JKPS 창간 50주년 기념 논문 요약문*

DOI: 10.3938/PhiT.27.037

한국의 물리교육 연구 동향

이봉우¹, 김희경²¹단국대학교, ²강원대학교

물리학은 현대 문명의 발달에 큰 역할을 해왔고, 4차 산업혁명으로 대표되는 미래 사회에서도 매우 중요하게 여겨지고 있다. 그러나 최근 초중등 학교에서 물리 선택목의 저하(2018학년도 수학생력시험에서 물리Ⅱ(23.62%), 물리Ⅲ(1.16%))를 비롯한 일련의 위기 상황 속에서 물리 교육에 대한 관심이 더욱 필요하다. 국내에서 물리교육 연구는 역사가 그렇게 오래되지 않지만, 교육과정 개정을 통한 초중등 교육의 방향을 제시하거나, 물리 교수학습 방법을 제안하는 등 많은 역할을 해왔다.

2000년 이후로 새물리와 한국과학교육학회지에 게재된 국내 물리 교육 논문은 총 535개로 해가 지남에 따라 점차 증가하였다. 연구 주제로 분석하였을 때, '학생의 물리 개념'에 대한 연구가 총 88편(26%)으로 가장 많았다. 연구 대상으로 보면 초중고 학생에 대한 연구가 137편(35%)으로 가장 많았고, 대학생(예비교사 포함) 대상의 연구는 20% 수준이었다.

주제어에 대한 분석에서 ‘이해(56)’와 ‘개념(55)’이 가장 많이 제시되었으며, 교과서(49), 개발(37), 대학생(34), 고등학생(32), 국가교육과정(31), 중학생(31) 등이 그 뒤를 이었다. 이 사실로부터 전형적인 물리교육 연구는 ‘학생들의 물리 개념에 대한 이해’라고 할 수 있다. 이외에도 교수 학습 자료나 실험의 ‘개발’에 대한 연구, 교육과정 개정과 함께 수행된 교육과정과 교과서의 내용 분석에 대한 연구도 많이 이루어졌다.

본 연구에서는 주제어에 대한 사회 연결망 분석을 실시하였는데, 주제어 중에서 빈도수가 높았던 이해, 개념, 개발, 교과서 등의 연결 중심성 지수가 높아 네트워크에서 중요한 허브 역할을 하고 있으며, 다른 주제어들과 빈번히 연결되어 연구되고 있었다.

빈도수가 2개 이상인 주제를 대상으로 대학생(예비교사 포함)과 중고등학생으로 구분하여 네트워크 분석을 수행하였다(그림 1, 2 참조). 두 집단 모두 ‘개념’, ‘이해’와의 연결 정도가 높았다. 대학생 집단에서는 어려움, 고전 역학, 전자기학, 오개념 등의 순서로 연결 정도가 높았으며, 중고등학생 집단에서는 탐구, 효과, 활동, 교수 전략 등의 순서로 연결 정도가 높았다.

그림 1. ‘대학생’을 중심으로 하는 네트워크 분석 결과

그림 2. '중고등학생'을 중심으로 하는 네트워크 분석 결과.

이로부터 대학생을 대상으로 하는 연구에서는 역학, 전자기학과 같은 내용에 대한 이해 정도 및 오개념과 관련된 연구가 많이 이루어졌으며, 중고등학생을 대상으로 하는 연구에서는 탐구 관련 연구나 교수학습 전략이나 활동의 효과를 분석하는 연구가 많이 이루어졌음을 알 수 있다.

*JKPS 50주년 기념 특별호(72권 12호, 73권 2호, 4호, 6호)에 실린 논문 중 26편의 논문 요약문을 게재 순서대로 실었다.

이상의 연구로부터 물리교육 연구가 지향해야 할 점에 대해 몇 가지 시사점을 제시하였다. 첫째, 많은 연구들이 '학생의 물리 개념에 대한 이해'와 관련되어 수행되었다. 특히 대학생 대상의 연구에서는 그 특징이 두드러졌는데, 교사-학생 상호작용, 탐구 능력, 학습동기, 태도, 과학 본성 등과 같이 다양한 영역으로 확대될 필요가 있다.

둘째, 물리에 대한 흥미를 높이고 물리 선택을 높이기 위한 정책연구가 필요하다. 이를 위해 태도, 흥미, 동기 등과 같은 정의적 영역에 대한 연구가 이루어질 필요가 있다.

셋째, 역학과 전자기학을 중심으로 하는 연구에서 현대 물리를 비롯한 다양한 영역으로 연구가 확대될 필요가 있다.

극한 조건의 핵물질: 쿼크-글루온 플라즈마부터 중성자별까지

홍병식

고려대 물리학과

핵물리학의 궁극적인 목표는 비정상적인 조건 하에서 강하게 상호작용하는 물질의 특성을 핵 물질, 강입자 물질, 쿼크-글루온 물질 등과 같은 다양한 수준에서 정밀하게 이해하는 것이다. 강한 상호작용 물질은 우주 질량의 대부분을 차지함에도 불구하고, 그 비섭동적(non-perturbative) 성질 때문에 아직 잘 알려져 있지 않고 있다. 입자물리학의 표준모형에서 강한 상호작용을 설명하는 이론은 양자색소역학(QCD)이다. 그런데 현재 QCD는 기본입자들 사이의 상호작용 크기가 매우 작은 높은 에너지 영역에서만 성립하고, 상호작용이 커지는 저에너지 영역을 다루는 방법은 아직 잘 알려져 있지 않다. 즉 QCD는 강입자들의 쿼크 속박현상을 설명하지 못하고, 고온, 고밀도에서 핵물질이 쿼크-글루온 플라즈마로 상전이하는 현상도 설명하지 못한다. 따라서 현대 핵물리학은 온도, 밀도, 양성자/중성자 비대칭성 등이 매우 비정상적인 값에 근접할 때 QCD의 비섭동성을 연구하는 학문이라고 말할 수 있다(그림 3 참조).

쿼크-글루온 플라즈마(QGP)는 138억 년 전 우주 대폭발 직후 생성된 고온의 핵물질이다. 우주가 팽창을 지속하며 쿼크-글루온 플라즈마는 강입자 기체 상태로 변화되었고, 계속해서 여러 종류의 원소들이 생성되었다. 이와 같이 고온 상태하에 있는 강한 상호작용 물질의 상전이 현상을 연구하기 위해 1980년대 후반부터 미국 브룩헤븐 국립연구소(BNL)의 AGS와 스위스 핵-입자물리연구소(CERN)의 SPS 가속기를 이용한 중이온 충돌실험이 시작되었다. 그리고 더 높은 에너지의 핵물질을 생성시키기 위해 2000년부터 BNL의 RHIC, 2010년부터 CERN의 LHC 등 충돌형 가속기를 이용한 중이온 충돌실험을

그림 3. 온도(T), 밀도(ρ_B/ρ_0), 양성자/중성자 비(Z/N)의 함수로 나타낸 핵물질의 상구조.

진행 중이다. 이들 실험에서는 강입자의 유체 흐름, 강입자 다발 억제, 쿼코니움 억제, 카이랄 자기파동 현상 연구를 통해 QGP의 특성을 연구 중이다.

반면 저온 상태에서도 핵자밀도가 정상상태 핵물질의 2배 이상으로 증가하면 저온 쿼크-글루온 플라즈마가 생성될 가능성이 있다. 특히 빔과 표적의 종류로써 중성자가 매우 풍부한 방사성 동위원소를 사용할 경우, 순수한 중성자 물질에 가까운 QGP를 생성시킬 수 있다. 이와 같이 특이한 물질은 중성자별의 중심(core)에 존재할 것으로 예측되며, 압축 핵물질의 상태방정식, 양성자-중성자의 에너지 대칭성 등을 연구할 수 있는 대상이 된다. 현재 압축 핵물질의 상태방정식과 관련된 연구는 일본 이화학 연구소(RIKEN)와 미국 국립 초전도싸이클로트론 연구소(NSCL) 등에서 진행 중이다. 현재 대한민국의 기초과학연구원(IBS)에 건설 중인 RAON 중이온가속기에서도 방사성 동위원소 빔을 이용하여 핵물질의 상태방정식과 관련된 연구를 진행하고자 한다. 이러한 실험에서는 핵자 확산, 중성자 표피의 두께, 파이온 생성 등을 자세히 분석하여 핵물질의 상태방정식과 대칭에너지에 대한 정보를 얻고 있다.

Classification of Space-Charge Resonances and Instabilities in High-intensity Linear Accelerators

전동오

기초과학연구원, 중이온가속기사업단

현대 입자 가속기의 빔 강도가 비약적으로 증가하면서 공간전하(space charge) 효과로 불리는 빔 자신의 포텐셜 효과가 중요해지고 있으며, 가속기 구축 시 다양한 할로 메커니즘(halo mechanism)의 영향을 피하거나 최소화함으로써 빔 손

그림 4. 고강도 Gaussian 빔의 4차 공명(위 그림)과 고강도 KV 빔의 4차 불안정성(아래 그림)을 보여준다. 둘 다 빔 분포에 특징적인 4중 구조가 보여 같은 메커니즘으로 오인할 수 있다. 4차 공명인 경우, 선형가속기 레티스의 phase advance σ 가 90° 이하 영역에서는 위 그림의 파란선과 같이 4차 공명에 해당하는 $0.25(=90^\circ/360^\circ)$ 에 공명 주파수 성분이 보인다. KV 빔의 4차 불안정성의 경우, 빔 phase space에 stable fixed point가 생성되지 않아 아래 그림과 같이 $0.25(=90^\circ/360^\circ)$ 에 4차 공명에 해당하는 공명 주파수 성분이 없다.(Ref. [1])

실을 최소화하는 것이 최대 목표이다.

고강도 선형 가속기에는 두 종류의 공간전하 할로 메커니즘(space charge halo mechanism)인 공명(resonance)과 불안정성(instability)이 있는데 이 둘은 구별되어야 한다. 우리가 공명이라고 부르는 것은 공간전하 비선형 항(nonlinear term)을 통해 발생하는 빔 입자의 공명으로, 원형가속기에서 흔히 공명이라 불리는 메커니즘이기도 하다. 불안정성은 정확히 말하면 빔 엔벨롭 불안정성(beam envelope instability)이다. 불안정성은 빔 엔벨롭 방정식(beam envelope equation)의 파라메트릭 공명(parametric resonance)이기 때문에 파라메트릭 공명이라고도 불린다. 문제는 이 두 종류의 메커니즘이 같은 공명이라는 이름으로 느슨하게 불리어 커뮤니티에 혼란을 야기해왔다는 사실이다.

최근 저자가 JKPS 50주년 기념호에 게재한 논문에서 공간

전하에 의한 빔의 공명과 불안정성의 명확한 차이점을 제시하고 혼란을 줄일 수 있는 체계적인 명칭을 제시하였다.^[1] 그림 4는 고강도 Gaussian 빔의 4차 공명(위 그림)과 고강도 KV 빔^[2]의 4차 불안정성(아래 그림)을 보여준다. 두 경우 다 빔 분포에 특징적인 4중 구조가 보여 같은 메커니즘으로 오인할 수 있다. 그러나 고강도 빔의 공명의 경우 공명 주파수 성분이 관찰되지만 불안정은 공명 주파수 성분이 없다. 보다 자세한 공간전하 공명과 불안정성에 관한 내용은 Ref. [1]에 수록되어 있다.

테라헤르츠를 이용한 디랙 물질 연구: 그래핀과 위상절연체 Terahertz Investigation of Dirac Materials: Graphene and Topological Insulators

인치훈, 최현용

연세대학교 전기전자공학과

지난 10여 년 동안 그래핀은 전자, 광자, 전기광학 분야에서 폭넓은 관심을 받으며 2차원 반 데르 발스(Van der Waals) 물질 연구로의 토대를 만들었다. 그래핀의 전기적 특성은 디랙(Dirac) 점 근처에서 광범위하게 연구되었는데, 여기서 전자는 질량이 없는 디랙의 상대론적 방정식을 따른다. 기존의 양자우물과는 다르게, 전도대와 가전대가 디랙 점에서 접하므로 비정상 반(半)정수 양자 홀 효과와 전도도의 양자화가 나타났다. 즉, 디랙 밴드 분산에서 빛의 주파수에 관계없는 일정한 광흡수도는 빛-물질 상호작용이 2차 곡선 분산을 가진 기존의 물질과 다름을 의미한다. 더 나아가 그래핀의 중요한 전기적 특징은 디랙 페르미온(fermion)의 밀도가 전기적으로 변하는 데에 있다. 밀도에 의존하는 디랙 페르미온과 포논의 상호작용은 전자-공정 생성을 동반한 포논의 란다우(Landau) 감쇄를 일으킨다.

테라헤르츠 주파수 영역 그래핀 분광학은 가시광선 영역과는 다르게 나타나는데, 광흡수도가 전도도의 양자값보다 높고, 디랙 페르미온 밀도에 의존해 변화한다. 테라헤르츠 광자의 에너지는 매우 낮으므로($1 \text{ THz} = 4.14 \text{ meV}$), 빛-물질 상호작용이 밴드 내 반응과 관련된 드루드(Drude) 공식에 의해 결정된다. 테라헤르츠 영역 그래핀의 전도도와 관련된 다양한 분광학 연구가 있었으며, 수송체 밀도와 온도가 테라헤르츠의 분광학 반

REFERENCES

- [1] Dong-O Jeon, J. Korean Phys. Soc. **72**, 1523 (2018).
- [2] I. M. Kapchinskij and V. V. Vladimirov, *Proceedings Int. Conf. on High-Energy Accelerators and Instrumentation* (CERN, Switzerland, 1959), p. 274-288.

응을 결정하는 데에 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀졌다. 테라헤르츠 주파수와 직류 수송 영역에서 그래핀의 안정적이고 제어 가능한 전기적 특성을 이용해 광전압 기기, 광검출기, 광 제어기, 발광소자, 모드락 레이저로서 기능하는 복합 전기광학 기기를 만들 수 있었다.

최근 양자 물질에서 새롭게 분류되는 위상절연체는 고체물리 분야에서 세계적인 주목을 받았다. 위상절연체가 기존 절연체로부터 구분되는 점은 위상절연체 표면이 양자 스핀 홀 상태에 있다는 것이다. 대표적인 3차원 위상절연체는 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sn_2Te_3 등이 있는데, 강한 스핀-궤도 상호작용이 TI 표면에서 스핀 겹침을 깨트린다. 한편 크래머(Kramer) 정리에 따르면 위상절연체의 시간-반전 대칭이 표면 브릴루인(Brillouin) 영역의 Γ 지점에서 특별한 상태 겹침을 만든다. 즉, 위상절연체의 표면 상태는 그래핀과 유사한 나선형의 디랙 분산을 나타내며, 반면 위상절연체의 벌크 상태는 기존 절연체와 같은 에너지 갭을 가진다. 위상절연체 표면과 관련된 중요한 전기적 성질에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 표면 전자가 바닥상태에서 비(非)자성 불순물에 의한 산란이 억제된다는 것이다. 두 번째는 표면 전자의 스핀 방향이 운동량의 방향과 직교한다는 것인데, 즉 ‘스핀-운동량 잠금’을 보인다. 지난 10년 동안 나선형의 디랙 분산의 존재는 각도-분해 광전자 방출에 의해 검출되었으며, 스핀 방향에 따른 전자 수송은 다양한 광자 스핀을 가진 광전류 분광학을 이용해 확인되었다.

본 논문에서는 대표적인 디랙 물질인 그래핀과 위상절연체의 테라헤르츠 반응에 대해 다루었다. 테라헤르츠 분광학과 광-펌프 테라헤르츠-프로브 분광학과 관련된 비선형 광학을 정리했으며, 그래핀에서 테라헤르츠 동역학의 순간적 반응과 2차원 디랙 페르미온의 선형 전도도에 기반한 물리적 해석이 소개되었다. 또한 최근 위상절연체 연구 및 테라헤르츠에 의해 유도된 디랙 준(準)입자인 디랙 플라스몬에 대해 다루었으며, 마지막으로 그래핀과 위상절연체의 응용을 위한 앞으로의 전망을 정리했다.

그래핀 투명전극을 이용한 태양전지 연구

Use of Graphene for Solar Cells

신동희, 최석호

경희대 응용물리학과

전 세계적인 에너지 수요의 증가와 석유 자원의 고갈로 인해 대체 에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데 태양에너지는 인류가 사용할 수 있는 에너지원 중에서도 가장 풍부한 무공해 청정 에너지원으로 인식되고 있다. 현재 태양전

지의 발전 단가는 기존의 전기에너지(화석연료, 원자력, 수력 등)를 생산하는 발전단가보다 높아, 아직은 전기energi를 생산하는 주요 발전 원으로 사용되고 있지 못한 실정이다. 오늘날까지 태양전지의 대표적인 전극으로 가장 많이 사용되는 산화 인듐 주석(indium tin oxide, ITO)은 일종의 산화물 투명전극(transparent conducting oxide, TCO)이다. 그러나, 산화물 투명전극은 전기전도도가 크고 가시광선 영역에서의 투과도가 뛰어나지만 화학적 안정성이 떨어지고 깨지기 쉬워 유연한 소자 적용에 제한이 있다. 또한 금속전극은 태양광에 노출되는 활성 면적(active area)을 감소시킴으로써 높은 개구율(aperture ratio)을 가지는 태양전지를 제작할 수가 없다. 특히, 이 두 종류의 전극은 모두 고진공의 분위기에서 스퍼터링 등의 방법으로 제작되기 때문에 제작시간이 길고 공정 단가가 높을 수밖에 없다. 따라서 태양전지에 사용하는 기존의 전극을 저가의 투명전극으로 교체한다면 발전단가를 크게 낮출 수가 있다. 수많은 투명전극 중에서 그래핀 투명전극은 기존의 산화물 투명전극과 금속전극과 비교하여 자외선부터 근적외선 영역에서의 높은 투과도, 화학적 안정성, 불순물 도핑에 의한 일함수 조절이 용이하다는 장점들을 가지고 있다. 이 밖에도 우수한 신축성을 가지고 있어 그래핀 투명전극은 변형이 된 상태에서도 전기전도도의 변화가 무시될 정도로 적고, 플라스틱 기판 위에 형성할 수가 있어서 유연하고 투명한 태양전지를 비롯한 광전자 소자들의 투명전극으로서 적합한 특성을 지니고 있다. 본 논문에서는 그래핀 투명전극과 다양한 반도체의 접합에 의해 제작한 여러 종류의 태양전지들의 구동원리, 제작방법, 및 태양전지 특성 등에 대해서 자세히 소개하였으며 향후 상용화를 하기 위해서 극복해야 할 주요 문제점들과 전망에 대해서 기술하였다.

전자기 유도 투과 현상에 대한 메타물질의 잠재적 응용성

Electromagnetically-induced Transparency in Metamaterials for the Potential Applications

황지섭, 부이선통, 이영백

한양대학교 물리학과

메타물질은 외부 전자기파의 파장보다 훨씬 작은 크기를 가지는 단위 격자가 주기적으로 배열된 인공 재료이다. 이 메타물질은 빛을 초고효율/고밀도로 모아 공진시킴으로써 흡수 장치의 효율성과 센서의 감도를 크게 향상시킬 수 있다. 본 논문은 최근 메타물질 기반 흡수체 및 센서에서 전자기 유도 투과 현상 및 전자기 유도 흡수 현상의 잠재적 응용을 제시하고, 기존 센서와의 감지 성능을 비교한다.

전자기 유도 투과 현상은 빛과 물질 사이의 상호 작용에 의해 발생하는 비선형 효과이며, 원자 매체의 특이한 분산 특성에 기초한 양자 간섭이다. 일반적으로 원자의 서로 다른 두 개의 에너지 준위 간의 상쇄 간섭에 기반을 두는 현상이며, 레이저에 의해 유도된다. 이러한 현상은 극저온 레이저와 같은 특별한 조건을 요하는데, 최근에는 메타물질을 이용하여 이러한 특수한 장비 없이 상온의 환경에서 유도 투과 현상이 가능하게 되었다. 이 현상의 결과로 흡수 스펙트럼에 투과 창이 나타나고 전자기파의 군속도를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 특히, 전자기 유도 투과 현상은 마이크로웨이브, 테라헤르쯔 및 광주파수에서 현상 구현이 가능하여, 굴절률 감지 및 바이오 감지와 같은 분야에 적용이 가능하다. 또한, 전자기 유도 투과 현상의 반대 효과로서, 원자 간 결맞음 상호작용에 기인하는 전자기 유도 흡수 현상은 전자기 유도 투과 현상과 같이 강화된 투과율을 관찰하는 대신에, 원자 준위 간 보강 간섭을 통하여 흡수의 강화와 함께 좁은 흡수 피크를 발생시킨다.

본 논문에서는 전자기 유도 투과 현상 및 전자기 유도 흡수 현상에 대한 이론적 배경과 이러한 현상에 기반한 험 대역 및 다중 대역 완전흡수체에 대한 최근 연구 결과들을 다루며, 그 현상을 이용하여 굴절률과 생체 감지의 간단한 개념과 적용 가능한 센서들을 제시한다. 또한, 메타물질의 전자기 유도 투과 및 전자기 유도 흡수와 같은 효과를 통해 얻을 수 있는 험 대역 및 다중 대역 흡수 장치뿐만 아니라, 전자기 응답을 쉽게 조절할 수 있는 다양한 센서를 위한 플랫폼을 제공한다. 앞으로 마이크로 및 나노 기술의 발전을 통해 새로운 응용 가능성이 열리게 되어, 가시광선 및 적외선 영역의 메타물질에 대한 전자기 반응은 새로운 개념과 실제적인 적용과 관련된 새로운 영역에서 더 많은 연구들이 이루어질 것이다.

Potassium Sodium Niobate계 무연 박막의 최근 연구 동향

석해진¹, 안창원¹, 김일원¹, Aman Ullah², 이해준³, 이선영⁴, 박정민⁵, 원성식⁶, 김승현⁶

¹울산대학교 물리학과, ²파키스탄 과학기술대학교 물리학과, ³삼성전기 중앙연구소, ⁴한국기초과학지원연구원 부산센터, ⁵울산과학기술연구원 신소재공학부, ⁶브라운대학교 재료공학부

강유전체 박막 연구는 piezoelectric cantilever, MEMS 소자뿐만 아니라 health monitoring system 등과 같은 정밀 소형 의료기기에 사용되는 센서와 액추에이터로서 중요성이 높아지고 있다. 현재 사용 중인 대표적인 압전체 물질인 PZT [Pb(Zr,Ti)O₃]는 마이크로 또는 나노 기기를 포함한 압전 액추

그림 5. P-E hysteresis loop of the KNN thin film. The inset shows the C-V curve measured at 100 kHz and piezoelectric d_{33} response of KNN films as a function of applied voltage.

에이터 및 센서로 널리 이용되고 있으나 인체와 환경에 유해한 중금속인 납(Pb)을 포함하고 있기 때문에 전 세계적으로 납이 포함되지 않는 무연(無鉛, Pb-free) 압전 박막소재 개발이 요구되고 있다. 현재 연구가 진행되고 있는 여러 종류의 무연 압전 소재 중에 K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃(KNN)계 세라믹 소재는 상대적으로 높은 압전 특성과 온도 안정성, 생체적합성 때문에 지난 20년 동안 여러 연구자들에 의해 활발하게 연구되고 있다. 그러나 KNN은 공기 중 수분에 약하며 고온에서 휘발성이 강한 K와 Na를 포함하고 있기 때문에 양질의 박막을 성장시키기 어려워 현재까지 KNN 박막의 강유전 및 압전 특성에 관한 연구는 소수의 연구자들에 의해 진행되고 있다. 연구자는 논문에서 지난 20년 동안 sol-gel 및 RF magnetron sputtering 방법으로 양질의 KNN계 박막을 제조하여 물성을 연구하여 왔다. 논문은 KNN 박막 제조 시 문제점인 K와 Na의 휘발성(K and Na volatile) 제어 방법, 정량적 화학조성비(stoichiometric), 재현성(reproducibility), 노화 현상(aging effect) 등을 극복한 양질의 박막 제조 기술 및 우수한 유전, 압전, 강유전성에 관하여 다음과 같은 4가지 주제로 기술되었다.

- 1) 최근 10년 동안 KNN계 물질의 연구 동향
- 2) 양질의 박막을 제조하기 위한 분말 합성 및 증착 방법
- 3) Sol-Gel과 RF magnetron sputtering 방법으로 증착한 KNN 박막 제조와 문제점
- 4) Mn, Li, Ta를 첨가한 KNN 박막 증착 및 강유전성 및 압전성

위와 같은 주제로 KNN 박막의 제조 및 물성에 관하여 체계

적으로 기술하였으며 또한 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

양자화된 켈러 다양체와 양자중력

이정재¹, 양현석²

¹대진대, ²서강대, 양자시공간연구센터

아인슈타인이 뉴턴의 중력이론을 일반상대성 이론으로 공식화한 지 100년의 시간이 지난 지금 우리는 양자중력이라는 새로운 문제에 직면해 있다. 그러나 양자중력을 공식화하려는 지난 50년의 노력은 별다른 성과 없이 교착상태에 빠져있다. 특히 끈이론은 양자중력에 대한 여러 가지 중요한 통찰을 제공해 주었지만 그것을 담아내는 그릇의 구태함으로 궁극적인 양자 중력이론으로 발전하지 못하고 있다. 작금의 상황을 돌이켜 보면 (양자)중력에 대한 이해에서 우리는 결정적인 요소를 간과하였거나 중대한 부분이 빠진 것으로 보인다. 특히 끈이론의 최근 발전과정에서 나타난 창발하는 중력이론이라는 관점에서 보면 더욱 그러하다. 우리는 JKPS 50주년 기념 논문에서 양자중력에 대한 우리의 이해에서 빠진 부분이 무엇인지 고찰하고 이 잃어버린 부분에 대한 성찰이 어떻게 창발하는 시공간에 대한 묘사를 도출하는지 설명한다.

켈러 기하학은 유클리디안 (양자)중력이론과 끈이론에서 중요한 역할을 하는 아인슈타인 중력이론의 일부이다. 켈러 다양체는 닫힌 비축퇴된 2-형 기본 텐서를 갖는 복소 다양체이다. 따라서 이러한 다양체는 계량텐서에 의한 기술뿐만 아니라 2-형 기본 텐서에 의한 동형 기술이 가능하다. 후자의 기술에서 켈러 기하학의 2-형 기본 텐서는 본질적으로 $U(1)$ 게이지 이론의 전자기장이라고 생각할 수 있다. 켈러 기하학과 $U(1)$ 게이지 이론 사이의 이 놀라운 연결은 이미 잘 알려져 있었지만 아쉽게도 그 동안 진지하게도 깊이 있게도 추구되지 않았다. 우리는 이러한 쌍대성이 양자중력에 대한 우리의 이해에서 빠진 부분이라고 주장한다. 그 이유는 다음과 같다.

켈러 기하학이 닫힌 비축퇴된 2-형 기본 텐서를 갖는다는 사실은 우주를 구성하는 공간에 사교구조가 부여된다는 것을 암시한다. 이 사실은 $R^{2n} \cong C^m$ 과 같은 공간이 사실은 입자의 위상공간과 같은 사교구조를 가지며 전자기장에 의한 이 사교구조의 변형이 중력이라는 결론을 도출한다. 전자기장에 의해 변형된 사교구조에 일반상대성 이론의 등가원리를 적용하면 중력에 대한 비선형 $U(1)$ 게이지 이론의 기술을 얻는다. (이 진술은 사교 기하학에서는 Darboux theorem이나 Moser lemma로 알려져 있다.) 게이지 이론의 비선형성은 공간에 부여된 근원적 사교구조 때문이며 이 사교구조로부터 유도된 포아송 구조는 중력이라는 동역학적 계를 어떻게 양자화하는지에

대한 중대한 통찰을 보여준다. 결과적으로 우리는 양자화된 켈러 다양체에 대한 비가환 $U(1)$ 게이지 기술을 얻고 이 비가환 이론에 대한 Hilbert 공간의 표현이론은 결국 0차원 행렬 모형을 도출한다. 우리는 이 행렬 모형을 사용하여 배경과 무관한 양자중력의 공식화를 시도하고 이 공식화로부터 우리의 출발점 --켈러 기하학--을 어떻게 복원하는지 조사한다. 이러한 왕복 여행으로부터 창발하는 시공간의 개념이 왜 필요한지 이해하고 이것이 어떻게 우주상수 문제, 계층 문제, 암흑 에너지, 암흑 물질 및 우주의 급팽창과 같은 물리학의 악명 높은 문제를 해결하기 위한 새로운 관점을 제시하는지 논의한다. 또한 켈러 기하학을 넘어서는 창발하는 중력의 다양한 일반화를 논의한다.

잘로신스키-모리야 상호작용 측정법

최석봉¹, 유천열²

¹서울대학교 물리천문학부, ²대구경북과학기술원 신물질과학전공

반대칭적 자기 교환 상호작용, 즉 잘로신스키-모리야(Dzyaloshinskii-Moriya, DM) 상호작용은 스핀트로닉스 소자 및 소재에서 흥미로운 새로운 자기 현상을 발생시킨다. DM 상호작용은 그 크기에 따라서, 나선형 자기구역(magnetic domain) 벽과 스커미온(skyrmion)과 같은 자기적 위상 구조 및 현상 발생의 직접적인 원인으로 작용한다. 이러한 자기적 위상 구조의 안정성과 동역학적 특성은 DM 상호작용의 크기에 의존하므로, DM 상호작용 크기의 정확한 측정은 스핀트로닉스 응용 연구는 물론 새로운 소자의 설계에 필수적이다. 이 논문에서는 현재까지 개발된 DM 상호작용 측정법으로서, 자기구역 벽의 운동을 기반으로 하는 측정법과 스핀파를 기반으로 하는 측정법의 측정 원리와 관련 현상을 검토하고, 각 측정법의 장단점 및 최근 진행 상황을 논의한다.

원자규모에서의 극고속 전자 동역학 연구를 위한 극한 방법론

Extreme Metrology for Ultrafast Electron Dynamics at the Atomic Scale

김동언

포스텍 물리학과, 아토초 과학 연구 센터/막스 플랑크 한국 포스텍 연구소

21세기의 시작과 더불어 20세기 과학의 성취와 21세기 과학에 대한 전망에 대해서 과학자 개개인의 입장에서, 그리고

각 과학 분야 학회 차원에서 많은 논의들이 진행되었다. 특히 미국의 경우 에너지 성(Department of Energy)은 그 산하 BESAC(Basic Energy Science Advisory Committee) 위원회를 통해서 21세기 과학의 5대 도전적 과제를 조사 선정하여 보고하였다.^[3] 과학적으로 깊고, 어려우나, 기초과학 전반에 영향을 미칠 수 있고, 실생활의 질을 획기적으로 향상시킬 수 있는 소자나 방법으로 결과물이 창출될 수 있어야 한다는 조건을 가지고, BESAC 위원회가 선정한 5대 도전적 과제를 열거하면 다음과 같다. (1) 전자 수준에서 물질을 조작하는 것, (2) 원하는 성질을 갖는 새로운 형태의 원소와 이의 에너지 효율적인 합성을 설계하고 완성하는 것, (3) 원자와 전자의 복잡한 관계에서 비롯된 물질의 주목할 만한 성질을 이해하고 제어하는 것, (4) 생명체에 필적하는 능력을 가진 신기술 개발을 위해 나노미터 규모에서의 에너지와 정보를 자유로이 다루는 것, (5) 평형점에서 떨어진(특히 멀리 떨어진) 물질의 성질을 기술하고 조종하는 것 등이다.

항목 (1)과 (5)는 동역학 현상에 대한 탐구이다. 이 보고서는 앞으로 다가오는 시대를 “the Control Age(조작의 시대)”로 규정하고, 이 시대에서는 기초 과학의 연구가 양자 시스템이 어떻게 작동하여 궁극적으로 원하는 결과를 낼 수 있는지에 초점을 맞추는 쪽으로 변모될 것이라고 예견하고 있다. 이 조작의 시대에서는 비평형상태에서 진행되는 원자 간의 분리와 재결합에서 전자의 움직임을 조종하는 것이 요구된다. 또한 종합적인 현상과 돌발적인 성질을 이해하고 통제하는 것이 요구된다. 보고서에서는 아토초 시간대에서 나노미터 공간 해상도로 물질 내의 전자의 행동을 통제할 수 있는 새로운 방법의 개발이, 즉 아토초 분광 및 영상 기술이 필요하다고 역설하고 있다.

지난 20여 년간 극 고속 전자 동역학 현상을 측정하고 조작하는 것을 가능하게 하는 기술이 눈부시게 발전하여서 지금은 전자 수준에서 물질 현상을 측정하고, 고도의 비 평형 상태에서의 동역학을 연구할 수 있는 길들이 열리고 있다. 본 논문에서는 발전과정을 간략하게 설명하고, 대표적인 업적들을 소개함으로써 새로운 분야의 태동의 흥분을 이 새 분야가 제공할 새로운 과학적 파라다임과 기술적인 안목에서 생생하게 전달하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 수주기 레이저 개발 및 아토초 펄스 개발 관련 이야기를 개략적으로 설명하고, 3, 4장에서는 이러한 새 측정방법론이 원자, 분자, 고체 연구 분야에서 활용되어 이룩한 중요 업적들을 소개하고, 5장에서는 꿈의 X선 광원이라 불리는 아토초 XFEL(free electron X-ray laser)의 향후 개발 관련에 대해서 기술하였으며, 향후 10년의 발전에 대한 예견으로 논문을 마무리하였다.

비가속기 입자물리학 실험

김수봉¹, 김영덕², Yannis K. Semertzidis³

¹서울대학교 물리학과, ²기초과학연구원 지하실험연구단, 세종대학교 물리학과, ³기초과학연구원 엑시온 및 극한상호작용 연구단, 카이스트 물리학과

이 보고서에서는 가속기에 기반하지 않은 입자 물리학 실험에 대해 간략히 리뷰하였다. 중성미자의 질량과 진동 현상, 암흑 물질 및 새로운 입자의 탐색과 같은 실험들은 여러 측면에서 가속기 실험에 대한 보완적인 성격을 띤다. 이 보고서에서는 특히 한국에서의 현재와 미래의 실험 프로그램을 중심으로 개관하였다.

한국의 한빛 원자력 발전소에서 2011년부터 진행된 RENO(Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) 실험은 2012년 4월, 표준모형의 기본상수 중에 하나인 중성미자의 세 번째 섞임각, θ_{13} 를 측정하는데 성공하였다. 서울대학교를 중심으로 한 한국중성미자연구센터(KNRC) 그룹은 16톤의 Gd를 포함하는 LAB 기반 액체섬광체를 타겟으로 하는 동일한 두 개의 검출기를 근거리와 원거리에 놓아서 그 비를 측정함으로써 섞임각을 구하였는데, 2017년 1500일간의 데이터로 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.086 \pm 0.008$, $|\Delta m_{ee}^2| = (2.61 \pm 0.18) \times 10^{-3} eV^2$ 를 얻었다. 장래의 계획으로는 일본에서 활발히 추진되고 있는 차세대 물체렌코프 검출기인 Hyper-K 실험과 더불어 같은 중성미자 빔을 보다 장거리에서 측정할 수 있는 검출기를 한국에 위치시켜서 중성미자의 질량 계층구조와 CP 깨짐각을 측정하려는 프로젝트가 일본 그룹과 공동으로 추진되고 있다. 또 하나의 성공적인 중성미자 진동실험으로 IBS의 지하실험연구단(CUP)에서 수행한 NEOS 실험이 있는데, 이는 20여 미터의 거리에서 1톤 정도의 Gd 포함 LAB 섬광 검출기를 사용하여 비활성 중성미자의 존재 여부를 실험한 것이다.

지하실험연구단에서는 Mo-100 동위원소의 중성미자 미방출 이중베타붕괴 실험을 추진 중이며, 알파 백그라운드를 제거할 수 있는 10 mK에서 작동하는 저온 검출기를 채택하여 개발 중이다. 양양의 지하실험실(Y2L)에서 1.9 kg의 결정으로 Pilot 실험을 진행 중이며, 정선의 새로운 지하실험실에서 200 kg의 결정을 사용한 AMoRE-II 실험은 중성미자의 질량을 15-30 meV까지 탐색할 수 있다. 직접 WIMP를 측정할 수 있는 암흑 물질 실험으로 기존의 CsI 결정을 사용한 KIMS 실험에 연이

REFERENCES

- [3] G. R. Fleming and M. A. Ratner, Physics Today July issue, 61, 28 (2008).

어 DAMA 그룹과 같은 NaI 검출기를 사용한 COSINE 실험이 미국의 예일대와 공동으로 시작되었다. 약간 높은 백그라운드 를 가지는 1단계 실험에서 초기 검증 실험을 하였고, 백그라운 드를 낮춘 NaI 결정을 직접 성장시켜서 DAMA 시그널에 대한 궁극적인 검증을 계획하고 있다.

Axion(엑시온)은 WIMP와 함께 가장 강력한 암흑물질 후보 입자인데, IBS의 엑시온 및 극한상호작용 연구단(CAPP)은 세 계에서 가장 강력한 엑시온 검출기를 개발하고 있다. 엑시온 연구단은 KAIST의 문지 캠퍼스에 8 T, 18 T의 강력한 자석을 0.1 K 이하의 온도로 낮춘 Cavity와 SQUID 센서를 사용하여 실험을 진행 중이다. 2020년도에 도입되는 25 T의 고온초전 도 자석으로 엑시온-포톤 사이의 결합상수를 KSVZ 모델값까지 낮추어서 측정할 수 있는 실험을 준비 중이다. 이들 실험으로 엑시온의 질량 0.04 meV에서 엑시온-포톤 결합상수를 10^{-14} GeV⁻¹까지 측정할 수 있을 것으로 예상된다. 엑시온 또는 Axion-Like Particles(ALP) 검색 방법에 대한 새로운 아이디어 가 많이 개발되고 있으며, 국제공동연구인 ARIADNE 실험에서 는 0.1-10 meV의 엑시온 질량을 측정하는 것을 목표로 하고 있다. 양성자 저장링에서 양성자의 EDM을 측정하는 실험에 대한 연구도 활발히 진행하고 있다.

물리식의 의미와 물리교육

김민철¹, 정용욱², 송진웅³

¹서울대학교 사범대학 물리교육과, ²경상대학교 사범대학 물리교육과,

³서울대학교 교육종합 연구원 & 사범대학 물리교육과

물리식은 물리 개념지식을 수학적으로 모델링하여 기호들의 관계로 간단하게 나타낸 것이다. 물리식이 갖는 풍부한 의미에 대한 교수학습은 학습자의 물리학 개념 이해를 심화시킬 수 있다. 이러한 기대에서 본 논고에서는 물리식의 의미를 관련 개념 사이의 의미관계와 물리식의 기능과 위상에 따라 유형화 하는 여러 논의들을 정리하여 소개하였다. 물리식은 포함된 개념들의 의미관계에 따라 $F=kqQ/r^2$ 와 같은 상호작용 관계식(계의 속성과 상호작용에 관한 수학적 표현으로 계 사이의 상호작용 관계만 서술), $PV=nRT$ 와 같은 상태 관계식(계의 속성들에 관한 수학적 표현으로 계의 속성 변화만 기술), $F=ma$ 와 같은 인과 관계식(계의 속성과 상호작용에 관한 수학적 표현으로 계와 환경과의 상호작용(원인)에 의한 계의 속성들의 변화(결과) 설명)으로 구분된다. 이러한 구분에는 계(system), 속성(property), 상호작용(interaction)과 같은 존재론적 범주에 대한 고려가 바탕이 된다. 물리식은 또한 기능과 개념적 위상

에 따라 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 와 같은 경험법칙(empirical law), $p=mv$ 와 같은 정의(definition), $F=ma$ 와 같은 원리(principle)로 구분된다. 이러한 의미유형의 구분은 물리식의 심층적인 교수학습을 위한 토대를 제공할 수 있을 것이다.

나노선 포토닉스

박홍규

고려대학교 물리학과

나노물질 및 나노구조체를 이용한 다기능의 새로운 나노소자는 다양한 과학기술 분야에서 영향을 끼치고 있다. 특히, 반도체 나노선은 발광 다이오드, 레이저, 광도파로 등의 나노 광소자와 전계 효과 트랜지스터, 통합 논리 게이트, 나노 프로세서 등의 나노 전자소자의 핵심 부품으로서 각광받고 있다. 반도체 나노선은 화학 조성, 크기, 모양을 적절히 조절하여 합성함으로써 원하는 기능들을 쉽게 얻을 수 있다.

반도체 나노선의 작은 구조적 변화는 나노선 광특성의 급격한 변화를 가져온다. 나노선의 이러한 독특한 특성으로 인해 기존의 벌크 형태보다 다양한 광소자를 보다 효율적으로 구현할 수 있다. 예를 들어, 반도체 나노선을 이용해 단일 공진기 모드, 낮은 레이저 문턱값, 저전력 소모가 가능한 나노레이저를 제작할 수 있다. 파장보다 작은 직경을 갖는 반도체 나노선은 나노선 축 방향으로 빛을 유도할 수 있어 매우 작은 광도파로로 이용된다. 또한 반도체 나노선은 초고밀도 집적 회로에서 넓은 대역폭과 빠른 속도를 갖는 광전자 소자로서도 작동할 수 있다. 이와 함께, 나노선에서는 공진 모드가 국소적으로 존재하고 흡수 단면이 매우 커서 기존 평면 소자에 비해 향상된 광 흡수 및 광전 효과를 보이므로 고효율의 태양전지로서 사용되기도 한다. 게다가, 짧은 길이의 다공성 실리콘과 긴 결정질 실리콘이 결합된 복합 나노선 구조에서 다공성 실리콘 부분을 광학적으로 펌핑하게 되면 나노선에 흐르는 전류를 높은 on/off 비율로 스위칭할 수 있게 된다. 마지막으로, 반도체 나노선은 다양한 형태와 조절 가능한 전기 광학적 특성을 갖도록 합성될 수 있으므로 생물학적 시스템을 탐색할 수 있는 탐침으로 응용되기도 한다.

이 리뷰 논문에서는 1차원 반도체 나노선의 이러한 독특한 광학적 특성과 광소자로서의 응용에 대한 최근 연구 결과들을 소개하고 있다. 본 저자의 연구실에서 출판된 결과들을 위주로, 2장에서는 나노선 레이저와 광도파로, 3장에서는 나노선 태양전지, 4장에서는 빛으로 동작되는 나노선 트랜지스터, 5장에서는 나노선 탐침 구조 및 비선형 효과, 그리고 마지막으로

6장에서는 이 결과들을 요약하고자 한다.

반도체 나노선은 지난 십수 년 동안 다양한 나노 광소자 및 광전자소자의 개발을 가능하게 했다. 광학적 구조의 소형화는 광소자의 성능을 향상시킬 수 있지만, 많은 경우 광손실의 증가를 가져 온다. 반도체 나노선 및 반도체 나노선에 외부 광 구조를 결합한 나노구조는 광손실을 최소화하는 최적화 설계 과정을 통해 실제 응용 가능성을 높이고 있다. 이 리뷰에서 소개된 다양한 나노선 디자인과 새로운 접근법이 고효율 및 다기능의 광소자의 구현을 위한 다목적 플랫폼으로 사용될 수 있으리라 기대한다.

중이온가속기 라온

정순찬, Panagiota Papakonstantinou(파나지오티아 파파콘스탄티노), Hironobu Ishiyama(히로노부 이시야마), 김영만

기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단

기초과학연구원 중이온가속기건설구축 사업단은 2011년 12월부터 2021년 12월 완공을 목표로 중이온가속기 라온을 구축 중이다.

라온은 가속기를 이용하여 인공적으로 만들지 않는 이상 지구상에는 거의 존재하지 않는 희귀동위원소(rare earth isotope)를 생성한다.

희귀동위원소는 이론 물리학, 천체 물리학 등 전반적인 과학 영역에서 중요한 위치를 차지하고 있을 뿐만 아니라 물성 과학, 의·생명 과학, 원자 및 분자 과학, 핵자료 등 다양한 분야의 발전에 크게 기여할 수 있다. 이러한 광범위하고 중요한 라온 연구 분야 중 핵물리 및 천체물리 분야를 중심으로 라온의 과학적 가치를 조금이나마 소개하고자 한다.

라온을 통하여 0.000000000000001 미터 크기의 펨토 세계에 대한 과학적 탐구뿐만 아니라 빅뱅(Big Bang) 수십 초 이후 우주 형성 과정에 있어서의 물질(원소)의 생성, 별들의 진화, 엑스선 폭발(X-ray burst), 초신성 폭발과 같은 거시적 현상에 대해서도 연구할 수 있다.

라온에서 생성할 밀집핵물질(dense nuclear matter)은 밀도가 10^{17} kg/m^3 의 수배에 이르는 초고밀도 물질이다. 참고로 지구의 평균 밀도는 약 5500 kg/m^3 이다. 이러한 극한 상태의 물질 연구를 통하여 핵 대칭에너지, 핵물질의 액체-기체 전이 등 상전이(phase transition) 현상, 중성자별의 성질 등을 정밀하게 이해할 수 있다. 또한 현재까지 알려진 자연계를 지배하는 기본적인 네 가지 힘 중 하나인 강상호작용을 기술하는 근본 이론인 양자색역학의 중요한 성질 중 하나인 카이랄 대칭

성(chiral symmetry)의 자발적 붕괴와 (부분)복원, 양자색역학의 다양하고 풍부한 진공(vacuum) 구조가 자연 현상에 미치는 영향 등에 관한 과학적 이해에 라온은 중요한 단초를 제공할 수 있다.

핵은 껍질 구조(shell structure) 이외에도 다양하고 흥미로운 성질을 지니고 있다.

둥근 모양의 핵이 가장 보편적이지만, 럭비공 모양, 아령 모양 등 다양한 형태를 가질 수 있고, 핵 내부에서 핵자들이 균일하게 존재하지 않고 뭉침 현상(clustering)을 보이기도 한다. 라온을 통하여 얻을 수 있는 다양한 핵 성질에 대한 정밀한 이론적 이해는 양자 유한 다체계(quantum finite many-body system) 이론 정립 및 핵력의 이해에 필수적일 뿐만 아니라, 천체물리에 중요한 핵반응, 중성자별의 이해 등에 필수적이다.

우주 원소의 기원 탐구에 있어서도 라온은 절대적인 역할을 한다. 21세기 11개의 과학 질문 중 하나인 철보다 무거운 원소의 기원을 설명하는데 중요한 역할을 하는 r-process(rapid neutron capture process: 중성자 포획 과정)을 이해하기 위해 필수적인 핵의 질량, 수명 및 핵반응 율(nuclear reaction rate) 등을 라온에서 제공할 수 있다.

라온의 풍부한 과학적 가치 중 일부를 소개하였다. 가까운 장래에 라온이 세계적 연구 시설이 되기를 희망하며 간략한 라온 소개 글을 마치고자 한다.

유기 저항변화 메모리의 소형화 및 고집적에 대한 연구 Miniaturization and Integration of Organic Resistive Memory Devices

송영걸, 유대경, 이택희

서울대학교 물리천문학부

유기 저항변화 메모리(organic resistive memory devices)는 용액 공정이나 증착 방식을 이용하여 형성한 유기 필름 양단에 금속전극을 한 소자구조를 가지며, 전압 또는 전류 인가에 따른 전기 전도도의 변화를 정보 저장 매체로써 활용한다. 유기 저항변화 메모리는 좋은 안정성, 동작성, 유연성, 그리고 용액 공정이 가능하다는 장점이 있기에 연구자들에게 많은 관심을 받아왔다. 이러한 장점들을 현실 공정에 활용하기 위하여, 필자는 1 Diode-1 Resistor(1D-1R) 유기 메모리, 수직 집적 구조(vertically stacked) 메모리, 유연한(flexible) 유기 메모리 등 다양한 유기메모리 소자 개발 연구를 해왔다. 하지만, 유기 메모리 소자의 고집적화는 구현하기 어려웠는데, 그 이유는 아세톤과 같은 유기 용매를 사용하는 광식각 방법(photolithography method)을 유기 메모리 제작에 적용할 수 없었기 때문이다. 따

라서 일반적인 유기메모리 제작과 연구에 있어서 셀(cell)의 크기는 쉐도우 마스크(shadow mask) 기법을 이용하여 수백 마이크로미터에 한정되어 왔으며 한 칩에 100개 cell 이하의 저집적 소자를 제작할 수밖에 없었다. 이러한 문제 상황에서 필자를 포함한 여러 연구자들이 유기저항변화 메모리의 소형화와 고집적화에 대해 연구를 하였다. JKPS 50주년 기념 논문으로 작성한 리뷰 논문인 'Miniaturization and Integration of organic resistive memory devices'에서는 이러한 유기저항변화 메모리 소자의 소형화와 고집적화 연구를 정리하였다. 본 리뷰 논문에서는 광반응 교차결합 폴리머(photo cross-linked polymer) 활용, 구멍 접합 구조(via hole structure), 금속 전극 전사(direct metal transfer) 방법, 완충 층(buffer layer) 활용, 불소화 직교 광식각(orthogonal photolithography with fluorinated photoresist) 방법, 그리고 나노 구조 성장(miniaturization via nanostructure growth) 등의 방법들을 통한 유기메모리 소자의 소형화, 고집적화 연구가 소개되어 있다.

고분자 및 생체 고분자의 동역학과 반응역학

이남경

세종대학교 물리천문학과

고분자와 생체막은 생명계를 다루는 물리학의 주요한 대상으로서 무른 물질계에서 생화학적 변화가 일어나는 속도, 구조를 변화시키는 데 걸리는 시간과 같이 동역학적 거동을 이해하는 것은 생물학 및 나노기술 분야의 핵심적인 과제이다. 형광물질 추적법과 광학적 방법을 사용하여 시간 분해능을 가지고 세포 안의 단일 입자를 추적할 수 있을 뿐 아니라 단일 고분자의 동역학적 거동을 관찰할 수 있게 되었다. 또한 대규모 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 유체 역학적 상호 작용을 포함하는 묶은 용액에서의 거동과 고밀도 용액에서의 개별 고분자의 동역학에 대한 정량적인 분석도 가능하게 되었다. 이와 같은 실험 및 계산과학 연구와 함께 고분자계에 대한 이론적 모형을 수립하고 물리학적 관점에서 그 동적 거동을 이해하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 이 리뷰 논문에서는 특히 고분자의 강성과 위상적 상호 작용 및 감금 효과가 단일 고분자 사슬의 동역학과 구조 변화 반응역학에 미치는 영향에 대한 이론적 연구를 주로 소개한다.

유체에서 고분자의 동역학적 거동은 널리 받아들여진 Langevin 방정식으로 기술할 수 있다. 단일 고분자를 마구잡이 끈기로 기술하는 확산 방정식으로부터 기본 스케일링 법칙을 끌어낼 수 있다. 일반적으로 고분자의 확산운동은 그 연결성 때문에, 평균 제곱 변위의 짧은 시간 거동은 변칙적이며 총

그림 6. 좁은 슬릿에서 고밀도 고분자 용액. 고분자 간 얽힘이 동역학적 성질을 지배하며 슬릿의 두께에 따라 얽힘거리 N_e 가 길어진다. [JKPS, Phys. Rev. Lett. **118**, 067802 (2017)].

분한 시간이 지나 전체 사슬이 상관된 후에는 단순한 확산법칙을 따른다. 이상적인 사슬과 달리 생체 고분자는 대체로 뺏뺏한 국지적 특성을 가지는데, 이 때문에 짧은 시간 거동에서 이방성을 가지게 된다. 얽힌 고분자 용액에서 단일 분자의 운동은 주변의 다른 사슬에 의해 제한되며 마구잡이 끈기 형태로 구축된 자기 자신의 경로를 따라가는 확산운동, 즉 랩테이션(reptation)으로 알려져 있다. 반유연 사슬의 경우 랩테이션(reptation) 운동에서도 유연한 고분자의 동적지수와 구분되는 동적 영역이 보고되었다. 그 외에도 능동적 소음이 포함되어 있는 세포환경에서나 비등방적인 생체막 상에서의 확산을 이해하고자 다양한 이론적 모형이 대두되었다.

또한, 나노 테크놀로지의 환경과 같이 작은 크기계에서 유체의 특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 고분자 유체의 동적 특성은 고분자 네트워크의 위상학적 정적 구조가 관련되어 있다. 고원 전단 계수는 고분자 용액 고유의 독특한 점탄성 특성으로서 고밀도 액체에서 미세한 얽힘 구조를 반영한다. 랩테이션 모형에서, 유연한 사슬의 경우 이웃하는 얽힘 사이의 거리 즉 얽힘 길이(entanglement length)가 랩테이션 튜브의 기하학적 크기에 해당된다. 좁은 슬릿에 갇힌 용액에서 얽힘 길이는 더 길게 측정되며 이론적으로 슬릿의 폭의 세제곱에 반비례하여 증가한다는 것이 보고되었다. 얽힘 길이에 대한 통합된 그림을 찾기 위해 대규모 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 고분자 용융물의 위상구조를 분석하는 연구가 수행되었으며, 나노크기계에서는 네트워크를 이루던 고분자가 서로 풀려나가서 분리되는 경향이 유변학적 점탄성의 감소로 귀결됨을 알 수 있다.

확산 운동에 의해 매개되는 분자 간의 결합 반응, 생체막 투과, 생체물질의 수송 전달은 결합반응의 속도에 따라 대체로 두 가지 방법으로 동역학에 접근할 수 있다. 고분자의 생체막 투과(translocation) 모형에서 Fokker-Planck 방정식을 도입한 것과 같이 평형 접근법은 화학 반응의 시간 척도가 중합체 자

표 1. What Einstein emphasized in EoP on SR education and its opposite.

	Einsteins Emphasis*	The Opposite of Einsteins Emphasis
Purpose (why)	<p>Intrinsic value</p> <ul style="list-style-type: none"> • To figure out the attempt of the human mind to understand reality of nature • To understand a new physical and philosophical viewpoint • To understand the fundamental principles that represent <i>simplicity</i>^a, <i>universality</i>, and <i>harmony</i> 	<p>Instrumental value</p> <ul style="list-style-type: none"> • To learn new scientific concepts explaining physical phenomena • To satisfy students curiosity • To understand new technological applications in the modern era • To improve students scientific literacy in order to be citizens of a democratic society by utilizing scientific thinking
Content Knowledge (what)	<p>Integral knowledge</p> <p>Treatment of the whole structure and overall flow focusing on key words</p> <ul style="list-style-type: none"> • Viewpoint of the physical world/fundamental principles • Body knowledge which represents inner consistency • Knowledge in periphery 	<p>Fragmentary knowledge</p> <p>Piecewise/fragmented propositions, concepts, and facts</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relativity of simultaneity • Time dilation • Length contraction • Lorentz transformation • Equivalence of mass and energy
Teaching Approach (how)	<p>Hermeneutic/communicative approach</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ways to lead students to participate in the process of the unification/generalization of the theory within the overall structure • Ways to instruct students to understand the nature of science that is not completed but continuing, as an inquiry about the reality of nature 	<p>Partial/Functional approach</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ways to make students become familiar with individual/partial concepts and content related to relativity without an overall context (ways of better understanding, teaching methods, etc.) • Ways to instruct students to think that science is a set of completed knowledge

^aEmphasis from *EoP*

체의 이완 시간에 비해 매우 큰 경우, 반응이 일어나기 전에 고분자의 형태가 평형상태의 통계를 따른다고 가정한다. 다른 동역학적 접근은 확산 제어이다. 이 경우 반응 시간은 접촉 형성에 도달하는 최초 시간(first passage time)으로서 최근의 이론적 연구에서는 강한 외부 장 또는 활성 세력에 노출된 고분자의 비평형 형태를 고려한다.

생물학적 대상은 비평형 상태에 있다. 또 대부분의 세포 과정은 일반적으로 ATP 또는 빛의 형태로 에너지 공급을 필요로 한다. 비평형과 능동적 과정에 대한 연구는 일반 모델을 개별적 상황과 시뮬레이션 연구에 접목시켜 발전시킬 수 있을 것이며 고분자 물리의 이론이 다양한 생물학적 과정에서 발견된 현상들에 대해 일관된 이해를 발전시키는데 도움을 줄 것으로 기대한다.

아인슈타인의 관점에서 본 특수 상대성이론 교육에 대한 반성과 전망

김홍빈, 이경호

서울대학교 물리교육과

이 연구의 목적은 특수 상대성이론(특수상대론) 교육에서 가장 중요한 것은 무엇인지를 아인슈타인의 관점에서 고찰하고,

현재까지 국내에서 진행되어 온 특수상대론 교육 연구를 반성적으로 분석한 후, 향후 이 분야 연구의 방향과 비전을 제시하려는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 아인슈타인의 저서 중 일반 독자를 대상으로 집필한 “The Evolution of Physics (EoP)”를 다음과 같은 세 가지 질문을 중심으로 분석하였다. 세 가지 질문은 ‘왜 특수상대론을 가르쳐야 하는가?’, ‘특수상대론의 무슨 내용 지식을 가르쳐야 하는가?’, ‘특수상대론을 어떻게 가르쳐야 하는가?’이다. 이와 같은 세 가지 질문을 중심으로 특수상대론 교육에 관한 세 가지 평가 기준을 1) 본질적 가치, 2) 통합적 지식, 3) 해석학적/대화적 접근으로 설정하였다. 이 기준을 바탕으로 지난 50년간 국내 학술지를 통해 발표된 특수상대론 교육 연구 논문들을 분석하였다. 연구 결과, 많은 연구들이 특수상대론 교육에 관한 아인슈타인의 관점과는 교육의 목적, 내용, 방법 면에서 매우 다른 것으로 나타났다(표 1 참조).

본 연구에서는 특수상대론 교육 관련 국내의 많은 선행 연구들에서 각 연구자의 의도와는 관계없이, 다른 연구나 교육 실천에서 도구적인 목적, 파편화된 내용 지식, 부분적이고 기능적인 접근 등으로 오도할 가능성이 있다는 점을 지적하였다. 마지막으로, 본 연구자들은 아인슈타인의 관점으로부터 특수상대론 교육뿐만 아니라 일반적으로 물리교육 전체에 새로운 시

각을 제공해줄 수 있는 Einsteinian Physics Education을 제안하였다.

초대칭 게이지 이론을 위한 인덱스 정리

이필진

고등과학원 물리학과

인덱스 정리는 Dirac Operator들의 가장 근원적이고 위상학적인 성질에 대한 일단의 수학적 정리에 대한 통칭이다. 물리학적 입장에서는 Hamiltonian이 해당 Dirac Operator의 제곱의 형태로 주어지는 초대칭 양자역학의 성질을 알려주는데, 기본적으로는 그 기저 상태들의 개수를 세는 정리이다. Atiyah와 Singer에 의하여 1960년대에 발견되기 시작하였고, 물리학자들에게는 Alvarez-Gaume와 Witten이 각기 이 정리의 물리학적 유도과 초대칭이론에서의 다양한 응용을 다루기 시작하면서 널리 알려지게 되었다.

1980년대 초 Alvarez-Gaume에 의하여 물리학적으로 다시 유도된 Atiyah-Singer 정리의 경우, 소위 비선형 시그마 모델로 알려진, 다양체 위에서 움직이는 스핀 양자 함수에 국한되어 있다. 그러나 Witten이 제안한 조금 더 일반화된 인덱스 정리는 모든 초대칭 이론에 대하여 정의되는데, 특히 초끈 이론들에서 다양한 형태로 출현하는 초대칭 게이지 이론들의 위상학적인 성질을 알려주는 중요한 물리량으로 자리잡고 있다. 1980년대 이후 초끈 이론의 발전에서의 인덱스 정리들의 중요성은 이루 말할 수 없다.

그럼에도 불구하고 초대칭 게이지 이론의 인덱스 정리는 수학적인 엄밀함에 있어서 Atiyah-Singer의 인덱스정리에 비하여 크게 못 미치는 상태로 최근까지 남아 있었다. 특히, 많은 경우, 증명되지 않은 “처방”에 의존하여, 계산 과정 자체를 신뢰하기 힘들었다. 과거에 수학자들이 쓰고 있던 소위 fixed point 정리를 게이지 이론의 경로 적분에서 효과적으로 구현한 것인데, 이를 localization이라 하는데, 가장 마지막 단계에서의 적분 경로의 모호성, 그리고 이러한 방법을 써서 얻어지는 결과물들이 실제로 물리학적 관심의 대상인 기저 상태의 개수를 실제로 세느냐 하는 두 가지의 중요한 문제들이 흔히 간과되어 왔다.

전자의 경우 2013년 이후로 상당 부분 해소되었는데, 2차원 Elliptic Genus, 1차원 Witten Index, 0차원 초대칭 행렬 적분 등에서, Atiyah-Singer 정리와 같은 수준에 해당하는 엄밀한 결과들이 출현한 것에 기인한다. 이는 Alvarez-Gaume의 결과를 거의 모든 초대칭 게이지 이론에 확장한 매우 중요한 발견이다. 또한, 이와 같은 초대칭 경로 적분이 항상 인덱스 자체를 계산하는 것이 아니며, 흔히 정수가 아닌 유리함수로 주어지는

소위 분배 함수를 계산한다는 사실을 확인할 수 있는데, 그럼에도 불구하고 분배함수로부터 인덱스를 쉽게 읽어낼 수 있는 다양한 상황에 대한 구체적인 발견이 최근 제시되었다.

이 리뷰에서는 1차원 게이지 이론에 중점을 두고 최근의 이 두 가지 발견에 대하여 간단히 설명하며, 그 과정에서 rational invariants, holonomy saddles, 그리고 quiver invariants 등의 새로운 개념들을 소개한다.

저항 변화 현상 기반 메모리 소자의 물리적 쟁점 및 응용 가능성

김연수, 박배호

건국대학교 물리학과

전하 저장 기반의 트랜지스터를 이용한 플래시 메모리 소자는 동작 속도, 소모 전력 및 집적도의 한계로 인해 이를 대체할 차세대 메모리 소자의 개발이 진행되어 왔다. 다양한 물리적 현상을 이용한 새로운 개념의 메모리 소자들이 제안되었고, 강유전체 메모리(FRAM), 자기저항 메모리(MRAM), 상 변화 메모리(PRAM) 그리고 저항 변화 메모리(ReRAM) 등이 높은 응용 가능성을 인정받아 꾸준한 연구가 이루어져 왔다. 이 중에서도 저항 변화 메모리 소자는 단순한 구조, 빠른 동작 속도, 저전력 및 높은 집적도 등 차세대 메모리 소자가 요구하는 대부분의 조건을 만족하는 우수한 특성을 보여주고 있다.

기본적으로 저항 변화 현상은 도체-부도체-도체 구조에서 외부 전압 혹은 전류를 인가함으로써 부도체의 저항이 비휘발적으로 변하는 것을 말한다. 단순한 현상으로 보이지만 이러한 저항 변화 현상이 매우 광범위한 구조에서 다양한 형태로 나타나기 때문에, 저항 변화 현상을 보다 잘 이해하기 위해 이러한 현상의 적절한 분류가 필수적이다. 저항 변화 현상을 유도하기 위해서 하나의 극성을 가지는 전압 및 전류가 필요할 때 단극성(unipolar) 혹은 무극성(nonpolar) 저항 변화라 부르고, 양방향의 전압 및 전류가 필요할 때는 양극성(bipolar) 저항 변화라 부른다. 단극성 저항 변화 현상에서는 외부 전압 및 전류의 인가에 의해 매우 작은 폭을 가지는 전도성 채널의 형성 및 단절이 유도됨으로써 낮은 저항 상태와 높은 저항 상태가 나타난다고 여겨진다. 양극성 저항 변화 현상은 조금 더 자세하게 분류할 수 있는데, 금속-반도체 계면에 형성된 쇼트키 장벽의 변화, 결합에 의한 원자간의 변화, 혹은 전기화학적으로 활성화된 금속 원자로 이루어진 채널의 형성 및 소산이 저항 변화의 원인으로 제안되고 있다. 최근 많은 관심을 받고 있는 멤리스터는 저항 변화 현상에 대한 더 깊은 이해뿐 아니라 기억 및 학습과 관련된 시냅스 모방 소자로의 응용 가능성과

지 열어주었다.

저항 변화 현상을 이용한 고집적 저항 변화 메모리의 구현 과정에서 몇 가지 어려움이 나타나는데, 대표적인 문제가 크로스바 배열에서 저항 상태를 읽는 과정에서 높은 저항 상태를 읽는 대신 여러 개로 연결된 낮은 저항 상태들의 저항의 합을 읽는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 트랜지스터, 다이오드 등과 같은 다양한 형태의 셀렉터가 제안되었고, 3차원 적층 구조를 위해 셀렉터 없이 동작 가능한 다양한 구조들 또한 제안되었다.

여전히 저항 변화 현상의 온전한 이해 및 산업적/기술적 측면에서의 어려움이 모두 해소된 것은 아니지만, 지난 10여 년 간의 전 세계적인 연구를 통해 저항 변화 현상에 대한 이해가 꾸준히 깊어져 왔다. 이러한 발전 과정과 이 과정에서 새롭게 발견되는 가능성들을 고려했을 때 저항 변화 현상이 가진 다양한 미래 소자로의 응용 가능성은 매우 크다고 할 수 있다.

양자컴퓨팅 시스템

와라누트 아누쿨¹, 임종석², 송윤홍³, 안재욱³

¹치앙마이 대학교 물리 재료학과, ²임페리얼 컬리지 런던, 블랙렛 연구소, ³한국과학기술원, 물리학과

양자컴퓨터는 중첩, 얽힘, 비국소성 등의 양자현상을 직접적으로 활용하여 계산 알고리즘을 처리하는 기계장치로서, 현재 사용되는 디지털 컴퓨터의 계산 능력을 뛰어넘을 것으로 기대되어 각광받고 있다. 임의의 알고리즘을 처리할 수 있는 양자컴퓨터(양자역학적 튜링머신)와 제한된 알고리즘을 처리하는 양자시뮬레이터(파인만이 제안한 최초 개념의 양자컴퓨터)로 구분된다. 양자역학적 정보단위인 큐비트(qubit, 양자비트)는 0과 1의 중첩상태를 허용하기 때문에, N개의 큐비트로 구성된 양자컴퓨터는 2^N 개의 입력값을 동시에 저장하여 처리할 수 있다. 따라서 불과 $N=100$ 개의 큐비트로 구성된 양자컴퓨팅 시스템은 $2^{100} \approx 10^{30}$ 개 숫자를 병렬처리할 수 있어 현존하는 디지털 컴퓨터의 계산능력을 능가하게 된다. 하지만 이를 위해서는 N개 큐비트 시스템의 양자역학적 중첩상태를 임의로 조절할 수 있어야 하는데, 이를 가능하게 하는 선택적 양자얽힘(on-demand quantum entanglement)이 원리적으로나마 일정 규모 이상으로 가능한 물리계의 종류가 제한적이다.

지난 20년 동안 양자컴퓨터를 구현하기 위하여, 다양한 후보군의 물리계(이온, 원자, 분자, 광자, 반도체, 초전도체시스템 등)를 대상으로 큐비트 시스템의 기술 요건에 해당하는 디빈첸초(DiVincenzo)의 5가지 조건(큐비트의 저장, 초기화, 양자소자 구현, 큐비트 상태 측정, 결맞음 유지)에 대한 검증이 이루어졌다. 그리고 이러한 시스템에 기반하여 간단한 양자알고리즘을

그림 7. 양자컴퓨터 구현을 위한 7가지 기술단계.^[4]

구현할 수 있는 소규모의 양자컴퓨터들이 만들어졌다. 하지만 중규모의 양자컴퓨터의 구현을 위해서는 그림 7에서 보여주는 바와 같이 총 7단계의 양자컴퓨터 기술 요건이 필요한 것으로 이해되고 있다. 처음 두 단계가 위의 디빈첸초 큐비트 조건에 해당하고, 세 번째 단계가 에러 복구(quantum error correction), 그리고 네 번째 단계가 결맞음 시간의 증폭이다. 나머지의 단계들은 결맞음의 한계를 극복한 논리큐비트의 구현과 이를 이용한 결함허용 양자컴퓨팅(fault-tolerant quantum computing)의 단계이다. 현재 세 번째 단계에 도달한 시스템은 이온덫, 초전도체, 중성원자(리드버그원자) 등의 정밀물리량 측정에 사용되는 실험장치들이다. 초전도체와 이온덫 시스템은 $N=20$ 개 크기의 양자컴퓨터를 구현하고 있으며, 중성원자와 이온덫 시스템은 $N=50$ 개의 양자시뮬레이터를 구현하고 있다. 세계 유수의 대학과 연구소뿐만 아니라, 특히 북미의 산업계가 참여하여 양자컴퓨터 개발 연구를 진행하고 있다.

한국물리학회 영문학술지(Journal of the Korean Physical Society) 50주년을 기념하여 준비한 양자컴퓨팅 시스템을 소개하는 개요논문^[5]은 위의 세 가지 양자컴퓨팅 시스템의 작동 원리와 연구 진행 상황을 요약하였다.

탄소나노튜브 기반 포화흡수체 개발 및 응용연구 동향

이상민

한국과학기술원(KAIST) 물리학과

물질이 지닌 고유의 뛰어난 전기적, 광학적 특성으로 인해 탄소나노튜브는 전 세계적으로 지난 수십 년간 많은 기초 및

REFERENCES

- [4] M. H. Devoret and R. J. Schelkopf, Science **339**, 1169 (2013).
- [5] W. Anukool, J. Lim, Y. Song and J. Ahn, J. Korean Phys. Soc. **73**, 841 (2018).

응용 연구에 큰 관심의 대상이 되어 왔다. 저차원 탄소나노 구조의 고유한 전기적, 화학적, 광학적, 그리고 열적 특성으로 인해 다양한 산업분야에서 혁신적인 대체물질로 기대를 받을 뿐만 아니라, 순수 과학적인 관점에서 매우 흥미로운 연구대상이 되고 있다. 현재 탄소나노튜브를 기반으로 하는 나노소자, 전계방출소자, 전자 및 전광소자 등에 대한 연구는 상당히 많이 수행되어 왔으며, 각종 소자로서의 상용화도 일부분 이루어졌다. 반면 광학적인 측면에서 볼 때, 기존의 소재들에 비해 광대역 파장영역에서 응용 가능성 및 월등한 선형/비선형적 광특성에도 불구하고 탄소나노튜브 기반의 광학 및 포토닉스 연구는 초고속, 비선형 광소자 개발 및 응용 연구를 제외하고는 아직까지 그에 비해 제한적으로 수행되고 있다. 참고로 국내 KAIST, KIST, 서울시립대, 아주대를 비롯해 일본, 중국, 미국, 유럽의 대학과 연구소에서는 탄소나노튜브 기반 포화흡수체(saturable absorber) 개발 및 이를 기반으로 하는 광섬유 및 고체 레이저에서 초고속 펄스 방출을 가능하게 하는 연구를 지속적으로 활발히 수행하고 있다.

기존의 초고속 펄스레이저 시스템에서는 반도체 다중헤테로 구조 기반의 포화흡수거울(semiconductor saturable absorber mirror; SESAM)이 개발되어 공진기 내 모드잠금에 의한 초고속 펄스 발진용 광스위치로 널리 사용되어 왔으나, MOCVD, MBE 등의 고가장비와 복잡한 공정과정을 통해 제작되는 번거로움과 제작된 소자의 사용 가능한 파장영역의 한계로 인해 응용 범위가 제한되고 있다. 그에 비해 탄소나노튜브 기반의 차세대 초고속 포화흡수체는 상대적으로 손쉽고 저렴하게 제작이 가능하고, 물질이 지닌 고유 특성으로 인해 응용 가능한 파장영역이 매우 넓어 국내외를 막론하고 초고속 펄스 레이저 개발 및 그 응용 연구에 큰 관심의 대상이 되고 있다.

현재 이와 관련된 분야의 연구동향을 보면 탄소나노튜브 외에 그래핀, 위상절연체 등의 다양한 나노 및 저차원 신물질을 이용한 초고속 수동 광스위칭 및 센싱 소자 개발 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다.

단층 이하 두께의 양자점 제작과 광전소자 응용

Submonolayer Quantum Dots for Optoelectronic Devices

김영호¹, 김준오¹, 이상준¹, 노삼규²

¹한국표준과학연구원 산업표준부, ²동국대학교 물리반도체과학부

지난 수십 년간 III-V족 화합물반도체 기반 양자점(quantum dot, QD)은 적외선검출소자(infrared photodetector), 태양전지(solar cell), 레이저다이오드(laser diode), 단광자원(single pho-

ton source)과 같은 다양한 수발광 광전소자 응용 분야에서 많은 관심을 받아 왔다. QD 형성에는 원자층(atomic layer), 액적(droplet), Stranski-Krastanov(SK) 에피택시 등 여러 가지 자기조립(self-assembled, SA) 성장 모드가 시도되어 왔으며, QD에 기초한 적외선검출소자(QDIP)와 태양전지(QDSC)는 보통 격자 부정합 반도체의 응력을 적극적으로 활용한 SK 모드에 의한 SA-QD를 이용한다. (InGa)As 기판층에 2-3 단층(monolayer, ML) 두께의 InAs를 증착하여 제작하는 InAs SK-QD는 강한 광전전이를 나타내는 비교적 높은 밀도($>10^{10} \text{ cm}^{-2}$)의 QD 층을 얻을 수 있는 반면, QD 성장 중에 형성되는 얇은 InAs 젖음층(wetting layer, WL)으로 인한 전하구속 강도의 저하와 QD 크기의 변화 등과 같은 약점을 지니고 있다. 이러한 SK-QD의 단점을 보완하는 대체 구조로 최근 개발된 구조가 WL가 없는 단층 두께보다 얇은(sub-monolayer, SML) SML-QD이다. InAs SML-QD는 1 ML보다 얇은 두께의 InAs와 (InGa)As 층을 교대로 적층하여 형성하는데, 적층수 조절을 통하여 QD의 높이와 밀도 조절이 가능할 뿐만 아니라 WL가 없기 때문에 SK-QD보다 강한 양자구속 효과를 기대할 수 있다. SML-QD는 최근 수직공진 표면방출레이저(VCSEL), 표면 플라스몬결합 양자점 적외선검출소자(SPC-QDIP), 양자점 태양전지(QDSC) 등 보다 복잡하고 정교한 소자에 채용되어 그 우수성이 입증됨으로써 차세대 QD 구조로 응용성을 인정받고 있다.

본 총설논문에서는 SK 및 단층 이하 두께의 QD(SML-QD) 형성 기법과 이를 탑재한 2종류의 수광소자(QDIP, QDSC)의 제작 및 특성을 소개하였다. 전반부에서는 SK 및 SML InAs-QD를 이용한 양자점 적외선검출소자(QDIP)의 구조 및 광전특성을 제시하고, 이들의 소자특성을 비교 논의하였다. 후반부에서는 2종류의 양자점 태양전지(QDSC), SK-QD에 기반한 InAs/GaAs QDSC와 SML-QD에 기반한 InAs/Ga(AsSb) QDSC의 제작과 광전변환 특성을 각각 논의하였다. 다중 적층 기법으로 제작한 SML-QD 기반의 QDIP는 기존 SK-QDIP에 비해 낮은 암전류와 우수한 응답속도 및 적외선검출 특성을 보여 주었으며, 전하구속효과를 최적화한 AlGaAs 포텐셜 장벽 구조의 도입으로 SML-QDIP의 성능을 크게 향상시켰다. InAs/Ga(AsSb) SML-QDSC의 광전류는 강한 양자구속을 가지는 SML-QD의 채용으로 크게 증가하였고, 단층 두께보다 얇은 InAs의 적층으로 인한 응력축적의 완화는 SML-QD의 결정성을 개선시켜 결과적으로 SML-QDSC의 출력전압을 높였다. 본 연구에서 도입한 응력보상기법은 더 많은 수의 SML 적층을 가능하게 함으로써, 결과적으로 광전류와 출력전압의 곱으로 표현되는 태양전지의 변환효율을 크게 향상시켰다.

반데르발스 재료의 합성 및 조립에 관한 최근 진보 Recent Advances in Synthesis and Assembly of van der Waals Materials

추동일, 김은규

한양대학교 물리학과 양자기능연구실

그래핀의 우수한 물리적 특성은 지난 수십 년간 상온 양자홀 효과, 스핀 로직, 초고속 트랜지스터 등 다양한 양자물성구현 및 양자소자 응용성을 제시하여 왔다. 현재 국내외 연구진들은 그래핀과 유사한 결정구조를 갖는 전이금속 디칼코게나이드(transition metal dichalcogenides, TMDCs) 물질에 많은 관심을 가지고 활발한 연구들이 진행되고 있다. TMDCs는 새로운 층상반도체로서 40개 넘는 안정적인 화학적 조합을 보유하고 있다. 이중 가장 널리 연구된 2차원 그룹은 일반적인 화학식 MX_2 (M은 금속, X는 칼코겐원자)으로 표현될 수 있으며 X-M-X 인 층상구조 결정이 형성되어 있다. 원자층의 스택킹 및 배위의 순서에 따라 상이한 폴리타입으로 인해 MX_2 의 전기적 특성이 크게 변화한다. 이렇게 재미있는 특성들을 바탕으로 2차원 초박형 차세대 전자 장치의 후보 재료로 떠오르고 있다.

MX_2 구조의 2차원 물질은 단일물질 대신 다양한 2차원 물질을 레고처럼 적층하면 다양한 구조의 소자 제조가 가능하여 응용 가치를 크게 확장시킬 수 있을 것이라고 사람들은 전망하고 있다. 간단한 2차원 물질 제조법인 스카치테이프를 이용한 기계식 박리법으로 새로운 개념의 소자들을 구현하여 많은 가능성을 제시하였다. 하지만 재료성장에 대한 상당한 노력에도 불구하고 대규모, 고품질 2차원 반도체 물질 성장은 여전히 숙제로 남아 있다. 본 리뷰에서는 다양한 프로토콜을 사용하여 층상 반도체를 제조하는 방법에 대해 소개할 것이다. 가장 널리 사용되는 방법이며 성장 메커니즘이 각기 다른 방법으로써, 2차원 재료의 화학기상 성장에 대한 소개와 함께 용액공정 등과 같은 top-down 접근 방식에 대해 논의한다. 특히 용액공정은 산업적 수요를 충족시키고 대량생산에 용이한 방식으로 주목받고 있다. 이와 더불어 최근 연구결과들도 소개할 것이다.

반데르발스 에피택시는 기계식 전사와 같은 후속공정 없이 인위적인 2D 어셈블리 제조법에 가장 이상적인 방법이나, 다중 층상구조물들을 in-situ로 쌓는데 있어서는 여전히 도전적 이므로 여러 가지 전사 기법이 개발되어 왔다. 2차원 물질들의 이중접합구조 형성방법들은 크게 건식 및 습식 방법으로 구분된다. 이들 모두 “pick-and-place”의 공정 프로세스가 공통적으로 포함되지만 2차원물질 표면에 오염물질 잔류 여부에 따라 구분된다. 본 리뷰의 두 번째 파트에서는 각각의 공정에 대한 장단점과 함께 실행방법에 대해 자세히 논의할 것이다.

핵융합 플라즈마의 고성능 정상상태운전을 향한 KSTAR 주요연구현황

오영국

국가핵융합연구소 및 ITER 국제기구(프랑스)

KSTAR 프로그램은 ITER 운전과 DEMO의 설계를 위해 핵심이 되는 핵융합 플라즈마의 고성능 플라즈마 발생과 정상상태 운전 에 따른 과학적 기술적 현안들을 해결하는 데 연구의 중점을 두고 있습니다. KSTAR는 기존의 핵융합장치와 차별된 초전도핵융합 장치의 장점과 극도로 낮은 자기장 오차, 장펄스 가열장치, 진공용기 내 설치된 3차원 제어코일, 및 고급 이미징 및 프로파일 진단 장치 등을 갖추고 있기에, 국내외 대학 및 연구소들과의 공동협력 연구를 통해 플라즈마 운전제어와 물리연구에 있어서 많은 진전을 가져왔으며, 기존의 핵융합장치와 차별 연구결과를 통해 ITER를 비롯한 세계 핵융합연구에 기여할 수 있었다.

지난 10여 년의 운전 및 실험을 통한 주요 성과로는 핵융합 플라즈마의 제어에 있어서는 중성입자빔가열장치를 사용하여 고성능 H-모드 플라즈마를 70초 이상 세계 최장의 유지를 달성했으며, 더불어 ITER 등의 대형 핵융합로의 내벽 손상의 원인이 되고 있는 경계불안정성(ELM)이 완전히 억제된 H-모드를 약 30초 동안 발생시킬 수 있었다. 이를 통해 ITER 장치의 초기 운전에 대한 시나리오 개발에 따른 리스크를 줄이는 데 기여할 수 있었다.

더불어 핵융합 플라즈마의 근본 물리연구에 있어서도 많은 연구역량을 보여 주었다. 특히 3차원 제어코일과 고성능 진단장치를 활용하여 ELM에 대한 체계적인 분석연구가 가능했으며, 이밖에도 플라즈마와 내벽 간 상호작용연구, 플라즈마 수송 및 섭동 연구, MHD 불안정성 연구 등에 있어서 많은 성과를 이루었다.

향후 KSTAR의 연구에서는 이전의 연구 결과를 바탕으로 DEMO 핵융합실증로에 활용 가능한 플라즈마 시나리오 연구와 이에 따른 다양한 MHD 불안정성을 억제하기 위한 연구에 많은 기여를 하고자 한다. 이를 위해서 고출력 전류구동 시스템 증설과 진공내벽 구조물의 변경 등을 병행해 갈 예정이다.

결맞는 X-선을 이용한 나노스케일의 스트레인 이미징 기술의 개발과 적용

Nanoscale Strain Imaging Using Coherent X-ray Light Sources

김동진, 최성욱, 윤규석, 강진백, 김재승, 김성원, 김현정
서강대학교 물리학과

3세대 방사광가속기와 X-선 자유전자레이저 등의 첨단 X-선

광원에서 발생하는 X-선은 공간적으로 결맞음성의 특성을 가지고 있다. 또한 세계적으로 새롭게 구축되거나 업그레이드를 계획하고 있는 X-선 광원의 경우에도 X-선의 결맞음성은 더욱 크게 향상된다. 따라서 이러한 결맞은 X-선을 활용한 이용 연구가 매우 중요하고 시급하다. 현재까지 결맞은 X-선을 활용한 대표적인 연구 기술은 나노 스케일의 동역학을 측정하는 X-선 광산란분광법(X-ray photon correlation spectroscopy)과 결맞은 X-선 회절 이미징(coherent X-ray diffraction imaging) 기술이다.

본 리뷰에서는 이 중에서도 나노 물질 시스템의 내부 변형을 측정할 수 있는 결맞은 X-선 회절 이미징 기술을 소개하고, 현 단계에서의 활용 및 응용 사례연구를 설명하고자 한다. 특히 나노 스케일의 물질은 상대적으로 표면과 계면의 비율이 벌크보다 높기 때문에 작은 영향에도 민감한 스트레인 특성을 나타낸다. 따라서 원자 스케일의 스트레인 혹은 변형 특성을 비파괴적으로 정확히 측정하고 이해하는 것은 기초과학과 첨단 산업기술 면에서 매우 중요하며 특히 반도체, 촉매제, 연료전지 등의 나노 재료 설계 및 응용 분야에서 필수적인 요소이다. 결맞은 X-선 회절 이미징 기술은 일반적으로 원거리장에 해당하는 프라운호퍼(Fraunhofer) 회절 영역의 산란 신호, 다시 말해 결맞음성에 의한 간섭무늬인 결맞은 X-선 회절패턴을 측정함으로써 시작한다. 이렇게 측정된 패턴을 위상 복원 알고리즘을 통하여 실제 공간상의 3차원 이미징으로 변환시킬 수 있다. 원칙적으로 회절 실험에서 산란된 X-선의 세기를 측정하므로 위상의 값을 알 수 없으므로 이미징은 될 수 없는 것으로 알려져 있었다. 그러나 결맞은 X-선 회절 패턴의 경우, 부가적인 간섭무늬의 발생 조건을 만족하도록 푸리에 변환 및 통제 조건(constraint)을 적용한 알고리즘을 통해 위상을 복원시킬 수 있다. 특히 결맞은 X-선 이미징 기술을 결정에 적용하여 Bragg 회절 조건에서 측정하면 복원된 위상 정보는 격자 상수에 비례한 값을 나타내기 때문에 복원된 위상을 포함한 3차원 이미징은 결론적으로 시료의 미세한 변형을 3차원으로 얻게 되어 다른 측정 기술로는 불가능한 정보를 얻을 수 있다.

특히 이 기술은 X-선 산란을 통해 비파괴적으로 측정할 수 있으며, 실제 시료의 변형을 실시간(in-situ) 혹은 동작 조건에서 측정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 이점을 통해 배터리 물질, 금속 촉매제의 구조적인 변화와 내부 변형 구조를 작동 상황에 따라 측정이 가능하며, 나노 물질의 성장, 용해, 부식 등 실제 상황에서의 구조 특성 분석 연구가 가능하다. 보다 최근에는 X-선 자유 전자레이저를 이용하여 매우 짧은 시간인 피코(pico)초 이하의 시간 분해 이미징 연구가 시작되었고, 시공간적으로 나노 물질에 대한 원자 구조 다이내믹스 분석이

가능함을 보여주었다.

결맞은 X-선 회절 이미징은 여러 기술적 보완 및 결맞은 X-선 광원 개선으로 최근 급속도로 빠른 발전을 이루었고, 많은 성과를 보여주고 있다. 10 나노미터 이하의 공간 분해능과 함께 피코미터 스케일의 변형 민감도를 가지고 본 기술의 개발과 적용은 앞으로 새로운 분석 및 측정 기술의 혁신적인 연구 성과를 가져다 줄 것으로 기대되고 있다

위상물질로 가는 길: 콜로퀴움

A Passage to Topological Matter: Colloquium

박권

고등과학원(KIAS) 물리학부

위상물질(topological matter)은 현대 응집물질물리에서 가장 중요한 분야 중의 하나이다. 본 리뷰에서 필자는 위상물질이 이렇게 중요한 분야가 되는 데에 있어서 결정적인 역할을 했던 몇 가지 주요 아이디어들을 교육학적으로 쉽게 설명하고자 한다. 특히, 필자는 어떻게 정수 양자홀상태(integer quantum Hall state)가 결국 위상물질의 일반적인 개념으로 확장되는 위상절연체의 원형으로서의 역할을 했는지 설명할 것이다. 정수 양자홀상태의 위상학적 성질은 싸울레스(Thouless)-코모토(Kohmoto)-나이팅게일(Nightingale)-데 니스(den Nijs) 공식, 즉 흔히 TKNN 공식이라고 짧게 줄여서 불리는 공식에 의해서 가장 잘 표현된다. 이 공식은 베리 위상(Berry phase)과 홀 전도도(Hall conductivity)를 직접적으로 연결한다. 위상절연체가 위상학적으로 특별한 이유는 근본적으로 해밀토니언의 매개변수가 구성하는 가공의 공간에 디랙 단극(Dirac monopole)이 존재하기 때문이다. 재미있게도 라비 진동(Rabi oscillation)을 기술하는 해밀토니언은 위상절연체를 기술하는 해밀토니언과 정확히 같은 위상학적 구조를 갖는다. 위상물질의 개념은 이후 와일 반금속(Weyl semimetal) 및 디랙 반금속(Dirac semimetal)을 포함하는 위상학적 반금속으로 확장된다. 위상물질 연구의 가장 최첨단 주제 중의 하나는 상호작용에 의해서 야기되는 위상학적 물질 상태, 즉 분수 천 절연체(fractional Chern insulator)와 분수 위상절연체(fractional topological insulator)이다. 이 두 상태의 존재는 분수 양자홀상태(fractional quantum Hall state)와의 비유를 통해서 이론적으로 제안되었다. 필자는 이 제안의 요지에 대해서 설명함과 동시에 아직 해결이 안 된 몇 가지 문제점들도 같이 지적하고자 한다. 마지막으로, 필자는 위상물질 연구에 있어서 앞으로 우리가 나아갈 방향에 대해서 논의하면서 본 리뷰를 마무리하고자 한다.