

성균관대 극한양자기능물질 선도연구센터 소개

박두선
성균관대학교 물리학과

성균관대 극한양자기능물질 선도연구센터는 극한환경 측정기술, 신물질의 소자화 및 특성분석, 다체계의 이론적 분석 및 예측에 특화된 8개 기관 13명의 연구원이 참여하여 응집물리의 핵심 연구주제인 양자물질 (quantum matter)에 대한 연구를 수행하고 있다. 최근 ‘고전적’ 양자물질로 분류되는 초전도, 다강체 및 무거운 페르미온의 한계를 뛰어넘는 새로운 양자기능성 (quantum functionality)에 대한 연구가 보고되고 있으며 이에 대한 이해는 응집물리의 최대 난제로 부상하고 있다. 본 소개 자료에서는 현재 진행되고 있는 연구 중에서 초전도 관련 주제인 카이랄 초전도체 (chiral superconductors) 및 수소기반 상온초전도체를 간략히 소개하겠다.

□ 카이랄 초전도 연구

카이랄 초전도체는 복소수 형태의 초전도 갭 (complex superconducting gap)을 갖고 있으며 모멘텀 공간에서 시계방향 및 반시계 방향의 회전성(chirality)을 갖고 있다. 시간역전대칭성(time reversal symmetry)이 깨진 카이랄 초전도는 모멘텀이 영인 zero energy 에서 자신이 스스로 반입자인 마요라나 모드 (Majorana modes) 및 일반 초전도 플럭스 퀸텀의 1/2 크기를 갖는 반-양자 보텍스 등의 특이한 위상학적 특성을 가지고 있다. 특히, 카이랄 p-wave 초전도체의 볼텍스 코어에서 나타날 것으로 예상되는 마요라나 모드는 초전도 큐비트와 달리 외부요소에 영향을 적게 받기 때문에 양자컴퓨터의 위상 큐비트 (topological qubit)의 후보로서 큰 관심을 받고 있다..

1. 압축/인장력 제어를 통한 카이랄 초전도 연구

카이랄 초전도현상은 주요 초전도질서변수가 2중 중첩(two-fold degenerate) 되었을 때 나타난다. 예를 들면 트리플렛 카이랄 오더인 p_x+ip_y 를 갖는 초전도체에 x축으로 압축을 하게 되면 p_x 와 관련된 초전도는 약간 높은 온도에서 발현되는 반면 ip_y 컴포넌트는 온도가 낮아지면서 점점 증가하게 되어 y방향에 있는 노드를 제거하게 되며 두 번째 초전도 전이인 카이랄 초전도가 나타나게 된다. 압축/인장력은 p_x , p_y 컴포넌트 관련 초전도 온도 및 초전도 물리적 특성을 연속적으로 조절할 수 있는 기능을 부여하므로 카이랄 초전도 물성을 연구하는 핵심 기술로서 이용된다. 카이랄 도메인 경계(chiral domain boundaries)와 결정 결함 및 표면에서 발현되는 자발적 전류(spontaneous currents)에 의한 내부자기장의 존재는 시간역전대칭성을

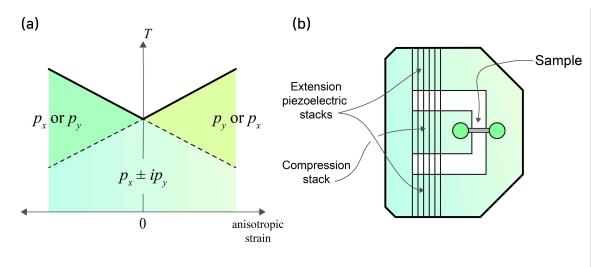


그림 1 카이랄 초전도인 $p_x \pm ip_y$ 초전도질서 변수를 갖는 물질에 인장/압축을 가했을 때 나타나는 개괄적인 상전이도형. (b) 단일축 인장/압축 조절이 가능한 압력셀 개요도

깨는 원인이 되면 이에 대한 연구는 uSR 실험을 통해서 진행된다.

높은 온도에서 발현되는 노드가 있는 초전도상에서 낮은 온도에서 발현되는 카이랄 초전도상으로의 변화에 대한 연구는 전통적인 수송성 특성 및 열역학적 특성에 대한 연구와 더불어서 각분해 기능이 추가된 조셉슨 터널링 실험을 통해 수행된다. 즉, 노드(nodes) 및 안티노드(anti-node)가 있을 것으로 예상되는 결정축 방향을 포함할 수 있도록 시료의 옆면을 둥그렇게 가공한 이후에 각도에 따라 균질한 조셉슨정현을 구현하여 온도에 따른 초전류의 변화를 연구하게 되면 $T_c^- < T < T_c^+$ 에서는 갭이 있는 각도를 중심으로 비균질한 초전류가 보이는 반면, 카이랄 초전도가 나타나는 $T < T_c^-$ 에서 균질한 전류가 나타날 것으로 예상 된다.

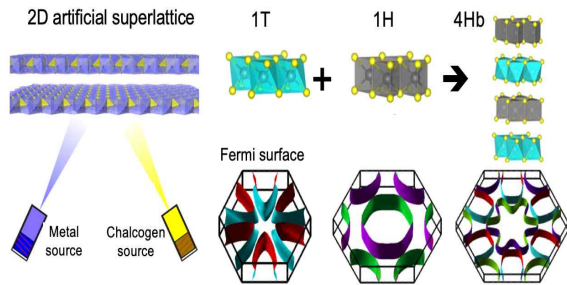


그림 2 서로 다른 대칭성 (1T vs. 1H) 결정구조 적층으로 새로운 인공초격자 신물질의 전자구조 예측

2. 카이랄 2차원 인공초격자 박막 특성 연구

2차원 반데르발스 물질의 서로 다른 대칭성 (1T vs. 1H) 결정구조체가 적층되면서 벌크에 존재하지 않는 새로운 2차원 인공초격자 결정구조 물질을 구현하고자 한다. 2차원 전이금속 디칼코겐 화합물(TMD)은 대부분 반전대칭인 1H 구조와 점대칭인 1T 구조 중에 한가지 구조로 안정화가 되며, 대칭성

의 차이로 전자구조의 특성 또한 크게 변하게 된다. 이렇게 서로 다른 대칭성인 이중물질 층을 서로 적층하게 되면 벌크에서 잘 발견되기 힘든 인공적인 결정구조 신물질을 합성하여, 새로운 2차원 인공물질의 연구가 가능할 것이다.

카이랄 초전도체는 1T와 1H 구조로 구성된 자연적인 초격자 벌크에서 복잡한 오비탈 전자구조 조합으로 카이랄 특성을 가지는 특성이 발현되고 있다. 대표적 예는 벌크 2Hb-TaS₂에서 발현되는 카이랄 전자구조 특성이다. 이러한 1T/1H 초격자를 인공적으로 합성하여 전자구조 제어와 전하수송의 특이점 연구가 가능하게 된다. 또한, 2차원 물질의 층상 상호작용의 크기 조절을 위해서 인공적인 조합 종류를 제어가 가능하여, 적층 물질(1H NbSe₂, 1T VSe₂ 등)과 주기에 따른 새로운 전자구조 발현이 기대된다.

3. 이중접합 구조를 이용한 카이랄 초전도체의 위상학적 특성 연구

양자 컴퓨팅 등 첨단 응용의 필수 요소라 할 수 있는, 비아벨리안 들뜸 입자의 생성/소멸 그리고 동역학 제어를 위한 실험 방법론이 아직 확립되지 않았다. 하지만, 최근 이중접합 구조와 간단한 전류 측정을 통해 비아벨리안 위상학적 양자 상을 관별할 수 있는 이론적 제안들이 보고되었다. 초전도 계면이 삽입된 양자홀-(비아벨리안) 스핀액체로 만들어진 회로에서는 양자화된 전도도가 측정될 수 있다. 양자홀계에서 발현된 끝머리 전자가 초전도 계면에서 두 개의 마요라나 페르미온으로 분해되고, 하나의 마요라나 페르미온은 스핀액체로 주입된다. 스핀액체 체적에서 비아벨리안 입자가 생성되면 독특한 상호 통계에 의해 주입된 마요라나 페르미온의 부호가 뒤바뀌게 되며 끝머리 홀(Hole) 상태

연구기관 소개

가 양자홀계로 재주입 되면서 유한한 전도도가 측정된다. 회로의 설계 및 구성은 비아벨리안 입자의 성질에 따라 달라질 수 있다. 나선성 초전도체의 얽힘 스펙트럼 연구를 통해 비아벨리안 입자의 위상학적 성질을 특정하고 이를 바탕으로 위와 같은 회로 설계를 통해 실험적으로 입증하는 방법을 제시할 수 있다.

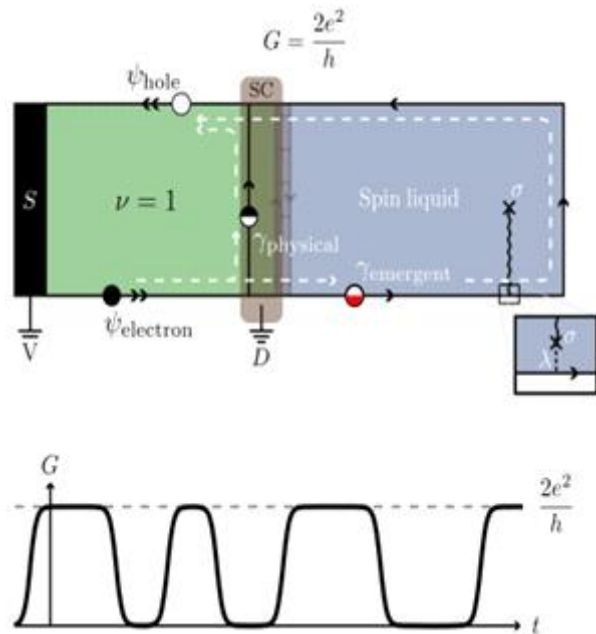


그림 3 (위) 초전도 계면이 삽입된 양자홀-스핀 액체(비아벨리안)로 이루어진 전기 회로. 스핀 액체 체적내에서 비아벨리안 입자가 생성되면 (아래) 양자화된 전도도가 측정됨

□ 수소화물 고온초전도성 연구

강한 전자-포논 결합력(electron-phonon coupling) 및 높은 포논모드를 가질 것으로 예상되는 수소기반 금속화합물에서 고온 초전도가 발현될 것이라는 닐 아쉬크로프트(N. Ashcroft)의 이론적 예측 이래로 초전도온도(Tc) 203 K의 H₃S, 260 K의 LaH₁₀, 243 K의 YH₉ 등의 수소화물에서 고온초전도가 실험적으로 구현 되었다. 과학 및 산업의 많은 분야에 주요한 진보를 가져올 꿈의 물질로 각광받고 있는 수소화물 고온초전도체의 실

질적인 응용을 위해서는 두 가지 필수적으로 해결해야 하는 난제가 있다. 첫째는, 고온에서 초전도성을 보이는 수소화물에서 초전도 특성을 밝혀내는 것이다. 메가바의 압력이 가해진 다이아몬드 셀의 환경이 가져다주는 제약으로 인해 물리적인 측정이 어려워 초전도 특성에 대한 연구가 거의 이루어지지 못하는 형편이다.

둘째는, 수소화물 고온초전도의 구현에 필요한 압력을 메가바 이하로 낮추는 것이다. 단원소로 이루어진 수소금속을 구현하기 위해서는 약 5 메가바의 압력이 필요한 반면에 희토류(rare earth) 및 알칼리계(alkaline earth) 원소와 결합한 이종 수소화물(binary hydrides)의 금속화와 초전도 상전이는 약 2 메가바에서 이루어진다. 메가바의 압력에서 수소원소가 희토류원소 등을 게스트원자로 중심에 두고서 Clathrate-like 케이지 구조를 형성하며 수소와 게스트 원자 사이의 쿨롱인력으로 인해 사전압축(precompression)의 효과가 나타나 필요한 압력이 대폭 축소한 것으로 이해되고 있다. 메가바 이하로 초전도 합성온도를 낮추기 위한 노력으로 사전압축 효과를 증폭할 수 있는 삼중수소화물(ternary hydrides)에 대한 연구와 더불어 금속화를 빠르게 증진시킬 것으로 예상되는 캐리어 도핑효과에 대한 연구 등이 다각적으로 진행되고 있다.

4. 수소화물 고온초전도체 합성

수소기반 고온초전도체의 합성은 다이아몬드 압력셀(diamond anvil cell, DAC)을 이용한 메가바 압력의 조절과 레이저로 초수소화물 전구체(precursor) 가열을 동시에 수행하는 것이다. 메가바에 도달하기 위해서는 100 μm 이하의 다이아몬드 쿨렛(culet)을 사용하여야 하며 이 때 시료의 크기는 30 μm정도의

크기라서 정밀한 극한연구가 필수적이다.

본 연구센터는 슈퍼하이드라이드 고온초전도체 중의 하나인 CeH_9 의 합성에 이미 성공하였으며 115 GPa에서 초전도 상전이 현상이 95 K에서 나타남을 확인하였다. X-ray 측정을 통한 구조분석연구 그리고 온도에 따른 라만분광학 측정을 통한 초전도와 관련된 보존모드에 대한 선행 연구를 수행중이다. 또한 본 연구센터가 세계 최초로 성공한 메가바 점접촉 분광법(Point contact spectroscopy)을 이용하여 초전도 갭에 대한 직접적 관측 및 온도/자기장 의존성을 연구하고 있다. 이러한 노력은 초전도 갭 특성 이해로 연결되어 수소화물 고온초전도 메커니즘을 규명에 핵심적 역할을 할 것으로 기대된다.

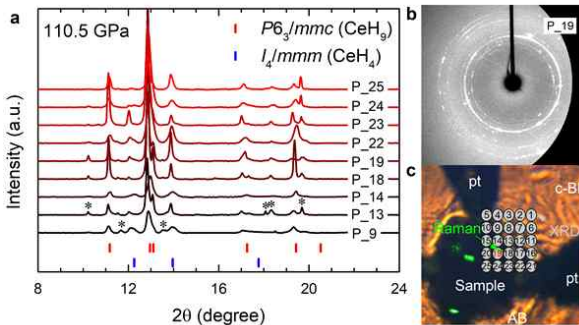


그림 4 a, 5x5 mapping을 이용한 Ce 폴리하이드라이드의 XRD 분석. b, P9에서 보이는 XRD 이미지. c, DAC 안에 형성된 시료의 사진. XRD를 분석은 여러 점들이 P1 - P25까지 표시되어 있음.

5. 수소화물 초전도박막 디바이스 연구

물성측정에 많은 제약을 가지고 있는 기존 합성방법을 개선하기 위해서 박막제작과 디바이스 합성의 연구방법론을 고온초전도 합성에 적용하여 고온초전도 디바이스를 구현하는 것이 필요하다. 다이아몬드 위에 증착 (deposition) 및 리소그래피(Lithography) 방

법을 사용하여 홀바 및 다양한 수송성 측정이 가능한 금속 구조를 만든 이후에, 게스트 원자인 Ce 혹은 Y 박막을 증착한다. 만들어진 박막의 보호 및 수소와 게스트원소와의 반응을 도와주는 역할을 할 수 있는 Pd를 증착한 이후에 암모니아 보론(NH_3BH_3) 혹은 수소가스를 넣어주어 합성을 하게 된다. 고온초전도체기반 디바이스의 성공적인 구현은 초전도 특성에 대한 보다 정량적이며 다양한 물성연구의 기회를 제공한다는 측면과 더불어 산업화 응용에 이용할 수 있는 다양한 디바이스의 테스트모델로 활용할 수 있다는 큰 의미를 부여할 수 있을 것이다.

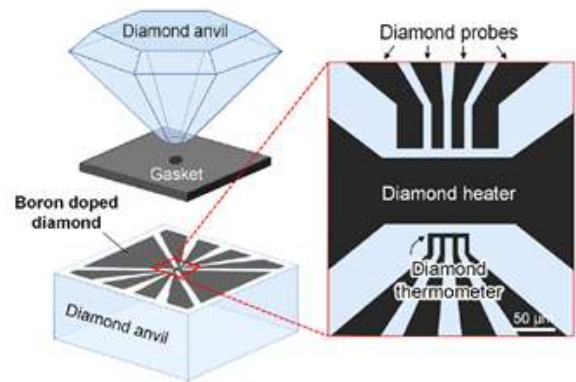


그림 5 수소화물 고온초전도 디바이스 플랫폼 제작

6. 수소화물 초전도체 AI 접목 연구

현재 고압 수소화물 초전도 물질의 결정상에 대한 연구는, 고압 상황의 결정구조를 측정하는데 따르는 여러 가지 어려움 때문에 유전 알고리즘이나 particle swarm optimization 방법론 등을 이용한 이론 예측에 크게 의존하고 있는 상황이다. 저압 영역에서의 고온 초전도를 구현하기 위한 화학적 압력을 유도하기 위해서는 3종류 이상의 원소로 구성된 물질이 필요하다 추측되며, 이러한 복잡한 조성 및 구조를 갖춘 물질의 구조 예측을 위해 Neural network potential 및

연구기관 소개

crystal graph convolution neural network 등의 AI 모델을 사용 한다.

기계학습 및 통상적인 방법을 통해 측정되거나 예측된 물질의 초전도 임계 온도는 Migdal-Eliashberg 이론 등의 방법을 통해 계산할 수 있다. 이를 거꾸로 적용하여, 예측된 구조 및 실험 결과들로부터 초전도 임계 온도 및 이에 필요한 압력을 낮출 수 있는 방법을 기계 학습 모델 구축을 통해 탐색하며, 이를 통해 보다 높은 초전도 임계 온도와 낮은 임계 압력을 갖는 물질 후보를 제안하는 ‘역방향 물질 디자인’을 적용할 수 있다. 이론적 구조 예측 및 실험을 통한 피드백을 통해 초전도 수소화물 물질 데이터베이스를 구축하며, 이를 통해 고온 초전도 물질에 대한 역방향 물질 디자인을 수행한다.

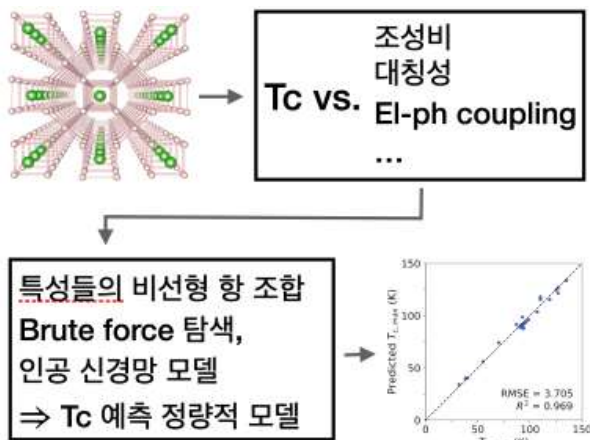


그림 6 초전도 물질 데이터베이스로부터 임계온도 예측모델 설계 및 학습

□ 맺음말

고전적 양자물질연구를 뛰어넘는 별난 초전도 응축 현상은 체계적이며 미세한 조절이 필요한 매우 도전적인 극한물성연구이다. 인장력/압축력(strain/tensile)을 사용한 카이랄 초전도 연구, 메가바 압력을 통한 고온초전도 구현 등은 극한제어 생태계 구축이 신기능 양

자물질 연구를 위해 필수적임을 시사하고 있다. 한편 3차원/2차원 양자물질의 합성, 소자 구현을 통한 기능성 특성 연구, 층간 twist 각도 및 압력실험을 통한 양자물성의 조절 등의 제어가 유기적으로 진행되고 있는 연구는 국내외에 매우 드문 형편이다. 본 선도연구센터는 전문성을 확보한 물질합성, 소자제작, 극한물성 측정, 다체계 이론의 융합적인 연구 진행과 더불어 메가바 압력 및 2차원 다층시스템에서 twist 각도 등의 극한연구 인프라 생태계를 통합적으로 구축하여 21세기 물리학의 난제인 “신기능 극한양자물성 구현 및 이해”를 견인하고자 한다.

창발하는 신기능 양자물성연구(Emergent quantum matter with functionality)를 선도하기 위해서 극한환경 물성측정센터, 인공적 원자층 적층제어가 가능한 2차원 물질 합성 인프라, twist 다층시스템 및 다양한 소자제작이 가능한 나노 소자/공정 디바이스 랩 등을 구축하고 있다. 본 연구센터는 확보한 핵심 기반 시설을 국내/해외 연구자에게 오픈한 사용체계인 ‘오픈공유랩’을 운영하고 있다. 양자기능물성 연구에 대한 새로운 참신한 아이디어가 실험에 필요한 장비 등이 부족하여 경쟁에 뒤처지거나 심지어는 그냥 사장되는 경우를 종종 주변에서 들었을 때 매우 안타까웠으며 이는 국가적으로도 과학경쟁력의 약화로 이어지게 된다. 본 연구센터는 연구 인프라가 필요한 국내연구진과 연구환경을 공유하여 상생 연구생태계를 구축하고, 이를 통하여 신기능 양자물성연구의 국내 활성화를 추진하는 노력을 기울일 것이다.

저자이력

박두선

- 2003년 University of Illinois at Urbana-Champaign (박사),
- 2003~2008년 Los Alamos National Laboratory 박사후 연구원
- 2008~ 2024 성균관대학교 물리학과 교수
- 2023~2024 성균관대학교 극한양자기능물질 선도연구센터 센터장

