 것과 마찬가지로, 오류없이 정확하게 동작하는 양자 컴퓨터나 양자 센싱 기술의 발전을 위해서는 반드시 정확한 양자거리 측정 기술이 필요하다. 이번 연구를 통해 고체 속 전자의 양자거리를 직접적이고 완전하게 측정하는 데 성공한 만큼 같은 물리학적 원리를 다양한 양자 기술 및 관련 산업 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

지난 20년간 물리학 연구의 중심 화두 중 하나는 고체 속 전자의 위상학적 성질이었다 (2016년 노벨 물리학상). 최근에는 고체 속 전자의 위상학적 성질 뿐만 아니라 기하학적 성질도 중요하다는 것이 드러나고 있으며, 이 분야를 “양자 기하(quantum geometry)”라 한다. 양자 기하 연구는 이제 막 태동 단계로 양자거리 측정은 양자 기하 연구의 중요한 초석이라 볼 수 있다. 이번 연구를 다양한 대칭 구조와 전자 특성을 갖는 고체 물질로 확장하여 양자기하 분야의 연구를 선도하고자 한다. 추격형(패스트 팔로워)이 아닌 선도형(퍼스트 무버) 연구로 국내 연구진이 특정 연구 분야를 국제적으로 선도하는 것이 아직 우리나라에 드문 편인데, 그런 사례를 만들어 나가고자 한다.

연구자 소개

〈김근수, 교신저자〉



1. 인적사항

- 소 속 : 연세대학교 물리학과
- 전 화 : 02-2123-2609

2. 학력

- 2005 연세대학교 학사 (물리학)
- 2010 연세대학교 박사 (물리학)
- 2010 ~ 2013 미국 로렌스버클리국립연구소 박사후연구원

3. 경력사항

- 2013 ~ 2017 포항공과대학교 물리학과 조교수
- 2017 ~ 현재 연세대학교 물리학과 조/부/정교수
- 2024 ~ 현재 연세대학교 언더우드 특훈교수
- 2021 ~ 현재 과학기술정보통신부 리더연구 단장
- 2016 이달의과학기술자상(과학기술정보통신부)
- 2019 국무총리 표창(대한민국 정부)
- 2021 한성과학상(한성손재한장학회)
- 2022 한국과학기술한림원 차세대회원 선출
- 2025 한국물리학회 학술상

4. 전문분야 정보

- 고체물리학 실험(저차원 양자물질, 각분해광전자분광)

5. 연구지원 정보

- 2021 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(리더연구)

〈양범정, 교신저자〉

1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6618



2. 학력

- 2001 서울대학교 학사 (화학)
- 2008 서울대학교 박사 (물리학)
- 2008 ~ 2010 토론토대학 박사후연구원
- 2010 ~ 2015 리켄연구소 박사후연구원

3. 경력사항

- 2015 ~ 현재 서울대학교 물리학과 조/부/정교수
- 2021 ~ 2022 제29대 한국물리학회, 한국물리학회지(JKPS) 부실무이사
- 2021 ~ 2022 제29대 한국물리학회, 아태한국위원회 위원
- 2023 ~ 2024 제30대 한국물리학회, 아태한국위원회 간사
- 2024 ~ 현재 AAPPS Bulletin 편집위원
- 2017 신진연구자상(한국물리학회)
- 2020 한성과학상(한성 손재한 재단)
- 2021 서울대학교 학술연구상(서울대학교)
- 2025 한국과학기술한림원 정회원 선출

4. 전문분야 정보

- 고체물리학 이론 (양자물질의 기하적, 위상적 특성 분석)

5. 연구지원 정보

- 2020 ~ 현재 삼성미래기술육성재단

〈김선제, 제1저자〉

1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6618

2. 학력

- 2018 서울대학교 학사 (물리학)

3. 경력사항

- 2025 삼성휴먼테크논문대상 Basic Science 부문 은상
- 2024 한국물리학회 우수발표상

4. 전문분야 정보

- 고체물리학 이론 (양자물질의 기하적, 위상적 특성 분석)



〈정윤아, 제1저자〉



1. 인적사항

- 소 속 : 연세대학교 물리학과

2. 학력

- 2015 연세대학교 학사 (물리학)
- 2021 연세대학교 석사 (물리학)
- 2024 연세대학교 박사 (물리학)

3. 경력사항

- 2018 ~ 2019 한국전자기술연구원 비상근위촉연구원
- 2024 ~ 현재 연세대학교 밴드구조제어연구단 박사후연구원
- 2024 ~ 현재 미국 로렌스버클리국립연구소 박사후연구원
- 2023 ICAMD2023 우수발표상 수상

4. 전문분야 정보

- 고체물리학 실험(저차원 양자물질, 각분해광전자분광)

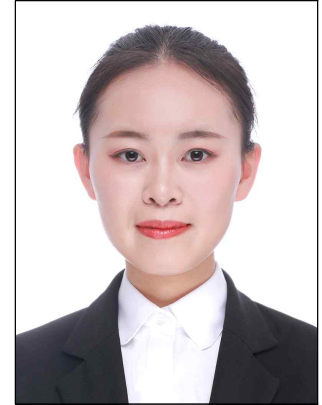
5. 연구지원 정보

- 2025 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(세종과학펠로우십)

〈유팅 켄안(Yuting Qian), 제1저자〉

1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6618



2. 학력

- 2016 B.S. in Physics, Hebei Normal University
- 2021 Ph.D. in Physics, Institute of Physics Chinese Academy of Science

3. 경력사항

- 2021 ~ 현재 서울대학교 박사후연구원

4. 전문분야 정보

- 고체물리학 이론 (제일원리계산, 양자물질 특성 계산)