

보도일시	2020. 7. 21.(화) 조간(국제엠바고 7. 21. 0시)부터 보도해주시기 바랍니다.		
배포일시	2020. 7. 20.(월) 09:00	담당부서	기초연구진흥과
담당과장	이주원(044-202-4530)	담당자	강창원 서기관(044-202-4532)
관련기관	기초과학연구원(IBS) 강상관계 물질 연구단 박제근 前부연구단장(02-880-6613)		

IBS, 전자 1개가 여러 원자에 존재하는 새로운 양자상태 발견

- 2차원 자성 물질에서 '양자 자성 다체 엑시톤' 존재 확인 -
- 네이처誌 논문 게재 ... 양자정보 전달 수단으로 확장 기대 -

□ 기초과학연구원(IBS) 강상관계 물질 연구단 박제근 前부연구단장(서울대 물리천문학부 교수)은 서강대(정현식), 연세대(김재훈), 고등과학원(손영우) 등과 함께 자성을 띤 2차원 물질에서 독특한 신호를 발견하고, 이 신호가 전자 1개가 여러 원자에 나누어 존재하는 양자다체상태의 새로운 엑시톤임을 밝혀내었다.

○ 엑시톤은 자유전자와 양공*으로 이루어진 입자로, 광자를 방출하는 양자상태이기 때문에 양자광원**이 필요한 양자정보통신에 중요한 열쇠로 거론된다.

* 전자가 빠져나간 빈자리, ** 양자상태에 따라 빛(광자)을 내보내는 광원

○ 이번에 발견한 새로운 엑시톤은 삶과 죽음이 중첩되어 존재하는 슈뢰딩거의 고양이*처럼 전자 1개가 여러 원자에 나누어 존재한다. 이 엑시톤은 이론적으로 예측된 적이 없는 새로운 양자현상이다.

* 양자역학의 불확정성을 빚댄 사고실험. 상자 속 고양이가 죽을 확률이 50%라고 할 때, 상자를 열어 관측하기 전까지 죽은 고양이와 산 고양이가 중첩돼 있다.

○ 과학기술정보통신부(장관 최기영)와 IBS(원장 노도영)는 이번 성과가 세계적 학술지 네이처(Nature, IF 42.778)에 7월 21일 0시(한국시간) 게재되었다고 밝혔다.

□ 연구진은 2차원 자성물질(삼황화린니켈, 이하 NiPS₃)에서 결맞음성*이 매우 강한 엑시톤 신호를 서로 다른 세 가지 실험으로 확인하고 이 신호 데이터를 계산하여 이번에 발견한 엑시톤이 양자다체상태임을 규명하였다.

* 결맞음성(coherence) : 파장 여러 개의 주파수와 파형이 일치함을 이른다. 파장이 다양한 자연광보다 단일한 파장을 갖는 레이저가 결맞음성이 높다.

○ 면 형태의 2차원 물질은 1차원이나 3차원에서 나타나지 않는 전자 상호작용으로 독특한 물리적 특성을 갖는다. 이번 실험에 사용된 NiPS₃는 자성을 가지면서 얇은 2차원 층으로 분리되는 반데르발스 물질* 중 하나다.

* 층 사이가 반데르발스 결합으로 불리는 약한 전기적 인력으로 묶여 있어, 얇은 원자층으로 분리할 수 있는 물질

○ 연구진은 물질에 흡수된 뒤 다시 방출되는 빛을 측정하는 광방출 실험을 통해 2차원 NiPS₃에서 결맞음이 강한 빛 신호를 발견했다.

○ 이후 빛의 운동량과 에너지 분산관계를 측정하는 공명 비탄성 X선 산란 실험을 수행하고, 고체 내 다른 원자들과의 상호작용을 완벽하게 고려한 양자역학적 이론인 다체 이론으로 이 엑시톤 데이터를 설명하였다.

○ 연구진은 최신 양자역학 기반의 다체 이론을 적용하고 방대한 양의 계산을 수행하였으며, 이를 공명 비탄성 X선 산란실험 결과와 비교하여 이번에 발견한 엑시톤이 양자다체상태임을 알 수 있었다.

□ 양자 다체 자성 엑시톤은 근본적으로 새로운 양자상태로, 2차원 물질 양자현상 연구에 기여해 양자정보기술 혁명을 앞당길 것으로 기대된다.

○ 2차원 물질은 그래핀처럼 층을 쌓아 조립할 수 있어 응용성이 크다. 또 엑시톤에서 발생하는 빛은 양자상태로 정보를 전달하는 양자정보통신으로 확장될 수 있는데, 이 때 엑시톤이 갖는 양자상태를 더 잘 이해하는 것이 중요하다.

○ 이 엑시톤은 에너지 폭이 매우 좁은, 결맞음성이 높은 신호를 보이는데 초전도체, 초유체 등 특이한 물리 현상들도 결맞음성과 관련이 있다. 박제근 前부연구단장은 "2차원 물질에서는 특히 양자상태가 매우 드물다"며 "우리 연구진이 개척해서 중요한 연구 분야로 자리매김한 자성 반데르발스 물질 분야에서 또다시 선도적인 연구 성과를 내서 이 분야를 주도했다."라고 의미를 밝혔다.

- <참고자료> : 1. 논문 정보 2. 연구이야기 3. 용어설명
4. 그림설명 5. 연구자 이력사항

논문 정보

□ 논문명

- Coherent many-body exciton in van der Waals antiferromagnet NiPS₃

□ 저자

- 강순민(공동 제1저자, IBS/서울대), 김강원(공동 제1저자, 서강대), 김범현(공동 제1저자, KIAS), 김종현(공동 제1저자, 연세대), 심경익(연세대), 이재웅(아주대), 이성민(IBS/서울대), 박기수(IBS/서울대), 윤석환(IBS/서울대), 김태훈(IBS/서울대), A. Nag(Diamond Facility), A. Walters(Diamond Facility), M. Garcia-Fernandez(Diamond Facility), J. Li(Diamond Facility), L. Chapon(Diamond Facility), K. Zhou(공동교신저자, Diamond Facility), 손영우(공동교신저자, KIAS), 김재훈(공동교신저자, 연세대), 정현식(공동교신저자, 서강대), 박제근(공동교신저자, IBS/서울대)

□ 주요내용

2차원 자성 반데르발스 물질인 NiPS₃에서 기존에 발견된 적이 없는 새로운 형태의 엑시톤을 발견하였다. 이 엑시톤은 강한 결맞음성을 보이고, 자성을 띠는 스핀자유도가 양자적으로 얽힌 매우 특이한 형태이다. 다체이론계산을 통해서 이 엑시톤이 그동안 이론적으로만 알려진 장-라이스 양자다체상태에 의한 것임을 발견하였다. 2차원 자성체는 물론이고, 지금까지 이렇게 다체상태에 의해 스핀 얽힌 엑시톤은 발견된 적이 없어, 매우 획기적인 발견이라고 할 수 있다.

연구 이야기

□ 자성 엑시톤이란 무엇이며, 어떤 것이 새로운가?

전자와 양공이 전기적 힘에 의해서 입자로 결합하는 엑시톤은 고체(절연체)의 기본적인 들뜸으로서, 초전도체, 양자 결맞음 등 다양한 응용분야에서 고려되고 특히 양자정보기술 분야에서 중요하게 여겨지고 있다. 절연체에 빛을 쬐이면 원자에 속박된 전자가 들뜬 상태로 전이하는데, 전자가 원자핵을 중심으로 도는 것처럼 이렇게 들뜬 전자는 양공 주위를 돈다. 엑시톤을 이루는 전자와 양공이 다시 만나면 광자를 내뿜으며 붕괴하고, 이 빛을 감지해 엑시톤의 존재를 알 수 있다.

엑시톤 개념은 1931년 러시아 과학자인 Frenkel에 의해서 제안되었고, 이어서 구체적인 실험결과들이 발표되었다. 2차원 물질 분야가 발전하면서 2000년 후반, 엑시톤 연구는 제 2의 중흥기를 맞았다. 2차원 물질을 이용하면 엑시톤의 전자와 양공을 다른 층에 위치시킴으로써 엑시톤의 붕괴를 늦출 수 있어, 더 면밀한 연구가 가능하기 때문이다. 하지만 이러한 엑시톤은 기본적으로 Frenkel이 최초로 제안한 메카니즘과 같고, 양자상태가 다르다고 볼 수는 없다.

이번 NiPS₃에서 발견한 엑시톤은 자성물질 내에 존재하기 때문에 기본적으로 자성(스핀 자유도)이 있으면서, 신호가 굉장히 좁은 에너지 분포를 갖는(결맞음성이 매우 높은) 양자 자성 엑시톤이다. 연구진은 결맞음성이 비정상적으로 높은 엑시톤 신호를 발견하고 계산을 통해 이 신호가 양자다체상태에 기인함을 규명했다. 자성 엑시톤도 드물게 발견되는데, 새로운 양자상태를 갖는 자성 엑시톤을 발견해 의의가 크다.

□ 이번 연구는 어떻게 시작되었나?

2차원 물질은 1차원이나 3차원에서 나타나지 않는 전자 상호작용으로 독특한 물리적 특성(자성 상전이, 위상물리학 등)을 갖는다. 그러나 자성 2차원 물질은 매우 드물고, 이를 설명하는 이론 또한 측정 물질과 기술의 부족으로 증명되지 못하고 있었다. 자성 2차원 물질의 특성을 설명하는 세 가지 이론(스핀 방향에 따라 아이징, XY, 하이젠베르크 모형으로 나뉜다)은 1943년부터 확립되었지만 실험적으로 엄밀하게 입증되지는 못했다. 박제근 前부단장은 2010년초부터 2차원 자성체 연구의 돌파구를 열기 위해서 자성 반데르발스 연구분야를 개척해 오고 있다. 국내 공동연구를 통해서 박제근 교수 연구진은 2016년부터 자성 반데르발스 물질인 FePS₃(아이징

모형, Nano Lett. 16, 7433–7438 (2016)), NiPS₃(XY 모형, Nature Communications 10, 345 (2019)), MnPS₃(하이젠베르크 모형, 2D Materials 6, 041001 (2019))을 차례로 실험하면서 처음으로 이 모형들을 엄밀하게 입증했다.

이번 Nature 지에 발표되는 연구성과는 국내외 공동연구과 함께 다양한 측면으로 NiPS₃ 연구를 시도하였고, 광학적 성질 연구도 진행했다. 빛을 물질에 흡수시켜서 다시 방출되는 빛을 측정하는 광방출 실험 결과, 1.5 eV 근처에 매우 보족한, 통상적인 수준보다 수백 배 좁게 분포하는 신호가 존재하는 것을 확인했는데, 이는 엑시톤이 매우 높은 정확도(결맞음)로 1.5 eV 에너지를 가짐을 의미한다. 뒤이어 다른 실험들로 이 현상을 설명하려고 노력했다. 아무도 하지 않았던 기초연구는 처음에는 어두운 방에서 벽을 더듬어 가는 것과 같이 목표가 명확하지 않은 작업이지만, 여러 실험들을 계속하면서 전혀 연결되지 않았던 실험 결과들이 서로 깊은 관련이 있다는 것을 깨달은 '유레카' 순간을 경험했다.

□ 어떻게 실험과 이론을 수행했나?

이번 연구에는 총 세 가지 측정방법을 동원한 실험연구와 다체(many body) 계산을 이용한 이론 연구가 함께 수행되었다. 먼저, 엑시톤이 붕괴하면서 내뿜는 빛을 측정하는 광방출 실험을 통해, NiPS₃에서 1.5 eV 근처에 결맞음이 큰 엑시톤 신호가 존재하는 것을 2016년경에 발견하였다. 당시 이 결과를 본 정현식 교수(서강대)가 당시 '내 평생 이렇게 보족한 피크는 처음 본다'고 말할 정도로 이상했고, 기존의 어떤 지식으로도 설명되지 않았다. 이어서 수행한 공명 비탄성 X선 산란 실험(RIXS, 영국 diamond facility)에서 이 엑시톤이 갖는 운동량과 에너지에 대한 아주 구체적인 정보들을 얻을 수 있었고, 이를 이론적으로 설명하기 위해서 결과 데이터를 계산으로 풀었다(고등과학원 손영우 교수팀). 150만 개 경우의 수를 다루는 다체계산을 통해서 이 엑시톤 피크가 Zhang-Rice singlet이라는 다체상태로부터 출발함을 보일 수 있었다.

동시에 광흡수 실험(연세대 김재훈 교수팀)을 통해서 처음에 하나의 피크라고 생각했던 것이 실제로는 두 개의 피크임을 발견하고, 곧이어 초정밀 광흡수 실험을 통해서 이 엑시톤이 결맞음성이 매우 높은 양자 자성 엑시톤이라는 결론을 내릴 수 있었다. 2018년 초, 세 개의 실험이 같은 결과를 가리킴을 확인한 것이다.

국내의 공동연구진인 세 실험팀과 한 이론팀이 새로운 아이디어와 결과를 주거나 받거나 하면서 지난 5년 동안 수많은 토론을 하면서 흥미로운 연구를 진행했다. 이 기간 동안 연구진들이 지하철 2호선을 타고 다니면서 수없이 많은 토론을 했기 때문에, 이 연구성과를 '과학의 2호선 오디세이'라 부르고 싶다.

□ 이번 연구의 의미와 향후 응용 방안

이번 연구는 2차원 자성 물질에서 누구도 예측하지 못했던 양자 현상을 발견한 것이 가장 큰 성과다. 2차원 자성 물질 연구는 물리학 전체에서 갖는 중요성에도 불구하고 박제근 교수가 2010년 서울대에서 연구를 시작하기 전까지는 학계에 전혀 알려지지 않았던 분야이다. 초기의 국내외 연구진의 냉대를 극복하고 박제근 교수가 국내에서 세계 최초로 개척한 분야로서 국외에서 한국에서 개척한 중요한 연구분야로 인식되고 있는 전세계적으로 드문 예이다.

이번 연구에서 발견된 엑시톤은 양자광원(양자상태에 기인해 광자를 방출하는 것)이라 기본적으로 양자정보통신 연구와 관련이 있다. 자성을 갖는 엑시톤도 드문데, 결맞음이 통상적인 수준보다 수백 배 높아 기존에 알려진 메커니즘과 전혀 다른 물리 현상임을 시사한다. 초전도체, 초유체 등 많은 독특한 물성이 결맞음에서 비롯된다. 연구진은 앞으로 NiPS₃ 양자 자성 엑시톤의 후속 연구를 수행해 결맞음성을 일으키는 원리를 규명하고, 이 엑시톤을 양자컴퓨팅 등과 같은 곳에 활용할 수 있는지도 연구할 계획이다.

이번 연구는 전 세계에서 아무도 하지 않은 연구를 한국에서 시작하고 창시했다고 볼 수 있다. 자성 반데르발스 연구는 2010년 박제근 교수가 처음 아이디어를 내고 개척해 왔으며, 2018년 Nature 지에 이 분야 리뷰논문을 발표하기도 했다.

우리 말에 '구슬이 서말이라도 꿰어야 보배'라는 말이 있다. 어느 한 개인이나 그룹이 새로운 분야를 개척할 만큼 깊이와 폭의 연구력을 가진다는 것은 불가능하다. 왜냐하면 새로운 것은 늘 한번도 생각해 보지 않은 새로운 문제가 있어서 다양한 전문가들이 필요하기 때문이다. 본 연구는 이번 연구에 참여한 국내 네 연구진(서울대 박제근 교수, 서강대 정현식 교수, 연세대 김재훈 교수, 고등과학원 손영우 교수)의 공동 작품이다. 이번 성공을 바탕으로 세계적 수준의 새로운 연구를 얼마든지 개척할 수 있다는 자신감과 경험을 얻었다.

용어 설명

1. 1, 2, 3차원 물질

- 1차원은 선, 2차원은 면, 3차원은 입체다. 물리적으로는 차원에 따라 모든 것이 달라진다. 1차원은 대부분 정확한 해가 존재하고 저차원이라 양자효과가 매우 크다. 3차원은 서술하는 모형은 있으나 너무 복잡하여 해를 구할 수 없다. 우리가 사는 3차원 세상에서는 양자역학적 효과를 만들기가 어렵거나 불가능하다.
- 2차원 물질은 1차원과 3차원의 중간으로, 일부 해가 존재하고 여기에서 여러 흥미로운 물리현상들이 발생한다.

2. 2차원 격자 모형

- 2차원 물질의 특성을 설명하는 이론적 모델. 격자 위 원자들의 스핀 상호작용을 기반으로 설명한다. 대표적으로 아이징 모델(Ising Model), XY 모델(XY Model), 하이젠베르크 모델(Heisenberg Model)이 있다. 각 모델과 관련해 모두 노벨상이 수여됐을 정도로 학술적으로 중요하다.

3. 반데르발스 물질 $NiPS_3$

- 반데르발스 물질은 층 사이가 약한 반데르발스 결합으로 이뤄져 2차원으로 얇은 층을 분리할 수 있다. 간단히 2차원 물질을 만들 수 있어 각광받고 있다.
- 반데르발스 물질인 $NiPS_3$ 는 비교적 고온인 155K에서 반강자성(이웃한 스핀 방향이 반대로 정렬해 전체적으로는 자성이 없고 국소적으로만 자성이 있다)을 띠며 단일층 구현이 가능한 최초의 자성 반데르발스 물질이다.
- 층과 나란한 방향으로 스핀이 정렬해 2차원 XY 모델을 따른다. 동일한 구조의 반데르발스 물질인 $FePS_3$ 는 스핀방향이 층과 수직해 아이징 모델을, $MnPS_3$ 은 스핀 방향이 자유로운 하이젠베르크 모델을 따른다.

4. 자유전자와 양공

- 원자에 속박된 전자가 에너지를 얻고 속박을 벗어나면 자유전자라고 부르며, 전자가 빠져나가서 (+) 전하를 띠는 빈 자리를 양공이라고 한다.

5. 장-라이스(Zhang-Rice) 양자다체상태

- 전자가 존재할 확률이 산재해 있어, 여러 원자에 동시에 속박되어 있는 독특한 양자상태이다.
- 고온 초전도체 메커니즘을 설명하기 위한 이론으로 1988년 처음 등장해 각광받았으나, 후에 고온 초전도체 실험이 더 발전되면서 실험결과와

일치하지 않아서 사장되었다.

6. 양자정보통신

- 양자광원을 정보단위로 쓰는 통신 기술. 비트 하나에 양자 단 1개만 필요하기 때문에, 훨씬 작은 에너지로 작동하며 현저하게 소형화할 수 있다. 엑시톤은 전자와 양공이 만나 붕괴할 때 빛을 발생시키기 때문에 양자광원이 될 수 있다.

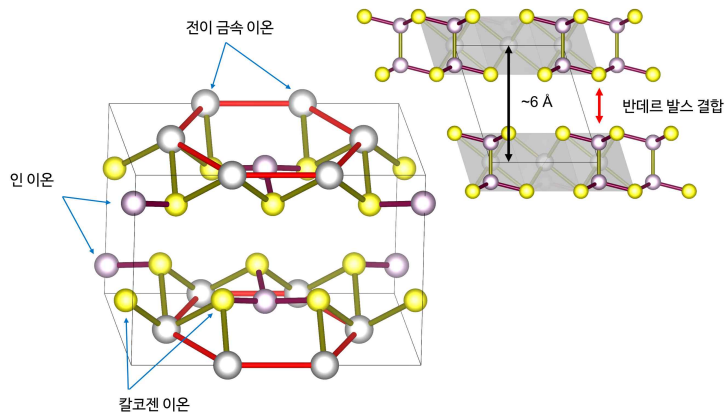
7. 엑시톤

- 전자-양공이 전기적 인력에 의해서 결합하는 상태를 엑시톤이라고 부른다. 이런 상태는 직접 밴드갭을 가지는 반도체에서는 늘 형성되는 것으로 광통신 등의 양자정보 통신에 매우 유용하다. 엑시톤 연구는 최근 2차원 물질에서 자주 발견되면서 제2의 부흥기를 맞고 있다.
- 이번에 $NiPS_3$ 에서 발견된 엑시톤은 먼저 자성의 스핀 자유도가 직접적인 관여를 한다. 그리고 이런 스핀 자유도와 함께, Ni의 전자 파동함수가 특수한 양자 다체상태인 Zhang-Rice 상태를 이룬다.

8. 네이처(Nature)誌

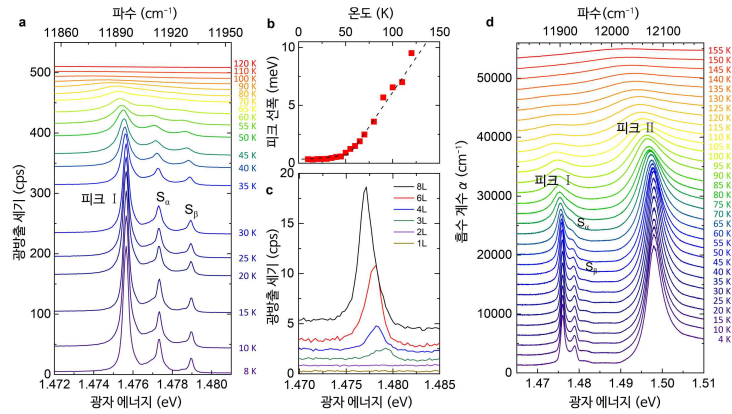
- 자연과학 분야 세계최고 권위 학술지(Impact Factor : 42.778)

그림 설명



[그림 1] 덩치삼황화린니켈(NiPS3)의 결정 구조

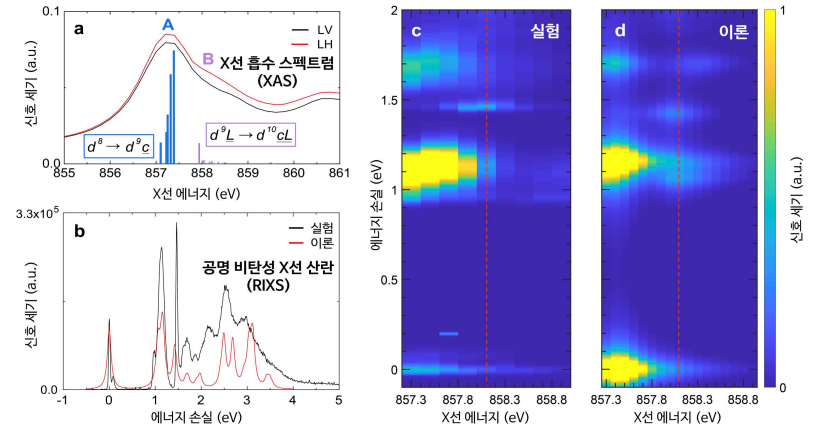
실험에 사용한 2차원 자성 반데르발스 물질 각 층은 육각형 구조로 이뤄져 있으며, 층간 결합을 이루는 반데르발스 결합은 약해서 쉽게 층을 분리할 수 있다. 강자성과 같이 스핀 방향이 고정돼 있지만, 인접한 스핀끼리 반대방향을 띠어 전체적으로는 자성을 띠지 않는 반강자성 물질이다.



[그림 2] NiPS₃에서 광방출, 광흡수 실험을 통해 얻은 엑시톤 신호

(a) 2차원 자성 물질에서 방출된 빛을 측정했더니 특정 에너지를 가진 빛이 강한 것을 발견했다. 이러한 신호는 엑시톤의 증거인데, 기존보다 결맞음이 100배 이상 높은 수준이다. (b) 온도에 따

른 신호 폭 그래프 낮은 온도에서 신호가 매우 좁은 폭으로 분포한다. (c) 광방출 신호의 두께 의존성. (d) 2차원 자성 물질이 흡수한 빛을 측정했다. 이론적으로는 광방출 실험과 광흡수 실험 결과가 같아야 하는데, 광방출 실험에서 관찰했던 신호(피크 1)가 똑같이 나타난다.



[그림 3] NiPS₃에 대한 X선 흡수 스펙트럼과 공명 비탄성 X선 산란 실험, 다체계산

(a) X선 흡수 스펙트럼 실험 결과. 857.3eV 와 858.1eV 근처에 가장 높은 신호가 존재한다. 각 신호는 서로 다른 오비탈 배열에서 비롯됐다. (b) 공명 비탄성 X선 산란 실험을 통해 858.1eV 근처에서의 에너지 빙글 스펙트럼을 측정했다(검정). 이론값(빨강)과 유사한 분포를 보인다. (c, d) 858.1eV 근처에서의 공명 비탄성 X선 산란 스펙트럼 이론값과 실험값

연구자 이력사항

<박제근 IBS 강상관계 물질 연구단 前부연구단장, 교신저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6613
- e-mail : jgpark10@snu.ac.kr



2. 학력

- 1990-1993 박사, Imperial College, London
- 1988-1990 석사, 서울대학교 물리학과
- 1984-1988 학사, 서울대학교 물리학과

3. 경력사항

- 2014 - 현재 영국물리학회지 편집위원/섹션 편집장
- 2012 - 2020 기초과학연구원(IBS) 강상관계물질 연구단 부연구단장
- 2010 - 현재 서울대학교 물리천문학부 교수
- 2001 - 2010 성균관대학교 물리학과 부/정교수, 석좌교수 (SKKU Fellow)
- 1996 - 2001 인하대학교 물리학과 조/부교수
- 1994 - 1996 박사후 연구원/연구교수 Birkbeck College, Univ. London
- 1993 - 1994 박사후 연구원 CNRS, France

4. 수상실적

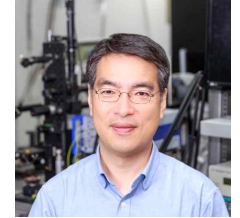
- 2017 과학기술한림원 정회원
- 2016 한국 과학상 수상
- 2015 한국물리학회 학술상 수상
- 2009 성균관대학교 석좌교수 (SKKU Fellow) 임명
- 2008 영국물리학회 석학회원 (Fellow) 임명

연구자 이력사항

<정현식 서강대학교 물리학과 교수, 공동 교신저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 서강대학교 물리학과
- 전 화 : 02-705-8434
- E-mail : hcheong@sogang.ac.kr



2. 학력

- 1993 박사, Harvard University 물리학과
- 1986 학사, 서울대학교 물리학과

3. 주요 경력사항

- 1999 - 현재 서강대학교 물리학과, 조/부/정교수
- 1997 - 1999 National Renewable Energy Laboratory, Senior Scientist
- 1995 - 1997 National Renewable Energy Laboratory, Postdoc
- 1993 - 1995 Harvard University, Division of Applied Sciences, Postdoctoral Fellow

연구자 이력사항

<김재훈 연세대학교 물리학과 교수, 공동 교신저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 연세대학교 물리학과
- 전 화 : 02-2123-2623
- E-mail : super@yonsei.ac.kr



2. 학력

- 1992 박사, Stanford University 전자공학과
- 1985 학사, University of California, Berkeley 전자공학과

3. 주요 경력사항

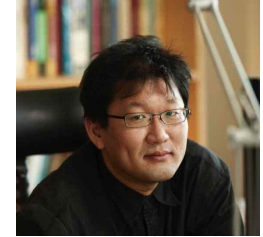
- 1995 - 현재 연세대학교 물리학과 조/부/정교수
- 1992 - 1995 University of Groningen (Netherlands)/FOM, 박사후연구원
- 1992 - 1992 Stanford University, Solid State Laboratory, 박사후연구원

연구자 이력사항

<손영우 고등과학원 교수, 공동 교신저자>

1. 인적사항

- 소 속 : 고등과학원 계산과학부
- 전 화 : 02-958-3720
- E-mail : hand@kias.re.kr



2. 학력

- 2004 박사, 서울대학교 물리학과
- 1997 학사, 서울대학교 물리학과

3. 주요 경력사항

- 2008 - 현재 고등과학원 계산과학부 교수
- 2007 - 2008 건국대학교 물리학과 조교수
- 2004 - 2006 UC Berkeley, Postdoctoral Fellow