

제 18 권 제 1 호

ISSN 2288-050X

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

2021년 12월

우주소립자연연구소

INSTITUTE FOR UNIVERSE AND ELEMENTARY PARTICLES

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

우주소립자연연구소 연구원 (2021-2022)

소장	문동호(전남대)	Dong Ho Moon (Chonnam National University, Gwangju)
참여교수	김재률(전남대)	Jae Yool Kim (Chonnam National University, Gwangju)
	임인택(전남대)	In Taek Lim (Chonnam National University, Gwangju)
	이재식(전남대)	Jae Sik Lee (Chonnam National University, Gwangju)
	주경광(전남대)	Kyung Kwang Joo (Chonnam National University, Gwangju)
	제송근(전남대)	Soong-Geun Je (Chonnam National University, Gwangju)
연구원	고아라(전남대)	Ara Go (Chonnam National University, Gwangju)
	신창동(전남대)	Chang Dong Shin (Chonnam National University, Gwangju)
	김현철(전남대)	Hyun Chul Kim (Chonnam National University, Gwangju)
	박령균(전남대)	Ryeong Gyoon Park (Chonnam National University, Gwangju)

우주소립자 연구지 논문 투고 안내

- 본 연구지는 매년 12월 27일자로 발행되고 있습니다.
- 본 연구지의 논문 투고는 본 연구소 홈페이지의 논문 투고 게시판을 이용하거나 전자우편 (dhmoon@chonnam.ac.kr)을 통해 할 수 있습니다.
- 논문작성에 관한 상세한 사항은 우주소립자 연구소 홈페이지의 논문 투고 규정을 참조하시기 바랍니다.
- 투고한 논문에 대한 기타 사항은 우주소립자 연구소로 문의하시기 바랍니다.

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77 (용봉동)
전남대학교 자연과학대학 4호관 우주소립자연연구소
전화 : 062-530-3354

Website : <http://iuep.jnu.ac.kr>

제 18 권 제 1 호

ISSN 2288-050X

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

2021년 12월

우주소립자연연구소

INSTITUTE FOR UNIVERSE AND ELEMENTARY PARTICLES

목 차

RAON에서 LAMPS 실험을 위한 빔 표류 검출기 (BDC) 연구	서준후	01
Recent progress of the investigation of heavy ion collision by color-neutral probes	Hyunchul Kim	13

RAON에서 LAMPS 실험을 위한 빔 표류 검출기 (BDC) 연구

서준후

전남대학교 물리학과, 광주 61186, 대한민국

LAMPS는 원자핵 속의 핵자들 사이에 작용하는 힘과 운동에 대해 연구하기 위한 검출기 시스템이다. 이런 핵자의 운동을 연구하기 위해, LAMPS는 희귀 동위 원소 빔이 필요하다. 한국에서 RAON이라 불리는 희귀 동위 원소 가속기가 건설 중에 있다. RAON은 여러 종류의 유용한 동위원소 빔을 LAMPS에 제공해줄 수 있다. LAMPS는 SC, BDC, TPC, 중성자 검출기 등과 같은 검출기들로 이루어져 있다. 이 논문에서는 BDC에 대한 설계, 제작 그리고 작동에 관한 것을 다룬다. BDC는 입사된 입자에 의해 발생한 이온화 과정으로부터 생겨난 전자를 검출하기 위해 아주 가는 금속 실을 이용하는 가스 검출기이다. LAMPS에서 BDC의 목적은 입사한 빔의 위치와 방향을 100 μm 이하의 분해능으로 검출해내는 것이다. BDC연구의 첫 단계로, 설계한 BDC의 구조에 대한 작동 성능을 확인하기 위해 작은 모형(mock-up)의 BDC를 제작하였다. 그 다음, 시제품 BDC를 설계하고 제작하여 우주선 뮤온과 KOMAC에서 100 MeV 양성자 빔 데이터를 받았다. 이 데이터를 통하여, 프로토타입 BDC의 성능과 빔 추적을 해 보았다.

주제어 : BDC, RAON, LAMPS, drift chamber, ionization, KOMAC

투고일자 : 2021. 12. 13

심사일자 : 2021. 12. 20

확정일자 : 2021. 12. 23

1. Introduction

Understanding the dynamics of nucleons is the most important subject for nuclear physicists. So, we should study the forces between nucleons and the interactions among the quarks. For this purpose, in South Korea, the world's first accelerator which combines Isotope Separation On-Line (ISOL) and In-flight Fragmentation (IF) methods, called The Rare Isotope Accelerator complex for ON-line experiments (RAON), is under construction.

Even though there were a lot of efforts to understand the properties of nuclei, some of the knowledge of nuclei is still unclear yet, such as the stability of the normal nucleus, the origin of superheavy elements, the core of neutron star, and supernovae and etc. Using Rare Isotope Beam (RIB) produced by RAON, our basic knowledge of nuclei can be widened [1, 2]. For doing this purpose, we need to explore the nuclear equation of state (EOS), which is expressed by total baryon density and isospin asymmetry of nucleons.

As one of the RAON's programs, the Large Acceptance Multi-Purpose Spectrometer (LAMPS) detector is the optimized facility to study EOS [3]. The LAMPS consists of a beam diagnosis system in the beam pipeline at the front of solenoid magnet, and Time Projection Chamber (TPC) to build up the trajectory of fragmented particles, and Neutron Detector Array (NDA) to detect the neutrons, placed 15 m away from the solenoid magnet. Beam diagnosis system of the LAMPS consists of Start Counter (SC) and veto, and Beam Drift Chamber (BDC). The SC will provide start timing of each event and BDC will supply trajectories of incident RIB aiming to target.

In this thesis, the detailed BDC construction procedure and data analysis results taken at cosmic muons and proton beam produced by the KOREA Multi-purpose Accelerator Complex (KOMAC) facility.

2. LAMPS

The LAMPS detector system that will be installed in one of the high-energy experimental halls consists of the superconducting solenoid magnet with maximum field strength of 1 T, Time Projection Chamber (TPC) with Gas Electron Multipliers (GEM), Time-of Flight (ToF) array encompassing the TPC, BDC, and forward neutron detector array Figure 1 The two quadrupole triplet magnets will focus beam particles at the target position. The Generic Electronics for TPC (GET) is adopted for signal readout from the TPC, and new 500-MHz flash ADC and trigger modules have been developed for the neutron detector array. The ToF detector, target system, and beam diagnostic detector system including a start counter are now under development.

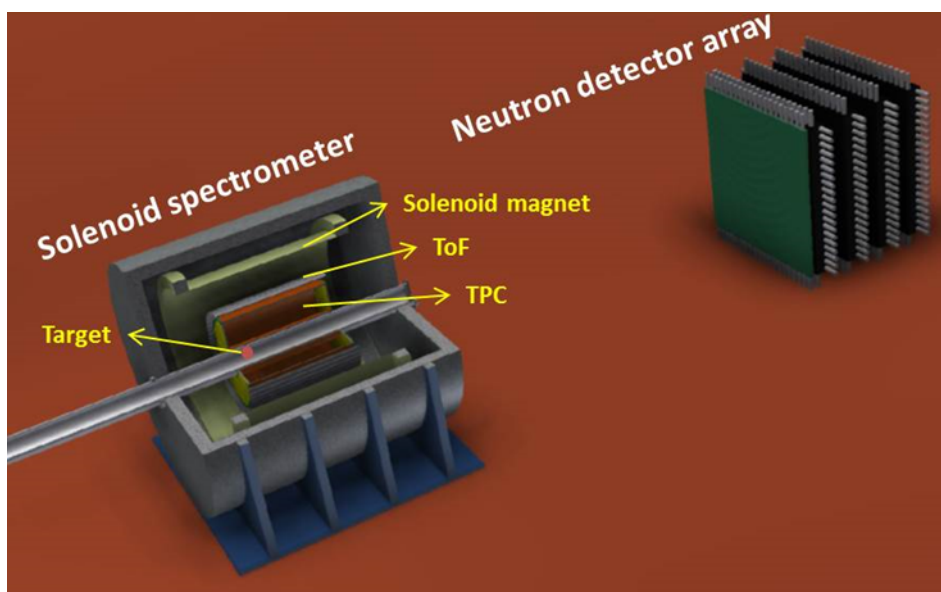


Figure 1. Schematic view of the basic configuration of the LAMPS at high energy experimental hall

3. Principle of the Drift Chamber

Usage of a wire chamber is to detect incident particle's trajectory for high-energy physics area. The wire chamber is filled with gases like argon, methane, isobutane and, etc. In the chamber, there

are two types of the metallic wires that are signal wire and potential wire arranged alternately [4]. The wires are normally 20 ~ 100 μm in diameter. This is usually called anode (or anode plane). For the signal wire, zero or plus high-voltage is applied. On the other hand, for potential wire, minus high-voltage is applied. Also, there is cathode plane usually made of thin aluminum mylar applied minus high-voltage. The anode and cathode make drift field.

So, if some particle passes through the gas inside of the chamber, it makes electron and ion pair by ionization. In the drift field, the first electron from the ionization can acquire enough energy to create more electrons by colliding other gas molecules. This process makes an electron avalanche. Then, the electrons will drift to the signal wires. If the number of electrons of the avalanche is enough, it makes measurable current on the signal wires. The ratio between the number of initial electrons and final electrons is called gas gain.

4. Components of the Beam Drift Chamber

The anode for BDC is showing as Figure 2 The signal wires are gold-plated tungsten and 20 μm in diameter. The potential wires are also gold-plated tungsten and 80 μm in diameter. Each anode has 32 signal wires and 33 potential wires. Tension of the wires is about 40~60 g. On anode plane, there are resistors and capacitors to prevent over current signal and sparks. The drift length is 2.5 mm.

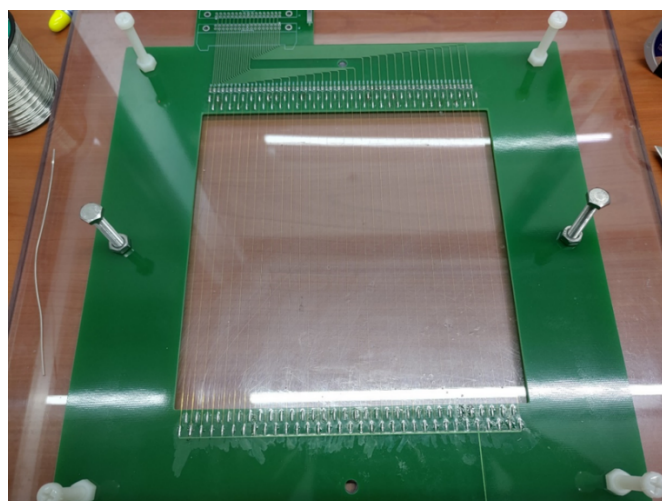


Figure 2. The anode of the prototype BDC

The cathode for prototype BDC is showing as Figure 3 The material on the cathode plane is double-sided aluminum mylar. The mylar has a thickness of $2.5\ \mu\text{m}$. A kapton tape is used to keep the mylar flat. Kapton tape has temperature stability in a large range and electrical isolation ability too.

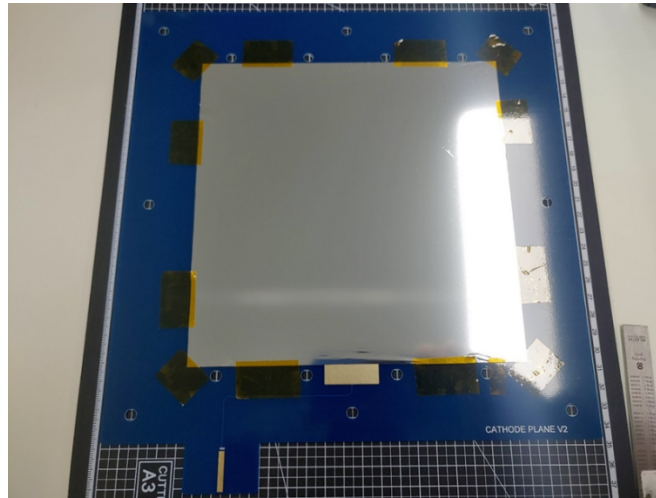


Figure 3. The cathode of the prototype BDC

The drift length between cathode mylar and wires is $2.5\ \text{mm}$ so it makes $2.5\ \text{mm}^2$ square electric field cell. There are 2 prototype chambers and each has 2 anodes (X and Y) and 3 cathodes. Figure 4 is showing inside of one of the chambers.

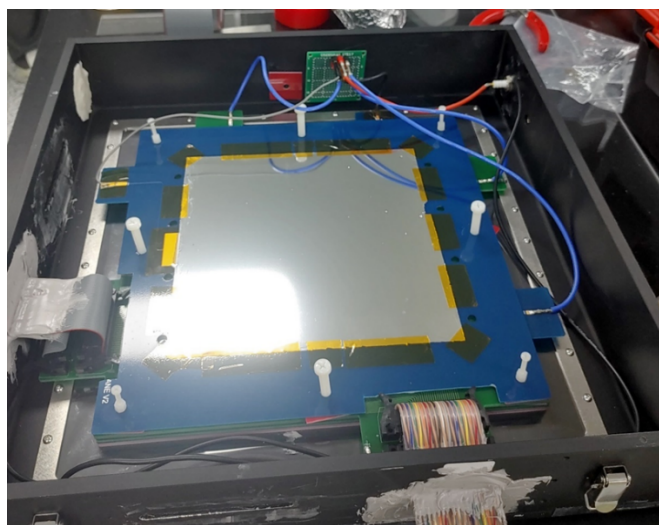


Figure 4. Inside of the prototype BDC chamber

The signal cables are 64ch IDC connector cables. To prevent gas leakage, the hole of the chamber

is filled with silicone. The active area of the chambers is 16 cm².

5. Data Analysis

(1) Cosmic Muon

Figure 5 shows prototype BDC set-up for cosmic muon. There are 4 SCs and 2 prototype BDCs. The middle one is active target TPC for low-energy LAMPS.

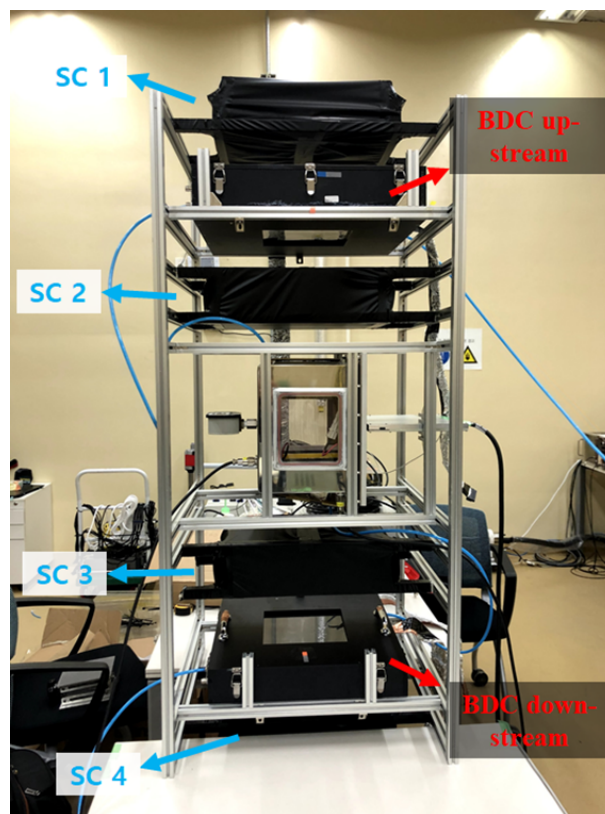


Figure 5. SCs and prototype BDCs set-up. There are up-stream BDC and down-stream BDC

When the SC takes cosmic signal, it gives trigger to the BDC. The trigger rate was about 200 events per 1 hour. The distance between up-stream BDC and down-stream BDC is about 1 m. For

DAQ, 64ch ASD board is used. The time resolution of the ASD board is 1 ns and 1 clock for QDC value is 32 ns. The QDC and TDC of cosmic muon from the ASD board are shown as Figure 6 There are empty lines due to damages on the ASD board caused by over current signal or some electric sparks. The TDC values of each anodes (x and y) for each BDCs are shown as Figure 7. With these TDC values, 2-D hit point can be made as Figure 8 As expected, the cosmic muon signal distributed on all channels. Muon tracks with TDC values from ASD board of up-stream BDC and down-stream BDC is shown as Figure 9 It shows all the tracks are pass through the active area of BDC. The prototype BDCs are working stably while taking the muon signal. The current of high voltage module is under 1 nA at working voltage.

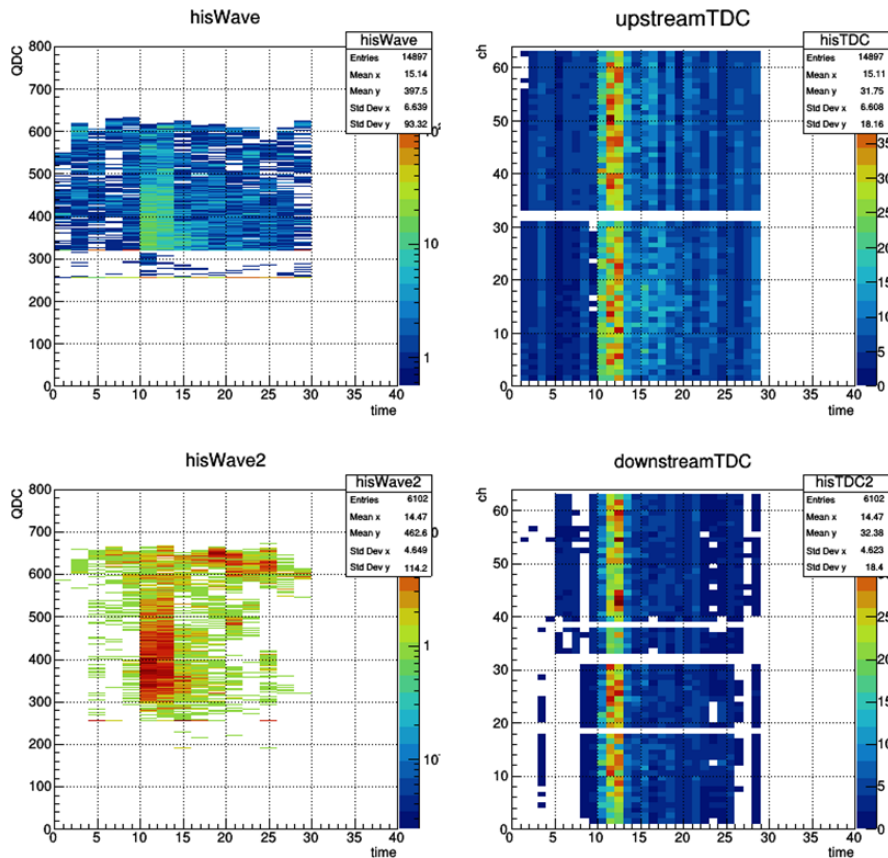


Figure 6. Cosmic muon data result from the ASD board. Top three plots are for up-stream BDC and others are for down-stream BDC

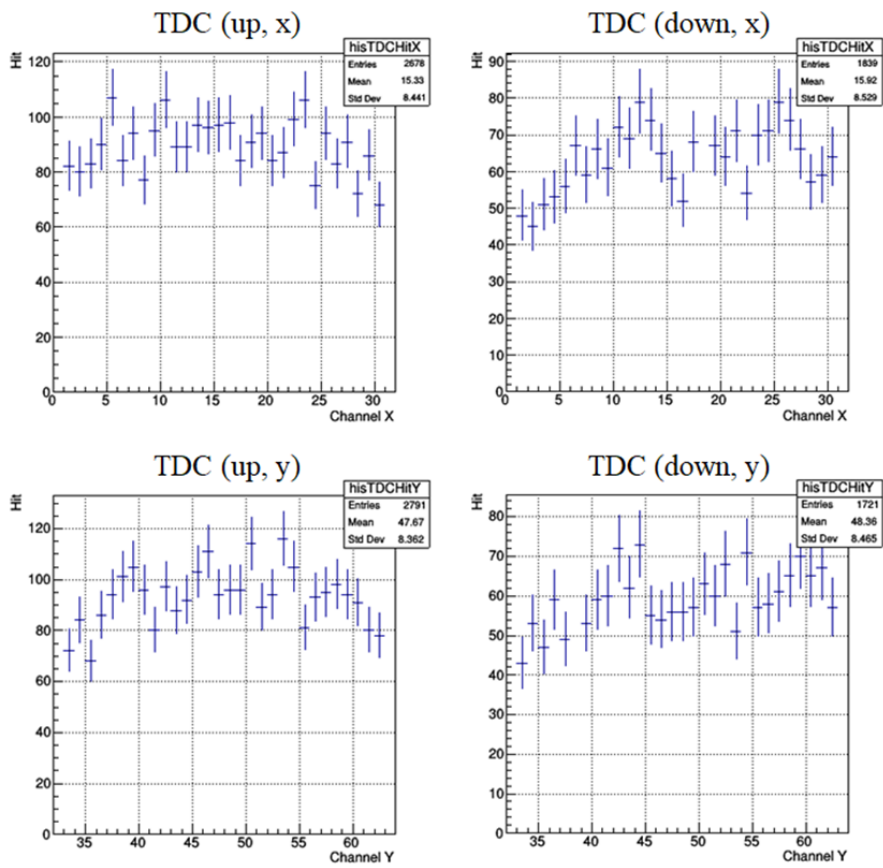


Figure 7. The TDC values of each anodes (x and y) for each BDCs

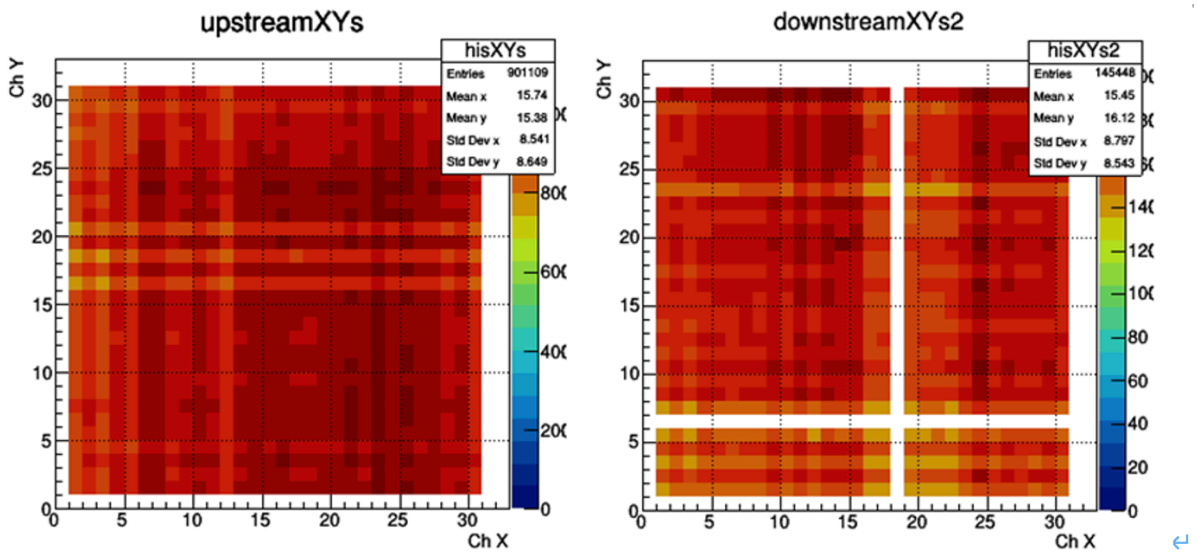


Figure 8. 2-D hit points made with TDC values of each anodes for each BDCs

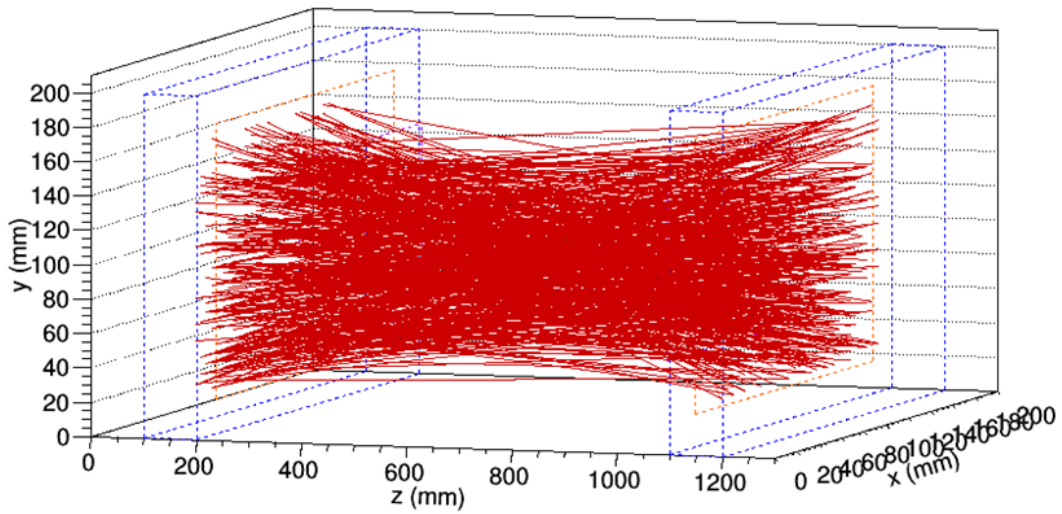


Figure 9. Cosmic muon tracks with TDC values. The orange squares are active area of each BDC

(2) Proton Beam

In KOMAC facility, Figure 10 shows the SCs and BDCs set-up 100 MeV for proton beam. There is a collimator in the front and boron blocks to prevent scattered electrons from the up-stream. Figure 11 shows same result plots like Figure 6 and Figure 9 for 100 MeV proton beam.

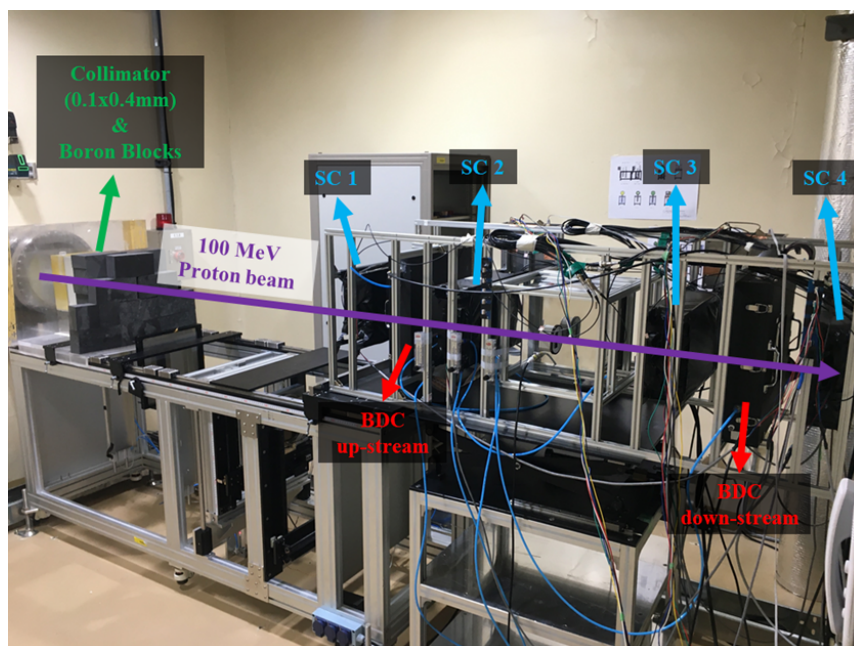


Figure 10. Detector set-up for 100 MeV proton beam

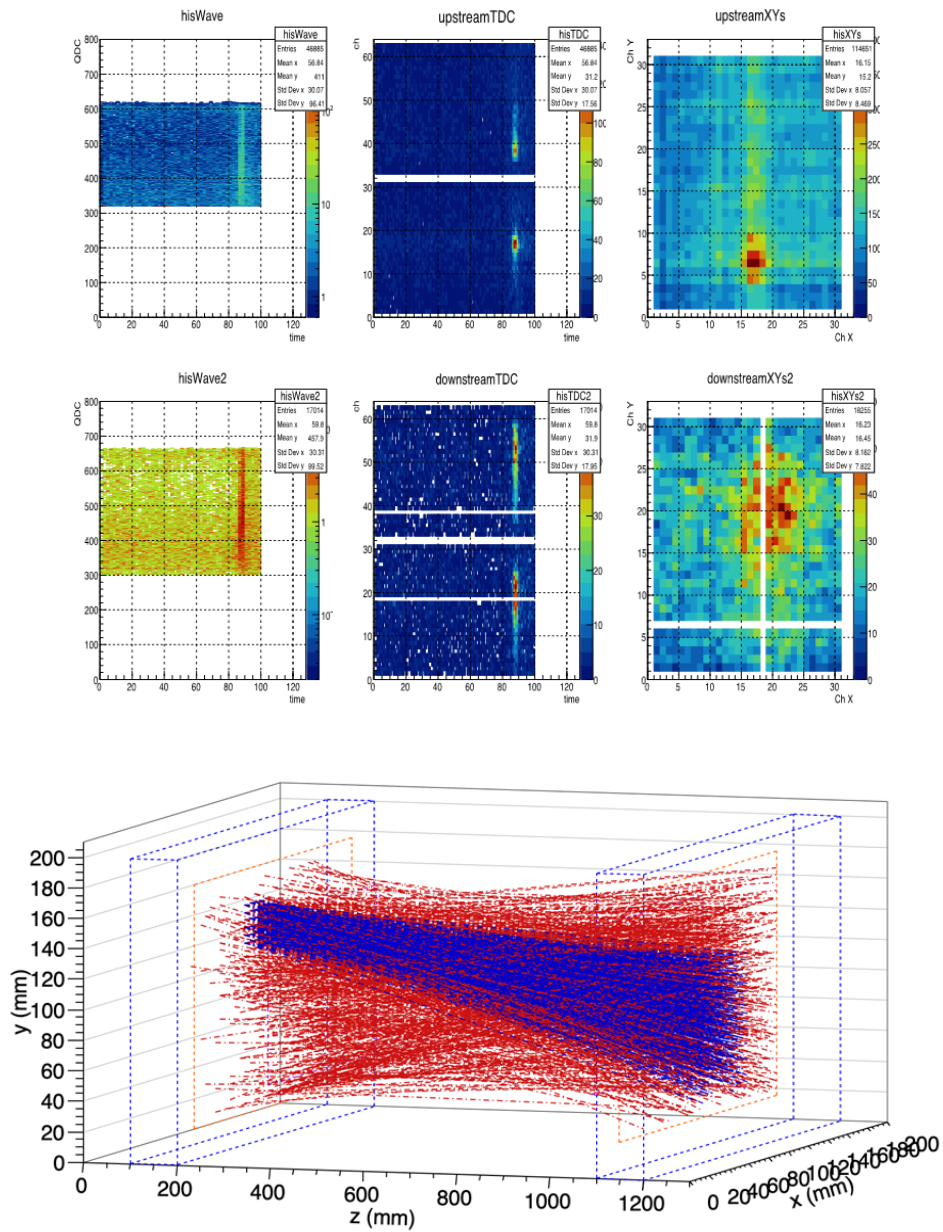


Figure 11. The result plots for the 100 MeV proton beam

6. Conclusion

The motivation of the LAMPS is to study about the force and the dynamics between nucleons inside nuclei. Especially, with RIB, it can be researched at supra-saturation densities. In South Korea, the RAON is under construction now and it can give us RIB for the LAMPS. For beam diagnosis and

its alignment, the BDC is needed. So, prototype BDC is developed and made for LAMPS experiment. With the SC's trigger, the muon data was taken stably at working voltage. For the 100 MeV proton beam, the results show the expected hit points for up-stream BDC and down-stream BDC. The BDCs works stably at working voltage while the BDCs take the 100 MeV proton beam.

References

- [1] B. Hong, "Equation of State and Symmetry Energy in Heavy-Ion Collisions", *New Physics: Sae Mulli* 66, 1550-1555 (2016)
- [2] A. W. Steiner, M. Prakash, J. M. Lattimer and P. J. Ellis, "Isospin asymmetry in nuclei and neutron stars", *Phys. Rep.* 411, 325 (2005)
- [3] B. Hong, J. K. Ahn, Y. Go, G. Jhang and E. Joo et al., "Plan for nuclear symmetry energy experiments using the LAMPS system at the RIB facility RAON in Korea", *Eur. Phys. J. A* 50, 49 (2014)
- [4] Ix-B Garcla Ferreira, J. Herrera and L. Villasenor, "The Drift Chambers Handbook, introductory laboratory course (based on, and adapted from, A H Walenta's course notes)", *J. Phys.: Conf. Ser.* 18, 010 (2005)

Recent progress of the investigation of heavy ion collision by color-neutral probes

Hyunchul Kim

Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

Color neutral probes have been used for the investigation of the inside structure of the nucleons described by Parton distribution function (PDF) nPDF for stand-alone nucleon and bounded nucleon in the nucleus, respectively. In LHC era, various nPDFs have been studied in pPb and PbPb collisions using Z and W boson production. In this paper, recent analysis of the electroweak probes such as the Drell-Yan process, W and Z boson are presented. All the experimental results are compared with existed only proton PDFs and nPDFs. And finally prospect for future analysis is also proposed.

Keyword : color-neutral probes, Drell-Yan, Z boson, heavy-ion, parton distribution function, PDF, nPDF

투고일자 : 2021. 12. 13

심사일자 : 2021. 12. 20

확정일자 : 2021. 12. 23

1. 서론

양자 색소 역학은 점근적 자유도에 의해 색소를 지닌 쿼크와 글루온들이 해리되어 있는 고온, 고밀도의 쿼크 글루온 플라즈마(Quark Gluon Plasma : QGP)의 존재를 예측하고 있다. 또한 QGP는 우주 초기 상태의 일정 단계에서 존재했을 것으로 보이므로, 미니 빅뱅을 재현할 수 있는 고에너지 입자 가속기로 원자핵, 즉 중이온을 충돌시키면 QGP를 재현할 수 있는 것으로 예상되었다. 미국 브룩헤이븐 국립 연구소의 RHIC 가속기를 거쳐 2008년부터 본격적으로 유럽핵입자물리연구소(CERN)의 거대 강입자 가속기 LHC가 가동되기 시작하면서, QGP의 특성에 대한 여러 연구결과가 쏟아져 나오고 있다.

이런 관점에서 색소 중립적인 입자를 이용한 연구는 독특한 성격을 지니고 있다. 앞서 말한대로 QGP는 색소를 가진 쿼크와 글루온들이 해리된 상태이므로, 색소 중립적인 입자들은 QGP와 반응을 하지 않는다. 즉, 해당 입자의 생성률은 QGP의 생성유무와 관계 없이 일정할 것으로 기대된다. 따라서 색소 중립적인 입자들은 중이온 충돌 결과를 분석하는데 있어서 기준으로 사용되고 있다. 또한 색소 중립적인 입자들은 QGP 생성 이전에 원자핵 충돌의 초기 단계에서 형성되는데, 이는 충돌하는 원자핵 내의 쿼크들끼리의 반응에 의한 것이다. 따라서, 색소 중립적인 입자들은 원자핵의 구조, 더 정확하게는 핵자의 구조를 밝히는데 널리 이용되고 있다. 흔히 핵자, 즉 양성자와 중성자는 세 개의 up 또는 down 쿼크로 이루어져 있다고 생각하기 쉬운데, 이는 표면적으로 드러나는 요소 즉, valence quark들이고, 실제로는 쿼크-반쿼크 쌍들과 글루온 들로 가득차 있어 핵자의 구조를 기술하는데는, 핵자를 이루는 쿼크와 글루온들의 핵자 분포 함수(parton distribution function : PDF)라는 확률 밀도 함수가 이용되고 있다. 이 함수들은 parton의 종류, 즉 쿼크와 글루온의 종류와 전하, parton들이 가지는 에너지 교환량, 그리고 전체 핵자에서 parton이 차지하는 에너지의 비율 x 에 따라서 다르게 나타난다. 그런데, PDF는 핵자가 단독으로 존재할 때와 원자핵 내에 속박되어 있을 때 다르게 분포한다. 원자핵 내에 속박되어 있는 경우의 PDF를 nuclear PDF (nPDF)라고 하는데, 이는 핵자 단독의 PDF에 원자핵 내에서의 변형을 고려하여 기술된다. 문제는 실험 데이터의 부족으로 nPDF의 불확실도가 상당히 크다는 것이다. 여기서 앞서 말했던 특성 때문에 중이온 충돌에서의 색소 중립적인

입자의 연구가 상당히 요긴하게 사용될 수 있다. 색소 중립적인 입자들로는 direct photon, W boson, 그리고 여기에서 주로 설명할 Drell-Yan process가 있다.

2. Drell-Yan process

Drell-Yan process(DY)는 1970년 Sidney Drell과 Tung-Mow Yan에 의해 처음으로 제안된 입자의 붕괴 채널로 고에너지 강입자 충돌에서의 렙톤-반렙톤 입자쌍의 생성을 설명하기 위한 것으로 [1], AGS(Alternating Gradient Synchrotron) 가속기에서의 양성자-우라늄 충돌에서 J. H. Christenson 등에 의해 최초로 관측되었다. 구체적으로는 아래 그림에서와 같이 강입자 내의 쿼크의 상호 반응에 의한 쌍소멸로부터 가상 광자(virtual photon)나 Z 보존 입자가 생성되고, 다시 렙톤-반렙톤 입자 쌍으로 붕괴되는 과정을 말한다.

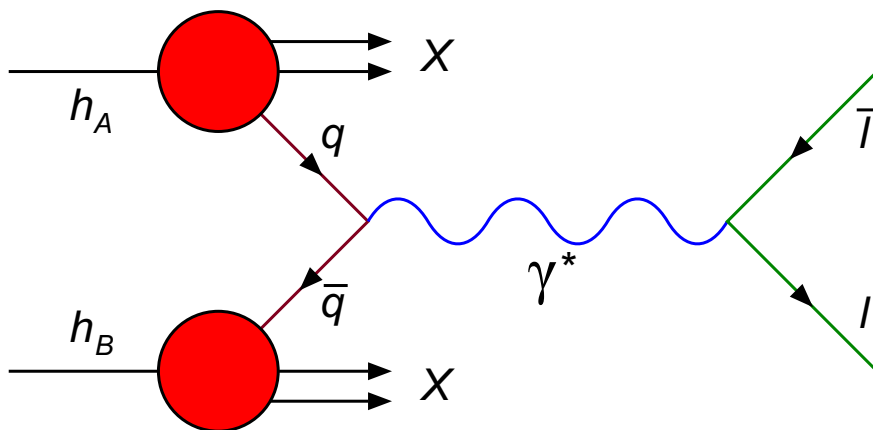


그림 1. Drell-Yan 과정에 대한 개념도 [2]

DY는 핵자 내의 쿼크들의 상호 작용에 의해 생성된다는 특성 때문에 PDF 또는 nPDF를 연구하는데 있어서 널리 관측되었다. 한 예로 LHC가 2008년에 가동을 시작한 직후의 결과를 비롯하여 최근의 13 TeV 양성자-양성자 충돌까지 DY 측정결과는 지속적으로 다루어져 오고 있다.

중이온 충돌 실험에서 DY 과정에 대한 측정은 지금까지 Z 보존 입자가 매개하는 채널에 대해서만 이루어져 왔다. 특히 LHC가 가동된 이후 기존의 실험보다 훨씬 많은 Z 보존 입자가

생성됨에 따라 CMS 공동연구그룹같은 경우는 2008년 첫 중이온 충돌 실험 데이터를 분석한 초기 결과로 Z 보존 입자의 재구성 결과를 발표했을 정도로 중요한 채널로 다루어지고 있다 [3]. 하지만, 가상 광자가 매개하는 채널의 경우, 상대적으로 낮은 불변 질량 범위에 해당하므로 많은 배경입자로 재구성이 어려웠다. 하지만, 에너지가 증가하고 축적된 광도(integrated luminosity)가 증가함에 따라 재구성이 가능할 것으로 여겨졌고, 상대적으로 배경 신호가 적을 것으로 보이는 양성자-납핵 충돌 결과에 대한 분석이 우선 이루어졌다.

3. 양성자-납핵 충돌에서의 Drell-Yan process 분석 결과 [4]

앞서 말한 것과 같이 2017년에 LHC에서 이루어진 핵자 당 에너지 8.16 TeV의 양성자-납핵 충돌로부터 173.4 nb^{-1} 의 데이터를 받아서 DY 채널에 대한 재구성을 시도했다. CMS그룹에서 충돌 이벤트만을 골라내기 위하여 설정한 조건을 통과한 이벤트에서 서로 반대되는 전하를 가지고 있는 뮤온 입자가 적어도 2개 이상인 이벤트를 추출했다. 이 때 각 뮤온 입자는 CMS 검출기의 acceptance 범위에 해당하는 $|\eta| < 2.4$ 를 만족하고, 적어도 한 개의 뮤온의 수직 운동량이 15 GeV를 넘고, 나머지 모든 뮤온들의 p_T 도 10 GeV를 넘는 경우만 고려했다. 측정된 입자를 뮤온 입자로 고려하는 조건으로는 CMS 뮤온 그룹에서 연구한 뮤온 판별 조건 중 standard tight ID cut이 고려되었고, DY가 아니고 jet 안에 있는 뮤온 입자를 골라내기 위해 상대적은 트랙 고립 조건을 적용하였으며, 뮤온쌍으로부터 재구성된 dimuon은 불변질량이 (15,600 GeV) 범위에 있으면서, 3차원 공간에서의 두 뮤온 사이의 각도가 $\pi-0.005$ 이내이면서, dimuon의 vertex의 신뢰도가 20보다 작은 경우를 고려했다. 마지막으로 각 충돌 이벤트에 적어도 3개 이상의 트랙이 있는 경우만을 골라냈는데, 이는 전자기 배경신호를 제거하기 위함이다.

결과의 분석 범위는 불변 질량이 (15,600 GeV) 범위에 있는 dimuon들이었는데, 이 중 (15,60), (60,120 GeV)의 범위를 각각 저질량 범위, Z 보존 질량 범위로 설정하여 이 범위의 dimuon에 대해서는 p_T , $|y|$, ϕ^* 에 대한 의존도를 추가로 조사하였다. 여기서 ϕ^* 는 아래와 같이 정의가 되는데, p_T 의 대체량으로 사용할 수 있으면서, 상대적으로 측정 분해능이 좋은 ϕ 를 이용하여 얻어내는 값이므로 더 정밀하게 측정이 가능한 양이다.

또한, 중이온 충돌물리에서 nPDF 연구를 위해서 이용되는 양으로 전후방 생성비(forward-backward ratio : R_{FB})가 있는데, 위의 두 영역에 대해 모두 측정이 이루어졌다.

전체적인 분석은 초기 데이터로부터 예상되는 여러 배경신호를 모두 제거한 후에, 검출기 분해능 보정을 해주는 unfolding 과정을 거친 후, acceptance, efficiency를 보정하고 마지막으로 최종단계 방사(FSR: final state radiation)를 보정해주는 순서로 진행되었다. 여기서 최종적으로 각 물리량에 대한 충돌단면적을 구하고, 추가로 R_{FB} 를 구하였다.

전체 과정 중 DY 분석 과정에서 가장 중요한 것은 배경 신호의 제거다. DY의 배경 신호는 크게 두 부류로 나눌 수 있는데, 먼저 두 개의 고립된 뮤온들이 관련된 배경 신호이다. 이 신호들은 $Z/\gamma^* \rightarrow \tau^+\tau^-$, $t\bar{t}$, tW , dibosons 등으로 볼 수 있는데, 이 채널들에서 생성되는 뮤온들이 DY에서 생성된 뮤온들로 오인될 수 있기 때문에, "emu method"라는 방법을 이용하여 제거를 한다. "emu method"는 MC를 이용하여 각 채널의 예상 갯수를 예측하고 이를 충돌 데이터를 통하여 검증하는 방법이다. 또 다른 부류의 배경 신호들은 제트 안에 있는 1개 또는 그 이상의 뮤온들을 가지고 있는 배경 신호로 W^+ 제트 또는 QCD 제트들이 여기에 해당한다. 여기에 해당하는 배경 신호의 제거를 위해서는 "fake rate(misidentification) method"라는 것을 이용하게 된다. 여기서 이용하는 "fake rate"은 배경 신호의 MC로부터 얻어내는데, 제트에서 나오는 뮤온을 걸러내기 위한 조건, 즉 고립(isolation) 조건을 적용하기 전 모든 뮤온 판별 조건을 통과한 뮤온 중, isolation 조건을 적용한 뮤온의 비율인데, 이를 이용하여, 전체 뮤온 입자 중 "fake muon"의 갯수를 얻어내는 방법이다. 이 방법은 다른 종류의 분석 조건을 적용한 같은 입자의 뮤온 쌍 데이터를 이용하여 검증하였다.

이러한 배경 신호 구분을 통하여 얻어낸 그림이 아래 그림이다. 위의 그림은 불변 질량에 따른 dimuon의 분포이고, 아래 두 그림은 각각 저질량, Z 보존 입자 범위에서의 $|y|$ 에 대한 dimuon의 분포이다. 그림에서 노란색으로 나타낸 부분이 배경 신호를 모두 제거하고 얻어낸 DY 신호의 예측량이다. 전반적으로 MC를 이용한 예측 결과와 비교하면 일치하지만, 일부 일치하지 않는 부분이 있고, 이 부분을 자세히 살펴보는 것이 이 분석의 의미라 하겠다.

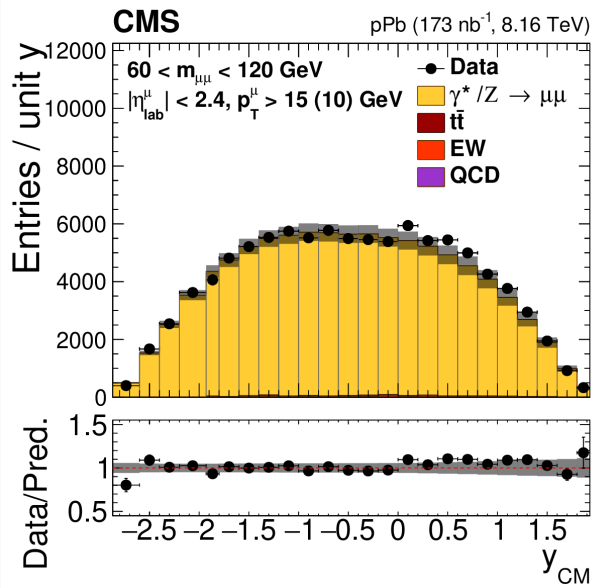
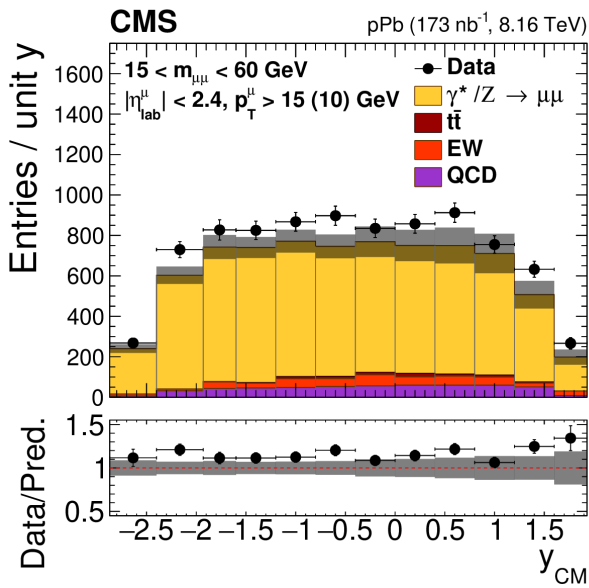
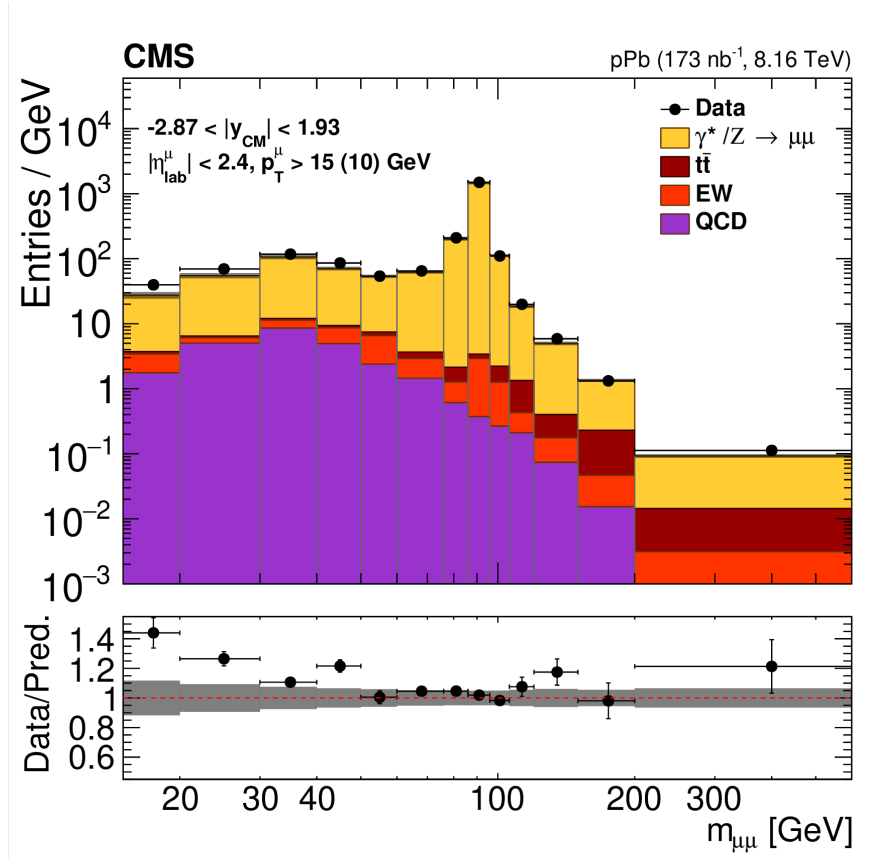


그림 2. 불변 질량(위)과 $|y_{CM}|$ (아래)에 대한 dimuon 채널의 분포도, 왼쪽 아래는 저질량 영역, 오른쪽 아래는 Z 보손 영역에서의 분포도로, 검정색 점은 충돌 데이터, 황색은 DY 채널, 적색은 $t\bar{t}$, 주황색은 EW 채널, 보라색은 QCD 배경신호를 의미한다.

배경 신호 제거 후 앞서 언급한 모든 단계를 거친 후에 얻어낸 산란 단면적의 분포가 아래 그림이다. 검정색 점으로 나타낸 데이터는 청색과 적색으로 각각 나타낸 PDF, nPDF와 비교하였고, 그 데이터와의 비도 나타냈다. 여기서 비교를 위해 사용한 PDF는 CT14, nPDF는 CT14을 기반으로 한 EPPS16이다. 결과를 살펴보면, Z 보존 입자 영역에서 CT14보다는 핵 효과가 고려된 EPPS16이 충돌 데이터를 더 잘 설명하는 것을 볼 수 있는데, 이 영역에서 충돌 데이터의 불확실도가 PDF, nPDF의 불확실도보다 훨씬 작기 때문에 이를 통해 PDF, nPDF 개량에 도움을 줄 수 있음을 기대할 수 있다. 이번에 처음으로 측정된 저질량 범위에서는 모델과의 일치도가 훨씬 낮는데, 이번 데이터가 모델 개량에 도움을 줄 수 있음을 보여준다고 하겠다.

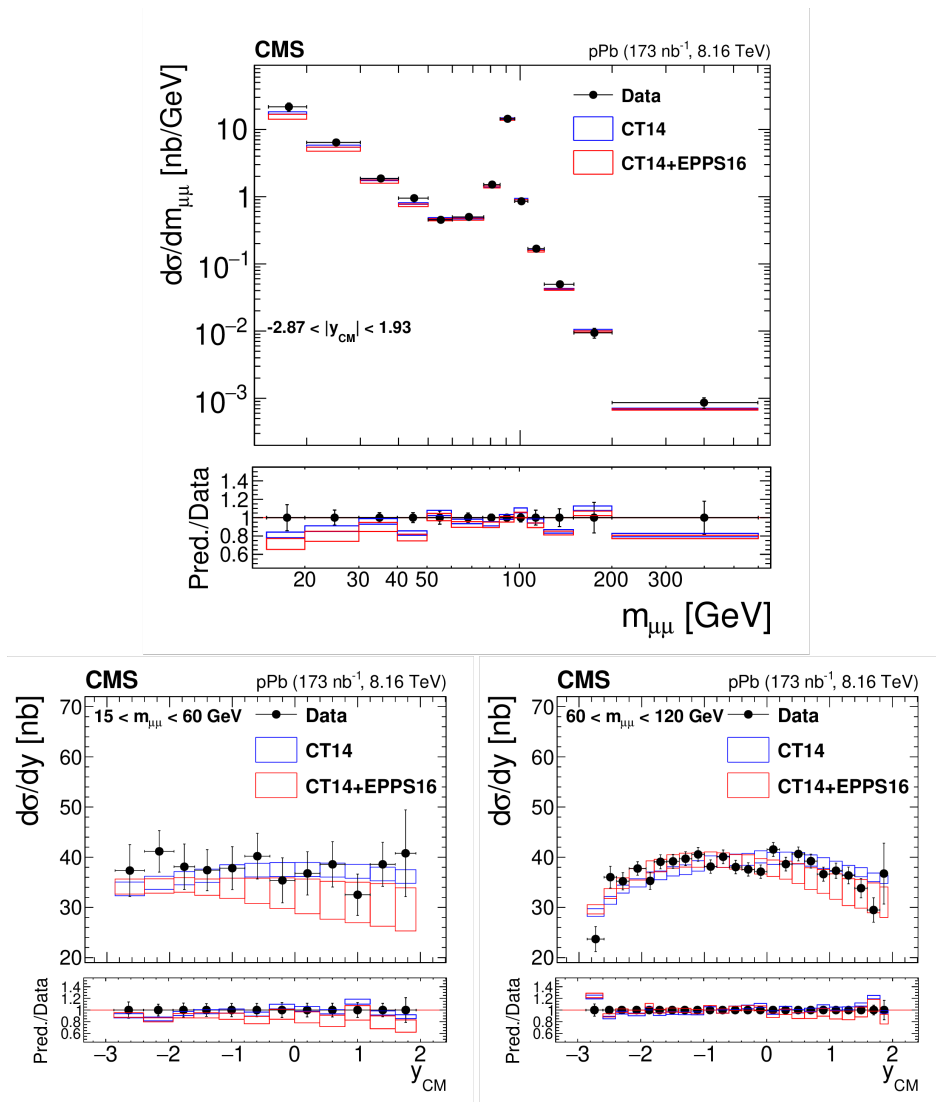


그림 3. 불변 질량(위)과 $|y_{CM}|$ (아래)에 대한 DY 신호의 산란 단면적, 검정색 점은 충돌 데이터, 청색과 적색 박스는 각각 PDF, nPDF의 예측 결과

중이온 충돌에서 중요한 R_{FB} 결과를 살펴보면, 산란 단면적보다 불확실도가 줄어든 것을 볼 수 있는데, 이는 R_{FB} 를 얻는 과정에서 일부 계통오차가 상쇄되기 때문이다. 저질량 영역과 Z 보존 입자 영역을 각각 PDF, nPDF와 비교해보면, 모두 $|y_{CM}|$ 이 증가함에 따라 감소하는 추세를 보여주고 있는데, Z 보존 입자 영역에서 R_{FB} 가 1보다 작은 경향을 볼 수 있는데, 이는 PDF 보다는 nPDF로 더 잘 설명이 됨을 알 수 있다. 이론보다 더 작은 불확실도를 가진 실험 결과를 통해 앞으로의 PDF, nPDF 모델링에 기여를 할 수 있음을 알 수 있다.

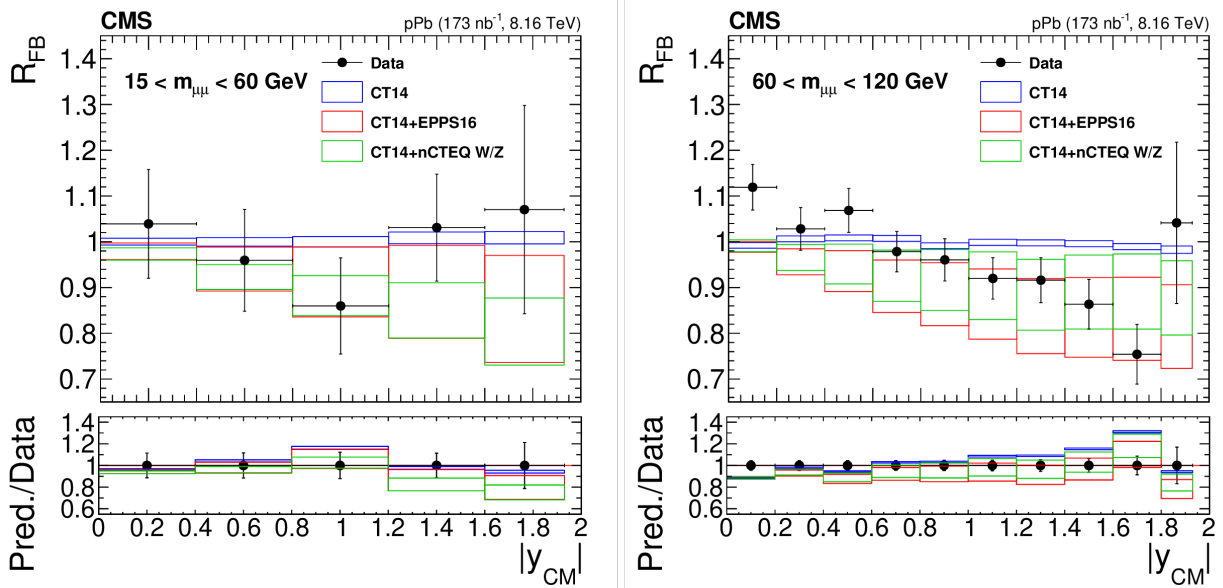


그림 4. 저질량 영역(왼쪽)과 Z 보존 입자 영역(오른쪽)에서의 $|y_{CM}|$ 에 대한 R_{FB} 분포, 검정색 점은 충돌 데이터, 청색, 적색, 녹색 박스는 각각 CT14 PDF, EPPS16 nPDF, CTEQ W/Z nPDF의 예측 결과이고, 데이터와 모델의 예측 결과의 비를 표시하였다.

CMS에서 DY 채널을 통해 얻은 결과를 기존의 5.02 TeV CMS Z 보존 입자 결과[5]와 ATLAS 실험의 5.02 TeV 에너지의 양성자-납핵 충돌 결과와 비교를 해보면 [5], 역시 핵자 단독의 PDF보다 nPDF가 실험 결과를 더 잘 설명한다는 기존 결과와 부합함을 알 수 있다. 또한 ALICE, ATLAS에서 분석한 납핵-납핵 충돌 결과와 비교를 하면 [6, 7], ALICE 결과는 nPDF가 ATLAS 결과는 CT14 PDF가 더 잘 설명을 함을 알 수 있다. 또한 ALICE에서 측정한 RAA보다, ATLAS에서 측정한 RAA가 크게 나오는데, 앞으로의 실험에서 이에 대한 정밀한 측정이 이루어져야 할 필요성이 제기된다.

4. 납핵-납핵 충돌에서의 Z 보존 입자 분석 결과 [8]

앞서 말한 것과 같이 납핵-납핵 충돌에서 DY 중 하나인 Z 보존 입자에 대하여 분석이 이루어져 왔다. 최근 2018년 납핵-납핵 충돌 데이터를 이용하여 얻은 최신의 결과에서는 여러가지 의미 있는 결과들이 나왔는데, 우선 그림 6에 보이는 것과 같이 Z 보존 입자의 타원 흐름율(v_2)를 중심도에 따라 측정해 보았다. 양수인 타원 흐름율은 QGP의 한 증거로 여겨지는 것인데, 기본적으로 색소 중립적인 입자들은 QGP와 반응하지 않을 것으로 기대되기 때문에 타원 흐름율은 0일 것으로 기대된다. 이번에 중심도에 따라 타원 흐름율을 측정한 결과 불확실도 내에서 0으로 측정되었다. 이는 납핵-납핵 충돌에서 생성된 QGP와 최종 단계에서의 유의미한 반응을 하지 않음을 보여주고 있다. 또한 그림 7에 보이는 것과 같이 중심도에 따라 Z 보존 입자를 핵 중첩 함수(T_{AA})와 전체 이벤트 수로 나눈 값을 살펴보았는데, 납핵-납핵 충돌에서 중심도가 높은 경우, 즉, 납핵이 비껴 충돌한 경우, 그 값이 0-90% 데이터의 평균보다 작음을 알 수 있었다. 이는 기존에 사용해온 PYTHIA 입자 생성 모델에 의해서는 설명이 안 되는데, PYTHIA의 입자 생성 모델에 HIJING에서 모사하는 초기 충돌의 기하학적 정보가 결합된 HG-PYTHIA로 데이터를 설명할 수 있음을 알 수 있었다. 이 결과는 ATLAS에서 W, Z 보존을 이용하여 측정한 결과와는 다른 경향을 보인다. 즉, ATLAS의 결과는 중심도가 높은 경우 R_{AA} 값이 불확실도 내에서 중심도가 낮은 경우와 마찬가지로 1로 나오는데, 이는 중심도가 높은 경우 HG-PYTHIA의 R_{AA} 예측 결과가 1보다 작게 나오는 결과로는 설명이 되지를 않는다. CMS의 검출가능영역이 $|y| < 2.1$ 이고, ATLAS의 검출가능영역이 $|y| < 2.5$ 로 영역이 다르고, 전자기적인 배경 신호에 의한 오염 가능성이 있는 것이 두 실험 결과의 불일치를 가져온 것으로 추측되고 있다.

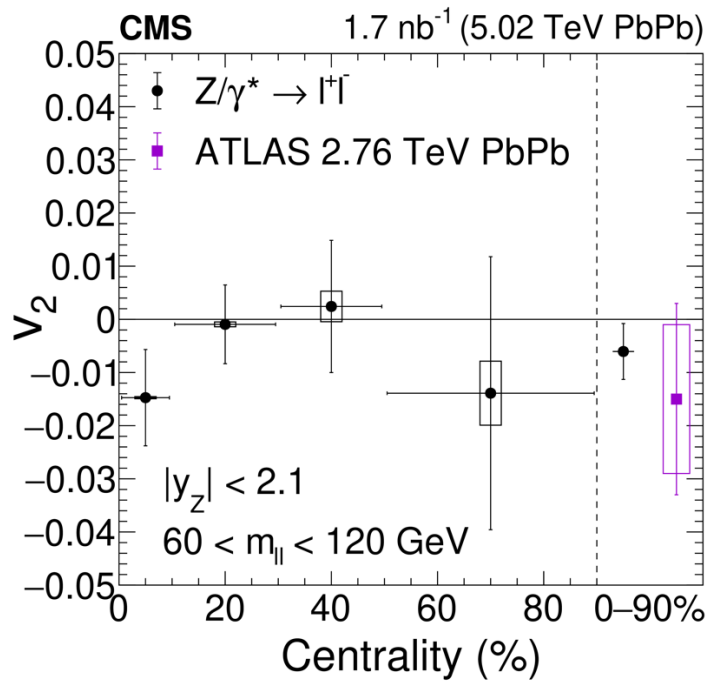


그림 5. 중심도에 따른 타원 흐름율(v_2), 검정색은 CMS에서 측정한 결과이고, 보라색은 ATLAS에서 2.76 TeV 납핵-납핵 충돌에서 측정한 결과이다.

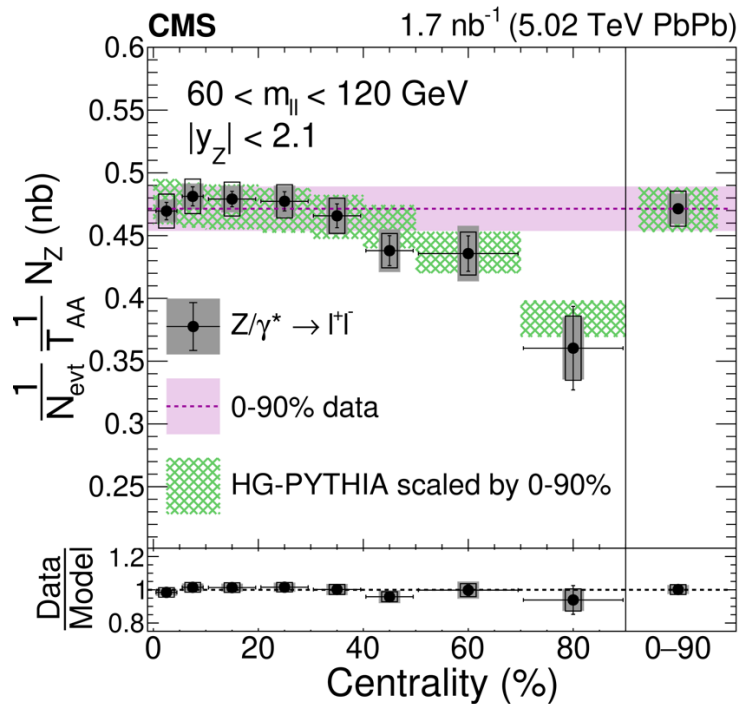


그림 6. Z 보손 입자를 이벤트의 갯수와 T_{AA} 로 나눈 값을 중심도에 따라 나타낸 그림, 검정색은 데이터이고, 분홍색 영역은 0-90% 중심도 데이터가 분포하는 영역, 그리고 녹색 영역은 HG-PYTHIA가 예측하는 결과이다.

5. 결론과 전망

이상에서 살펴 본 것과 같이 양성자-납핵 충돌에서 저질량 영역까지 포함하는 DY 측정이 이루어지고, Z 보존 영역에서는 양성자-납핵, 납핵-납핵 충돌에서의 데이터와 PDF, nPDF와의 비교가 이루어졌다. DY 측정은 모델의 예측보다 훨씬 작은 불확실도를 가지고 이루어져서 앞으로 nPDF의 개량에 크게 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 처음으로 이루어진 저질량 영역의 결과는 nPDF 연구에 새로운 공간을 제공할 것이다. 또한 정밀하게 이루어진 납핵-납핵 충돌에서 생성된 Z 보존 입자의 측정 결과 또한 모델의 개량의 필요성을 보여주고 있다. 특히, R_{AA} 등 측정값의 경향, 측정값을 PDF와 nPDF 중 어떤 모델로 더 잘 설명할 수 있는지가 각 실험 그룹의 측정에 따라 다른 경향을 보여주고 있음에서, 아직도 불확실도를 더 줄여서 정밀한 측정을 할 필요가 제기된다. 앞으로 2022년 LHC가 재가동되어 새로운 충돌 데이터를 얻게 되면 더욱 더 정밀한 측정을 통해 여러 의문점이 해결될 수 있을 거라 기대된다. 또한 국내 중이온 충돌 물리 연구가 쿼코니아 중심으로 집중해있는데 비해, DY 측정은 국내 입자물리 연구자들이 구축해놓은 프레임워크를 통해 연구가 진행됨을 통해 국내 중이온 충돌 물리 연구 분야의 확장 가능성 또한 보여주고 있어 핵-입자 물리간 국내 연구자들의 협동 모델의 가능성 또한 보여주고 있다. 앞으로도 DY를 비롯한 색소 중립적인 입자들에 대한 연구는 아직까지도 미지의 영역으로 남아 있는 핵의 구조와 QGP의 특성 규명에 크게 기여할 수 있을거라 기대된다.

References

- [1] Drell, S.D. and Yan, T.-M., "Massive Lepton-Pair Production in Hadron-Hadron Collisions at High Energies", Phys. Rev. Lett. 25, 316–320 (1970)
- [2] Wikipedia, "Drell-Yan process", https://en.wikipedia.org/wiki/Drell-Yan_process
- [3] CMS Collaboration, "Study of Z Boson Production in PbPb Collision at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett 106, 212301 (2011))
- [4] CMS Collaboration, "Study of Drell-Yan dimuon production in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV", JHEP 05, 182 (2021)
- [5] ATLAS Collaboration, "Z boson production in p + Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured with the ATLAS detector", Phys. Rev. C 92, 044915 (2015)
- [6] ALICE Collaboration, "Z-boson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV", JHEP 09, 076 (2020)
- [7] ATLAS Collaboration, "Z boson production in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured by the ATLAS experiment", Phys. Lett. B 802, 135262, (2020)
- [8] CMS Collaboration, "Constraints on the Initial State of Pb-Pb Collisions via Measurements of Z-Boson Yields and Azimuthal Anisotropy at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV", Phys. Rev. Lett. 127, 102002 (2021)

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

Volume 18, No. 1

ISSN 2288-050X

2021년 12월 24일 인쇄	(비매품)	발행인	문 동 호
2021년 12월 27일 발행		편집인	문 동 호
		인쇄처	전대 자연대 복사 / 운화복사
		발행소	전남대학교 우주소립자연연구소

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77 (용봉동)
전남대학교 자연과학대학 4호관 우주소립자연연구소
전화 : 062-530-3354

Website : <http://iuep.jnu.ac.kr>

CONTENTS

Volume 18, No. 1

Journal of Universe and Elementary Particles December 2021

RAON에서 LAMPS 실험을 위한 빔 표류 검출기 (BDC) 연구	서준후	01
Recent progress of the investigation of heavy ion collision by color-neutral probes	Hyunchul Kim	13