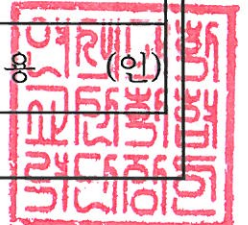


『4단계 BK21사업』 미래인재 양성사업(과학기술 분야)
연세물리교육연구단 자체평가보고서

접수번호	4199990114260							
사업 분야	기초과학	신청분야	물리	단위	전국	구분	교육연구단	
학술연구분야 분류코드	구분	관련분야		관련분야		관련분야		
		중분류	소분류	중분류	소분류	중분류	소분류	
	분류명	물리학	응집물질물리	물리학	입자및장물리	물리학	광학및양자전자학	
	비중(%)	40%		30%		30%		
교육연구 단명	국문) 연세 물리 교육연구단 영문) Yonsei Physics Education and Research Institute							
교육연구 단장	소 속	연세대학교		이과대학	물리학과			
	직 위	교수						
	성명	국문	오경환		전화	02)2123-5608		
					팩스			
		영문	KYUNGHWAN OH		이동전화	[REDACTED]		
E-mail					ohkyunghwan@gmail.com			
연차별 총 사업비 (백만원)	구분	1차년도 (20.9~21.2)	2차년도 (21.3~22.2)					
	국고지원금	486,125	972,250					
총 사업기간	2020.9.1.-2027.8.31.(84개월)							
자체평가 대상기간	2020.9.1.-2021.8.31.(12개월)							
<p>본인은 관련 규정에 따라, 『4단계 BK21』 사업 관련 법령, 귀 재단과의 협약에 따라 다음과 같이 자체평가보고서 및 자체평가결과보고서를 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">2021년 9월 17일</p>								
작성자	교육연구단장			오 경 환 (인)				
확인자	연세대학교 산학협력단장			이 충 용 (인)				



〈자체평가 보고서 요약문〉

중심어	연세 물리 교육연구단	학생 중심	교육-연구 선순환
	C ³ : Creativity, Critical Thinking, Connection	sp ³ : 학생, 신진인력, 교수, 인프라	Q ³ : Quantum Universe, Quantum Matter, Quantum Application
	낙오자 없는 교육	산업·사회 기여	사람과 사람간의 네트워크
교육연구단의 비전과 목표 달성정도	<p>1] 교육-연구 선순환 체계를 갖춘 학생중심의 혁신적 인재 양성 교육연구단 교육-연구의 제도적 혁신을 위한 자격시험 개선안과 그 위원회가 학생들의 연구 진전을 트랙하여 낙오자 제로 시스템을 뒷받침</p> <p>2] 산업·사회에 실효성 있는 연구 성과를 환원하는 사회 기여 교육연구단 대중강연, 기업 문제 해결을 위한 공동연구, 연구소와의 협동과정 개설 등을 통해 사회, 산업계, 연구계와의 다양한 협력과 융합적 활동을 추구하여 교육과 연구의 결과를 외부로 환원하는 출발점 마련</p> <p>3] 학문적 파급력이 높은 연구 성과를 창출하는 창의적 교육연구단 연구 수월성을 최우선으로 하는 문화를 정착시키고 제도적으로도 이를 뒷받침 할 수 있도록 다양한 자원을 지원</p> <p>4] 초연결적 사회 속에서 협력을 주도하여 가치를 창출하는 융합적 교육연구단 대중강연, 기업 문제 해결을 위한 공동연구, 연구소와의 협동과정 개설 등을 통해 사회, 산업계, 연구계와의 다양한 협력과 융합적, 초연결적 활동을 추구하여 교육과 연구의 결과를 외부로 환원하는 출발점</p>		
교육역량 영역 성과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연구중심특별프로그램 운영: 최신물리학동향, 응집/응용/입자물리 특별연구 ▪ 산업, 사회문제해결 특별프로그램 운영: 달팽이/카오스 강의, LG 디스플레이 강의, 과학고 컨설팅 ▪ 박성찬 교수: 2021년 2월 연세대학교 우수강의 교수상 수상 ▪ 박도윤 학생(제1저자), Nature 596, 68-73 (2021) ▪ 최원준 학생(제1저자), Advanced Materials 2103079 (2021) 		
연구역량 영역 성과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 본 교육연구단은 지난 1년간 160편 이상의 논문을 게재하였으며, 참여교수 1인당 논문 환산편수 (1년간 1.13편/인)는 선정평가 당시의 값을 유지. • 참여교수 1인당 환상보정 IF 합 (1년간 ~0.7/인)의 경우 선정평가 당시와 비슷한 값을 유지하고 있으며, 환산보정 ES 합(1년간 ~4.5/인)은 예년에 비해 약 2배로 향상됨. 교육연구단 논문 질적 지표가 유의미하게 향상되고 있다고 판단됨. • 김근수 교수는 교신저자로 2021년 8월 “Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals” 논문을 Nature지에 게재함 • Journal of High Energy Physics, Physical Review D, Advanced Materials, Nature Communications, Advanced Functional Materials, ACS Nano, Nano Letters 등 유수의 저널에 게재. 		
달성 성과 요약	<ul style="list-style-type: none"> • 교육 분야에서는 대학원 학생이 매 단계별로 최대의 역량을 발휘할 수 있도록 제도적인 기틀을 확립하였으며 학생의 수요를 확인하여 연구에 실질적으로 활용할 수 있는 과목을 개설하여 교육 토대를 마련하였음. • 세계적 수준의 연구를 선도하여 주요 저널에 학생이 제1저자, 참여교수가 교신저자로 된 논문을 다수 게재하였으며 국제협력을 통해 다수의 공동 연구 성과를 달 		

	<p>성하였음.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 산학협력도 지속적으로 확대되고 있으며 활발한 인력 교류 터전을 확보하였음.
미흡한 부분 / 문제점 제시	<ul style="list-style-type: none"> • 사회문제 해결 기여 면에서 다소 부족한 바, 이를 해결하기 위하여 보다 산학협력력을 확대하고, 사회문제의 파악 및 이를 해결할 가능성 모색이 필요함.
차년도 추진계획	<ul style="list-style-type: none"> • 대학원생 교과 과목을 단계별로 세분화 하여 각 학생이 단계별로 수강할 수 있는 입문, 심화, 연구수행 과목을 개발. • 자격시험 제도를 기존의 교과목 필답고사에서 연구를 준비하고 점검받는 실질적인 방식으로 전환 • 온라인-오프라인 국제 협력을 강화하여 공동연구 거점으로 성장하기 위한 전략 및 계획 수립 • 신진연구인력의 연구, 교육 및 경력관리를 위한 체계적 대책 수립.

I

교육연구단의 구성, 비전 및 목표

1. 교육연구단장의 교육·연구·행정 역량

성 명	한 글	오경환	영 문	KYUNGHWAN OH
소 속 기 관	연세대학교		이과대학	물리학과

- 교육연구단장인 오경환 교수는 해당 기간 인 2020.9.1.~2021.8.31. 동안 총 7편의 SCI 논문을 출간하였으며, 특히 광학분야저널 랭킹 10% 이내의 저명 저널인 Photonics Research 1편을 게재하였고 1편은 게재 승인 상태로 우수한 연구실적을 보였음. 또한 영국, 중국 연구자와 공동연구를 통한 논문이 총 3편이 출간된 바 전체 논문의 40%가 넘는 비중으로 활발한 국제공동연구를 수행하였음.
- 또한 2021년 8월에는 미국공군연구소 (Air Force Office of Scientific Rsearch, AFOSR)와 한국 정도통신 기획평가원 (IITP) 공동 주관 사업인 한IITP-미AFOSR 양자통신, 양자센서 분야 공동연구 신규과제에 선정되어 미국 University of Colorado at Boulder-JILA와 공동연구를 시작하였음.
- 오 경환 단장은 대학원 교육에서 광소자물리 강좌를 Flipped Class형태로 운영하여 수강생이 먼저 강의내용을 동영상으로 학습하고 수업시간 이전에 assignment를 해오고 수업시간에서는 그 결과를 상호 토론하는 형식으로 수업을 진행하였음. 이를 통해 학생들이 보다 능동적이고 적극적으로 수업을 예습할 수 있는 교육을 실시하였음.
- 오경환 교수는 대학원 교육에서 고급물리특강II, IV를 통해 대학원생들의 가장 큰 애로 사항으로 조사된 논문의 Introduction 작성에 대하여 영국 Institute of Physics의 공개 자료를 기반으로 강의 내용에 반영하였음.
- 오 경환 단장은 핀란드 Aalto University의 Mikko Partanen박사 (<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=znj0Bn4AAAAJ>)를 Horizon 2020 프로그램을 통해박사후연구원으로 활용하여 총 2편의 sci논문을 출간하는 국제 신진연구 인력 양성에 기여하였음.
- 4th International Seminar on Photonics, Optics, and its Applications (ISPhOA 2020, December 1-2, 2020), 2년마다 ASEAN 국가에서 열리는 광학, 광자공학 및 그 응용에 대한 학술 연구 정보를 교환하는 국제학회로 오경환 교수는 Pleanary Speaker로 참여하였음.
- 세계 최대 최고의 광학 학술회인 미국광학회 (Optical Society of America, OSA)내 Fiber Modeling and Fabrication Technical Group이 오경환 교수를 초청하여 Webminar를 실시하였음.
- The 81st JSAP Autumn Meeting 2020 September 8-11, 2021, 일본응용 물리학회 (Japanese Society of Applied Physics)는 일본에서 시작된 학회로 2020년에는 81회를 맞는 오랜 역사를 가진 학회이며 응용물리 전반을 포괄하는 대형학회임. 일본의 주요 대학, 연구소, 기업이 참여하였으며 오경환 교수는 Invited Speaker로 참여하였음.
- Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2020, International Conference on

Information Photonics and Optical Communications (IPOC) 2020, ACP는 중국이 주도하는 광학기술, 광자공학 기술 전문 학회로 아시아 태평양 지역에서 가장 규모가 큰 학회 및 전시회임. 오경환 교수는 Track Committees (Track 1: Optical Fibers, Fiber-based Devices and Sensors) 위원으로 참여하였음.

- 오경환 교수는 IEEE Photonics Society에서 발간하는 Photonics Technology Letters의 AssociateEditor, Optics Communicaitons International Advisory Board Member, Frontiers in Sensor Special Section Editor in Chief등으로 활발한 국제 저널 편집위원 활동을 하고 있음.

2. 대학원 학과(부) 소속 전체 교수 및 참여연구진

<표 1-1> 교육연구단 대학원 학과(부) 전임 교수 현황 (단위: 명, %)

대학원 학과(부)	학기	전체교수 수	참여교수 수	참여비율(%)	비고
물리학과	20년 2학기	27	19	70.3%	
	21년 1학기	27	20	74%	

<표 1-2> 최근 1년간(2020.9.1.~2021.8.31.) 교육연구단 대학원 학과(부) 소속 전임 교수 변동 내역

연번	성명	변동 학기	전출/전입	변동 사유	비고
1	정광호	2020년 2학기	전출	정년 퇴직	
2	조영욱	2021년 1학기	전입	신규 임용	

<표 1-3> 교육연구단 대학원 학과(부) 대학원생 현황 (단위: 명, %)

대학원 학과(부)	참여 인력 구성	대학원생 수											
		석사			박사			석·박사 통합			계		
		전체	참여	참여 비율 (%)	전체	참여	참여 비율 (%)	전체	참여	참여 비율 (%)	전체	참여	참여 비율 (%)
물리학과	20년 2학기	10	6	60%	15	7	46.6%	105	76	72.3%	130	89	68.4%
	21년 1학기	12	8	66.6%	17	4	23.5%	111	81	72.9%	140	93	66.4%
참여교수 대 참여학생 비율				21.5%									

3. 교육연구단의 비전 및 목표 달성정도

<연세 물리 교육연구단의 가치>

- | | |
|-------------------|---|
| 연세
물리
교육연구단 | <ul style="list-style-type: none"> ○ [延世 : 세상을 이끄는] 창의적·도전적 문제 해결형 인재 양성 ○ 미래 기술 사회 핵심 기반 지식인 양자 물리 분야 연구혁신 ○ 교육과 연구의 선순환 체계를 통한 학문적·사회적 가치 창출 |
|-------------------|---|

<비전 달성을 위한 교육연구단의 노력>

교육연구단의 4가지 비전(1, 2, 3, 4)과 그에 상응하는 대표적인 노력과 성과(1, 2, 3, 4)는 다음과 같다. 세부 내용은 각 부문별로 나누어 II. 교육역량 영역, III. 연구역량 영역에 기술하였다.

교육연구단의 비전

- 1 교육-연구 선순환 체계를 갖춘 학생중심의 혁신적 인재 양성 교육연구단
- 2 산업·사회에 실효성 있는 연구 성과를 환원하는 사회 기여 교육연구단
- 3 학문적 파급력이 높은 연구 성과를 창출하는 창의적 교육연구단
- 4 초연결적 사회 속에서 협력을 주도하여 가치를 창출하는 융합적 교육연구단

교육연구단의 노력

- 1 학생 제안 커리큘럼 실시【특별연구 시리즈: 학생 간 자유로운 지식 교류 강조, 벤치마킹 대학들의 중점 교육 목표인 “학생중심교육” 실시】, 교육과정 중 연구 방법론 습득【첨단물리 연구 방법론 개설, 벤치마킹 대학들의 중점 교육 목표인 “교육-연구 선순환” 실시】, 학부생 심화 전공 과목 제공【인재 양성 기반 제공】, 박사학위 자격시험 개선안 마련 및 의견 수렴중【자격시험 위원회가 학생 연구 트랙: 낙오자 제로】, 신진인력의 강의 기회 제공, 신진인력의 정규직 취업
- 2 산학협력과제 확보【산업사회 문제 해결】, 각종 school 강연【전문 교육 기여】, 과학상 수상 및 토크 콘서트【자연과학 가치의 대중전달, 고교생에 최신 연구 청취 기회 제공】, 달팽이 강의【대학원생/학부생을 위한 친절한 강의, 낙오자 제로 기여】, 강연 등을 통한 산업 및 사회 기여【사피언스 스튜디오 대중강연, KAOS 대중강연, 영재교육원 컨설팅, 기업체 내부 전문 교육, 나노기술 기반 교육】
- 3 최고 수준 연구논문 발표【Nature, Science, Nature 자매지, Physical Review Letters, Advanced Materials 등, 벤치마킹 대학과 비교열위에 있는 “질적지표” 추구】, 연구력에 기반한 각종 지원계획 수립【연구 실적에 기반한 자원 지원】, 파급력 높은 연구 장려 문화 조성, 국제적 연구활동【학회운영참여, 국제공동논문 등 40여 건, 국제 교류 및 해외연수 7건】, 국외연구자 초빙【27건】
- 4 산학협력과제 확보【18건】, 한국표준과학연구원과의 협동과정 개설【2021-2, 신입생 입학】, 새로운 융합 교육【머신러닝, 빅데이터, 양자컴퓨팅 강의 개설】, 기업 협력을 통한 공동특허【삼성전자 공동 특허(미국)], 해외 기관과의 정례 워크숍 개최【연세-버클리 워크숍 등 4건】

위와 같이 지난 1년차 사업 기간 동안 본 교육연구단은 비전 달성을 위한 다양한 활동을 진행하였다. ▲특히 교육-연구의 제도적 혁신을 위한 자격시험 개선안과 그 위원회가 학생들의 연구 진전을 트랙하여 낙오자 제로 시스템을 뒷받침하고자 하였다. ▲학생 중심의 커리큘럼과 융합과목 개발을 통해 혁신 인재 양성을 위한 기틀을 마련하였다. ▲연구에 있어서는 수월성 연구를 최우선으로 하는 문화를 정착 시키고자 노력하였으며, 제도적으로도 이를 뒷받침 할 수 있도록 다양한 자원을 지원하고자 하였다. ▲대중강연, 기업 문제 해결을 위한 공동연구, 연구소와의 협동과정 개설 등을 통해 사회, 산업계, 연구계와의 다양한 협력과 융합적, 초연결적 활동을 추구하여 교육과 연구의 결과를 외부로 환원하는 출발점을 마련하였다. ▲해외 저명대학과의 벤치마킹을 통해 설정한 교육 및 연구의 혁신을 위한 “학생중심 교육”, “교육-연구 선순환”, “연구의 질적지표(수월성) 향상”을 위한 제도와 연구력 향상을 꾀하여 교육연구단 운영 첫해임에도 가시적인 성과가 나타나기 시작했다. ▲이와 같은 교육-연구 혁신 활동은 전체 8년 기간 동안 실행하고자 하는 목표의 기반 요소들이다. 이를 바탕으로 당초 수립한 다양한 계획을 지속할 예정이며, 이를 8차 년으로 확장해 본다면 본 교육연구단의 최종 비전 달성이 예상된다.

II

교육역량 영역

□ 교육역량 대표 우수성과

1 연세 물리 교육 연구단의 참여교수의 교육역량 우수성과

참여교수 교육역량 성과 ① 특별프로그램 운영 성과

- 연구중심특별프로그램 운영: 최신물리학동향, 응집/응용/입자물리 특별연구
- 산업, 사회문제해결 특별프로그램 운영: 달팽이/카오스 강의, LG 디스플레이 강의, 과학고 컨설팅

참여교수 교육역량 성과 ② 수상 성과

- 박성찬 교수: 2021년 2월 연세대학교 우수강의 교수상 수상
- 김근수 교수: 제4회 한성과학상 수상, “양자물질 디자이너”라는 주제로 토크콘서트 (2021. 8. 15)

2 우수대학원생 확보를 위한 지원성과

신입생 확보 및 정착 프로그램 ① 우수신입생 지원 성과

- BK-장학제도 및 연구 분야를 소개하는 설명회를 매학기 진행, 포스터 발표회 정례화
- 학부생에게 연구 분야별 튜토리얼 과목 소개: 첨단물리학의 세계, 양자물질연구, 응용물리입문

신입생 확보 및 정착 프로그램 ① 우수신입생 장학금 지급 성과

- 입학성적이 우수한 신입생들에게 동문회 병학, 이영진 장학금 6400만원 지급 (2020-2, 2021-1학기)
- Becker Graduate Fellowship: 우수 학부생 3명에게 2022-1학기부터 장학금 지급확정, 대학원 입학 후 5학기 동안 매학기 1인당 300만원씩 지급, 입학 첫해 동문장학금 1인당 500만원 추가 지급

3 참여대학원생 우수 연구, 특허 성과

우수 연구, 특허 성과 ① 연구 대표성과

- 박도윤 학생(제1저자), Nature 596, 68-73 (2021): Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals
- 최원준 학생(제1저자), Advanced Materials 2103079 (2021): Ambipolar Channel p-TMD/n-GaO Junction Field Effect Transistors and High Speed Photo-sensing in TMD Channel

우수 연구, 특허 성과 ② 특허 대표성과

- 박한범 학생: 열전 재료, 이의 제조 방법 및 열전 소자 (특허등록, 미국 10,886,451, 2021-01-05)
- 송준호 학생: 압타머 기능화 된 버티컬 바이오 센서 (특허등록, 한국 10-2224686, 2021-03-02)

4 교육의 국제화 우수성과

교육의 국제화 우수성과 ① 공동복수학위제 추진

- 프랑스 Lyon Université, 파리 소르본 대학과 복수/공동학위 프로그램을 위한 MOU 체결을 논의

교육의 국제화 우수성과 ② 해외저명대학과 워크숍 개최

- 연세대-사가대 입자물리 공동워크숍 (2021. 1. 7.-8, 2021. 1. 21-22): 총 8개의 교수 강연(90 min. each), 3개의 신진인력 세미나 (30 min. each), 10개의 대학원생 발표 및 3개의 그룹 과제 수행
- 연세 - UC 버클리 온라인 워크숍 (2021. 2. 18-19) : Quantum Matter 분야 발표를 통한 연구 교류, 초청연사: Prof. Alex Zettl, Prof. Steven Louie, Prof. James Analyst, Prof. Feng Wang

1. 교육과정 구성 및 운영

1.1 교육과정 구성 및 운영 현황과 계획

1 연세 물리 교육 연구단의 교육과정 및 학사 운영실적

본 교육연구단은 교육-연구 선순환 체계를 확립하여 1) 새로운 미래지식을 창출하는 창의적 인재 2) 혁신적 문제해결책을 제시하는 비판적 인재 2) 초연결 네트워크 내 협업을 주도하는 융합적 인재를 양성을 위해 교육과정과 학사운영을 진행해 왔다. 교육연구단 운영 첫해인 1차년도에는 아래와 같은 교육과정과 학사 운영을 통해 미래 지식과 기술의 근간인 양자 물리학 전문 연구인재 양성에 기여하였다.

교육과정 운영현황 ① 학생별 적성을 고려한 맞춤형 교육 실시

- 창의형 / 혁신형 두 가지 인재 트랙 중 대학원 신입생들이 자율적으로 선택
- 적성과 관심도를 심층 분석한 자료를 토대로 대학원 주임 교수와의 면담을 통해 트랙 최종 결정

교육과정 운영현황 ② 연구 중심 특별 교육 프로그램 운영성과

- 학생들에게 필요한 교과목 설문조사 실시하여 신규과목 개설에 반영
- **외국인교수 강의개설**: 이론물리특강 II (2021-1학기), 첸포엔 교수를 초청하여 입자물리학이나 다른 물리계의 문제를 해결하기 위한 수치적 방법을 소개하고, 입자 충돌의 단면 계산 및 운동학, 힉스 입자 정밀 분석, 통계 분석, 진공 안정성 등에 적용하는 것을 강의
- **“응용물리특별연구”** (2020-2학기, 2021-1학기 개설): 응용물리 분야 최신연구를 학생 간 공유, 연세물리교육연구단의 교육-연구 연계교육에 기여 (이연진 교수)
- **“응집물리특별연구”** (2020-2학기, 2021-1학기 개설): 타 연구 분야의 핵심 내용 및 연구 방법에 대한 이해 (융합적 사고 및 연구 지식 습득), 향후 연구 협력을 할 수 있는 부분에 대한 아이디어 공유 (조두희 교수)
- **“입자물리특별연구”** (2020-2학기, 2021-1학기 개설): 입자물리분야 협력 연구 가능성을 모색을 목표로 진행하는 과목으로 수업은 발표와 토론으로 이루어 졌으며, 특히 수업과 연구를 병행하는 방법으로 연구 효율을 극대화하는데 초점
- **“최신물리학 동향”** (2020-2학기, 2021-1학기 개설): 물리 각 분야별 첨단연구의 최전선에 있는 교수들이 최신연구 주제를 강의, 연구단의 연구비전과 경쟁력 강화
- **우수강의교수상 (연세대학교 총장 서승환)**: 박성찬 교수 (2021. 2. 28)

교육과정 운영현황 ③ 과학기술, 산업, 사회문제 해결 프로그램 운영실적

- **“달팽이 강의시리즈”**: “포스트 힉스 시대의 새로운 물리학“이라는 주제로 APCTP와 한국연구재단의 재정 도움을 받아 달팽이 강의시리즈를 운영 (박성찬 교수)
 - 입자물리에서의 양자컴퓨팅 (2020. 11. 20, 김민호 박사, 고등과학원)
 - “Axions“. From basic, to axion cosmology and recent progresses in direct detections. (2021. 5. 1, 임상희 박사, 서울대 IBS)
- **“카오스 강연”**
 - 카오스 재단에서 주최로 “반도체의 양자 도약을 꿈꾸며“라는 주제로 강연, 카오스 사이언스 유튜브 채널을 통해 오픈되어 있으며 조회수 6천회 이상을 기록 (김근수 교수, 2021. 1. 18)
 - “시간, 물질, 그리고 우주” 를 주제로 강연 (박성찬 교수, 2021. 6. 30)
- **“SPDAK 2021 school: 트리거 검출기 강의”**: 기술적으로 매우 복잡함 이러한 검출기 원리 및 기술을 대학원 학생들에게 집중적인 교육을 통해 가르치고 이를 연구에 활용할 목적의 겨울학교

가 경북대 주관으로 개최되었으며 유희동 교수는 트리거 검출기를 주제로 강의 (2021. 1. 21)

- **과학고 물리학 프로젝트 컨설팅** (오경환 교수)
 - 대전과학고 양자광학 실험준비를 위한 광학설비 및 양자광학 원리에 대한 자문, 고등학교 교사와 학생 그리고 대학 교수가 한 자리에서 프로젝트에 대한 배경과 데이터 해석 물리적 원리에 대한 논의를 하는 과정을 통해 과학의 사회 기여에 일조 (2021. 4. 1)
 - 인천과학예술평재학교 레이저 기반 속도 측정계에 대해 간헐 및 음향광학 효과에 대한 자문, 이를 통해 과학고 학생들의 물리 현상에 대한 이해를 향상시키고 더 나아가 물리학 및 기초과학에 대한 관심을 확대하는데 기여 (2021. 4. 12)
- **“연세대학교 부설 과학영재교육원 지도”** : 최영재 교수는 서울시 수학, 과학분야 최우수 학생들을 선발하여 운영하는 과학영재교육원 과학분과 주임교수로 물리분야 심화, 사사반 지도를 담당하여 과학 꿈나무 양성 및 진로지도를 수행
- **“사피엔스 스튜디오 대중강연”** : 사피엔스 스튜디오를 통하여 “궁극의 길이에 도전한다! 가장 큰 힘으로 가장 작은 세계를 찾아가는 여정”이라는 주제로 대중을 위한 과학 강연 (박성찬 교수, 2021. 5. 26, 2021. 6. 9)
- **“LG 디스플레이 강의”**
 - 급격한 기술 발전으로 인해 산업계 내부 인력의 재교육 필요성이 급증, 산업계로 부터의 시급한 요청으로 내부 인력 교육을 교육연구단의 참여교수가 직접 진행 (이연진 교수, 2021. 6. 14)
 - 주력 생산품인 OLED의 성능 저하 원인과 그 분석법을 분자고체의 전자구조에 기반하여 설명
 - 대학의 지식 기반을 이용하여 산업계의 직무변경자 및 신입직원의 교육을 대학이 수행, 교육연구단이 설정한 미래 대학의 역할 중 하나인 산업계 자문, 맞춤형 교육이라는 방향성에 부합
- **“나노분광학 교육”** : 나노기술연구협의회에서 주관으로 급격히 늘어나고 있는 나노 물질에 관한 분광분석 기법의 기초를 습득하기 위한 교육과정을 제공, 본 교육연구단의 목표중 하나인 산업사회 문제 해결을 위한 기초과학의 직접적 기여를 단적으로 보여주며 문제해결 프로그램 수행이라는 비전과도 잘 부합 (이연진 교수, 2021. 7. 10-29)
- **“한성과학상 특강 및 토크 콘서트”** : 김근수 교수는 제 4회 한성과학상 물리분야 수상자로서 한성재단 과학영재 중고등학생 200명을 대상으로 “양자물질 디자이너”라는 주제로 특강 및 토크콘서트를 수행 (2021. 8. 15)
- **“제12회 응집물질물리 여름학교 강연”** : 전국 물리학과 대학원생을 포함한 200명의 학생에게 전자현미경 연구 분야를 개괄적으로 강의, 전자현미경의 기본 동작 원리, 전자회절, 이미징, 최신 연구 동향까지 다방면의 내용을 강연에서 다루어 신진연구자들의 교육에 이바지 (김관표 교수, 2021. 8. 24-27)

교육과정 운영현황 ④ 학생 중심 자율 커리큘럼 제도 운영실적

- 학위 취득을 위해 반드시 이수해야 할 ‘필수과목’ 지정 최소화
- 이수 교과목 선택은 학업지도위원회의 조언을 얻어 자율적으로 결정
- 학생 본인의 진로와 연구 관련성을 고려하여 자율적 수업 이수
- 융합적 사고력 신장을 위한 폭넓은 인접 분야 탐색을 적극 장려

학사 운영현황 ① 장학제도 운영성과

- 국내 최우수 대학원생 및 외국인 대학원생 유치를 위한 획기적 장학제도를 도입하여 운영 중
- **동문회 병학장학금**: 입학성적이 우수한 대학원 신입생 11명에게 3300만원의 장학금 지급 (2020-2학기)
- **이영진 동문기념 장학금**: 입학성적이 우수한 대학원 신입생과 성적 우수 재학생 11명에게 3100만

원의 장학금 지급 (2021-1학기)

- **연세물리우수연구상:** 연구논문우수성과 대학원생 6명에 500만원 지급 (2021-1학기)
- **연세물리연구조교:** 신규교과목 개설 준비를 위한 담당조교 선정, 5명에 500만원 지급 (2021-1학기)
- **연세물리온라인교육조교:** 외국인 유학생 정착업무 담당, 머신러닝연구 및 교육 담당 등 6명에 645만원 지급 (2021-1학기)

학사 운영현황 ② 연구윤리 및 안전교육의 의무화 실시

- 연세대학교는 교내 연구자들의 연구 진실성을 포함한 연구 윤리에 대한 지속적 교육의 필요성을 인식, 체계적/효율적 연구윤리 의식 고양을 위해 관련 정보를 연세대학교 연구윤리 홈페이지 (<https://yure.yonsei.ac.kr/main.do>)를 통해 제공
- 연구윤리 교육과목을 대학 차원에서 개설하여 필수과목으로 운영

2 연세 물리 교육 연구단의 교육과정 및 학사 운영계획

교육과정 개선계획 ① 창의적 교육 프로그램 확대운영

- **온라인 강좌 활용:** 시간과 장소에 구애받지 않는 효율적으로 지식 습득
 - 콜로퀴움 강연 동영상 보관 및 on-demand 대여
 - 학부 및 대학원 수업 중 Flipped Class 과목 동영상 보관 및 on-demand 대여
- **Learning by Teaching (LT):** 학생이 단순 교육 수혜자가 아닌 적극적인 참여자 또는 교육의 조력자 역할을 수행, 관련 지식에 대한 깊이 있는 이해를 도모하고 의사소통 능력 증진 기회 제공
 - 대학원생 및 신진 연구자의 연구 결과물이 수업의 프레임을 통해 전달됨으로써 체계화된 학술 결과 전달과 소통 훈련이 이루어짐.
 - 동료 대학원생이 수업 진행에 주도적으로 참여함으로써 보다 활발한 질문/토론의 장 확보

교육과정 개선계획 ② 연구 중심 특별 교육 프로그램 확대운영

- **“최신 고급 연구 방법론: 머신러닝, 빅데이터, 양자컴퓨팅”** : 2021-2학기 개설 (유휘동 교수)
 - 목표: 머신러닝 및 양자컴퓨팅 분야 최신 연구기법 소개
 - 진행방식: 다양한 연구분야에 적용할 수 있는 예제 활용
 - 수업개요: 최근 10년간 비약적 발전을 이루며 과학 및 기술 분야에 활용되고 있는 머신러닝, 빅데이터, 양자컴퓨팅 분야 연구의 최전선에서 논의되고 있는 방법들을 소개
- **“첨단물리 연구방법론: 이론과 실제”** : 2022-1학기 신규 개설 예정 (최영재 교수)
 - 목표: 연세 물리 교육 연구단 내 공동연구 네트워크 형성
 - 진행방식: Learning by Teaching (주당 강의 2시간, 실습 2시간)
 - 수업개요: 참여하는 실험 및 이론 연구실의 최신 연구 성과 소개, 실험장비 및 이론연구 접근방식의 자세한 소개를 통해 연구실간 공동연구 주제 발견
- **“KCMS Lectures on Collider Physics (season 1)”** : 2021-2학기부터 강의진행 (유휘동 교수)
 - 유휘동 교수가 참여하고 있는 한국 CMS 연구단이 KCMS Lectures on Collider Physics 강좌를 개설, 대학원생들이 최신의 입자물리 특히 collider를 기반으로 하는 물리의 기초와 최신 연구 결과들을 배울 수 있는 기회 제공

교육과정 개선계획 ③ “위드 코로나” 대비 교육의 국제화 역량 강화

- 해외 대학과의 복수/공동학위 제도: 대학원생/신진연구인력의 국제적 커리어 형성 기간 단축 및

비용 절감을 통한 취업 및 진학 지원

- 해외 첨단 연구시설 활용 등 장단기 해외 연수 적극 지원
- 해외 석학 방문 특강 프로그램: 국내 장기 체류가 어려운 해외석학을 초청하여 집중강의를 운영하고 이를 정규학기 개설 교과목으로 인정
- **Pre-doc 제도:** 교육연구단 우수 대학원생을 pre-doc으로 선정하여 해외 우수 연구기관에 파견함으로써 학위 취득 후의 현지 기관으로의 취업 기회를 실질적으로 제고

학사 운영계획 ① 장학제도 확대

- 국내 최우수 대학원생 유치를 위한 장학제도 확대 계획
- **Becker Graduate Fellowship:** 물리분야에 창의력이 뛰어난 우수 학부생 3명에게 2022-1학기 대학원 입학시 장학금 제공예정, 입학 후 5학기 동안 매학기 1인당 300만원씩 지급, 입학 첫해 동문장학금 1인당 500만원 추가 지급
- **Underwood Graduate Fellowship:** 대학원 신입생 중 매년 최우수 입학생 1인 선정
- **Y-GF (Yonsei Graduate Fellow) 제도:** 등록금, 생활비 100% 지원
- **대학원생 연구집중년 제도:** 우수한 연구 능력을 보이는 대학원생에게는 의무 조교 시수를 줄여주고 그에 상응하는 특별장학금을 지원하여 연구 집중도 제고

학사 운영계획 ② 학업지도위원회를 통한 체계적 교육 지도

- 학생별 희망 연구 분야에 맞추어 2인(희망 연구 분야 전공 교수 중 1인과 대학원 주임)으로 구성된 학업지도위원회가 학업계획 수립 자문
- 사업단 내규에 따라 입학 후 1학기 종료 이전에 학생이 논문지도교수를 결정하면 기존 학업지도위원회는 논문지도교수를 포함한 3인으로 전환
- 3인의 학업지도위원회는 매 학기 해당 학생의 학업 진행 상황을 검토, 필요한 경우 학업계획 수정을 제안하는 등 학업 전반 지도
- 자격시험 합격 직후 학업지도위원회는 논문지도위원회로 전환하여 학위 논문 연구 계획 수립 및 연구 진행 지도
- 논문지도위원회는 매 학기 해당 학생의 논문 연구의 진척 등에 관해 대학원 주임에게 보고

학사 운영계획 ③ 연구 수월성 확보를 위한 자격시험 개선

- 입학 후 가능한 한 빠른 시기에 자격시험을 통과하도록 지도(박사과정 4학기 이내, 석박사 통합과정 6학기 이내)
- **1단계:** 인재 트랙별로 자격시험 과목을 특성화하여 전통적 기초과목 중심의 자격시험에서 연구 중심의 자격시험으로 단계적 변화 추진
- **2단계:** 자격시험을 연구계획서 발표방식으로 전환하여 연구에 전념할 수 있는 시점을 최대한 앞당기도록 유도

향후에도 분야별 특성을 고려한 맞춤형 교육프로그램을 통해 「학습을 통한 연구, 연구를 통한 학습」으로 이어지는 교육-연구 선순환이 지속되도록 교육과정과 학사운영을 혁신해 나갈 계획이다.

2. 인력양성 계획 및 지원 방안

2.1 최근 1년간 대학원생 인력 확보 및 배출 실적

〈표 2-1〉 교육연구단 소속 학과(부) 대학원생 확보 및 배출 실적

(단위: 명)

대학원생 확보 및 배출 실적					
실적		석사	박사	석·박사 통합	계
확보 (재학생)	2020년 2학기	10	15	105	130
	2021년 1학기	12	17	111	140
	계	22	32	216	270
배출 (졸업생)	2020년 2학기	3	10		13
	2021년 1학기	3	8		11
	계	6	18		24

2.2 교육연구단의 우수 대학원생 확보 및 지원 계획

본 교육연구단은 3대 혁신 요소인 인재-지식-인프라가 선순환을 통한 교육 혁신 생태계 속에서

- ① 자율성과 자주성을 갖춘 창의적 인재 (Creativity),
- ② 비판적 사고를 가지고 탐구하는 인재 (Critical Thinking),
- ③ 초연결 네트워크에서 협업을 통한 문제해결력을 갖춘 융합적 인재 (Connection)

를 양성하기 위해 우수 대학원생 확보를 위한 다양한 지원 프로그램을 계획/운영 중 이다. 특히, 입학 후 중도 하차하는 일 없이 (“낙오자 Zero ”) 사회에 우수한 인재로 사회에 진출할 수 있도록 입학-성장/발전-사회진출 단계별 맞춤형 지원 계획을 수립하여 지원해 오고 있다. 본 교육연구단의 단계별 지원 계획과 관련 대표실적 및 향후 보완 계획은 아래와 같다.

(1) 입학·정착 단계

본 교육연구단은 장학제도 설명회, 강의 개설, 연구 분야 소개발표회 등을 통해서 예비 대학원생들의 대학원 진학을 독려하고 신입 대학원생들의 정착을 돕기 위한 단계적으로 지원하고 있다. 특히 연구 분야 탐색을 위한 과목 개설이나 장학제도 설명회는 학부생들의 큰 호응을 얻고 있으며 최근 대학원 진학을 증가로 이어지고 있다.

① 신입생 확보 및 정착 프로그램

- **계획** : 대학원 신입생 및 잠재적 대학원 신입생들에게 입학 전 대학원 장학제도를 소개
- **대표실적** : 본 교육연구단 연구단 조두희 교수는 학부생 및 대학원 신입생들에게 BK-장학제도 및 연구 분야를 소개하는 설명회를 매학기 진행하였음. 특히 현 대학원 학생들에게도 매학기 장학생 선정전에 장학제도 관련 설명과 장학생 선발에 대한 규정들을 설명하여 투명하고 공정한 장학제도를 운영하고 있다. 이 때 대학원장 및 담당 행정 직원이 동석하여 학생들의 행정적 부분에 있어 의문 사항 및 건의 사항을 수렴하여 제도 운영에 반영하고 있다.
- **향후계획** : 설명회를 정례화하고 학생들에게 자주 받는 질문에 대한 응답 내용을 문서화 하여

언제든지 연람이 가능하도록 할 계획이다.

- **계획** : 연구 분야별 튜토리얼 과목 또는 Winter/Summer School 개최
- **대표실적** : 본 연구단은 학부 3~4학년 학생들이 진로 탐색을 위한 기회를 얻고자 하는 요구가 많다는 것을 교수님들의 개별 면담 사례들로부터 파악하고 이를 위한 분야별 다양한 과목들을 전공 선택 과목으로 개설하여 학생들에게 큰 호응을 얻고 있다. 대표교과목으로는 물리학 전반의 연구 분야 탐색을 위한 세미나 수업인 **첨단물리학의 세계 (조두희 교수)**, 응집물리분야에 대해 최신 연구 동향 및 수요 개념을 소개한 **양자 물질 연구 (김근수 교수)**, 응용물리분야에 대한 진로 탐색 기회를 제공한 **응용물리입문 (김관표 교수)** 등의 수업을 신설하였다. 또한 **포스터 발표회를 정례화** 하여 학부 및 대학원생들에게 연구 분야 및 성과를 소개하고 상호 교류할 수 있는 자리를 마련하였다.
- **향후계획** : 학부생을 대상으로한 분야 탐색을 위한 수업을 지속적으로 개설할 예정이다. 국내외 연구 기관 전문가 초빙하여 단기 School을 개최하고, 외부 기관에서 분야별로 개최되는 summer 또는 winter school에 대한 참여를 독려하고 지원할 계획이다.

▪ **계획** : 연구실 인턴 프로그램을 통한 연구 분야 탐색 기회 및 관심 유도

- **대표실적** : 학부생 및 대학원 신입생에게 BK 장학 제도를 설명하는 시간에 연구 분야 및 인턴 프로그램을 함께 소개하고 있다. 많은 경우 대학원 입학 전에 최소 2개 이상의 연구실에서 연구 분야를 경험해 보고 본인에게 흥미로운 분야를 선택하여 대학원에 진학하는 비율이 늘어나고 있다.
- **향후계획** : 인턴프로그램에서 연구 성과로 이어지는 프로그램 개발 독려하고 학생들의 성취감이 진학으로 이어지도록 지원하고자 한다.

② 자율성을 최대한 보장하는 지식창출 교육

- **계획** : 자율적 교육과정 선택 보장 / 학생들의 요구를 적극 수용한 커리큘럼
- **대표실적** : 기존 2개 교육트랙의 벽을 허물고 자율적 교과목 선택, 다학제간 팀티칭, 폭넓은 인접 분야 교과목 수강 허용으로 혁신 융합 능력을 기를 수 있도록 노력하고 있다. 특히 최근 관심이 폭발적으로 증가하는 양자 정보 기술 연구 및 교육을 위해서 **관련 분야 전문 인력인 조영욱 박사를 신입 교원으로 채용**하였다. 2021년 2학기 관련하여 학부생을 대상으로 한 **양자정보과학 수업을 신설하여 강의 (조영욱 교수)**하였다. 또한 2021년 2학기 **최신고급연구방법론: 머신러닝, 빅데이터, 양자 컴퓨팅**이라는 과목을 신설하여 강의 (유휘동 교수)하고 있다. 양자우주, 양자물질, 양자응용 분야의 최신 연구 동향을 파악하고 연구에 바로 응용이 가능하도록 돕는 수업 개설에 대한 요구를 적극 수용하여 **입자물리특별연구 (박성찬 교수)**, **응집물리특별연구(김근수, 조두희 교수)**, **응용물리특별연구(이연진 교수)**를 신설하여 강의하고 있다.
- **향후계획** : 설문을 통하여 학생들의 요구를 지속적으로 수용하여 과목 개설에 반영하고자 한다. 강의 평가를 통해 신설 과목을 적극적으로 개선해 교육 수요자(학생)이 만족하는 교육프로그램을 제공할 계획이다.

③ 외국인 대학원생 특별지원 프로그램

- **계획** : One-stop 지원센터 및 외국인 대학원생 장학금
- **대표실적** : 연세대학교에서는 백양누리 글로벌라운지에 외국인 대학원생 지원센터 운영되고

있다.

- **향후계획** : 현재 이미 정착하여 대학원 생활을 하고 있는 외국인 학생을 신입 외국인 학생의 정착을 돕는 멘토 제도를 학과에서 추가 운영할 계획이다. 글로벌리더펠로십, 우수외국인 장학금 I / II / III 등을 활용하여 외국인 학생을 적극적으로 수용하고 지원하고자 계획하고 있다. 또한 학과 교수들이 개별적으로 받는 경우가 많은 외국인 학생 및 박사 후 연구원들의 지원서들을 학과가 통합적으로 관리 운영하여 최우수 외국인 학생을 선발하는 방법을 논의 중이다.

(2) 성장·발전 단계

본 교육연구단은 대학원 진학 후 학생들이 세계적인 수준의 연구를 수행할 수 있는 능력을 교육 및 연구 프로그램을 통해 기를 수 있도록 지원하고 있다. 교육 과정에서는 학생들의 자율성을 보장함과 동시에 밀착 지도를 겸함으로써 중도 포기하는 학생이 없도록 (“낙오자 Zero”) 관리하고 있다.

① 낙오자 zero 시스템 구축

- **계획** : 박사과정 자격시험 개선
- **대표실적** : 기존의 교과목 문제 풀이형시험에서 실제 연구와 깊게 관련된 **구술형 연구 주제 발표**로 자격 시험을 개선하고자 하는 계획을 수립하고 있다. 2022년 부터는 과거의 방법과 새로운 방법 중 학생이 선택하여 자격시험에 응할 수 있도록 하는 하여 혼란을 줄이고 점차 본인이 문제를 정의하고, 풀어나가는 과정에 초점을 둔 선진적 방법으로 자격 시험을 개선하고자 한다, 특히 연구 중심 내용으로 진행하여 합리적 연구주제 선정 및 빠른 연구 정착에 도움을 주고자 한다.
- **향후계획** : 자체 면담 결과에 따르면 학생들은 연구와 밀접하게 연관된 교육을 통해 도움을 받고자하는 요구가 가장 큰 것으로 들어났다. 본 교육연구단은 자격시험 개선뿐만 아니라 교육 프로그램에서도 교육을 통해 연구를 익히는 다양한 과목들을 신설하여 통해 학생들의 연구력 증진을 도모할 계획이다.

② 연구 맞춤형 수업 개설: 창의적 연구인재 육성 교육

- **계획** : 해외석학 및 국내외 전문가 초빙 집중강의 개설 / 융합교육과정 개발
- **대표실적** : 본 교육연구단은 해외 우수 대학 및 기관과의 워크샵을 정례화하여 최신 연구 동향을 파악할 수 있는 기회를 학생들에게 제공하고 있다 (아래 맞춤형 국제화 교육 부분 참고). 또한 다양한 분야의 연사를 정기적으로 초청하여 강연을 듣는 콜로퀴움을 정기적으로 운영함, 특히 콜로퀴움 전,후로 참여 학생간의 자유롭게 토론할 수 있는 시간을 배정하여 타 분야에 대한 이해를 통해 융합적 사고를 함양할 수 있도록 기회를 제공하였다.
- **향후계획** : 양적으로 많은 교육 기회는 학생들이 연구에 집중하기 어려운 상황을 만들 수 있다. 분야별 집중 강연 및 세미나를 활발히 진행해 오고 있는바 전 분야를 아우를 수 있는 질 높은 특별 강연들을 계획하여 다양한 연구 분야 학생들이 도움을 받을 수 있도록 하고 학생간 상호 교류할 수 있는 기회도 제공할 계획이다.
- **계획** : 산학프로그램 학술연수(석/박사과정) 과정 확대를 통한 사회 기여
- **연구단 대표성과** : YU-KRISS 융합반도체 학과 (학과장 : 조만호 교수)를 신설하여 국책 연구소와 긴밀한 협력 연구를 통한 인재 양성으로 도모하고 있다.
- **향후계획** : 현재 본 교육연구단에서 학위과정을 하고 있는 연수 인원들을 적극적으로 수용하고

산업 문제 해결을 위한 교육 및 연구 프로그램 개발에 자문 역할을 할 수 있도록 한다.

③ 맞춤형 국제화 교육

- **계획** : 해외 저명대학과 정례 워크숍

- **대표실적** :

- ✓ **연세-버클리 고체 물리 워크숍 (온라인)**

4단계 BK 사업을 시작하며 미국 대표 연구 중심 대학인 University of California, Berkeley 와 응용 및 응집 물리 분야 워크숍을 진행하였다. 응집 및 응용 물리 전반의 최신 연구 동향으로 파악할 수 있었고, 세계 저명 학자 및 해외 저명대학 대학원생들과 인적 네트워크 형성할 수 있는 기회를 제공하였다. 총 8명의 교수가 연구 성과를 발표하였고 모든 대학원생들이 참석할 수 있도록 진행하였다. 교육 연구단의 연구 발전 방향에 대해서 자문을 얻기도 했다. 앞으로 워크숍을 정례화하고 학생 간 교류로 확장하는 방향을 모색하고 있다. 최근 본 교육연구단 출신의 박사 (류세희, 최영우) 박사 후 연구원으로 활발한 연구를 진행하고 있는 대학이기도 하다.

- ✓ **The 17th Saga-Yonsei partnership program on High-Energy Physics 2021 (온라인)**

2004년부터 연세대 물리학과와 일본 사가대학 물리학과 입자물리 연구진 사이에 Saga-Yonsei 입자물리 공동워크숍을 매년 진행해 오고 있다. 2021년 1월에는 연세대 주최로 진행된 제17회 공동워크숍에서는 총 8개의 교수 강연(90 min. each), 3개의 신진인력 세미나 (30 min. each), 10개의 대학원생 발표 및 3개의 그룹 과제 수행/발표가 진행되었다.

- ✓ **Asia-Pacific Workshop on Particle Physics and Cosmology 2021 (온라인)**

Asia-Pacific Workshop on Particle Physics and Cosmology 2021은 최신 연구 성과를 교류하는 자리로 온라인으로 진행되었으며 한국, 일본, 중국, 대만, 호주 등 아시아 지역의 100명 이상의 연구자들이 모여 토의를 진행하였다. 박성찬 교수는 메인 주최자로 해당 학회를 진행하였다.

- **향후계획** : 진행중인 워크숍을 정례화 또는 다양화하고 연구 성과 및 인적 교류뿐만 아니라 교육연구단의 교육 및 연구 프로그램에 대해서 해외 연구자들에게 자문을 얻는 기회로도 활용할 계획이다.

- **계획** : 외국어 능력 향상 교육

- **대표실적** : 한학기 평균 60%의 과목이 영어 강의로 개설되고 있으며, 모든 박사 학위 논문은 100% 영어로 작성되는 것을 원칙으로 하고 있다. 영어 논문 작성 및 발표에 대해 도움이 되는 강의들은 연세대학교에서 제공하는 영어 논문 작성법, 연구 윤리, 효율적 논문 작성법과 같은 온라인 수업을 적극 홍보하고 수강하도록 권장하고 있다.

- **향후계획** : 대학에서 제공한 다양한 온라인 교육 콘텐츠를 활용한 외국어 강의 활용하도록 권장한다. 해외 학회 참석시 구두 발표를 적극 권장하고 우선 지원할 계획이다.

- **계획** : 장단기 해외연수 지원: Q³ 3개 중점분야의 특성에 따른 국제공동연구 기회 제공

▪ **대표실적 :**

- ✓ **일본 국립 고에너지가속기연구기구(KEK)를 방문 Belle II 실험 참여**

참여 연구원 : 조성진, 김용규 학생 / 지도교수 : 권영준 교수

Belle II 실험 operation에 참여, Belle II 실험을 위한 data acquisition 연구 참여, 암흑광자 탐색을 위한 Belle 실험 데이터 분석 연구 참여 등으로 KEK 소속 Mikihiko Nakao 교수, Shohei Nishida 교수 등과 학술 교류를 하였다.

- ✓ **로렌스버클리국립연구소 방사광 가속기 방문 광전자 분광학 실험 진행**

참여 연구원 : 류세희 박사 / 지도교수 : 김근수 교수

미국 로렌스버클리국립연구소에 소개한 방사광가속기 Advanced Light Source 빔라인 7을 방문하여 알칼리 금속이 표면에 도핑된 흑린의 밴드 구조에 대한 각분해광전자분광 실험 및 연구를 수행하였다. 최근 관련한 연구 결과가 Nature지에 게재 되었다.

- ✓ **유럽핵입자물리연구소(CERN)에 방문**

참여 연구원 : 조용수 학생 / 지도교수 : 박성찬 교수

유럽핵입자물리연구소(CERN)에 방문하여 최근 입자물리학계에서 많은 관심을 모으고 있는, 액시온유사입자(Axion-like particles)로부터 일반적으로 발생하게 되는 렙톤수 비보존(Lepton-flavor-violation)과정과 그에 대한 탐색으로 MEG-II, MEG-II-fwd 등의 후속실험에서 직접 사용가능한 트리거 조건을 제시하는 것을 논의하였다.

- **향후계획 :** 다양한 분야에서 해외 방문 연구를 통해 수준 높은 연구 성과를 만들어 오고 있다. 매 학기 해외 방문 연구 계획을 파악하여 체계적 지원이 이루어지도록 관리할 계획이다. 또한 교내 해외 공동 연구 지원 프로그램을 적극 활용하여 더 많은 학생들에게 해외 연수 기회를 제공하고자 한다.

④ 장학제도

- **계획 :** 다양한 장학제도를 통한 연구 집중 환경 제공

▪ **대표실적 :**

- ✓ **베커 장학금 신설**

최우수 대학원 입학 (통합과정) 학생을 선발하여 매학기 300만원의 장학금을 지급하여 초기 연구 정착을 돕고 최우수 학생들이 박사 학위 취득을 통해 연구 분야로 진출하도록 독려하고 있다. 최우수 대학원 입학 (통합과정) 학생을 선발, 첫째 대학원 정착 지원금 500만원을 지급하고 있다.

- ✓ **우수 교육 및 연구 조교 장학금**

교육 및 연구에 기여도가 높은 우수 대학원생들에게 추가 장학금을 지급하고 있다,

- ✓ **조교 장학금**

학부 및 대학원생들이 수강하는 전공 과목에서 조교 업무를 수행하는 경우 추가 조교 장학금을 지급하고 있다. 업무에 대한 설명과 장학 제도에 대해서 사전 설명하고 본인의 연구에 방해가 되지 않는 선에서 학생들이 자유롭게 신청하고 있다.

- **향후 계획 :** 안정적 지원을 위해서 수혜 학생 및 범위를 체계적으로 관리하고 좀 더 많은

학생이 연구에만 집중할 수 있도록 경제적 지원을 할 계획이다. 학부 및 대학원생 대상 장학제도 설명회를 정기적으로 개최하여 투명하고 공정하게 관리할 것이다. 연구집중년 제도, Young Research Team, 주니어 융합 연구 그룹 등 우수 연구 및 학생 주도 공동 연구를 장려하는 장학제도를 신설하여 운영할 계획이다. 또한 문화(여가)활동 지원을 위한 장학제도도 신설하여 지원할 예정이다.

(3) 사회진출 준비 단계 진로지도 강화

본 교육연구단은 사회 진출이 수월할 수 있도록 체계적인 지원을 하고 있으며, 사회 진출 후 필요한 역량 및 소양이 교육 및 연구를 통해 자연스럽게 길러질 수 있도록 다양한 프로그램을 운영하고 있다.

① 대학원생 교육 참여 프로그램

- **계획** : Learning by Teaching (LT) / Undergraduate Tutorial (UT) 등 대학원생 강의 참여
- **연구단 대표성과** : 본 교육 연구단은 조교 이외에 대학원생이 교육에 참여할 수 있는 다양한 프로그램을 운영 중이다. 입자 물리 분야에 대한 연구 주제를 탐색하고 최신 연구 동향을 파악하고자 학생 제안으로 개설된 입자물리특별연구과목은 2020년 2학기 및 2021년 1학기 박사과정 학생이 강의 업무를 일부 맡아 진행하였다.
- **향후 계획** : 교육에 있어 대학원생의 역할을 수요자에서 제공자로 넓혀 다양한 기회를 제공하고자 한다.

② 취업·창업 지원 프로그램

- **계획** : Pre-doc 제도 (해외 박사 후 연구원 지원자 지원 프로그램)
- **연구단 대표성과** : 해외 우수 연구 기관에 박사 후 연구원으로 채용이 되는 기회를 열어 주기 위해 학위 취득 시점에 해외 공동 연구 및 워크샵 참석 등을 지원하고 있다. 최근 박사 학위를 받는 최영우 학생(지도교수: 최형준)은 본 연구단에서 주최한 연세-버클리 고체 물리 워크샵에 참석하였고 박사후 연구원 채용 전 버클리 대학 그룹과 온라인 미팅을 통한 공동 연구를 진행하였다.
- **향후 계획** : 취업 사례에 대해서 체계적으로 관리 Student Career Database 하여 추후 대학원 진로 지도에 활용 한다. 박사 후 연구원에 관심이 있는 대학원생들에게 장단기 해외 연수 지원 및 해외 학회 참여 지원을 통해서 적극적인 해외 진출을 도울 계획이다. 산업·사회문제 연계과목 개설을 통해 산업체에서 필요한 지식을 습득할 수 있는 기회를 제공하고 본인 연구 분야의 적용 가능성을 적극적으로 생각해 볼 수 있는 기회를 마련한다.

2.3 참여대학원생의 취(창)업의 질적 우수성

<표 2-2> 2021년 졸업한 교육연구단 소속 학과(부) 대학원생 취(창)업률 실적 (단위: 명,%)

구 분	졸업 및 취(창)업현황 (단위: 명, %)						취(창)업률(D/C)×100	
	졸업자(G)	비취업자(B)			취(창)업대상자(C=G-B)	취(창)업자(D)		
		진학자		입대자				
		국내	국외					
2021년 2월 졸업자	석사	3	1	0	1	1	0	0%
	박사	10	X		0	10	10	100%
2021년 8월 졸업자	석사	3	1	0	0	2	2	100%
	박사	8	X		0	8	7	87.5%

① 졸업생 현황 분석

본 교육연구단은 지난 BK21 사업기간 중 우수한 연구중심대학으로의 전환을 위해 석박사통합·박사과정 입학생 비중을 지속적으로 향상시켜 왔으며, 지난 한해 18명의 박사와 6명의 석사를 배출하였다. 이중 BK 지원을 받은 13명의 박사는 전원 국내외 대기업, 연구소, 대학에 연구원으로 취업되었다, 과거 응용 분야에서는 취업을 선호하는 경향이 강했지만 BK 지원이 후 많은 학생들이 대학 및 연구소에 박사후 연구원으로 취업하는 사례가 늘어나고 있다.

② 우수 취업 실적

본 연구단 출신 석/박사들은 국내외 기업 및 연구 기관에서 활발한 사회활동을 하고 있다. 특히 BK 참여 박사(13명)은 전원 취업을 하였다. 특히 응용 물리 분야에서 학위 연구를 한 박사들은 대기업 연구소에 다수 취업하였다, 과거 산업체 취업에 편중되는 경향이 있었지만 BK 지원 이후 국내외 박사 후 연구원을 지원하거나 연구소에 취업을 하는 사례들이 늘어나고 있는 추세이다. 현재는 산업체와 학계 진출 (박사 후 연구원 또는 연구소)이 BK 참여 박사 기준 약 1:1 비율로 고르게 인재를 사회에 배출하고 있는 것으로 평가된다. 특히 지난 1년간 2명의 석사가 박사까지 학위 과정을 이어가기 위해 본교 대학원에 진학하였다, 이는 본 교육연구단의 우수 학생 유치 및 낙오자 zero를 위한 노력의 성과라고 평가된다.

① 산업체 진출 대표 실적

송준호, 유상혁, 신형근, 백민, 황수빈, 박명욱 박사는 본 연구단 연구 분야인 양자 응용 분야에서 학위과정동안 연구 활동을 성공적으로 마무리하였다. 주로 유,무기 반도체 및 나노 소재를 활용한 소자 개발 관련 연구를 수행하였고 차세대 반도체 소자 개발 또는 이를 위한 소재 발굴 등에서 연구 업적(논문 및 특허)을 쌓아 나갔다. 현재는 학위 기간의 연구 경험을 바탕으로 삼성 전자 취업하여 연구원으로 활동 중이다.

② 학계 진출 대표 실적

이양진, 최영우, 박한범, 정연수, 조용재 박사는 본 연구단 연구 분야인 양자 응용과 양자 물질 분야에서 학위과정동안 연구 활동을 성공적으로 마무리하였다. 특히 이양진 박사는 전자 현미경을 이용한 2차원 물질 및 이형 접합 구조에 대한 연구 성과를 인정받아 세종펠로우(한국연구재단)에 선정되어 박사 후 연구원으로 연구 활동을 이어가고 있다. 최근 본 연구단이 주최한 연세-버클리 고체 물리 워크샵을 계기로 Alex Zettl 교수 연구실로 파견을 나가 해외 공동 연구를 수행하고 있다. 최영우 박사는 이론 계산을 이용하여 비틀어진 2차원 물질의 전자 구조 및 초전도 현상의 원인을 규명하는 연구 성과로 연구자로서의 발전 가능성을 높게 인정받아 버클리 대학에 박사 후 연구원으로 연구 활동을 이어가고 있다. 박한범, 정연수, 조용재 박사는 반도체 소재 및 소자 개발에 대한 연구로 연구 능력의 우수성을 인정받아 박사 후 연구원으로 연구 활동을 이어가고 있으면 해외 기관에서 활동하기 위한 준비를 병행하고 있다.

② 추진 계획

본 연구단은 원활한 사회 진출이 이루어지도록 다양한 방향의 지원을 아끼지 않고 있다. 특히 사회 진출과 학계 진출을 구별하여 맞춤형 지원 프로그램을 시행하고 있다. 산업체 취업을 돕기 위해서 산업체에서 요구하는 지식 또는 능력을 겸비하기 위한 사회문제 해결형 교육 및 연구 프로그램 개발하여 연구 성과가 취업으로 이루어 질 수 있도록 한다. 산학장학생 지원 및 다양한 산학 프로그램을 유치하여 연관된 연구 활동이 취업으로 이어지는 기회를 제공한다. 학계 진출의 경우 졸업

시기에 해외 진출을 위한 지원 시스템을 만들어 지원한다. 해외 우수 기관과의 워크숍 참여, **공동연구 수행, 해외 학회 발표 등을 우선 지원 (Predoc 제도)**하여 적극적으로 해외 진출을 장려하고 지원할 계획이다. 또한 석사로 지원한 학생들의 박사 진학을 독려하고 통합과정 전환을 통해 연구에 연속적으로 집중할 수 있는 기회를 제공하고자 한다.

3. 참여대학원생 연구실적의 우수성

① 참여대학원생 저명학술지 논문의 우수성

1 우수연구실적의 정의 및 교육연구단의 전략

- ◎ 본 교육연구단은 ① 새로운 미래 지식의 기반이 될 연구, ② 학문적 기여도와 파급력이 높은 연구, ③ 사회 및 산업 문제 해결을 위한 연구의 3대 성과를 우수실적으로 정의하고, ① (지식) 연구 밀접 교육 프로그램 제공하고 ② (인재) 사업단 인력(학생, 신진인력, 교수), 국내외 연구자, 동료 집단과 자율적인 협업이 진행될 수 있는 ③ (인프라) 초연결적 연구 환경을 구축하여 국제적 경쟁력을 갖춘 인재를 배출하고자 한다.
- ◎ 우수연구실적이 창출되는 과정을 분석, 연구 분야별 맞춤형 지원 시스템을 개선·발전 시켜나가, 대학원생의 연구 수월성을 혁신하고 세계적 경쟁력을 갖춘 연구 성과가 확대되도록 노력한다.

2 참여 대학원생의 대표적인 연구실적 19건

- 박도윤 학생(제1저자), Nature 596, 68-73 (2021)
Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals
- 최원준 학생(제1저자), Advanced Materials 2103079 (2021)
Ambipolar Channel p-TMD/n-GaO Junction Field Effect Transistors and High Speed Photo-sensing in TMD Channel
- 신형곤, 강동희 학생(공동 제1저자), ACS Nano 14, 15646-15653 (2020)
High-Performance van der Waals Junction Field-Effect Transistors Utilizing Organic Molecule/Transition Metal Dichalcogenide Interface
- 이술, 정중언 학생(공동 제1저자), Nano Letters 21, 4305-4313 (2021)
gamma-GeSe: A New Hexagonal Polymorph from Group IV-VI Monochalcogenides
- 김명진 학생(제1저자), Journal of Materials Chemistry A 9, 10316 (2021)
Tribodiffusion-driven triboelectric nanogenerators based on MoS2
- 최영우 학생(제1저자), 2D Materials 8, 035024 (2021)
Anisotropic pseudospin tunneling in two-dimensional black phosphorus junctions
- 박한범 학생(제1저자), ACS Applied Materials and Interfaces 13, 23153-23160 (2021)
Enhanced Spin-to-Charge Conversion Efficiency in Ultrathin Bi2Se3 Observed by Spintronic Terahertz Spectroscopy

- 조용수 학생(제1저자), Physical Review D 104, 015018 (2021)
Probing new physics with high-multiplicity events: Ultrahigh-energy neutrinos at air-shower detector arrays
- 김지수 학생(제1저자), Physical Review D 103, L051501 (2021)
Vector meson mass in the chiral symmetry restored vacuum
- 김용규 학생(제1저자), IEEE Transactions on nuclear science 68, 2146-2150 (2021)
Archiver System Management for Belle IIDetector Operation

3 당초 계획대비 실적 분석 및 향후 추진 계획

- ◎ 당초 계획대비 실적은 양적 지표(논문 수)와 질적 지표(환산 보정 IF와 환산 보정 ES)로 나누어 분석하였다. 우선 양적 지표로서 지난 1년간 교육연구단 소속 대학원생이 제1 저자로 게재한 논문의 수는 50건 이상으로 선정 당시와 비슷한 수준을 유지하고 있다. 하지만 질적 지표를 살펴 보면 선정 당시 1편당 환산 보정 IF는 0.1848로부터 0.2054로 11% 증가하였고, 1편당 환산 보정 ES는 0.662로부터 1.289로 2배로 향상되었다. 이는 대학원생의 연구수월성 증진을 위해 본 교육연구단이 중점적으로 추진하고 있는 대학원생 4대 지원제도가 일정정도 효과를 나타낸 것으로 판단된다.
- ◎ 본 교육연구단은 양적 지표 중심으로부터 질적 지표 중심으로 전환하는 정책을 일관성 있게 추진하여, 향후 2차년도, 3차년도에서 점진적으로 대학원생 논문의 질적 지표를 향상시켜 나가고자 한다.

2 참여대학원생 학술대회 대표실적의 우수성

1 우수학술대회 발표의 정의와 교육연구단의 지원 전략

- ◎ 연세 물리 교육연구단은 ① 커뮤니케이션 스킬 증진을 위한 강좌, ② 학내 토론 분위기 정착을 위한 발표 및 토론식 수업 진행, ③ 소규모 학술 대회 개최를 통한 다양한 발표 훈련 기회 제공 등 비교과 또는 교과연계 교육 프로그램을 통하여 대학원생으로 하여금 우수한 연구 결과(3.1.1 참조)물을 커뮤니티에 효율적으로 전달하도록 지원하고 있다.
- ◎ 학회 발표 전에 소규모 그룹을 구성(전임교원 포함)하여 예행 연습을 시행하고 여러 차례 수정하여 효율적으로 연구 결과가 소개될 수 있도록 하고 학술대회 참석 이후에는 보고 과정을 거쳐, 향후 연구 방향에 대해서 논의하도록 관리한다.
- ◎ 분야별 특수성을 고려하여 Q³(Quantum Universe, Quantum Matter, Quantum Application) 분야가 크게 학회 참석 지원을 받을 수 있도록 배려하며 ① 발표를 통해 교육연구단의 위상을 제고하고, ② 학생들에게 분야별 전문가와의 네트워크 형성 기회를 제공하며 ③ 새로운 연구 방향이 활발히 논의될 수 있는 학술대회를 우수학술대회로 평가하여 학회 스케줄 및 내용 등의 정보를 사전 공지하고 참석 및 발표를 장려한다.

2 참여 대학원생의 대표적인 학술대회 실적 10건

- 조요셉 학생(구두), American Physical Society March Meeting, 미국/온라인, 2021

발표 제목: Doping dependence of low-energy band dispersions and magnetic properties of twisted bilayer graphene

발표 내용: 밀도범함수 이론 계산에 근거하여 마법각 비틀린 이중층 그래핀의 전자 구조와 자성 특성을 계산하였다. 마법각 비틀린 이중층 그래핀에 전자 또는 홀을 도핑하고, 도핑에 의해 밴드 구조가 달라지는 것을 연구하였고, 전자의 교환 에너지에 의해 강자성이 유도되는 가능성에 대해 연구하였다.

- 김종혁 학생(구두), American Physical Society March Meeting, 미국/온라인, 2021
발표 제목: Highly nonlinear magnetoelectric effect in antiferromagnetic Co₄Ta₂O₉ single crystals
발표 내용: 본 연구에서는 buckled honeycomb 구조 물질 중 하나인 반강자성체 Co₄Ta₂O₉에서의 비선형적인 magnetoelectric 효과에 대해서 연구한 결과를 발표하였다. 기존 Buckled honeycomb structure 연구 결과에서는 선형적인 magnetoelectric 효과가 나타난다고 보고된 바 있으나, 이는 다결정 실험 결과를 토대로 한 것이었으며, 본 연구실에서 합성한 단결정으로 측정해보았을 때 실제로는 측정방향에 크게 좌우되는 비선형적 magnetoelectric 효과를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 유사한 물질 Co₄Nb₂O₉에서의 magnetoelectric 효과의 origin에 대한 여러 연구중 2개의 sublattice에 의해 서로 다른 방향으로 magnetoelectric 효과가 나타나고 이 둘의 합으로 linear한 magnetoelectric response가 나타난다는 연구결과에 부합하는 내용으로, Buckled honeycomb structure에서의 magnetoelectric 효과의 origin에 대해 명확히 규명하는 근거가 된다.
- 황규영 학생(구두), American Physical Society March Meeting, 미국/온라인, 2021
발표 제목: Simulation study on energy and position resolutions with 4pi dual-readout calorimeter
발표 내용: 본 발표에서는 Geant4를 이용한 dual-readout calorimeter의 position, energy resolution study를 발표하였다. Dual-readout calorimeter (DRC)는 FCC와 CEPC의 CDR에 제안된 calorimeter이다. electromagnetic, hadronic particle을 동시에 측정할 수 있다. 기존 calorimeter에선 hadronic shower의 EM fraction을 정밀하게 측정하는 것에 어려움이 있었으나 서로 다른 h/e 를 가지 두 종류의 광섬유를 통해 DRC는 hadronic shower의 EM fraction을 정확히 측정하고 hadronic shower energy를 보정해주므로써 뛰어난 energy resolution을 얻을 수 있다. 또한 high granularity의 SiPM array는 뛰어난 position resolution 또한 가능하게 한다. 본 연구 결과는 DRC의 높은 수준의 position, energy resolution을 통해 CDR에 제안된 requirement를 충분히 만족할 수 있다는 점에서 중요성을 인정받았다.
- 성해숨 학생(구두), The 19th International Conference on Strangeness in Quark Matter, 미국/온라인, 2021
발표 제목: K₁/K* enhancement as a signature of chiral symmetry restoration in heavy ion collisions
발표 내용: 본 연구는 K₁과 K* 메존의 비율이 중이온 충돌 실험에서 centrality에 따라 증가하는 것을 계산함으로써 이를 통해 QGP 내에 Chiral symmetry가 회복되는 것을 볼 수 있음에 관하여 발표하였다. Chiral symmetry가 회복되는 QGP에서 입자가 생성되는 시점(Chemical freeze-out)이 되면 Chiral partner인 K₁과 K*의 개수가 같게 생성이 되지만 K₁ 메존은 시간이 지날수록 빠르게 줄어들어 관측하는 시점에서는 이 비율을 보지 못하게 된다. 하지만 70-80% centrality에서는 Hadron phase가 매우 짧아져 K₁ 메존의 갯수가 충분히 남아 있게 되고 이 차이는 thermal prediction보다 5배 많게 된다. 따라서 Chiral symmetry가 있을 때와 없을 때의 차이가 분명함을 계산하였는데 결국 실험으로도 이를 관측할 수 있음을 보여줌으로 연구의 중요성을 인정 받았다.

- 정동연 학생(구두), LIO international conference on Composite connections of Higgs, Dark Matter and Neutrinos, 프랑스/온라인, 2021

발표 제목: Primordial Black Holes in Higgs-R2 Inflation

발표 내용: 본 연구는 초기 우주 급팽창 모델 중 표준모형에서 존재하는 유일한 스칼라 입자인 힉스 입자를 이용한 급팽창의 UV 확장된 모델에서 원시 블랙홀의 생성 가능성을 연구해, 암흑물질의 후보로서의 가능성을 제시했다. 힉스 급팽창은 순수 표준모형에서 급팽창을 일으킬 수 있는 유일한 후보이나, 이 모델이 가지는 급팽창 현상들을 정밀하게 알기 위해선 모든 에너지 스케일에서의 재규격화 그룹 방정식을 풀어서 고려해야 한다. 본 연구에서는 힉스 입자의 양자 재규격화 방정식과 중력항의 추가를 통해서 힉스 급팽창에서 관측에 부합하는 원시 블랙홀이 생성될 수 있음을 보였으며, 이 블랙홀이 우리 우주의 암흑물질의 전부를 이룰 수 있다는 점을 밝혔다. 본 연구를 통해 힉스의 재규격화에 따라서 매우 다양한 현상들이 나타날 수 있음을 보여 힉스 입자에 대한 이해가 매우 중요함을 다시 한번 강조했다.
- 조성진 학생(구두), The 17th Saga-Yonsei partnership program on high-energy physics, 대한민국/온라인, 2021

발표 제목: Search for axion-like particle in $B \rightarrow K a'$ at Belle

발표 내용: 본 연구에서는 츠쿠바의 KEKB 전자-양전자 충돌기에서 실행되었던 Belle 실험의 데이터 및 몬테카를로샘플을 사용하여 ALP 탐색 연구를 진행하였다. 머신 러닝 기법과 확률밀도함수 피팅을 통하여 붕괴상한을 예측하였다.
- 장명진 학생(포스터), 제7회 한국 그래핀/2차원 소재 심포지엄, 대한민국/온라인, 2021

발표 제목: Unidirectional alignment of AgCN microwires on 1T' 2D crystals substrate

발표 내용: 이차원 물질을 활용한 이종접합 연구가 과거부터 활발히 진행되고있다. 이종접합을 통해 새로운 물리적 특성을 발견할 수 있기 때문이다. 특히 벌집모양 구조(2H)를 이용한 에피택시 연구에 국한되어 이뤄졌다. 이에 , 찌그러진 2차원 물질 위 에피택시 연구에 대해서는 미흡한 상황이다. 장명진 연구원은 찌그러진 2차원 물질 위 1차원 무기분자(시안화 은:AgCN)의 단방향 자가배열 현상을 발견하였다. 본 연구를 통해, 찌그러진 2차원 물질 위 1차원 마이크로 와이어 제작 및 투과전자현미경과 편광 라만을 통해 구조를 정밀 분석하였다. 이는 2차원 물질의 grain boundary를 마이크로 단위에서 쉽게 확인하는 표시자로 활용할 수 있다. 장명진 학생은 발표의 우수성을 인정받아 최우수 포스터 상을 수상하였다.
- 조용준 학생(포스터), 2nd International Workshop on Scanning Probe Microscopy, 대한민국, 2021

발표 제목: Anisotropic impurity states and electron scattering in Black Phosphorus

발표 내용: 본 연구 발표에서는 대표적 2차원 반도체 물질에서 일어나는 전자 산란의 시각화와 관련된 연구 내용을 발표하였다, 연구 주제에 대한 구체적인 논의 및 실험 결과 분석 방법에 대한 아이디어는 2021년 1학기 개설된 응집물리특별연구 3의 수업을 통하여 이루어졌다. 전자 산란으로 만들어지는 간섭 무늬를 시각화한 연구 결과와 광전자 분광법으로 측정된 실험결과 (본 연구단 김근수 교수 팀) 를 비교 분석하여 Pseudo spin이 전자 산란에 미치는 영향과 물질내 결함이 유도하는 특이 산란 과정에 대해서 발표하였다, 발표 내용 및 연구 결과의 우수성을 인정받아 최우수 포스터로 선정되었다.
- 조용재 학생(포스터), Materials Research Society (MRS) Spring Meeting, 미국/온라인, 2021

발표 제목: Low Voltage Operating Ferroelectric Memory Transistor with MoTe2 Channel and P(VDF-TrFE)

발표 내용: 본 연구에서는 강자성체인 P(VDF-TrFE)를 게이트 절연막으로 사용하여 MoTe₂ 채널 기반의 메모리 트랜지스터를 제작하였다. 기존의 보고된 P(VDF-TrFE)를 이용한 메모리 소자들은 최소 10 V 이상의 전압을 필요로 하는 것에 반해, 본 연구에서는 2차원 MoTe₂와 P(VDF-TrFE)의 구조적 적층법을 달리하여 8V의 작은 전압에도 쓰기/지우기가 가능한 메모리 제작에 성공하였다. 또한, H₂O₂ 컨택 처리법을 이용하여 구동전압을 10mV로 낮춤으로써 ~nW 의 매우 작은 전력을 소비하는 OLED pixel 회로응용에도 성공하였다. 본 연구 결과는, P(VDF-TrFE)/2차원 반도체 물질을 이용하여 제작된 메모리 트랜지스터 중 가장 낮은 구동전력을 보인다는 점에서 중요성을 인정 받았다.

- 이민규 학생(포스터), 2020 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 대한민국/온라인, 2020
 발표 제목: Amplified spontaneous emission in alkali vapor
 발표 내용: 본 연구에서는 2차원 반도체 물질의 에너지 갭을 정밀하게 측정한 연구 결과를 발표하였다. 반도체 물질의 에너지 갭을 측정하는 대표적인 방법은 광학적 전도도를 측정하는 것이다. 하지만 이러한 경우 본연의 전자구조가 아닌 빛으로 여기된 상태의 전자 구조를 측정하게 된다. 이렇게 빛에 의해서 변형된 상태는 경우에 따라 물질 본연의 전자 구조를 보여주지 못하는 단점이 존재한다. 본 연구에서는 빛을 사용하지 않고 미세한 터널링 전류를 측정하는 방법으로 2차원 반도체 물질의 에너지 갭을 정밀 측정하는데 성공하였다. 이 실험 결과를 광학적 전도도 측정법과 비교하여 광소자에 응용 가능성이 높은 준입자인 엑시톤의 결합에너지를 정량화 하였다. 본 연구 결과는 2차원 소재를 활용한 광소자 연구에 반드시 필요한 정량적 정보를 제공했다는 면에서 중요성을 인정 받았다.

3 당초 계획대비 실적 분석 및 향후 추진 계획

- ◎ 연세 물리 교육연구단은 대학원생의 학술대회 발표를 체계적으로 지원한 결과 2020년 9월부터 2021년 8월까지 지난 1년간 총 60건의 대학원생 발표 실적을 기록하였다. 작년부터 코로나 19로 인해 국제 학술대회 활동이 크게 위축될 수밖에 없었던 점을 감안하면 기대 이상의 실적을 기록한 것으로 분석된다. 특히 소규모 국내 거점 학술대회 보다 중규모 이상 국외 거점 학술대회에서의 발표 비중이 점차 늘고 있다는 점에서 고무적이다. 단순한 학술대회 발표 실적의 양적 확대보다 질적인 향상을 일관되게 추진해 왔던 본 교육연구단의 전략이 일정정도 효과를 발하기 시작한 것으로 분석된다. 뿐만 아니라 본 교육연구단 소속 대학원생들의 우수발표상 수상 실적이 지난 1년간 6건으로 증가하고 있는 데, 이는 발표 / 토론식 수업과 교내 소규모 학술행사 개최를 통해 발표를 지원한 전략이 주효했던 것으로 분석된다.
- ◎ 본 교육연구단은 대학원생 학술대회 발표를 적극적으로 지원하는 정책을 지속적으로 추진하여, 향후 2차년도, 3차년도에서 점진적으로 대학원생 학술대회 발표 실적을 양적/질적으로 모두 향상시켜 나가 고자 한다.

③ 참여대학원생 특허, 기술이전, 창업 실적의 우수성

- ◎ 본 교육연구단의 대학원생은 지역 및 산업 사회로부터의 상시 의견 수렴과 교육연구단의 지원을 바탕으로, 4단계 사회 기여 전략인 <문제인식>-<연구주제 설정>-<연구 및 문제해결>-<사회환원>를 수행한다. 대학원생은 4단계 전략안에서 연구성과의 사회기여라는 가치를 실현한다. 이러한 전략하에 다음과 같은 등록 특허 실적을 얻을 수 있었다.

▶ 박한범 학생: 열전 재료, 이의 제조 방법 및 열전 소자(특허등록, 미국 10,886,451, 2021-01-05)

- ▶ 김명진, 박명욱 학생: 반도체 공핍층을 이용한 마찰발전기 및 이의 제조방법 (특허등록, 한국 10-2215588, 2021-02-05)
- ▶ 송준호 학생: 압타머 기능화 된 버티컬 바이오 센서 및 이의 용도 (특허등록, 한국 10-2224686, 2021-03-02)
- ▶ 정나은 학생: 유무기 하이브리드 페로브스카이트 발광 소자 및 그 제조방법 (특허등록, 한국 10-2186853, 2020-11-30)
- ▶ 이현우 학생: 약액 공급을 위한 커넥터를 가진 광섬유 기반 무침 주사 (특허등록, 한국 10-2287079, 2021-08-02)

◎ 향후에도 당초 추진 계획인 ① 지역사회 및 산업계와의 연계를 강화하고 ② 사회(산업)문제와 연관된 교육 프로그램과 ③ 문제를 제시하고 해결할 수 있는 문제 해결능력 중심의 교육과 연구를 통해 산업·사회 기여를 늘려가고자 한다.

4. 신진연구인력 현황 및 실적

① 교육연구단 신진연구인력 현황

구분	성명	연구분야	비고
연구교수	첸포옌	QU: 입자물리	
박사후연구원	류세희	QA: 응집물리	
	와타누키 순	QU: 입자물리	

② 교육연구단 신진연구인력 연구실적

연번	신진연구인력	참여역할	연구실적	학술지명	DOI 번호/ISBN 등 관련 인터넷 link 주소
1	첸포옌	공동 제1저자	Search for new light vector boson using J/ψ at BESIII and Belle II	Journal of High Energy Physics	doi.org/10.1007/JHEP04(2021)091
2	첸포옌	공동 제1저자	Leptonic new force and cosmic-ray boosted dark matter for the XENON1T excess	Physics Letters B	doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135863
3	첸포옌	제1저자	Axion-like particles, two-Higgs-doublet models, leptoquarks, and the electron and muon $g-2$	Letters in High Energy Physics	doi.org/10.31526/lhep.2021.209
4	첸포옌	제1저자	Correlated gravitational wave and microlensing signals of macroscopic dark matter	Journal of High Energy Physics	10.1140/epjc/s10052-020-8183-4

5	류세희	공동 제1저자	Graphene p-n junction formed on SiC(0001) by Au intercalation	JOURNAL OF THE KOREAN PHYSICAL SOCIETY	10.1007/s40042-020-00010-0
6	류세희	공동 제1저자	Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered dopants metals	Nature	10.1038/s41586-021-03683-0

- Quantum Universe 교육연구팀 첸포옌 연구교수는 입자물리현상론과 우주론에 대한 연구 성과와 지식을 높게 평가받아 2021년 9월 1일 대만 칭화대 물리학과 조교수로 임용되었다.

③ 신진연구인력 교육 실적

- Quantum Universe 교육연구팀의 첸포옌 교수는 2021년 1학기 정규대학원 과목인 이론물리특강II를 개설하였다. 물리학의 대부분의 시스템은 충분히 복잡하고 분석적 솔루션이 없기 때문에 이론적 예측과 실험적 측정을 비교하기 위해 수치 계산이 필요하다. 해당 과목을 통해 입자물리학이나 다른 물리계의 문제를 해결하기 위한 수치적 방법을 소개하고, 이러한 방법을 최근 연구 주제, 예를 들어, 입자 충돌의 단면 계산 및 운동학, 힉스 입자 정밀 분석, 통계 분석, 진공 안정성 등에 적용하는 것을 강의하였다.

5. 참여교수의 교육역량 대표실적

교육역량 대표실적 ① 교육관련 수상 실적

- 박성찬 교수 : 2021년 2월 연세대학교 우수강의교수상 수상

교육역량 대표실적 ② 내부 교육 역량 제고 활동

- 유휘동 교수: “최신 고급 연구 방법론: 머신러닝, 빅데이터, 양자컴퓨터” (2021년 2학기 신규개설)
 - 최근 10년간 빅데이터, 머신러닝 및 양자컴퓨팅 분야는 비약적인 발전을 이루며 과학 및 기술 분야에 활용되고 있으며 특히 물리학 분야 전반에 걸쳐 최신의 연구 결과를 향상시키고 있음. 따라서 물리학을 전공하는 대학원생에게 다양한 연구 분야에 적용할 수 있는 예제 등을 활용하여 연구의 최전선에서 논의되고 있는 최신 방법들을 소개하는 새로운 과목을 개발하고 2021년 2학기에 개설하여 대학원생들에게 최신 연구 기법을 배울 수 있는 기회를 제공함.
- 최영재 교수: “첨단물리 연구방법론: 이론과 실제” 과목 개발 (2022년 1학기 신규개설 예정)
 - 본 연구단의 교육-연구 연계 교육에 기여하며 연세물리 교육연구단 내 공동연구 네트워크 형성을 추구하기 위한 신규 교과목을 개설함. Learning by Teaching 방식으로 강의 2시간, 실습 2시간으로 진행함. 참여하는 실험 및 이론 연구실의 최근 연구 성과를 소개하고 실험장비 및 이론 연구 접근방식의 자세한 소개를 통해 연구실간 공동연구 주제를 발굴함.
- 조영욱 교수: 양자정보과학 (2021년 1학기 신규개설)
 - 양자정보과학은 물리학의 핵심이라고 할 수 있는 양자역학의 기본 원리를 정보기술에 적극적으로 접목시키는 새로운 학문분야로 최근 양자정보과학에 대한 학생들의 교육 수요가 증대됨. 양자정보과학에 대한 개괄적인 소개와 현재의 기술 수준 및 난제에 대해 소개하는 새로운 과목을 개발하고 2021년 1학기에 개설함.
- 조두희 교수: 응집물리 특별연구 3
 - 응집물질물리학을 연구하고 있는 학생들이 서로의 지식을 자유롭게 나누고 협력 연구 가능성을

모색하는 방법으로 진행하는 과목으로 자발적인 수업 참여(발표 및 토론)으로 이루어짐. 특히 수업과 연구를 병행하는 방법으로 연구 효율을 극대화하여 본인의 연구 분야뿐만 아니라 타 연구 분야를 좀 더 깊게 이해할 수 있는 기회를 제공하여 공동 연구에 가장 중요한 역량인 융합적 사고력을 기를 수 있도록 강의를 진행함. 교수자도 본인의 연구 분야를 설명하고 함께 공동 연구를 진행한다는 가정으로 토론 및 발표에 참여하였으며, 그 중 2차원 물질에 대한 관심이 있는 두 학생이 제안한 광전자 분광법과 주사터널링 현미법을 이용한 협력 연구 계획이 구체화 되어 현재(2021년 9월) 진행 중임.

- 이연진 교수: 응용물리 특별연구 (1,2,3,4)
 - 응용물리 분야 최신 연구를 학생 간 서로 공유하는 것을 목적으로 학생 제안 교과목으로 개발함. 분야의 최전선이라고 할 수 있는 대학원생들이 실제로 연구하고 있는 내용을 매주 문서의 형태로 수강자들 간에 공유하고, 연구 내용의 진전을 업데이트하여 간단한 보고서 형태의 최종 산출물을 보고함. 이는 본 교육연구단의 연구 비전과 경쟁력을 강화하는 프로그램으로 본 교육연구단의 교육-연구 연계 교육에 기여함.
- 박성찬 교수: 이론물리특강 II (첸포엔 교수 개설)
 - 물리학의 대부분의 시스템은 충분히 복잡하고 분석적 솔루션이 없기 때문에 이론적 예측과 실험적 측정을 비교하기 위해 수치 계산이 필요함. 해당 과목을 통해 입자물리학이나 다른 물리계의 문제를 해결하기 위한 수치적 방법을 소개하고, 이러한 방법을 최근 연구 주제, 예를 들어, 입자 충돌의 단면 계산 및 운동학, 힉스 입자 정밀 분석, 통계 분석, 진공 안정성 등에 적용하는 것을 강의함.

교육역량 대표실적 ③ 외부 교육 활동 실적

- 유휘동 교수: KCMS Lectures on Collider Physics (season 1)
 - 유휘동 교수가 참여하고 있는 한국 CMS 연구단이 KCMS Lectures on Collider Physics 강좌를 개설하고 2021년 가을학기부터 강의를 진행할 예정. 국내 대학원 교육에 있어 새로운 시도로, 주제별 최고의 국내 연사를 모시고 연합 강좌의 형태로 운영함. 이를 통해 대학원생들이 최신의 입자물리 특히 collider를 기반으로 하는 물리의 기초와 최신 연구 결과들을 배울 수 있는 기회를 제공함. 유휘동 교수는 트리거 검출기 및 표준모형의 Electroweak precision measurement의 권위자로 관련 내용을 강의.
- 박성찬 교수: 달팽이 강의
 - 2017년부터 2019년까지 대학원생 및 학부생을 대상으로 “포스트 힉스 시대의 새로운 물리학“이라는 주제로 APCTP와 한국연구재단의 재정 도움을 받아 ‘달팽이 강의’ 시리즈를 운영함. 이 강의 시리즈의 이름은 한가지 주제에 대해 느리지만 매우 친절하게 강의한다는 교육 철학으로 부터 나온 것으로 현재 가장 뜨거운 주제가 되는 입자물리학과 우주론 그리고 머신 러닝에 이르는 다양한 주제에 대해 국내에서 가장 활발하게 연구하시는 교수, 연구원을 강사로 섭외하여 매우 심도 깊은 강의 프로그램임. 1년에 4-5회 정도 강의를 이어왔으며, 회당 참가 학생은 전국의 대학생과 대학원생으로 대략 50명 정도가 꾸준히 참가하고 있음.
- 오경환 교수: 과학고 물리학 프로젝트 컨설팅
 - 물리분야 R&E 참여학생과 지도교사가 참여하는 광학실험에 대한 자문을 하였음 (2021년 4월 총 2회: 대전과학고 및 인천과학예술헌재학교). 고등학교 교사와 학생, 그리고 대학교수가 한 자리에서 프로젝트에 대한 배경과 데이터 해석, 물리적 원리에 대한 논의하는 과정을 통해 과학의 사회 기여에 일조하며, 학생들의 물리학 및 기초과학에 대한 관심을 확대하는데 기여함.
- 최영재 교수: 연세대학교 부설 과학영재교육원 지도
 - 서울시 수학 및 과학분야 최우수 학생들을 선발하여 운영되는 과학영재교육원의 과학분과 주임

교수로 활동함. 물리분야 심화, 사사반 지도를 담당하여 과학 꿈나무 양성 및 진로지도를 수행함.

- 김근수 교수: 한성과학상 특강 및 토크 콘서트 (2021.08.15.)
 - 김근수 교수는 제 4회 한성과학상 물리분야 수상자로서 과학영재 중고등학생 200명을 대상으로 “양자물질 디자이너” 라는 주제로 특강 및 토크 콘서트를 수행함. 이를 통해 과학영재 학생들의 과학에 대한 관심을 확대하는데 기여함.
- 이연진 교수: LG 디스플레이 강의 (2021.06.14.)
 - LG 디스플레이의 주력 생산품인 OLED의 성능 저하 원인과 그 분석법을 분자고체의 전자구조에 기반하여 설명함. 급격한 기술 발전으로 인한 산업계 내부 인력 재교육에 기여함. 교육연구단이 설정한 미래 대학의 역할 중 하나인 산업계 자문, 맞춤형 교육이라는 방향성에 부합함.
- 김관표 교수: 제12회 응집물리 여름학교 강연 (2021.08.24.~27)
 - 전국 물리학과 대학원생을 포함한 200명의 학생에게 전자현미경 연구 분야를 개괄적으로 강의, 전자현미경의 기본 동작 원리, 전자회절, 이미징, 최신 연구 동향까지 다방면의 내용을 강연에서 다루어 신진연구자들의 교육에 이바지

6. 교육의 국제화 전략

① 교육 프로그램의 국제화 현황 및 계획

1 주요 성과 및 추진내용

- 공동 복수 학위제 추진: 프랑스 Lyon Université의 Giacomo Cacciapaglia 교수, 파리 소르본 대학의 Benjamin Fuks 교수와 복수/공동학위 프로그램을 위한 MOU 체결을 논의 중. 양교의 학위 취득 조건 등을 구체적으로 논의하였음. 특히 프랑스 The France Excellence: 프랑스 해외 대학원생 장기 지원 프로그램을 활용한 공동 지도교수 제도 추진
- 세계 저명 대학과 공동 워크숍, 학회 조직 (박성찬 교수): 동경대와 공동으로 온라인 국제학회 “Asia-Pacific Workshop on Particle Physics and Cosmology 2021 (Aug 2-6, 2021)” 을 개최. 한,중,일,대만, 시드니 대학 등 태평양 지역 주요 대학을 연결하는 학회로 각국의 대학원생, 연구원, 교수 등 총 170명 이상 참석. <https://ihepc.yonsei.ac.kr/event/130/>
- Mini-workshop on missing particle signatures and new physics at Belle II and LHCb 2021.07.05~2021.07.06 (권영준 교수) : 권영준 교수는 이스라엘 Tel Aviv 대학 Abner Soffer 교수와 Yonsei-Tel Aviv 공동연구 프로그램을 진행하면서 현재 Flavor Physics 분야의 주요 현안과제인 lepton-flavor universality 문제를 집중 탐구하기 위한 실험 방법 중 하나인 missing particle 분석법을 주제로 미니 국제 워크숍을 공동 개최하기로 의견을 모으고 추가로 3명의 조직위원들을 추가로 위촉하여 mini-workshop을 조직하고 진행하였다. 이 mini-workshop은 Covid-19 감염병 예방을 위해 전면 online으로 개최되었으며 전세계에서 185명이 등록, 참가하였다. (참가자 90% 이상 외국 대학/연구소 소속임) <https://indico.belle2.org/event/4615/>
- The 17th Saga-Yonsei partnership program on High-Energy Physics 2021 (2021.01.07-08 & 01.21-22, 권영준 교수) 2004년부터 연세대 물리학과와 일본 사가대학 물리학과 입자물리 연구진 사이에 Saga-Yonsei 입자물리 공동워크숍을 매년 진행해 오고 있다. 특히 2021년 1월에는 연세대 주최로 제17회 공동워크숍을 전면 온라인으로 진행하였다. 2021년 1월 7일-8일 이를 진행 후 학생들에게 과제를 내주고 다시 1월 21-22일 재개하여 마무리하는 일정에 따라 총 8개의 교수 강연(90 min. each), 3개의 신진인력 세미나 (30 min. each), 10개의 대학원생 발표 및 3개의 그룹 과제 수행/발표가 진행되었다. 이 mini-workshop에는 한국, 일본 외에도 미국, 스페인, 영국 등에서 총 52명이 등록, 참여하였다. <https://ihepc.yonsei.ac.kr/event/106/>

- 독일 Bonn 대학교 물리학과 콜로퀴움 강연 (권영준 교수, 2021.05.21.) 권영준 교수는 독일 Bonn 대학교 물리학과 Florian Bernlochner 교수의 초청 추천을 받아 2021년 5월 21일 “A tale of two-leptons“의 강연 제목으로 Bonn 대학교 물리학과 콜로퀴움 강연을 하였다. 이 강연에서는 최근 flavor physics 분야에서 초미의 관심이 되고 있는 lepton flavor universality의 문제와 관련된 최신 연구결과들을 소개하였다. <http://www.th.physik.uni-bonn.de/People/dagmar/kolloq.htm>
- 박성찬 교수 연구실의 조용수 학생이 CERN 학생 펠로우 선정되어 2021년 6월-12월 6개월간 CERN의 이론그룹에서 연구를 수행하고 있다.

2 국제연구자 초빙 및 국제학회 조직

- 김관표 교수는 미국 캘리포니아 버클리 대학(University of California, Berkeley)과 연계하여 연세대 - UC 버클리 온라인 워크숍(Yonsei - UC Berkeley Online Workshop on Condensed Matter Physics)을 2021년 1월 주최하였다. (초청 Prof. Alex Zettl, Prof. Steven Louie, Prof. James Analyst, Prof. Feng Wang) 2021.2.18.-19
- 김근수 교수는 스트레인 제어를 통한 각분해광전자분광 연구의 최신 동향이란 주제로 한국물리학회 파이오니어 심포지움을 개최하였다. (2020.04.22.)
- 박성찬 교수는 중력과 물리학에 대한 대학원생을 위한 온라인 시리즈 강연을 조직하였다. <https://indico.cern.ch/event/1032605/> (강연자 Kai Schumitt 박사 (CERN))
- 조두희 교수는 국내에서 정기적으로 개최되는 국제학외인 ICAMD에서 연세대학교 물리학과와 선도연구센터가 주관하는 2차원 물질에서 발견되는 흥미로운 양자 현상에 대한 연구 발표 세션을 주관할 예정이다 이 세션에서 현재 국내외에서 관련분야에서 가장활발하게 연구를 진행하는 응집 물리 이론 및 실험 분야 전문가들이 초청되어 발표 및 토론을 진행한다. 2차원 물질 연구의 최신 동향을 파악할 수 있는 기회를 제공할 뿐만아니라 향후 국제적인 연구 협력 관계를 구축해 나가는 기회가 될 것으로 기대된다. (2021.12.7. 온라인 개최 계획)
- 오경환 교수 연구실에서 EU Horizon 2020 사업 중 H2020-EU.1.3.2. - Nurturing excellence by means of cross-border and cross-sector mobility 사업을 Partanen박사가 수주하여 박사후 연구원으로 방문. 공동 연구 수행을 통해 2편의 국제논문 출간하였다.
- 유희동 교수 주도로 Korea Future Collider Workshop 2021 (summer)에 David Miller 교수 (University of Chicago) 초청하여 “Towards an interpretable data-driven trigger system“를 주제로 발표하였다. (2021.2.25.)
- 유희동 교수 주도로 Francesco Grancagnolo (INFN Lecce) 초대하여 Future Collider Monthly meeting 학회에 초청하여 “Drift chamber and Particle ID“를 주제로 발표하였다.

3 당초 계획 대비 실적 분석을 통한 향후 추진계획

- 국제 교류와 공동 연구 성과는 꾸준히 이루어 지고 있다.
- 특히 온라인 집중강연, 학회 및 세미나 초청, 발표 등이 매우 활발해졌다.
- 단, 코로나 사태의 장기화로 국제 학생 유치에는 실질적인 어려움이 있는 상황이다.
- 2022년 이후 상황을 고려하여 보다 적극적인 학생 유치 등 추진할 계획.

② 참여대학원생 국제공동연구 현황과 계획

- ◎ 본 교육연구단은 국제화 교육 프로그램을 혁신하기 위해, 연구단이 정의한 혁신의 3요소인 **인재-지식-인프라**를 중심으로 종합적인 국제화 프로그램의 목표를 설정하고 교육의 국제화 현황을 바탕으로 다양한 신전략을 수립하여 교육 프로그램의 inbound-outbound 국제화 계획을 정립하였다. Covid-19으

로 인한 해외 방문의 제약에도 불구하고 이러한 전략 하에 다음과 같은 국제 공동 연구 실적을 얻을 수 있었다.

- ▶ 조성진 학생 (2020.11.25. - 2021.02.28.): 일본 국립 고에너지가속기연구기구 (KEK)를 방문하여 Belle II 실험 operation에 참여, Belle II 실험을 위한 data acquisition 연구 참여, axion 유사입자 탐색을 위한 Belle 실험 데이터 분석 연구 참여 등으로 KEK 소속 Mikihiro Nakao 교수, Shohei Nishida 교수 등과 학술 교류를 하였다.
- ▶ 김용규 학생 (2020.11.13. - 2021.02.28.): 일본 국립 고에너지가속기연구기구(KEK)를 방문하여 Belle II 실험 operation에 참여, Belle II 실험을 위한 data acquisition 연구 참여, 암흑광자 탐색을 위한 Belle 실험 데이터 분석 연구 참여 등으로 KEK 소속 Mikihiro Nakao 교수, Shohei Nishida 교수 등과 학술 교류를 하였다.
- ▶ 류세희 학생 (2020.12.15. - 2020.12.30.): 미국 로렌스버클리국립연구소에 소재한 방사광가속기 Advanced Light Source 빔라인 7을 방문하여 Na이 표면에 도핑된 흑린의 밴드 구조에 대한 각분해광전자분광 실험 및 연구를 수행함.
- ▶ 류세희 학생 (2021.04.01. - 2021.08.31.): 미국 로렌스버클리국립연구소에 소재한 방사광가속기 Advanced Light Source 빔라인 7을 방문하여 Ca이 표면에 도핑된 흑린의 밴드 구조에 대한 각분해광전자분광 실험 및 연구를 수행함.
- ▶ 조용수 학생 (2021.07.01. - 현재): 유럽핵입자물리연구소(CERN)에 방문하여 최근 입자물리학계에서 많은 관심을 모으고 있는, 액시온유사입자 (Axion-like particles)로부터 일반적으로 발생하게 되는 렙톤수 비보존 (Lepton-flavor-violation)과정과 그에 대한 탐색으로 MEG-II, MEG-II-fwd 등의 후속실험에서 직접 사용가능한 트리거 조건을 제시하는 것을 논의하였다.

◎ 대학원생의 주도하에 진행된 국제 공동 연구 논문

- 박도윤 학생(제1저자), Nature 596, 68-73 (2021)
Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals
- 최원준 학생(제1저자), Advanced Materials 2103079 (2021)
Ambipolar Channel p-TMD/n-GaO Junction Field Effect Transistors and High Speed Photo-sensing in TMD Channel
- 신형곤, 강동희 학생(공동 제1저자), ACS Nano 14, 15646-15653 (2020)
High-Performance van der Waals Junction Field-Effect Transistors Utilizing Organic Molecule/Transition Metal Dichalcogenide Interface
- 이솔, 정중언 학생(공동 제1저자), Nano Letters 21, 4305-4313 (2021)
gamma-GeSe: A New Hexagonal Polymorph from Group IV-VI Monochalcogenides
- 김명진 학생(제1저자), Journal of Materials Chemistry A 9, 10316 (2021)
Tribodiffusion-driven triboelectric nanogenerators based on MoS₂
- 최영우 학생(제1저자), 2D Materials 8, 035024 (2021)

Anisotropic pseudospin tunneling in two-dimensional black phosphorus junctions

- 박한범 학생(제1저자), ACS Applied Materials and Interfaces 13, 23153-23160 (2021)
Enhanced Spin-to-Charge Conversion Efficiency in Ultrathin Bi₂Se₃ Observed by Spintronic Terahertz Spectroscopy
- 조용수 학생(제1저자), Physical Review D 104, 015018 (2021)
Probing new physics with high-multiplicity events: Ultrahigh-energy neutrinos at air-shower detector arrays
- 김지수 학생(제1저자), Physical Review D 103, L051501 (2021)
Vector meson mass in the chiral symmetry restored vacuum
- 김용규 학생(제1저자), IEEE Transactions on nuclear science 68, 2146-2150 (2021)
Archiver System Management for Belle IIDetector Operation

◎ 향후에도 당초 추진 계획인 ❶ 우수 외국 학생 확보 ❷ 해외학자 교육활용 ❸ 인프라 지원의 복합 전략으로 국제화 교육 허브를 구축하여 국제공동연구를 늘려가고자 한다.

Ⅲ

연구역량 영역

□ 연구역량 대표 우수성과

1 참여교수의 우수 논문 실적

저명 학술지 연구성과 게재 Nature지를 포함한 최상위 유명 저널에 연구결과 게재

- Nature지에 연구 성과 게재: 김근수 교수는 교신저자로 2021년 8월 “Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals” 논문을 Nature지에 게재함. 본 연구단 소속 류세희 박사 및 박도윤 대학원생이 제1저자 참여하였으며, 연구단 우수 연구성과를 상징적으로 보여줌.
- Journal of High Energy Physics, Physical Review D, Advanced Materials, Nature Communications, Advanced Functional Materials, ACS Nano, Nano Letters 등 유수의 저널에 다수의 연구성과를 보고하여 본 연구단의 연구 우수성을 나타냄.

게재 논문의 질적 향상 양적 지표의 유지 및 질적 지표의 향상

- 본 교육연구단은 지난 1년간 160편 이상의 논문을 게재하였으며, 참여교수 1인당 논문 환산편수 (1년간 1.13편/인)는 선정평가 당시의 값을 유지.
- 참여교수 1인당 환상보정 IF 합 (1년간 ~0.7/인)의 경우 선정평가 당시와 비슷한 값을 유지하고 있으며, 환산보정 ES 합(1년간 ~4.5/인)은 예년에 비해 약 2배로 향상됨. 교육연구단 논문 질적 지표가 유의미하게 향상되고 있다고 판단됨.

2 참여교수의 연구비 수주 실적

향상된 연구비 수주 실적 예년 대비 44% 증가된 연구비 수주 실적

- 지난 1년간 77억원 이상의 연구비 수주 (정부 연구비 72.8억 및 산업체 연구비 4.9억 포함)
- 참여교수 1인당 3.89억 연구비 수주 (선정 당시와 비교하여 44% 증가)

3 참여교수의 우수 특허 실적

해외 특허 등록 2건 산업계와의 실질적인 융합연구 추구

- 조만호 교수: 3차원 구조의 도핑 농도 결정 방법, 이를 이용한 반도체 장치의 제조 방법 (미국 특허등록, 2020-09-15)
- 조만호 교수: 열전 재료, 이의 제조 방법 및 열전소자 (미국 특허등록, 2021-01-05)

국내 특허 등록 6건 산업혁신과 국민건강 증진에 기여

- 임성일 교수: 이차원 반도체 물질을 이용한 수직형 쇼트키 다이오드 및 이의 제조방법
- 유경화 교수: 반도체 공핍층을 이용한 마찰발전기 및 이의 제조방법
- 유경화 교수: 압타머 기능화 된 버티컬 바이오 센서 및 이의 용도
- 이연진 교수: 유무기 하이브리드 페로브스카이트 발광 소자 및 그 제조방법
- 이연진 교수: DNA 기반 물질을 이용한 친환경 고효율 유기 발광 소자
- 오경환 교수: 약액 공급을 위한 커넥터를 가진 광섬유 기반 무침 주사

4 참여교수의 우수한 산업, 사회 기여

산업/사회 기여 성과 다양한 대중 강연 및 교육 프로그램 진행

- 달팽이 강의시리즈, 카오스 강연, 사피엔스 스튜디오 대중강연, 응집물질물리 여름학교 등을 통해 지역, 산업, 사회 문제 해결에 기여.

1. 참여교수 연구역량

1.1 연구비 수주 실적

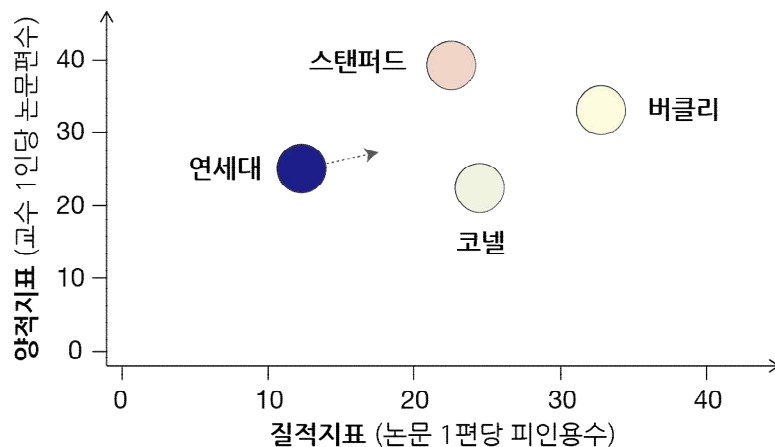
〈표 3-1〉 최근 1년간(2020.9.1.-2021.8.31.) 참여교수 1인당 정부, 산업체, 해외기관 등 연구비 수주 실적

항 목	수주액(천원)		
	3년간(2017.1.1.-2019.12.31.) 실적 (선정평가 보고서 작성내용)	최근 1년간(2020.9.1.-2021.8.31.) 실적	비고
정부 연구비 수주 총 입금액	12,114,065천원	7,289,045천원	
산업체(국내) 연구비 수주 총 입금액	2,398,933천원	496,000천원	
해외기관 연구비 수주 총 (환산) 입금액	4,920천원	-	
1인당 총 연구비 수주액	806,551천원 (268,850천원/년)	389,252천원	44.6% 증가
참여교수 수	18	20	

1.2 연구업적물 김관표 교수님

① 참여교수 연구업적물의 우수성

◎ 연세 물리 교육연구단은 지난 BK 선정평가 시 참여교수의 교수 1인당 논문 편수 및 논문 1편당 피인용수를 국내 타 대학 및 해외 벤치마킹 대학의 물리학과와 비교/분석하였다. 연세 물리 교육연구단은 양적 지표에서는 세계 TOP 20 물리학과와 근접한 논문 편수를 보여주고 있음에 비하여 질적 지표에 있어서는 Top20로부터 거리가 있었다 (아래 논문실적 비교 참고). 이에 따라 4단계 BK사업 기간 동안 연구의 양적 지표보다는 연구의 질적 수준을 향상시켜 연세 물리 교육연구단의 새로운 도약을 추구하기로 하였다.



벤치마킹 대학과의 논문실적 비교. SciVal (<https://www.scival.com>) 이용, 2015.03~2019.12 기간 논문 실적 조사(거대과학 제외). 양적 지표는 각 학과 소속 전체 교수(거대과학 제외)를 대상으로 1인당 논문 편 수. 질적 지표는 각 학과에서 출판된 전체 논문(거대과학 제외)을 대상으로 논문 1편당 피인용 수.

- ◎ 최근 1년간(2020년 9월~2021년 8월)의 참여교수 연구실적을 종합적으로 분석하기 위해 참여교수 1인당 논문편수, 참여교수 1인당 논문 환산편수, 참여교수 1인당 환산보정 IF 합, 참여교수 1인당 환산보정 ES 합을 조사하여 위의 표에 나타내었다. 참여교수 1인당 논문편수는 선정평가 당시와 비교하여 상대적으로 감소하였으나, 참여교수 1인당 논문 환산편수는 선정평가 당시의 값과 거의 비슷한 값(2% 감소)을 유지하고 있음을 확인하였다.

항목	5년간(2015년-2019년) 실적 연평균 (선정평가 보고서)	최근 1년간 실적* (2020년 9월~2021년 8월)	증감률
참여교수 1인당 논문편수 연평균	11.44	8.25	-28%
참여교수 1인당 논문 환산편수 연평균	1.176	1.151	-2%
참여교수 1인당 환산보정 IF 합 연평균	0.727	0.667	-8%
참여교수 1인당 환산보정 ES 합 연평균	2.206	4.581	+107%

*최근 1년간 실적의 경우 2021년 8월 발표된 JCR 데이터를 기준으로 IF, ES, 보정 IF, 보정 ES 계산

- ◎ 최근 1년간의 연세 물리 교육연구단 참여교수 논문의 질적 지표의 변화 양상을 분석하기 위해 참여교수 1인당 환산보정 IF 합 및 환산보정 ES 합을 조사하여 선정당시와 비교하였다. 참여교수가 게재한 논문의 중요성 및 영향력을 논의함에 있어 대표적으로 계산하여 비교할 수 있는 IF 및 ES 지표를 선택하여 비교 분석하였다. 교육연구단 참여교수 논문의 환산보정 IF 합의 경우 선정평가 당시와 비교하여 약간 감소 (-8%) 를 보인 반면 환산보정 ES 합의 경우는 매우 큰 폭의 유의미한 증가(+107%)를 보였다. 이런 변화를 종합적으로 고려하면 교육연구단의 질적 지표가 전반적으로 향상되고 있다고 판단되며, 내년 자체평가에서는 지난 1년간의 논문 실적의 평균 FWCI 값을 조사하여 논문의 실제 피인용수 변화 추세를 조사할 예정이다. ES 지수의 경우 IF에 비해 전통적이고 잘 알려진 저널이 높은 평가를 받고 있으며, 연세 물리 교육연구단의 참여 교수들은 전통적이고 물리학 분야에 잘 알려진 저널에 게재하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞으로도 계속 유지할 만한 점이라고 판단된다.
- ◎ 본 교육연구단의 첫 사업연도 동안 Nature, Nature Communications, Journal of High Energy Physics, Physical Review D, Advanced Materials, Advanced Functional Materials, ACS Nano, Nano Letters 등을 포함한 유수의 저널에 뛰어난 연구 성과를 게재하였으며, 교육연구단 내 분야별 대표 논문 실적을 다음과 같이 나열하였다.
- ◎ QU 분야는 다음과 같은 논문을 포함한 뛰어난 연구 업적을 지난 1년간 게재하였다.
 - 박성찬 교수 교신저자: “Leptonic new force and cosmic-ray boosted dark matter for the XENON1T excess” , **Physics Letters B**, IF=4.384, 2020년 12월
 - 이수형 교수 교신저자: “Doubly heavy tetraquarks, $qq' Q'Q'$, in a nonrelativistic quark model with a complete set of harmonic oscillator bases” , **Physical Review D**, IF=5.296, 2021년 6월
 - 무거운 쿼크 2개와 가벼운 쿼크 2개로 이루어진 axial vector meson T_{cc} 는 아직까지 발견되지 않은 compact tetraquark 일것이라 여겨져 연대그룹이 2007년부터 연구한 입자로 이번 논문에서는 그동안 근사적으로 계산 입자의 질량을 주어진 쿼크모델에서 정확하게 계산하였다. 그런데 출판이후로 LHCb collaboration에서 이 입자를 발견했으면 본 논문에서 예측한 질량과 거의 같은 값을 갖고 관측되었다. 이논문은 LHCb실험 발견 논문에서도 인용되다.

- 권영준 교수 교신저자: “Search for the dark photon in $B_0 \rightarrow A' A'$, $A' \rightarrow e^+e^-$, i^+i^- , and $\delta^+\delta^-$ decays at Belle”, **Journal of High Energy Physics**, IF=5.810, 2021년 4월
 - 입자물리 분국제 저명학술지인 Journal of High Energy Physics에 출판된 이 논문은 B 중간자의 붕괴에서 암흑광자를 세계 최초로 탐색한 연구 내용을 다루고 있다. 암흑광자는 암흑물질 입자들 간에 존재 가능한 U(1) 게이지 상호작용을 매개하는 것으로 여겨지는 미확인 입자로, 실험으로 암흑광자의 존재가 밝혀진다면 이는 표준모형을 넘어서는 새로운 물리의 존재를 뜻하는 것이며, 입자물리 역사에서 손꼽히는 발견이 될 것임. 본 논문의 제1저자인 박석희 박사(2020년 8월 학위취득; 지도: 권영준 교수, 교신저자)는 연세대 물리학과 박사과정 재학 중 Belle 실험 데이터를 분석하여 B 중간자가 두 개의 암흑광자로 붕괴하는 반응의 탐색을 세계 최초로 연구하였으며 이를 통해 암흑광자 생성 비율 및 힉스 입자와 암흑힉스 입자 사시의 결합의 상한선을 최초로 실험을 통해 결정하였다. 박석희 박사는 이 연구를 통해 능력을 인정받고 세계 저명 입자물리 연구기관 중 하나인 일본 고에너지가속기연구기구(KEK)에 계약직 조교수(비정년트랙)으로 임용되었음. 위 논문을 포함하여 지난 1년간 거대과학 실험 논문 25편 이상 게재하였음.
- 유희동 교수: “Search for resonant and nonresonant new phenomena in high-mass dilepton final states at 13 TeV”, **Journal of High Energy Physics**, IF=5.810, 2021년 7월
 - 본 논문은 높은 질량을 갖는 두 개의 경입자를 이용하여 새로운 힘을 매개하는 중성 게이지 보손을 탐색하는 연구이다. 본 연구자와 한국의 연구진이 이끌고 있는 30여명으로 구성된 CMS 실험내의 국제공동연구진이 CMS Run 2 데이터를 분석하여 연구한 결과이다. 본 연구자가 CMS 실험에서 10여년 이상 연구한 주요 주제로 LHC 실험 전체에서 새로운 물리현상을 탐사하는 가장 중요한 연구 주제 중의 하나이다. 다양한 이론 모형의 존재 상한값을 설정하였으며 또한 dimuon, dielectron 채널 사이의 lepton universality에 대한 연구도 진행되었다. 연구 결과는 입자물리분야 국제 저명학술지인 Journal of High Energy Physics에 출판되었다. 유희동 교수는 위 논문을 포함하여 지난 1년간 거대과학 실험 논문을 포함하여 거대과학 실험 논문 50편 이상을 게재하였다.

◎ QM 분야는 다음과 같은 논문을 포함한 뛰어난 연구 업적을 지난 1년간 게재하였다.

- 김근수 교수 교신저자: “Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals”, **Nature**, IF=49.962, 2021년 8월
- 조두희 교수 제1저자: “Spatially dispersing Yu-Shiba-Rusinov states in the unconventional superconductor $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ ”, **Nature Communications**, IF=14.919, 2021년 1월
- 김관표 교수 교신저자, 최형준 교수 참여: “gamma-GeSe: A New Hexagonal Polymorph from Group IV-VI Monochalcogenides”, **Nano Letters**, IF=11.189 2021년 5월
- 최형준 교수, 김관표 교수 공동 교신저자: “Single-Crystalline Metallic Films Induced by van der Waals Epitaxy on Black Phosphorus”, **Chemistry of Materials**, IF=9.811, 2021년 5월

◎ QA 분야는 다음과 같은 논문을 포함한 뛰어난 연구 업적을 지난 1년간 게재하였다.

- 임성일 교수 교신저자: “Ambipolar Channel p-TMD/n-Ga₂O₃ Junction Field Effect Transistors and High Speed Photo-sensing in TMD Channel”, **Advanced Materials**, IF= 30.849, 2021년 8월
- 임성일 교수 교신저자, 이연진 교수 참여: “Nanowatt use 8 V switching nonvolatile memory transistors with 2D MoTe₂ channel and ferroelectric P(VDF-TrFE)”, **Nano Energy**, IF=17.881, 2021년 3월
- 임성일 교수 교신저자, 김관표 교수, 이연진 교수 참여: “2D TMD Channel Transistors with ZnO Nanowire Gate for Extended Nonvolatile Memory Applications”, **Advanced Functional Materials**, IF=16.836, 2020년 10월

- 임성일 교수 교신저자, 김관표 교수 참여: “High Performance β -Ga2O3 Schottky Barrier Transistors with Large Work Function TMD Gate of NbS2 and TaS2”, **Advanced Functional Materials**, IF=16.836, 2021년 5월
- 임성일 교수 교신저자, 이연진 교수 참여: “Dynamic Oscillation via Negative Differential Resistance in Type III Junction Organic/Two-Dimensional and Oxide/Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenide Diodes”, **Advanced Functional Materials**, IF=16.836, 2021년 2월
- 임성일 교수, 이연진 교수 공동 교신저자: “High-Performance van der Waals Junction Field-Effect Transistors Utilizing Organic Molecule/Transition Metal Dichalcogenide Interface”, **ACS Nano**, IF=14.588, 2020년 11월
- 임성일 교수 교신저자, 김관표 교수 참여: “Nonvolatile and Neuromorphic Memory Devices Using Interfacial Traps in Two Dimensional WSe2/MoTe2 Stack Channel”, **ACS Nano**, IF=14.588, 2020년 9월
- 임성일 교수 교신저자, 김관표 교수 참여, 이연진 교수 참여: “Dramatic Reduction of Contact Resistance via Ultrathin LiF in Two-Dimensional MoS2 Field Effect Transistors”, **Nano Letters**, IF=11.189 2021년 4월
- 유경화 교수 교신저자: “Tribodiffusion-driven triboelectric nanogenerators based on MoS2”, **Journal of Materials Chemistry A**, IF=12.732 2021년 4월
- 김관표 교수 참여: “Reversible disorder-order transitions in atomic crystal nucleation”, **Science**, IF=47.728, 2021년 1월

② 교육연구단의 학문적 수월성을 대표하는 연구업적물 (최근 1년(2020.9.1.-2021.8.31.))

연번	대표연구업적물 설명
1	<p>QU 대표 논문: “Leptonic new force and cosmic-ray boosted dark matter for the XENON1T excess”, Physics Letters B, 2020년 12월</p> <p>입자물리 분야 국제 저명학술지인 Physics Letters B에 출판된 논문은 표준모형의 게이지 대칭성을 양자역학적 이상(anomaly)없이 확장하여 경입자와 암흑물질 간의 상호작용을 야기시키고, 이로 인해 최근 Xenon1t 실험에서 보고한 keV 영역대의 초과 신호 발생의 원인이 될 수 있음을 보였다. 이 논문은 발표 이후 학계에서 그 성과를 인정받아 단기간 동안 50회 (Inspire DB 기준)에 근접한 인용을 받고 있다.</p> <p>본 논문의 제1저자인 조용수 학생은 본 논문을 포함 SCI급 논문 5편을 출판 (4편 제1저자) 하였으며 CERN 학생 fellow로 선정되어 2021년 6월-12월 CERN 이론그룹에서 연구하고 있다. 본 논문의 공동저자인 Po-Yan Tseng 박사는 연구력을 인정받고 대만 칭화대 조교수 (정년트랙)으로 2021년 9월 임용되었다.</p>
2	<p>◎ 연구업적 정보</p> <p>Pseudogap in a crystalline insulator doped by disordered metals Nature 596, 68-73 (2021) / Impact factor: 42.778 (JCR기준)</p>

연세 물리 교육연구단 참여교수: 김근수

◎ 연구업적의 우수성

- 1960년대 이론으로 예측된 액체 금속의 전자 구조를 처음으로 규명
- 무질서한 도펀트의 공명산란 효과로 유사갭(pseudogap)의 메커니즘을 제시
- 연구 성과의 학문적 중요성을 인정받아 저명학술지 Nature에 게재됨

◎ 연구업적 내용

응집물질물리학에서는 전자 구조를 바탕으로 물질의 전기적, 광학적 특성을 설명한다. 원자들이 규칙적으로 배열된 결정 고체의 경우 전자 구조를 비교적 쉽게 설명할 수 있으나, 원자 배열이 불규칙한 액체나 비정질 고체(유리)와 같은 물질의 경우 그 전자 구조를 이론적으로 설명하는 것이 매우 까다롭다. 노벨물리학상 수상자 P. W. Anderson과 N. F. Mott 등은 1960년대 ‘액체 금속의 전자 구조’를 설명하는 이론 모델을 고안하였으나, 이는 지난 반세기 동안 실험적으로 발견된 적이 없었다. 본 연구에서는 액체와 같이 무질서하게 분포된 알카리 금속 원자들이 표면에 도핑된 결정 절연체 흑린의 전자 구조를 각분해광전자분광을 이용하여 측정하고 결과 액체 금속의 전자 구조의 주요 특징(뒤로 휘는 독특한 형태의 전자 구조와 pseudogap)을 처음 발견하였다. 이는 흑린에 도핑된 전자들은 불규칙적으로 분포된 알카리 금속 원자들에 의해 공명 산란되어 액체 금속의 전자 구조와 같은 특징을 갖게 되는 것으로 분석되었다. 이번 연구를 통해 pseudogap의 메커니즘이 무질서하게 분포된 원자들의 공명 산란 효과로 밝혀짐에 따라, 고온초전도체에 나타나는 pseudogap의 메커니즘을 이해하는 데 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다.

◎ 연구업적이 인재 양성에 미친 영향

- 논문의 제1 저자는 본 교육연구단 소속 신진인력(류세희 박사)과 대학원생(박도운 학생).
- 신진인력과 대학원생들이 학자로서 성장하는 데 중요한 연구 경험과 실적을 제공.

QA분야 대표 논문: Ambipolar Channel p-TMD/n-Ga₂O₃ Junction Field Effect Transistors and High Speed Photo-sensing in TMD Channel, Advanced Materials, 2021년 8월

3 2차원 반도체인 MoTe₂ 및 WSe₂ 등의 전이금속칼코젠 화합물 (TMD)은 ambipolar 즉 양극 전도성을 띠고 있으나 소스-드레인 전극을 선택함에 따라 강한 p형의 극성을 가진다. 본 연구에서는 박리형 전사가 가능한 3차원 n형 박막 반도체인 Ga₂O₃ 막을 2차원 p형 반도체위에 전사하여 이중접합 PN 다이오드를 형성하였고 더 나아가 이중 PN접합 트랜지스터를 구현하였다. 이번 트랜지스터의 특징은 게이트 산화막이 필요하지 않으며, MoTe₂ 나 WSe₂를 채널로 하는 p형 트랜지스터 소자를 n-Ga₂O₃가 게이팅하는 동시에 그와 반대로는 Ga₂O₃를 채널로 하는 n형 트랜지스터 소자를 p-TMD 반도체가 게이팅 할 수 있다는 특징이 있다. 즉, ambipolar channel PN접합 트랜지스터를 구현한 것이다.

이는 세계적으로 최초의 양극 채널 소자를 구현했다는 측면에서 긍정평가할 만하며, 트랜지스터의 구체적인 응용으로써 차단 주파수 수십 kHz이상의 photoswitching 능력이 있다는 측면이 놀랍다. 상부채널인 Ga₂O₃는 4.8 eV의 높은 밴드갭을 갖기 때문에 IR 적외선 과 가시광을 통과시킨다, 따라서 MoTe₂채널 소자인 Ga₂O₃/p-MoTe₂ 트랜지스터에는 고속 IR 스위칭 이 적용되고 WSe₂채널 소자인 Ga₂O₃/p-WSe₂ 트랜지스터에는 고속 가시광 스위칭이 적용된다. 이와 같은 응용은 2차원/3차원 반도체 혼합소자라는 측면에서 새로운 장을 개척할 것으로 예상되며,

<p>학술적 응용으로는 광의 에너지 변조를 통하여 micron 크기 TMD반도체의 진정한 에너지 갭도 측정할 수 있다는 큰 학술적 관점에서의 장점이 있다.</p>
--

③ 참여교수 특허, 기술이전, 창업 실적의 우수성

◎ 본 교육연구단은 산업과의 지속적인 상호작용을 추구해 왔으며, 특히 국내 물리학과 중 산업 관련 활동이 가장 활발한 학과 중 하나이다. 일찍이 대학원 과정을 기초물리와 응용물리의 큰 틀에서 바라보고, 응용성을 기반으로 한 연구를 한 축으로 수행해 특허 등 지적 재산을 확보해 왔다. 본 교육연구단의 첫 사업연도 동안 다음과 같은 특허 등록 실적을 얻었다.

- 조만호 교수: 3차원 구조의 도핑 농도 결정 방법, 이를 이용한 반도체 장치의 제조 방법 (특허등록, 미국 10776549, 2020-09-15)*
- 조만호 교수: 열전 재료, 이의 제조 방법 및 열전 소자 (특허등록, 미국 10886451, 2021-01-05)
- 임성일 교수: 이차원 반도체 물질을 이용한 수직형 쇼트키 다이오드 및 이의 제조방법 (특허등록, 한국 10-2224497, 2021-03-02)
- 유경화 교수: 반도체 공핍층을 이용한 마찰발전기 및 이의 제조방법 (특허등록, 한국 10-2215588, 2021-02-05)
- 유경화 교수: 압타머 기능화 된 버티컬 바이오 센서 및 이의 용도 (특허등록, 한국 10-2224686, 2021-03-02)**
- 이연진 교수: 유무기 하이브리드 페로브스카이트 발광 소자 및 그 제조방법 (특허등록, 한국 10-2186853, 2020-11-30)
- 이연진 교수: DNA 기반 물질을 이용한 친환경 고효율 유기 발광 소자 (특허등록, 한국 10-2296566, 2021-08-26)
- 오경환 교수: 약액 공급을 위한 커넥터를 가진 광섬유 기반 무침 주사 (특허등록, 한국 10-2287079, 2021-08-02)

*산업체(삼성전자)와의 공동 특허로 산업계와의 실질적인 융합연구가 이루어진 실적으로 본 교육연구단의 “산업혁신 창출” 기여 계획의 실행 결과

**산업혁신과 국민건강 증진에 기여

2. 산업·사회에 대한 기여도

본 교육연구단은 3대 사회 기여 분야를 1) 산업혁신 창출 기여 2) 사회문제 해결 기여 2) 산업·경제 직접 기여로 보고, 각 분야별 문제 해결 전략을 바탕으로 구체적 계획을 수립하여 실효성 있는 교육 및 연구 성과를 사회로 환원하고자 한다. 특히, <교육-연구-산업·사회> 트라이앵글 속에서 인재-지식-인프라의 양방향 순환을 통해 산업·사회 현안들을 혁신적으로 해결할 방법을 제시한다. 교육연구단 운영 첫해인 1차년도에는 다음과 같은 활동을 통해 산업/사회에 기여를 하였다.

- “달팽이 강의시리즈” : “포스트 힉스 시대의 새로운 물리학“이라는 주제로 APCTP와 한국연구재단의 재정 도움을 받아 달팽이 강의시리즈를 운영 (박성찬 교수)
 - 입자물리에서의 양자컴퓨팅 (2020. 11. 20, 김민호 박사, 고등과학원)
 - “Axions“. From basic, to axion cosmology and recent progresses in direct detections. (2021. 5. 1, 임상희 박사, 서울대 IBS)
- “카오스 강연”
 - 카오스 재단에서 주최로 “반도체의 양자 도약을 꿈꾸며“라는 주제로 강연, 카오스 사이언스 유튜브 채널을 통해 오픈되어 있으며 조회수 6천회 이상을 기록 (김근수 교수, 2021. 1. 18)
 - “시간, 물질, 그리고 우주” 를 주제로 강연 (박성찬 교수, 2021. 6. 30)

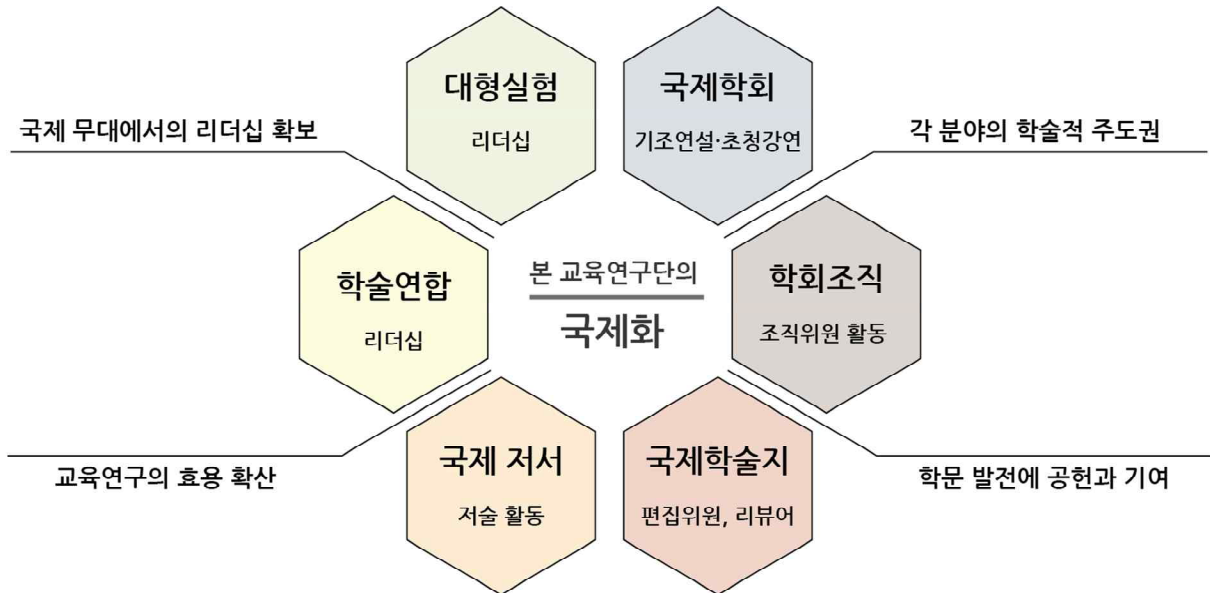
- **“SPDAK 2021 school: 트리거 검출기 강의”** : 기술적으로 매우 복잡함 이러한 검출기 원리 및 기술을 대학원 학생들에게 집중적인 교육을 통해 가르치고 이를 연구에 활용할 목적의 겨울학교가 경북대 주관으로 개최되었으며 유휘동 교수는 트리거 검출기를 주제로 강의 (2021. 1. 21)
- **과학고 물리학 프로젝트 컨설팅** (오경환 교수)
 - 대전과학고 양자광학 실험준비를 위한 광학설비 및 양자광학 원리에 대한 자문, 고등학교 교사와 학생 그리고 대학 교수가 한 자리에서 프로젝트에 대한 배경과 데이터 해석 물리적 원리에 대한 논의를 하는 과정을 통해 과학의 사회 기여에 일조 (2021. 4. 1)
 - 인천과학예술평재학교 레이저 기반 속도 측정계에 대해 간헐 및 음향광학 효과에 대한 자문, 이를 통해 과학고 학생들의 물리 현상에 대한 이해를 향상시키고 더 나아가 물리학 및 기초과학에 대한 관심을 확대하는데 기여 (2021. 4. 12)
- **“연세대학교 부설 과학영재교육원 지도”** : 최영재 교수는 서울시 수학, 과학분야 최우수 학생들을 선발하여 운영하는 과학영재교육원 과학분과 주임교수로 물리분야 심화, 사사반 지도를 담당하여 과학 꿈나무 양성 및 진로지도를 수행
- **“사피엔스 스튜디오 대중강연”** : 사피엔스 스튜디오를 통하여 “궁극의 길이에 도전한다! 가장 큰 힘으로 가장 작은 세계를 찾아가는 여정” 이라는 주제로 대중을 위한 과학 강연 (박성찬 교수, 2021. 5. 26, 2021. 6. 9)
- **“LG 디스플레이 강의”**
 - 급격한 기술 발전으로 인해 산업계 내부 인력의 재교육 필요성이 급증, 산업계로 부터의 시급한 요청으로 내부 인력 교육을 교육연구단의 참여교수가 직접 진행 (이연진 교수, 2021. 6. 14)
 - 주력 생산품인 OLED의 성능 저하 원인과 그 분석법을 분자고체의 전자구조에 기반하여 설명
 - 대학의 지식 기반을 이용하여 산업계의 직무변경자 및 신입직원의 교육을 대학이 수행, 교육연구단이 설정한 미래 대학의 역할 중 하나인 산업계 자문, 맞춤형 교육이라는 방향성에 부합
- **“나노분광학 교육”** : 나노기술연구협의회에서 주관으로 급격히 늘어나고 있는 나노 물질에 관한 분광분석 기법의 기초를 습득하기 위한 교육과정을 제공, 본 교육연구단의 목표중 하나인 산업사회 문제 해결을 위한 기초과학의 직접적 기여를 단적으로 보여주며 문제해결 프로그램 수행이라는 비전과도 잘 부합 (이연진 교수, 2021. 7. 10-29)
- **“한성과학상 특강 및 토크 콘서트”** : 김근수 교수는 제 4회 한성과학상 물리분야 수상자로서 한성재단 과학영재 중고등학생 200명을 대상으로 “양자물질 디자이너”라는 주제로 특강 및 토크콘서트를 수행 (2021. 8. 15)
- **“제12회 응집물질물리 여름학교 강연”** : 전국 물리학과 대학원생을 포함한 200명의 학생에게 전자현미경 연구 분야를 개괄적으로 강의, 전자현미경의 기본 동작 원리, 전자회절, 이미징, 최신 연구 동향까지 다방면의 내용을 강연에서 다루어 신진연구자들의 교육에 이바지 (김관표 교수, 2021. 8. 24-27)
- **산업계 인력 교육**: 산업계 인력의 박사과정 수학을 통한 산업계 문제를 학계와 함께 해결하는 산-학 융합 연구 실시로 실질적인 산업계 기여(임성일, 이연진 교수, 엘지디스플레이 소속 인원4인이 본 교육연구단에 박사과정으로 재학)
- **산업계 공동연구(연구과제)**: 산업계 문제 해결에 직접 기여하는 연구를 수행. 현안 문제 해결을 위한 연구와 관련 분야 인재 양성에 기여(18건, 김관표, 김근수, 유경화, 이삼현, 이수형, 이연진, 임성일, 조두희, 김재훈, 조만호 교수)
- **산학협력연구센터 운영 및 참가**: 연세-삼성 반도체 전략산학연구센터, 삼성디스플레이 연구센터를 지속적으로 운영 및 참여를 통해 지식 교류를 정기화하여 현 산업 기술의 문제점과 해결 방안 및 발전전략에 대해서 긴밀하게 협의하는 혁신적 환류 시스템을 통해 실효성 있는 연구 성과를 창출하여 산업·사회에 환원 중임(김관표, 이연진, 조두희, 조만호 교수)
- **연세-표준과학연구원 협동과정 개설**: 한국표준과학연구원과 본 교육연구단의 주도로 융합반도체

협동과정을 새롭게 개설하여 연구원의 첨단시설과 대학의 교육 인프라 및 인재를 연결하는 교육-연구 융합을 새롭게 시도하고 있으며, 미래 반도체 연구를 시작하고 있다.

3. 참여교수의 연구의 국제화 현황

① 국제적 학술활동 참여 실적 및 현황

1 연세 물리 교육연구단의 국제적 학술활동의 우수성 요약



1. 국제적 리더십

- 국제 대형 공동연구의 대표 (Co-spokesperson)
- 아시아태평양 물리학회 연합회 부회장

2. 국제학술대회에서 주도적 역할

- 학술대회 개최: 8건

3. 활발한 국제학회/학술대회 활동을 통한 학문적 주도권 확보

- 기조연설: 2건
- 초청강연: 16건

4. 국제학술지 발전에 공헌과 기여

- 국제학술지의 편집위원 활동: 4건

2 국제적 리더십

◎ 국제 대형 공동연구의 대표 (Co-spokesperson)

- Belle Collaboration은 일본 츠크바의 KEK 연구소에서 진행되는 입자물리학 분야의 대형 국제 공동실험이다. 한국, 일본, 미국, 독일, 프랑스, 이탈리아, 러시아, 중국, 인도 등 22개 국가의 400명이 넘는 물리학자가 참여한다. Belle 실험은 B-meson의 decay 과정에서 CP violation

관측을 주요 목표로 하며 지난 20년 이상의 연구를 통해 위대한 업적을 도출해 왔다.

- 본 교육연구단의 권영준 교수는 2018년 4월부터 Belle Collaboration의 공동 대표로 선출되어 직분을 계속 수행하고 있다. 이는 한국인 과학자로서는 입자물리학 대형 실험연구 분야에서 역대 유일하며, 본 교육연구단의 국제적 리더십을 보여주는 대표적인 사례이다.
- 2019년에 임용된 유희동 교수도 입자물리학 실험 분야의 세계 최대 규모의 국제 공동연구 프로그램인 스위스 CERN 연구소의 CMS Collaboration에서 Luminosity POG convener 등 다양한 그룹에서 리더십을 발휘해 왔으며 현재 연구단 내에서 활발한 연구 활동을 펼치고 있다.
- 유희동 교수는 2018년 9월부터 CERN 연구소의 Advisory Committee of CERN Users의 non-member states의 대표로 활동하며 CERN 연구소의 프로그램에 참여하는 전세계 연구자들을 대변하고 있으며 임기가 2022년까지 연장되어 리더십을 인정받고 있다. 또한 2030년대 후반 가동을 목표로 전세계 입자물리연구자들이 사활을 걸고 있는 차세대 가속기 프로젝트에 대하여 전임교원 수십명으로 이루어진 한국 차세대 가속기 연구단을 2021년 2월 발족하고 한국의 대표로 연구단을 이끌고 있다. 이를 바탕으로 해당 분야에서 본 교육연구단의 국제적 리더십을 한 층 더 확장할 수 있을 것이다.

◎ 아시아태평양 물리학회 연합회 부회장

- Association of Asia Pacific Physical Societies (AAPPS)는 아시아 태평양 지역의 국가별 물리학회의 연합회이며 한국물리학회도 주요 회원으로 참여하고 있다. 1990년 C. N. Yang을 초대 회장으로 창립되어, 아시아-태평양 지역의 물리학 연구와 교육의 국제적 학술 교류의 장으로 자리매김하였다. 현재 한국, 일본, 중국, 싱가포르, 인도 등 17개국 18개 학술단체의 연합으로 구성되어 있으며, 장차 미국물리학회와 유럽물리학회에 버금가는 국제 학술기구로 발전할 것으로 기대한다.
- 본 교육연구단의 최형준 교수는 2014년부터 2019년까지 AAPPS의 재무이사를 역임하였으며, 2020년부터 2022년까지 부회장직을 맡고 있다. 최형준 교수는 AAPPS에서 3년마다 개최하는 아시아태평양 물리학회 Asia-Pacific Physics Conference (APPC)의 International Program Committee 위원장을 맡아 2019년에 14차 학회의 성공적 개최를 이끌었고, 2022년에 개최되는 15차 학회를 준비하고 있다. AAPPS Bulletin의 Editor를 맡고 있기도 하다. 이는 본 교육연구단의 국제적 리더십을 보여주는 대표적인 사례이다.

3 국제학술대회에서의 주도적 역할

◎ 학술대회 개최

① Mini-workshop on missing particle signatures and new physics at Belle II and LHCb

- 학회기간: 2021.07.05~2021.07.06
- 개최국가: 대한민국과 이스라엘 공동 개최
- 권영준 교수는 이스라엘 Tel Aviv 대학 Abner Soffer 교수와 Yonsei-Tel Aviv 공동연구 프로그램을 진행하면서 현재 Flavor Physics 분야의 주요 현안과제인 lepton-flavor universality 문제를 집중 탐구하기 위한 실험 방법 중 하나인 missing particle 분석법을 주제로 미니 국제 워크숍을 공동 개최하기로 의견을 모으고 추가로 3명의 조직위원들을 추가로 위촉하여 mini-workshop을 조직하고 진행하였다. 이 mini-workshop은 Covid-19 감염병 예방을 위해 전면 online으로 개최되었으며 전세계에서 185명이 등록, 참가하였다. (참가자 90% 이상 외국 대학/연구소 소속임) <https://indico.belle2.org/event/4615/>

② The 17th Saga-Yonsei partnership program on High-Energy Physics 2021

- 학회기간: 2021년 1월 7일-8일, 1월 21일-22일
- 개최국가: 대한민국 (온라인)
- 권영준 교수와 박성찬 교수는 연세대 물리학과와 일본 사가대학 물리학과 입자물리 연구진 사이의 Saga-Yonsei 입자물리 공동워크샵을 2021년 1월에 개최하였다. 본 워크샵은 2004년부터 매년 진행해 오고 있으며, 2021년 1월 제17회 공동워크샵은 연세대 주최로 전면 온라인으로 진행하였다. 2021년 1월 7일과 8일에 워크샵을 진행한 후에 학생들에게 과제를 내주고 다시 1월 21일과 22일에 워크샵을 재개하여 마무리하는 일정에 따라 총 8개의 교수 강연(90 min. each), 3개의 신진인력 세미나 (30 min. each), 10개의 대학원생 발표 및 3개의 그룹 과제 수행/발표가 진행되었다. 이 mini-workshop에는 한국, 일본 외에도 미국, 스페인, 영국 등에서 총 52명이 등록, 참여하였다. <https://ihepco.yonsei.ac.kr/event/106/>

③ Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2020, International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC) 2020

- 학회기간: 2020년 10월 24일-27일
- 개최국가: 중국
- ACP는 중국이 주도하는 광학기술, 광자공학 기술 전문 학회로 아시아 태평양 지역에서 가장 규모가 큰 학회 및 전시회임.
- 오경환 교수는 Track Committees (Track 1: Optical Fibers, Fiber-based Devices and Sensors) 위원회를 역임함.

④ Asia-Pacific Workshop on Particle Physics and Cosmology 2021

- 학회기간: 2021년 8월 2일-6일
- 개최국가: 대한민국, 중국, 일본, 대만, 호주 (온라인)
- 대한민국, 일본, 중국, 대만, 호주 등 아시아 지역의 100명 이상의 연구자들이 모여 최신 연구 성과에 대한 토의를 진행하였다.
- 박성찬 교수가 메인 주최자를 역임함.

⑤ Future Collider Monthly meeting

- 학회기간: 2021년 2월 25일
- 개최국가: 대한민국 (온라인)
- 유휘동 교수는 차세대 가속기 프로젝트를 정기적으로 논의하는 Future Collider Monthly meeting 학회를 개최하고 국내외 전문가를 초청하여 워크샵을 진행함.

⑥ Korea Future Collider Workshop 2021 (summer)

- 학회기간: 2021년 8월 26일-27일
- 개최국가: 대한민국 (온라인)
- 유휘동 교수는 차세대 가속기 프로젝트에 대한 심도 있는 논의를 위한 워크샵을 개최하고 국내외 초청 연사들과 함께 현재 진행되고 있는 차세대 가속기 연구의 국내외 현황과 앞으로의 국내외 공동 협력 연구 방향 등에 대해 논의함. “Status of Dual-Readout Calorimeter R&D”, “Status of Korea Future Collider Consortium”, “Preparation of FCC Lol for Korea-CERN program“ 등 3개의 발표와 좌장 등의 활동을 진행함.

⑦ 1st International workshop on scanning probe microscopy

- 학회기간: 2020년 11월 10일-11일
- 개최국가: 대한민국
- 국내 연구자가 중심이 되어 scanning probe microscopy를 이용한 최신 연구 동향을 파악하고 향후 발전 방향을 모색하는 목적으로 개최되는 국제학회
- 조두희 교수는 학회를 주관하는 운영위원을 역임함.

⑧ 2nd International workshop on scanning probe microscopy

- 학회기간: 2021년 8월 9일-11일
- 개최국가: 대한민국
- 국내 연구자가 중심이 되어 scanning probe microscopy를 이용한 최신 연구 동향을 파악하고 향후 발전 방향을 모색하는 목적으로 개최되는 국제 학회
- 조두희 교수는 학회를 주관하는 운영위원을 역임함.

4 국제학회/학술대회 활동을 통해 학문적 주도권 확보

◎ 기초연설

① Hadrons in Nucleus 2020 (일본, 2021년 3월 8일-10일)

- 핵물질 속에서 강입자의 성질을 보려는 국제적 노력의 상황을 점검하고 앞으로 추진 방향을 논의한 국제 학회
- 이수형 교수가 “Vector meson mass in the chiral symmetry restored vacuum” 을 주제로 기초연설 수행

② 4th International Seminar on Photonics, Optics, and its Applications (ISPhOA 2020) (인도네시아, 2020년 12월 1일-2일)

- 2년마다 ASEAN 국가에서 열리는 광학, 광자공학 및 그 응용에 대한 국제학회
- 오경환 교수는 “Fiber Optic Laser Beam Shaping technology for Emerging Interdisciplinary Sciences.” 을 주제로 기초연설 수행

◎ 초청강연

본 교육연구단은 교육연구의 국제화를 달성하기 위해 국제학회 및 학술대회 활동을 적극 지원하고 있다. 특히 연구 논문 성과에 대한 평가가 양적 지표로부터 질적 지표로 전환되는 세계적인 추세에 발맞춰, 교육연구의 국제화도 양적 성장과 함께 질적 성장을 이뤄내야 한다. 본 교육연구단은 국제화 지표의 양적성장으로 부터 질적 성장으로의 전환을 꾸준히 추구하고 있다. 최근 1년간 (2020년 9월 1일부터 2021년 8월 31일까지) 초청 강연 실적은 다음과 같다.

① 독일 Bonn 대학교 물리학과 콜로퀴움 강연 (독일 Bonn 대학교, 2021년 5월 21일)

- 독일 Bonn 대학교 물리학과 Florian Bernlochner 교수의 초청 추천을 받아 Bonn 대학교 물리학과 콜로퀴움 강연
- 권영준 교수는 “A tale of two-leptons” 의 강연 제목으로 최근 flavor physics 분야에서 초미의 관심이 되고 있는 lepton flavor universality의 문제와 관련된 최신 연구결과들을 소개하였다. <http://www.th.physik.uni-bonn.de/People/dagmar/kolloq.htm>

- ② Microscopy and Microanalysis (M&M) 2021 (미국 (온라인), 2021년 8월 1일-5일)
- 미국 현미경 학회에서 주최하는 전자현미경 분야에서 제일 명망이 높은 국제 학술대회
 - 김관표 교수는 “Unidirectional Assembly on Distorted Two-Dimensional Crystal Substrates” 의 제목으로 초청강연 수행
 - 올해 초청연사 중 한국 연구기관 소속의 연사로는 거의 유일한 초청연사로서, 이는 김관표 교수가 전자현미경 분야에서 전세계적으로 역량을 인정받고 있음을 보여주고 있다.
- ③ 6th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2020) (대한민국, 2020년 11월 1일-4일)
- ENGE 2020은 한국금속재료학회에서 주관하는 최대 규모의 국제 학술대회
 - 김관표 교수는 “TEM imaging of molecular structures and dynamics enabled by graphene membrane” 을 주제로 2차원 물질에 대한 위성세션에서 초청강연 수행
- ④ UVSOR User’s Meeting (일본 (온라인), 2020년 10월 27일)
- UVSOR User’s Meeting은 일본의 대표적인 저에너지 방사광가속기 UVSOR에서 매년 개최하는 학술행사이다.
 - 김근수 교수는 나노스케일 각분해광전자분광과 흑린의 전자 구조에 관해 초청강연 수행
- ⑤ International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2020) (대한민국, 2020년 11월 1일-4일)
- ENGE 2020은 한국금속재료학회에서 주관하는 최대 규모의 국제 학술대회
 - 김근수 교수는 2차원 물질 분야에 대한 초청 연사로서 미래 유사스핀트로닉스를 위한 양극성 유사스핀 반도체라는 주제로 초청강연 수행
- ⑥ The 1st Workshop on Quantum Material under Extreme Conditions (대한민국-중국(온라인), 2020년 11월 27일)
- 중국의 HPSTAR와 한양대학교 고압연구소와 공동 주최하는 국제 워크샵
 - 김근수 교수는 흑린의 밴드구조와 디락 원뿔의 합병체라는 주제로 초청 강연 수행
- ⑦ Yonsei-UCB Workshop (대한민국-미국(온라인), 2021년 2월 18일)
- UC Berkeley 물리학과와 연세대학교 물리학과 간의 인적/학문적 교류를 촉진하고, 본 교육연구단에 대한 국제 자문을 위해 개최한 온라인 워크샵이다.
 - 김근수 교수는 2차원 반도체의 밴드구조 제어라는 주제로 초청 강연 수행
- ⑧ The 81st JSAP Autumn Meeting 2020 (일본, 2020년 9월 8일-11일)
- 일본 응용 물리학회(Japanese Society of Applied Physics, JSAP) 학술대회는 응용물리 전반을 포괄하는 대형 학술대회이며, 일본의 주요 대학, 연구소, 기업이 참여하고 있음.
 - 오경환 교수는 “All-Fiber Beam Shaping for Precise Optical Manipulation within a Single Droplet” 의 제목으로 초청강연 수행
- ⑨ IAS conference (홍콩(온라인), 2021년 1월 14일-21일)
- 홍콩의 고등과학원에서 매년 개최하는 입자물리 주제의 학회로 1주일의 워크샵과 1주일의 컨퍼런스로 구성되어 있음
 - 유희동 교수는 “Status of Dual-Readout Calorimeter R&D” 를 주제로 차세대 가속기와 관련된 d

ual-readout calorimeter R&D의 현황과 앞으로의 계획 등에 대해 초청강연 수행

⑩ CPAD Instrumentation Frontier workshop (미국(온라인), 2021년 3월 18일-22일)

- Snowmass 2021 캠페인과 관련하여 입자물리연구에 필요한 차세대 검출기 기술을 현황과 연구 방향을 논의하기 위한 학회
- 유휘동 교수는 “Dual-Readout Calorimeter R&D in Korea” 를 주제로 한국에서 수행하고 있는 dual-readout calorimeter R&D에 대한 연구 현황을 발표하고 특히 3D 금속 프린터로 제작 중인 차세대 검출기 모듈과 향후 연구계획에 대해 초청강연 수행

⑪ AFAD2021 workshop (러시아(온라인), 2021년 3월 16일-18일)

- 핵 및 입자물리 연구에 사용되는 가속기와 검출기 관련 연구의 최신 현황과 연구 방향을 논의하기 위한 아시아 포럼
- 유휘동 교수는 “Advanced R&D of the Dual-Readout Calorimeter” 를 주제로 한국에서 수행하고 있는 dual-readout calorimeter R&D에 대한 연구 현황을 발표하고 특히 3D 금속 프린터로 제작 중인 차세대 검출기 모듈과 향후 연구계획에 대해 초청강연 수행

⑫ The High Energy Physics 105 workshop (대한민국(온라인), 2020년 11월 7일)

- 연세대학교 물리학과 100주년을 기념하여 개최한 핵입자물리 심포지움 이후 매년 개최하는 관련 워크샵으로 최신 핵입자 물리연구 현황을 소개하는 워크샵
- 유휘동 교수는 “Dual-Readout Calorimeter R&D in Korea” 를 주제로 한국에서 수행하고 있는 dual-readout calorimeter R&D에 대한 연구 현황을 발표하고 향후 연구계획에 대해 초청강연 수행

⑬ Korea-Japan HI workshop (대한민국(온라인), 2021년 7월 15일-16일)

- 한국-일본의 중이온 연구 그룹이 정기적으로 개최하는 관련 연구 워크샵
- 유휘동 교수는 “3-d printing technology for calorimeter” 를 주제로 첨단 금속 프린터를 이용한 검출기 제작 연구 현황 및 계획에 대해 초청강연 수행

⑭ apres-LHC workshop (대한민국(온라인), 2021년 8월 3일-5일)

- LHC 실험 연구 결과에 대한 최신 현황과 앞으로의 전망에 대해 논의하는 정기 LHC 워크샵
- 유휘동 교수는 “Korea Future Collider Activities” 를 주제로 차세대 가속기 프로젝트에 참여하거나 관심있는 국내 연구진들의 연구 현황을 소개하고 앞으로의 활동 방향에 대해 초청강연 수행

⑮ 2nd International workshop on scanning probe microscopy (대한민국, 2021년 8월 9일-11일)

- 국내 연구자가 중심이 되어 scanning probe microscopy를 이용한 최신 연구 동향을 파악하고 향후 발전 방향을 모색하는 목적으로 개최되는 국제 학회
- 조두희 교수는 위상 초전도체의 쿠퍼쌍과 원자 수준의 결합의 상호 작용으로 발현되는 특이 전자 구조를 정밀하게 측정하고 제어하는 방법에 대해서 초청강연 수행

⑯ 한국물리학회 2020년 가을 학술논문발표회 (대한민국, 2020년 11월 4일-6일)

- 조두희 교수가 “van der Waals type superconductors“. 제목의 포커스 세션에서 층상 구조를 가지는 위상 초전도체에 대한 주사 터널링 현미경 연구 내용으로 초청강연 수행. 관련 연구 성과는 2021년 1월에 세계적인 권위지 Nature Communications지에 게재

5 국제학술지 발전에 공헌과 기여

◎ 국제학술지의 편집위원 활동

- ① Journal of the European Optical Society (영국): 김재훈 교수 편집위원 역임 (2016년-현재)
 - Journal of the European Optical Society는 광학과 포토닉스 분야에서의 의미있는 성과를 발표하는 국제 학술지다. 광학 계측, 분광법 등 폭넓은 분야를 바탕으로 물리, 화학 분야의 발전에 기여를 하고 있다.
 - 김재훈 교수는 2016년부터 Section Editor (Terahertz spectroscopy)를 역임하고 있다.
- ② Scientific Reports: 최영재 교수 편집위원 역임 (2019년 5월-현재)
 - Scientific Reports는 과학 전분야를 대상으로하는 네이처 자매지이다.
 - 최영재 교수가 2019년 5월부터 편집위원을 역임하고 있다.
- ③ AAPPS Bulletin: 최형준 교수 편집위원 역임 (2021년 6월-2023년 5월)
 - AAPPS Bulletin은 Association of Asia Pacific Physical Societies (AAPPS)에서 발행하는 물리학 전 분야를 대상으로한 학술지
 - 최형준 교수는 2021년 6월부터 편집위원을 역임하고 있다.
- ④ Current Applied Physics: 김관표 교수 편집위원 역임 (2016년 4월-현재)
 - Current Applied Physics는 한국물리학회에서 발행하는 학술지로 응용 물리 전반에 관한 논문을 다룬다. SCIE에 등재되어 있으며 2020년 JCR 기준 Impact Factor는 2.48이다.
 - 김관표 교수는 2016년 4월부터 편집위원을 역임하고 있다.

② 국제 공동연구 실적

<표 3-6> 최근 1년간 국제 공동연구 실적

연번	공동연구 참여자		상대국 /소속기관	국제 공동연구 실적	DOI 번호/ISBN 등 관련 인터넷 link 주소
	교육연구단 참여교수	국외 공동연구자			
1	임성일	LinFeng Deng, JinLi, QinLiu, HaiqingHuang, JunWang, DongCheng, HeWen	Hunan University, Changsha, China	Compact I-V Model for Ambipolar Field-Effect Transistors With 2D Transition Metal Dichalcogenide as Semiconductor	10.1109/TNANO.2020.3034658
2	임성일	Syed Raza AliRaza, Zamir-ul-Hassan	University of Azad Jammu and Kashmir, Pakistan	Electrical joule heating for the isolation of ZnO nanowire channel and subsequent high-performance 1D circuit integration	10.1016/j.cap.2020.09.011
3	김관표	Xiaojia Du, Yan Zhang, Tianhao Yu, Nan Liu	Beijing Normal University, China BeijingGrapheneInstitute, China	Electronically Weak Coupled Bilayer MoS2 at Various Twist Angles via Folding	10.1021/acsami.1c03135

4	김관표	Daniel Rossi, Xiaohan Liu, Mohit Khurana, Joseph Puthenpurayil, Alexey V. Akimov	Texas A&M University, College Station, United States	Intense Dark Exciton Emission from Strongly Quantum-Confined CsPbBr ₃ Nanocrystals	10.1021/acs.nanolett.0c02714
5	김관표	Jim Ciston, Karen C. Bustillo, Bryan W. Reed, Ruth S. Bloom, Alex Zettl	National Center for Electron Microscopy, Integrated Dynamic Electron Spectroscopy, University of California, Berkeley	Reversible disorder-order transitions in atomic crystal nucleation	10.1126/science.aaz7555
6	김관표	Arend M. van der Zande	University of Illinois Urbana Champaign, United States	Tailoring Single- And Double-Sided Fluorination of Bilayer Graphene via Substrate Interactions	10.1021/acs.nanolett.0c03237
7	권영준	Belle Collaboration	Belle Collaboration	Search for the dark photon in $B_0 \rightarrow A' A'$, $A' \rightarrow e+e'$, $\mu+\mu'$, and $\pi+\pi'$ decays at Belle	10.1007/JHEP04(2021)191 외 21건
8	권영준	Telescope Array Collaboration	Telescope Array Collaboration	The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode	10.3847/1538-4357/abdd30 외 1건
9	유취동	The CMS Collaboration	The CMS Collaboration	Measurement of the CP-violating phase ϕ_1 in the $B_s^0 \rightarrow J/\psi (1020) \rightarrow \mu+\mu' K^0$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$	10.1016/j.physletb.2021.136188 외 29건
10	최영재	Matthias J. Gutmann, Shangke Pan, Valery Kiryukhin	USA, United Kingdom	Noncollinear antiferromagnetic order in the buckled honeycomb lattice of magnetoelectric Co ₄ Ta ₂ O ₉ determined by single-crystal neutron diffraction	10.1103/PhysRevB.102.214404
11	최영재	Hua Zhou, Alessandro Bombardi	Argonne National Laboratory, USA University of Oxford, United Kingdom	Stable hump-like Hall effect and noncoplanar spin textures in SrRuO ₃ ultrathin films	10.1103/PhysRevResearch.3.023232
12	최영재	Adra Carr, John Bowlan, Claudio Mazzoli, Colby Walker, Xiaxin Ding, Andi Barbour, Wen Hu Stuart Wilkins, Shi-Zeng Lin, Richard L. Sandberg, Vivien S. Zapf	LANL, Brookhaven National Laboratory, Brigham Young University, USA	Dynamics of a fractal set of first-order magnetic phase transitions in frustrated Lu ₂ CoMnO ₆	10.1103/PhysRevB.103.L060401
13	최영재	Jonathan Denlinger, Aaron Bostwick, Eli Rotenberg	Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA	Spin-orbit coupling driven orbital-selective doping effect in Sr ₂ Ru _{1-x} Ir _x O ₄	10.1103/PhysRevB.103.L081104

14	김재훈	Carina A. Belvin, Edoardo Baldini, Ilkem Ozge Ozel, Dan Mao, Hoi Chun Po, Clifford J. Allington, T. Senthil, Nuh Gedik	Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA USA	Exciton-driven antiferromagnetic metal in a correlated van der Waals insulator	10.1038/s41467-021-25164-8
15	김재훈	Maryam Bari, Zuo-GuangYe	Simon Fraser University, Canada	Exotic optoelectronic behaviors in CH ₃ NH ₃ PbCl ₃ perovskite single crystals: Co-existence of free and bound excitons with structural phase transitions	10.1063/5.0043551
16	김재훈	Yukio Noda	Tohoku University	Kagome van-der-Waals Pd ₃ P ₂ S ₈ with flat band	10.1038/s41598-020-77825-1
17	김재훈	Joanna M. Wolska, Damian Pocięcha, Ewa Gorecka,	University of Warsaw, Poland	Security use of the chiral photonic film made of helical liquid crystal structures	10.1039/d0nr03743e
18	이수형	Philipp Gubler, Kenji Morita	Japan Atomic Energy Agency, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology	J/ψ near T _c	10.1016/j.physletb.2021.136065
19	박성찬	Kin-ya Oda	Osaka University, Japan	Spontaneous leptogenesis in Higgs inflation	10.1007/JHEP03(2021)083
20	조두희	Damianos Chatzopoulos, Koen M Bastiaans, Gorm O Steffensen, Damian Bouwmeester, Alireza Akbari, Genda Gu, Jens Paaske, Brian M Andersen, Milan P Allan	Leiden University, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Max Planck Institute for the Chemical Physics of Solids, Max Planck Institute for the Chemical Physics of Solids	Spatially dispersing Yu-Shiba-Rusinov states in the unconventional superconductor FeTe _{0.55} Se _{0.45}	10.1038/s41467-020-20529-x
21	오경환	Mikko Partanen	Aalto University, Finland	Radiation pressure measurement using a macroscopic oscillator in an ambient environment	10.1038/s41598-020-77295-5
22	오경환	Jun Ma, Yang He, Xue Bai, Li-Peng Sun, Kai Chen, Bai-Ou Guan	Jinan University, China	Flexible microbubble-based Fabry-Perot cavity for sensitive ultrasound detection and wide-view photoacoustic imaging	10.1364/PRJ.394941
23	김근수	Fabian Göhler, Sung Won Jung, Thomas Seyller	Chemnitz University of Technology, Germany Harwell Campus, UK	Electronic band structure of Bi-intercalate layers in graphene and SiC(0001)	10.1007/s40042-020-00055-1

③ 외국 대학 및 연구기관과의 연구자 교류 실적 및 계획

연세 물리 교육연구단은 질적으로 우수한 연구 성과로 이어질 수 있는 연구자 교류를 전략적으로 강화

하고자 한다. 이를 위해 해외 기관과의 정례 워크숍 확대 운영, 교내 국제 공동연구 플랫폼(연세프론티어연구원) 활용을 통해 우수 연구자 및 해외 석학 초청, 국외 신진연구 인력 및 대학원 학생 방문 프로그램 확대, 외국 대학과의 공동·복수학위제 확대 운영, 국외 첨단연구시설을 활용한 공동연구 확대 등을 계획하여 추진하고 있다.

연구자 교류 실적 ① 해외 기관과의 정례 워크숍 진행을 통한 인적 교류

본 교육연구단 운영 첫해인 1차년도에는 다음과 같은 대표적인 해외 기관과의 정례 워크숍을 포함하여, 해외 초청 연세 세미나를 17회 이상 개최하여 참여 대학원생 및 신진연구자들에게 최신 연구 동향을 소개하고 인적 교류 및 공동연구 활성화를 진행하였다.

- **Mini-workshop on missing particle signatures and new physics at Belle II and LHCb:** 권영준 교수는 이스라엘 Tel Aviv 대학 Abner Soffer 교수와 Yonsei-Tel Aviv 공동연구 프로그램을 진행하면서 현재 Flavor Physics 분야의 주요 현안과제인 lepton-flavor universality 문제를 집중 탐구하기 위한 실험 방법 중 하나인 missing particle 분석법을 주제로 미니 국제 워크숍을 공동 개최하기로 의견을 모으고 추가로 3명의 조직위원들을 추가로 위촉하여 mini-workshop을 조직하고 진행하였다. 이 mini-workshop은 Covid-19 감염병 예방을 위해 전면 online으로 개최되었으며 전세계에서 185명이 등록, 참가하였다. (참가자 90% 이상 외국 대학/연구소 소속임) (2021년 7월 5일~6일)
- **The 17th Saga-Yonsei partnership program on High-Energy Physics 2021:** 2004년부터 연세대 물리학과와 일본 사가대학 물리학과 입자물리 연구진 사이에 Saga-Yonsei 입자물리 공동워크숍을 매년 진행해 오고 있다. 특히 2021년 1월에는 연세대 주최로 제17회 공동워크숍을 전면 온라인으로 진행하였다. 2021년 1월 7일-8일 이틀 진행 후 학생들에게 과제를 내주고 다시 1월 21-22일 재개하여 마무리하는 일정에 따라 총 8개의 교수 강연(90 min. each), 3개의 신진인력 세미나 (30 min. each), 10개의 대학원생 발표 및 3개의 그룹 과제 수행/발표가 진행되었다. 이 mini-workshop에는 한국, 일본 외에도 미국, 스페인, 영국 등에서 총 52명이 등록, 참여하였다.
- **연세-UC Berkeley 정기 교류회:** UC Berkeley 물리학과와 연세대학교 물리학과 간의 인적/학문적 교류를 촉진하고, 본 교육연구단에 대한 국제 자문을 위해 온라인 워크숍 및 교류회를 진행하였다. 앞으로 정례화하여 1년 혹은 2년에 한번씩 진행할 예정이다. 본 교류회에서는 각 학교에서 4인의 교수가 발표를 진행하였고, 박사후 연구원 발표를 포함한 총 9개의 세미나가 2일간 진행되었다. 양교 박사후 연구원, 대학원생을 포함한 연구자 100명 이상이 참석하여 quantum materials 및 quantum applications 분야의 최신 연구 동향을 습득하였으며, 양교간 인적 교류 활성화 방안 등에 대하여 논의하였다. (2021년 2월 18일-19일)
- **Korea Future Collider Workshop 2021:** 차세대 가속기 프로젝트에 대한 심도있는 논의를 위한 워크숍을 개최하고 국내외 초청 연사들과 함께 현재 진행되고 있는 차세대 가속기 연구의 국내외 현황과 앞으로의 국내외 공동 협력 연구 방향 등에 대해 논의하였다. “Status of Dual-Readout Calorimeter R&D”, “Status of Korea Future Collider Consortium“, “Preparation of FCC LoI for Korea-CERN program“ 등 3개의 발표와 좌장 등의 활동을 진행하였다. (2021년 8월 26일~27일)

연구자 교류 실적 ② 연구자 해외 파견 실적

본 교육연구단 운영 첫해인 1차년도에는 다음과 같은 활동을 통해 외국 대학 및 연구기관과의 연구자 교류를 진행하였다. 최근 코로나19 상황으로 해외 직접 방문에 여러 제약이 있었으나, 추후 상황이 좋아져 교류가 좀 더 활성화될 것으로 기대한다.

- **조성진 대학원생 (권영준 지도교수), 김용규 대학학생 (권영준 지도교수):** 일본 국립 고에너지가속

기연구기구(KEK)를 방문하여 Belle II 실험 operation에 참여, Belle II 실험을 위한 data acquisition 연구 참여, axion 유사입자 탐색을 위한 Belle 실험 데이터 분석 연구 참여 등으로 KEK 소속 Mikihiro Nakao 교수, Shohei Nishida 교수 등과 학술 교류를 하였다. (2020년 11월~2021년 2월, 3개월 이상 체류)

- **조용수 대학원생 (박성찬 지도교수):** 유럽핵입자물리연구소(CERN)에 방문하여 최근 입자물리학계에서 많은 관심을 모으고 있는, 액시온유사입자(Axion-like particles)로부터 일반적으로 발생하게 되는 렙톤수 비보존(Lepton-flavor-violation)과정과 그에 대한 탐색으로 MEG-II, MEG-II-fwd 등의 후속실험에서 직접 사용가능한 트리거 조건을 제시하는 것을 논의하였다. (2021년 7월1일~현재)
- **류세희 박사후연구원 (김근수 지도교수):** 미국 로렌스버클리국립연구소에 소재한 방사광가속기 Advanced Light Source 빔라인 7을 방문하여 Na 및 Ca이 표면에 도핑된 흑린의 밴드 구조에 대한 각분해광전자분광 실험 및 연구를 수행함. (2020년 12월15일 - 2020년 12월 30일, 2021년 4월~현재)
- **이양진 박사후연구원 (김관표 지도교수):** 미국 캘리포니아 버클리 대학 물리학과에 방문연구원으로 파견되어 고분해능 투과전자현미경(TEM)을 활용한 인(Phosphorus) 구조 결정체 합성 및 분석 연구를 진행하고 있다. (2021년 6월 17일~ 현재)
- **조두희 교수:** 해외를 직접 방문하지 않았지만 온라인 미팅과 원격 실험을 통해 공동 연구를 진행하여 위상 초전도체와 원자 수준의 결합의 상호작용으로 발현되는 위상학적 양자 상태를 실험적으로 검증하는 방법을 제안하는 연구를 진행하였다. 관련 연구는 세계적인 권위지 Nature Communcations 2021년 1월에 게재되었고 조두희 교수는 공동 제1저자로 참여하였다.

연구자 교류 실적 ③ Joint Affiliation을 통한 해외 석학 초빙

본 교육연구단은 Joint Affiliation 교원을 활용하여 국제공동연구 기회 확대를 확대해나가고 있다. University of St Andrews의 키산 돌라키아 (Kishan Dholakia) 교수는 2018년부터 물리학과 겸임교수로 재직 중에 있다. 키산 돌라키아 교수는 코로나19 상황으로 최근 한국 직접 방문이 어려웠으나 온라인으로 대학원 광학 수업 등을 진행하며 본 연구단 교육에도 큰 기여를 하였다. 또한 오경환 교수 등을 포함한 연구그룹과 활발한 공동연구를 진행하고 있으며, 최근 본 교육연구단 참여 대학원생이 주저자로 다음과 같은 논문을 게재하는 등 큰 효과를 보이고 있다.

- 박준범 학생(제1저자), 오경환, Dholakia, K(교신저자), SCIENTIFIC REPORTS 11, 12690 (2021)
Optical manipulation of a dielectric particle along polygonal closed-loop geometries within a single water droplet

연세 물리 교육연구단은 지난 1년간 다양한 방법을 통해 해외기관과의 인적 교류를 확대해나가고 있으나, 코로나 19라는 특수 상황으로 인한 제약이 작다고 할 수 없다. 단기적으로는 코로나19 상황에서도 진행할 수 있는 부분을 중점적으로 진행해나가는 동시에 “위드 코로나” 상황을 대비하여 국제화 역량 강화에도 힘쓰고자 한다.

해외 연구자 교류 계획 ① “위드 코로나” 대비 국제화 역량 강화

- 해외 대학과의 복수/공동학위 제도: 대학원생/신진연구인력의 국제적 커리어 형성 기간 단축 및 비용 절감을 통한 취업 및 진학 지원
- 해외 첨단 연구시설 활용 등 장단기 해외 연수 적극 지원
- 해외 석학 방문 특강 프로그램: 국내 장기 체류가 어려운 해외석학을 초청하여 집중강의를 운영하고 이를 정규학기 개설 교과목으로 인정
- Pre-doc 제도: 교육연구단 우수 대학원생을 pre-doc으로 선정하여 해외 우수 연구기관에 파견함

으로써 학위 취득 후의 현지 기관으로의 취업 기회를 실질적으로 제고

해외 연구자 교류 계획 ② 국외 첨단연구시설을 활용 확대

국외 첨단연구시설을 활용한 공동연구 확대도 활발히 추진하고 있다. 국외 첨단연구시설을 활용한 공동연구가 질적으로 우수한 연구 성과로 이어지는 사례가 많으며, 다음과 같은 첨단연구시설 활용을 진행하고 있거나 앞으로 계획하고 있다.

- **QU:** 일본 KEK 연구소의 Belle / Belle II 실험을 통한 연구를 지속적으로 확대 발전하며 유휘동 교수가 참여하는 스위스 CERN 연구소의 CMS 실험으로 다변화
- **QM:** 미국과 영국 방사광가속기를 활용한 국제 공동연구를 지속하고 중국, 일본으로 확대해 나가며 방사광가속기 외 다른 첨단 연구 장비(TEM, STM 등)를 활용한 공동연구를 새롭게 추진
- **QA:** 첨단연구시설을 활용한 공동연구의 새로운 채널을 모색하여 대학원생 방문연구 확대 (김관표 교수: Lawrence Berkeley National Lab, 이연진 교수: 독일 Bessy-II 방사광가속기 등)

IV

4단계 BK21 교육연구단(팀) 관련 언론보도 리스트

교육연구단명	연세물리교육연구단
교육연구단장명	오경환

연번	구분	언론사명 /수상기관 등	보도일자/ 수상일자 등	제목/ 수상명 등	관련 URL
		주요내용 (200자이내)			
1	성과	조선일보 외 3건	21.05.11	김관표 교수팀, 새로운 구조의 4-6족 칼코겐 화합물 구현	https://lifenlearning.chosun.com/pan/site/data/html_dir/2021/05/11/2021051101532.html
		김관표 교수 연구팀은 이론으로만 예견된 새로운 구조의 4-6족 층상 칼코겐 화합물을 실제로 합성하였으며, 이를 통해 칼코겐 물질의 구조 제어 및 응용 연구에 새로운 길을 열었다. 최신 전자현미경 분석법을 총동원해 새로운 물질 구조 분석을 성공적으로 이뤄냈으며, 새로운 유형의 칼코겐 다형체 추가 발견과 강전 및 열전 응용에 대한 다양한 기초 연구 기반을 마련하였다.			
2	성과	한겨레 외 31건	21.08.06	김근수 교수팀, 노벨상 수상자가 예측한 ‘액체 금속의 전자 구조’ 발견	https://www.hani.co.kr/arti/science/science_general/1006505.html
		김근수 교수 연구팀은 노벨물리학상 수상자 필립 앤더슨과 네빌모트등이 1960년대 예측했던 액체 금속의 전자 구조를 발견하였다. 향후 고온초전도의 메커니즘 규명에 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다. 연구성과는 2021년 8월 5일 국제학술지 네이처(Nature)에 게재되었으며, 한겨레 외 31개의 언론사에 보도되었다.			