극한 핵물질 연구를 위한 검출기 개발

DOI: 10.3938/PhiT.28.005

안정근·문별·한인식·홍병식

Development of Detectors for Extreme Nuclear Matter Experiments

Jung Keun AHN, Byul MOON, Insik HAHN and Byungsik HONG

Particle detectors are used for position, energy, and velocity measurements on charged and neutral particles in nuclear and particle physics experiments. The Center for Extreme Nuclear Matter (CENuM) is leading an effort to develop new particle detectors for extreme nuclear physics programs in nuclear and hadron physics programs not only at RIKEN and J-PARC but also at RAON in Korea. The CENuM detector program includes the home-base development of an active-target time projection chamber, a silicon detector array, a LaBr₃ gamma-ray array, and a large-area neutron detector array.

서론

극한 핵물질은 가속기 빔의 에너지에 따라 쿼크와 하드론,

핵 등 다양한 대상으로 연구할 수 있다. 그리고 극한 핵물질 연구를 위한 실험은 목적에 따라 측정하는 입자의 종류와 에너지 영역 등이 크게 다른 만큼, 실험 장치의 종류와 크기도 달라져야 한다. 쿼크-글루온 플라즈마를 연구하는 고에너지 가속기의 초대형 실험부터 핵구조와 천체핵반응을 연구하는 상대적으로 작은 규모의 실험까지 실로 다양한 종류의 검출기가 필요하다.

검출기는 입자의 궤적이나 도달 시간, 검출기 매질 안에서 입자가 잃은 에너지 등을 측정한다. 검출기를 작동원리에 따라 분류하면 기체 검출기, 반도체 검출기, 섬광 검출기, 체렌코프 검출기 등이 있는데, 입자와 물질의 상호작용 종류에 의해 구분된다. 그리고 검출기에서 나온 첫 신호가 전기적 신호인지 빛 신호인지에 따라 전기신호 증폭회로나 광센서가 필요하다. 입력정보를 커다란 전기신호로 증폭한 다음, 파형 정보를 그대로 저장하거나, 그 크기나 시간 정보 등을 디지털화하여 저장한다. 이같이 신호를 저장하는 과정에서 필요한 정보만 선택하여 다음 단계로 전달하는 트리거 전자회로나 프로그램이 추가되기도 한다.

극한핵물질연구센터(CENuM)는 현재 국내외에서 진행 중이거나 수행할 예정인 핵물리 실험의 주요 검출장치를 개발하는 중이다. 특히 2021년 기초과학연구원(IBS)에 완공될 예정인 RAON의 첫 번째 빔 라인에 설치할 검출기와 향후 높은 에너지 빔 라인에 설치할 대형 검출기의 개발을 동시에 진행하고 있다.^[1,2] RAON 실험을 위한 검출기 개발은 우리나라의 연구인프라 구축과 기술축적을 위해 가능하면 국내에서 설계, 재료구매, 제작, 성능시험 등을 모두 할 예정이다. 이 글은 CENuM에서 개발하는 중이거나 계획하고 있는 시간 투영 검출기와 실리콘 검출기, LaBr₃(Ce) 감마선 검출기, 중이온가속기건설구축사업단(이하 중이온가속기사업단)의 LAMPS 중성자 검출기를 간략히 소개한다.

저자약력

안정근 교수는 고려대학교와 교토대학에서 박사학위 취득 후, 오사카대학의 박사후연구원을 거쳐 2001-2013년 부산대학교 교수로 재직하였고, 2014년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 현재 J-PARC H-Dibaryon 탐색 실험 E42의 대표로서 별난 하드론 물리 분야를 연구 중이다. (ahnjk@korea.ac.kr)

문별 박사는 홍익대학교 전자전기공학부 학사학위 취득 후, 2019년 고려대학교 물리학과에서 박사학위를 취득하고, 현재 극한핵물질연구센터에서 박사후연구원으로 재직 중이다.

한인식 교수는 예일대학에서 핵천체물리학으로 박사학위를 취득하였다. 이후 캘리포니아 공과대학, 일본 이화학연구소, 휴스턴대학에서 박사후연구원을 거쳐 1999년부터 이화여자대학교 과학교육과에 교수로 재직 중이다.

홍병식 교수는 미국 뉴욕주립대학(스토니브룩)에서 박사학위 취득 후, 독일 GSI 연구소 연구원을 거쳐 1997년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 현재 우수연구센터인 극한핵물질연구센터(CENuM)의 연구책임자이다.

REFERENCES

- [1] B. Hong *et al.*, Eur. Phys. J. A **50**, 49 (2014).
- [2] B. Hong *et al.*, Nucl. Sci. Tech. **29**, 171 (2018).

Fig. 1. Schematic drawing of the 1.5 T conduction-cooled superconducting magnet.

시간 투영 검출기

시간 투영 검출기(Time Projection Chamber, TPC)는 기체가 채워진 공간에 하전입자가 지나가면 기체 원자가 입자의 궤적을 따라 이온화하는 원리를 이용한다.^[3] 이온화 전자는 가해진 전기장을 거슬러가며 계속 이온화 과정을 반복함으로써 갈수록 더 많은 이차전자를 만든다. 그리고 검출기 내의 신호 취득 영역에는 기체 공간보다 훨씬 높은 전기장이 걸려 전자의 수가 급격히 증가한다. 검출기는 증폭된 전자들을 직접 모으거나 전체 전자구름의 유도전하를 읽는 식으로 전기신호를 만든다. 이때 입자의 궤적으로부터 도달한 전하량과 시간을 측정하면 입자 궤적을 3차원으로 재구성할 수 있다. 시간 투영 검출기에 전기장과 함께 자기장이 가해지면 하전입자는 나선형으로 진행하고 궤적이 휘는 정도를 측정하여 운동량을 재구성할 수 있다. 그리고 이온화 전자들이 기체 안에서 진행할 때 공간에 퍼지는 정도를 줄이면 공간분해능이 향상된다.

CENuM이 현재 연구하고 있는 시간 투영 검출기는 다음과 같은 세 가지이다. 첫 번째는 RAON의 LAMPS TPC 제작 전, 검출기의 특성을 자세히 조사하기 위해서 제작한 실제 크기의 1/8인 pTPC 시작품이다. 중이온가속기사업단은 pTPC 연구결과를 바탕으로 올해 안에 지름이 1 미터에 달하는 LAMPS TPC 본 검출기를 제작할 계획이다. 또 다른 검출기는 J-PARC의 E42 여섯 쿼크 입자 탐색 실험을 위한 HypTPC이다. 연구진은 2020년 J-PARC 실험에 사용하기 위해 현재 HypTPC 개발에 박차를 가하고 있다. 마지막으로 CENuM은 RAON에서 수행될 낮은 에너지 핵합성 반응 실험을 위하여 능동형 표적 시간 투영 검출기(Active Target TPC, AT-TPC)를 개발 중이다. 이 검출기는 내부를 채운 헬륨이 스스로 표적이 되어 이온 빔

Fig. 2. Photograph of a small time projection chamber at CENuM: (Left) Gas vessel, (Middle) Field cage, (Right) GEM and readout pad structure.

과 핵반응을 한다. TPC에 일반적으로 사용하는 아르곤과 메탄의 혼합 기체 대신 헬륨을 사용하기 위해서는 여러 가지 주의가 필요하다. 우선 높은 전기장에서 방전을 줄이는 설계가 필요하고, 짧은 거리에서 낮은 에너지 입자들의 궤적을 정밀하게 측정할 수 있도록 공간 분해능이 좋아야 하며, 전하량을 광범위하게 측정할 수 있는 전자회로가 필요하다.

그림 1은 AT-TPC 실험을 위하여 설계한 헬륨홀츠형 초전도 전자석의 개략도이다. 전도냉각형 초전도 전자석 내부에 검출기를 설치할 원통형 공간의 지름과 길이는 각각 60 센티미터이고 자기장은 최대 1.5 테슬라까지 생성시킬 수 있다. AT-TPC에서 이온화 전자의 수를 늘리기 위하여 기체전자증폭기(Gas Electron Multiplier, GEM)나 마이크로 픽셀 챔버(μ PIC)를 이용할 수 있다. GEM은 국내에서 CERN의 CMS 검출기를 위해 이미 개발이 완료되었고, μ PIC는 PCB 기반으로 다층 구조의 신호처리 챔버를 개발해야 한다. CENuM은 초전도 전자석 제작을 완료한 후, 그림 2와 같은 소형 TPC를 설치하여 우주선 성능시험을 실시할 예정이다.

실리콘 검출기

반도체 검출기 가운데 하나인 실리콘 검출기는 상온에서 상대적으로 간단히 사용할 수 있어 핵 및 입자 물리 실험에 다양하게 이용되고 있다. 하전입자가 검출기에 입사하면 전자와 양공 쌍이 생성되고 이들은 가해진 전기장을 따라 이동하며 전기신호를 만든다. 두께와 폭을 줄인 실리콘 띠(strip) 검출기를 이용하면 작은 에너지 손실(ΔE)과 매우 좋은 위치 분해능을 기대할 수 있다. 핵물리 실험은 얇은 실리콘과 두꺼운 실리콘을 조합한 $\Delta E-E$ 형태를 많이 채택하는데 이는 에너지 손실을 통한 입자의 종류를 알아내는데 효과적이기 때문이다. 그런데 입자들이 한꺼번에 너무 많이 입사하면 전자-양공 쌍이

REFERENCES

- [3] J. N. Max and D. R. Nygren, Phys. Today 31, 46 (1978).

Fig. 3. Experimental setup for $d(^{18}\text{Ne}, ^{19}\text{Ne}^*)p$.

Fig. 4. Preliminary design of the silicon detector for KoBRA at RAON.

동시에 여러 개 생겨 이들에 의한 전기신호들이 합쳐져 신호 구분이 불가능해지고 방사선 손상(radiation damage)으로 인해 검출기 수명이 단축된다는 단점도 있다.

실리콘 검출기를 사용하여 다양한 핵구조나 핵천체물리 실험을 할 수 있다. 예를 들어, 방사성 동위원소인 ^{18}Ne 빔을 이용하여 핵천체물리에서 중요한 $d(^{18}\text{Ne}, ^{19}\text{Ne}^*)p$ 실험을 할 수 있다. 이 반응은 빔이 CD_2 표적과 반응하여 양성자와 들뜬 ^{19}Ne 를 생성한다. 반감기가 매우 짧은 ^{19}Ne 의 들뜬 상태는 곧바로 ^{15}O 와 알파 입자로 붕괴한다. 그림 3은 양성자와 ^{15}O 를 검출하기 위한 실리콘 검출기를 보여준다. 이 실험은 RAON에서도 초기에 수행할 실험 가운데 하나로 고려 중이다. 그림 4는 RAON의 KoBRA 되튐 검출장치 끝단에 설치할 예정인 실리콘 검출기의 개념도이다. 이 검출기를 통하여 다양한 핵반응과 탄성충돌 실험을 할 수 있다.

LaBr₃(Ce) 감마선 검출기

핵은 에너지를 받아 들뜬 상태가 되면 기본적으로 다시 안정된 상태로 돌아가기 위해 감마선을 내보낸다.^[4,5] 이때 방출된 감마선의 에너지를 측정함으로써 핵의 자세한 구조를 알 수 있다. 그리고 감마선 에너지뿐만 아니라 붕괴가 일어나는데

Fig. 5. A fast timing gamma-ray detector array using 24 LaBr₃(Ce) scintillators.

소요되는 시간도 핵의 구조를 이해하는데 커다란 도움이 된다. 특정 에너지 준위의 붕괴시간을 측정함으로써 핵의 기하학적 형태의 진화와 핵물질의 분포를 정확하게 이해할 수 있다.

LaBr₃(Ce) 검출기는 무기물질 섬광 검출기 가운데 한 종류로서 상당히 뛰어난 시간 분해능과 순수한 에너지 분해능을 가진다. 검출기를 구성하는 무기물질의 가전자띠에 존재하는 전자는 감마선을 흡수하며 전도띠로 들떴다가 다시 가전자띠로 안정화하며 광자를 방출한다. 광증배관(photomultiplier tube, PMT)으로 방출된 광자를 전기 신호로 변환, 증폭하여 에너지와 특정 사건 발생 시간을 측정한다. 감마붕괴에 걸리는 시간은 수 피코(10^{-12})초부터 길게는 수백 마이크로(10^{-6})초까지 광범위하다. LaBr₃(Ce) 섬광 검출기는 통상적으로 1 MeV 감마선 에너지에 대해 200 피코초보다 좋은 시간 분해능을 보이며, 2.5% 정도의 에너지 분해능을 보유하고 있다. 이상과 같이 뛰어난 시간 분해능과 순수한 에너지 분해능은 시간 측정 실험에 적절하다.

CENuM은 그림 5와 같이 총 24대의 LaBr₃(Ce)를 이용하여 빠른-시간 측정용 감마선 검출시스템을 제작할 예정이다. 시뮬레이션에 의하면 662 keV 감마선에 대한 검출효율은 약 6.8%로 예상된다. 2019년에 현 시스템의 절반을 먼저 구축하고, 데이터를 취득하기 위한 전자장비 시스템을 설계하고자 한다. 그 후 일본 RIKEN에 위치한 RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory) 가속기 시설로 이전하여 2020년경부터 본격적인 핵 충돌실험을 진행할 예정인데, 핵 모양의 변형과 핵물질에 대해 많은 결과를 얻을 것으로 기대된다. 그리고 RIKEN에서의 실험을 완수한 이후에 RAON으로 이전하여 더욱 다양한 핵 구조 연구에 이용할 예정이다.

REFERENCES

- [4] B. Moon *et al.*, Phys. Lett. B **782**, 602 (2018).
- [5] B. Moon *et al.*, Phys. Rev. C **96**, 014325 (2017).

Fig. 6. Schematic drawing of the LAMPS detector system.

플라스틱 중성자 검출기

수십에서 수백 MeV의 중성자를 검출하기 위해서는 중성자-양성자 탄성충돌을 통해 입사하는 중성자의 운동에너지를 효과적으로 양성자에게 전달할 수 있도록 가능한 한 많은 양성자를 포함하고 있는 검출기 종류가 유리하다. 이 목적으로 플라스틱 섬광 검출기가 주로 쓰인다. CENuM은 중이온가속기사업단과 공동으로 LAMPS 중성자 검출기를 제작하였다.^[6]

LAMPS 중성자 검출기의 기본 모듈은 단면적이 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이고 길이가 2 m이다. 그리고 플라스틱 섬광체의 양 끝에 광유도체와 신호처리가 빠른 PMT가 설치된다. LAMPS에서는 20개의 모듈이 모여 한 층을 이루고, 각각 수직과 수평 방향으로 배열된 두 개의 층이 합쳐져 스테이션을 만든다. LAMPS에는 모두 4개의 스테이션이 설치될 예정이다. 첫 번째 스테이션 바로 앞에는 중성자 검출기와 함께 들어오는 하전입자를 걸러내기 위해 두께가 1 센티미터로 얇은 플라스틱 섬광 검출기 20개가 설치된다. 따라서 LAMPS 중성자 검출기는 총 180개의 플라스틱 검출기와 360개의 PMT로 이루어진 대형 검출장치이다. 앞으로 RAON의 고에너지 빔 라인이 완성되면 LAMPS 솔레노이드 스펙트로미터의 아래쪽에 중성자 검출기를 설치하여 핵의 상태방정식과 대칭에너지 연구를 수행할 예정이

Fig. 7. LAMPS neutron detector array assembled at Sejong campus of Korea University in 2018.

다. 그림 6은 RAON에 구축할 LAMPS 검출장치의 개요도이고, 그림 7은 2018년 말에 이미 완성된 LAMPS 중성자 검출기 사진이다.

CENuM은 RAON의 가속기 시설이 운영을 시작하기 전까지, 완성된 LAMPS 중성자 검출기를 이용하여 우주선 뮤온 토모그래피를 계획 중이다. 뮤온은 구성 원소와 밀도가 다른 물질을 지날 때, 정전기 산란에 의해 퍼지는 정도가 서로 다르다. 이를 이용하면 초대형 구조물이나 지표면 속의 눈에 보이지 않는 구조를 측정할 수 있다. 국제적으로 이미 일본, 이탈리아, 프랑스 등이 화산이나 용광로 등의 내부구조 촬영에 도전하여 상당한 진전을 보였다. CENuM은 LAMPS 중성자 검출기를 이용하여 고려대학교 세종캠퍼스 인근의 지표면 내부를 먼저 조사해 볼 계획이다. 특히 올해부터 프랑스 연구팀과 뮤온 토모그래피를 공동으로 연구하여 향후 연구대상을 한라산 등으로 확대하는 방안도 논의할 예정이다.

REFERENCES

- [6] K. Lee *et al.*, J. Korean Phys. Soc. 65, 610 (2014).