

Transverse Momentum Distribution of Z Boson Production Cross Section at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV

Yongsun KIM

Department of Physics and Astronomy, Sejong University, Seoul 05006, Korea

Dong Ho MOON*

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

(Received 7 May 2019 : accepted 22 May 2019)

A quark-gluon plasma (QGP) is very hot and dense quantum chromodynamics (QCD) matter in which quarks and gluons are deconfined. A QGP can be created by colliding two relativistically accelerated ions, which is of interest because the early universe was in this state shortly after the Big Bang. To create QGP in the lab, Large Hadron Collider (LHC) at Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN) and Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory (BNL) have collided various kinds of nuclei. One broadly used method to study the properties of a QGP is to compare the cross sections of high-transverse-momentum (p_T) hadrons in proton-proton (pp) and in heavy-ion collisions. The suppression of high- p_T hadrons in heavy-ion collisions, called jet quenching, serves as a signature of a QGP. Recently, however, several other effects, including nucleus PDF and cold nuclear matter effect, which cannot be ignored in accounting for jet quenching, were reported to fully understand those effects, researchers must measure precisely quarkonia, high- p_T hadrons, and Z and W bosons in proton-nucleus collisions. For this purpose, the LHC carried out proton-lead collisions at a centre-of-mass energy of 8.16 TeV. In this paper, we introduce the extrapolation method to produce the Z-boson cross section in proton-proton collisions at 8.16 TeV. The ultimate goal is to provide reference data to be compared with the differential cross section for this proton-lead pPb collision.

PACS numbers: 21.65.Qr, 24.85.+p

Keywords: Nuclear physics, Particle physics, Quark-gluon-plasma, Z boson, Cross section, Cold nuclear matter

충돌 에너지 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV 에서의 Z 보손 생성 산란 단면적의 횡운동량 분포

김용선

세종대학교 물리천문학과, 서울 05006, 대한민국

문동호*

전남대학교 물리학과, 광주 61186, 대한민국

(2019년 5월 7일 받음, 2019년 5월 22일 게재 확정)



두 중이온을 상대론적으로 빠르게 가속시킨 뒤 충돌을 시키면 매우 뜨겁고 밀도가 높은 새로운 물질이 형성이 되는데 이를 Quark-Gluon-Plasma (QGP) 상태라 부르며 빅뱅 직후 우주의 모습을 재현하는 것으로 기대하고 있다. CERN 연구소의 LHC와 BNL 연구소의 RHIC에서는 이 QGP 매질을 만들기 위해 가속기를 이용하여 다양한 중이온을 충돌 시키는 실험을 행해왔다. QGP 상태의 성질을 이해하기 위해 여러가지의 연구 방법 중 가장 잘 알려진 것은 중이온 충돌에서 생성되는 고에너지 강입자의 산란 단면적을 양성자-양성자 충돌의 결과와 비교해보는 것이다. 양성자-양성자 충돌에 비해 강입자의 생성량이 줄어드는 제트-꺼짐은 QGP 형성의 중요한 증거로 사용되어왔지만, 최근에는 제트꺼짐이 QGP 효과 뿐 아니라 핵 파톤 분포함수(nPDF), 차가운 핵물질 효과(CNM) 등 2차적인 요소들의 영향도 무시할 수 없다는 것이 알려졌다. 이를 연구하기 위해서는 양성자-중이온 충돌에서 생성되는 쿼코니아, 강입자, Z 및 W 입자들을 정밀하게 측정해야하며, 그 목적을 달성하기 위해 LHC에서는 2016년에 8.16 TeV의 충돌 에너지에서 양성자-납핵 충돌 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 8.16 TeV의 양성자-양성자 충돌에서 생성된 Z 입자들의 충돌산란단면적을 외삽하는 방법을 소개하며, 궁극적으로는 양성자-중이온 충돌 실험의 결과에 참고할 수 있는 데이터를 제공하는 것이 목적으로 한다.

PACS numbers: 21.65.Qr, 24.85.+p

Keywords: 핵물리학, 입자 물리학, Quark-Gluon-Plasma, Z 보손, 생성 산란 단면적, 차가운 핵물질

I. 서론

납핵과 금핵등의 중이온들을 O(100)GeV 이상의 에너지에서 충돌시키면 고온 고압의 매질이 생성된다 [1]. 이 매질 안에서는 쿼크와 글루온이 강입자의 속박에서 벗어나 자유롭게 공간은 떠돌아 다니며 서로 강한 상호작용을 주고받게 되는데 이를 Quark-Gluon-Plasma (QGP) 상태라고 부른다. 빅뱅 직후부터 그리고 우주의 첫번째 양성자가 생기기 전까지의 초기 우주 역시 이 QGP 상태에 있었기 때문에 이를 연구하는 것은 강입자의 생성과정을 이해하는 데 결정적인 역할을 한다. QGP의 열적 특성을 탐색하는 여러 가지 방법 중 한가지가 높은 횡운동량을 가진 (high p_T) 강입자 의 산란단면적을 측정하여 양성자-양성자의 결과와 비교하는 것이다. 양성자-양성자 충돌과 중이온 충돌에서 high p_T 강입자들은 공통적으로 충돌초기에 강하게 산란되는 쿼크와 글루온의 파쇄로 인해 생성된다. 다만 중이온 충돌에서 생성되는 쿼크와 글루온들은 동시에 생성되는 QGP 매질과 강한 상호작용을 하여 에너지를 잃게 되어, 여기서 파쇄된 강입자들의 횡운동량이 양성자-양성자 충돌에 비해 상대적으로 낮아지게 된다. 일반적으로 강입자의 스펙트럼은 횡운동량이 높아질수록 급격하게 낮아지기 때문에 중이온 충돌실험에서의 high p_T 강입자들의 산란단면적이 양성자-양성자 충돌에 비해 상당히 많이 줄어들게 된다 [2,3]. 이러한 현상을 제트꺼짐이라고 부르며 이는 LHC와 RHIC의 중이온 충돌실험에서 QGP가 생성된다는 중요한 단서로서 받아들여져 왔다. 그 뿐만 아니라 중이온 충돌에서 일어나는 쿼코니아의 생성량 억제에는 그 메커니즘

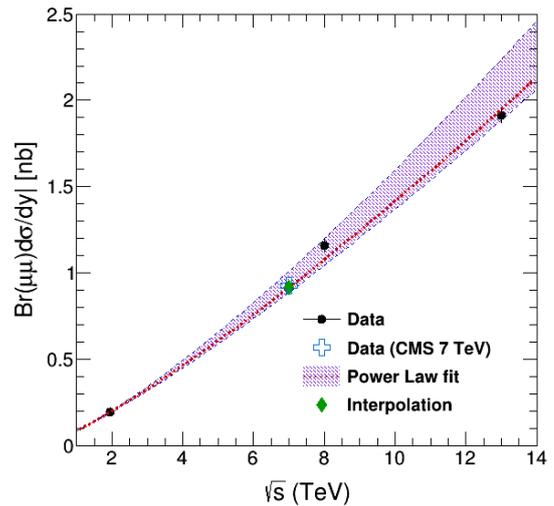


Fig. 1. (Color online) Power law fit for the inclusive Z boson production cross-section. The closed black circles correspond to CMS data points, the green closed diamond mark the interpolated production cross-section at 7 TeV. The shaded area indicates the estimated error of the power law fit.

이 제트꺼짐과는 다르지만 (Debye screening) 결과적으로 양성자-양성자 충돌에 비해 산란단면적이 줄어드는 효과를 내며, QGP의 또다른 단서로서 역할을 한다.

제트꺼짐과 쿼코니아 억제를 수치적으로 나타내기 위해 만들어진 변수가 핵수정변수 (Nuclear Modification Factor; R_{AA})이며 다음과 같이 정의된다.

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{\sigma_{AA}}{\sigma_{pp}}. \quad (1)$$

σ_{AA} 와 σ_{pp} 는 각각 관찰하고자 하는 입자 (high p_T 강입자 혹은 쿼코니아 등)이 중이온-중이온(AA) 충돌과 양

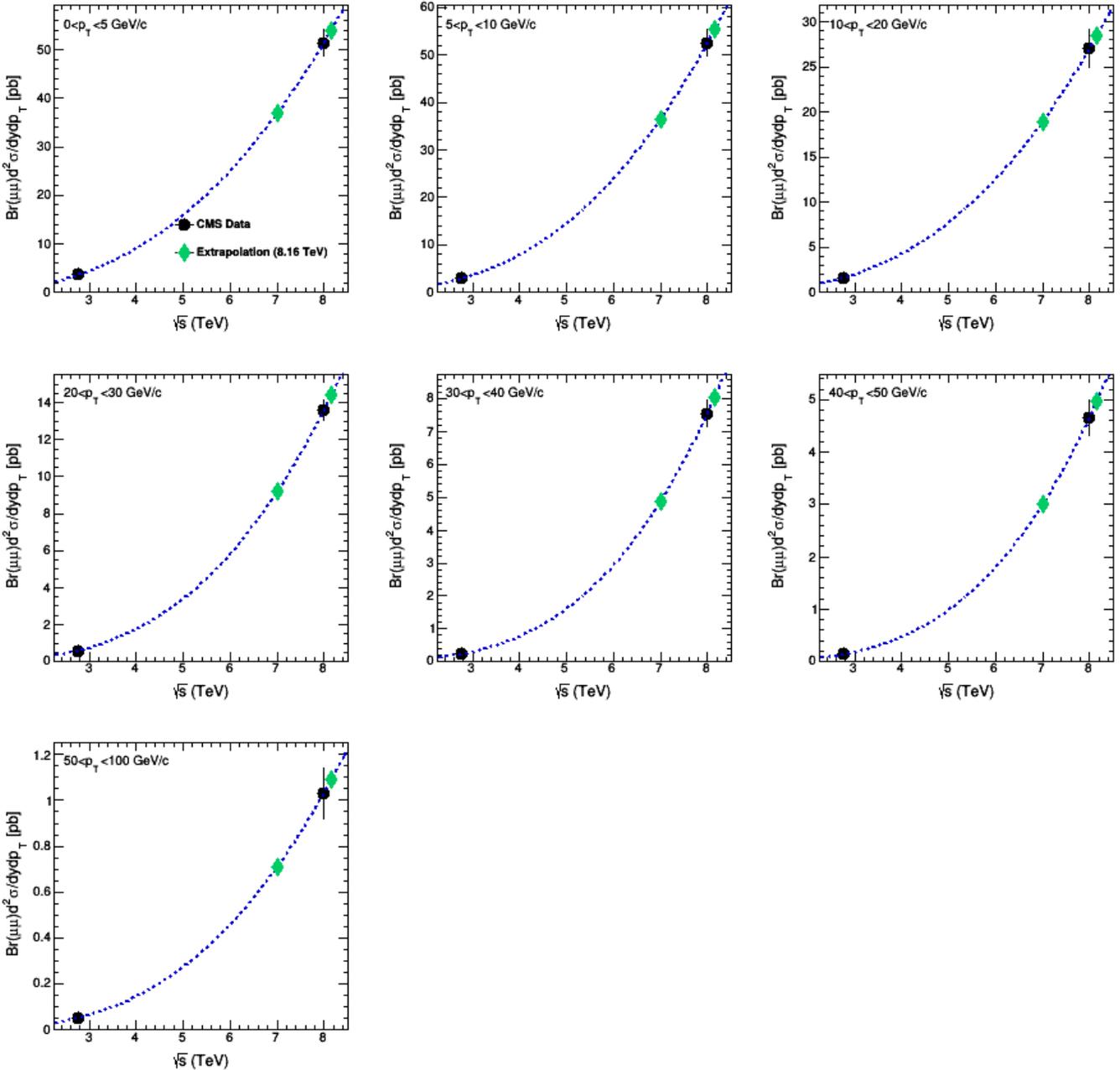


Fig. 2. (Color online) Z boson production cross-sections as a function of the transverse momentum within a rapidity range $|y| < 2.4$. The closed black circles correspond to CMS measurements at 2.76 TeV and 8 TeV, while the closed green diamonds indicated the interpolated and extrapolated results for 7 and 8.16 TeV.

성자-양성자(pp) 충돌에서 가지는 산란단면적을 의미한다. N_{coll} 은 한 회의 중이온-중이온 충돌 내부에서 일어나는 핵자쌍들 간의 비탄성 충돌 횟수를 의미하며, 두 산란단면적의 비율에 정상화 상수로 사용된다. 예를 들어 어떤 입자에서 측정된 R_{AA} 가 1인 경우, 두 충돌 실험에서의 산란 단면적이 일치한다는 의미이며 $R_{AA} < 1$ 인 경우에는 중이온-중이온 충돌에서 그 입자의 생성량이 억제되었음을 의미한다. RHIC과 LHC 실험에서 측정한 강입자와 쿼크onia의 R_{AA}

는 약 1/5-1/2 사이로 측정되었으며, 이는 QGP의 모델링 하는데에 필요한 중요한 정보로 활용되고 있다.

그러나 측정된 R_{AA} 값이 모두 QGP에 의해 결정되는 것이 아니라 그 외 부차적인 요인도 함께 작용한다. 예를 들면 핵 안에서 생성된 쿼크들이 핵자들과 탄성충돌하면서 생기는 에너지 잃음 (Cold Nuclear Matter; CNM) 효과, 핵 자체가 가지고 있는 파톤 분포함수가 양성자의 분포함수와 다르다는 점 (nPDF) 등이 있다. 이러한 요인들을 총칭

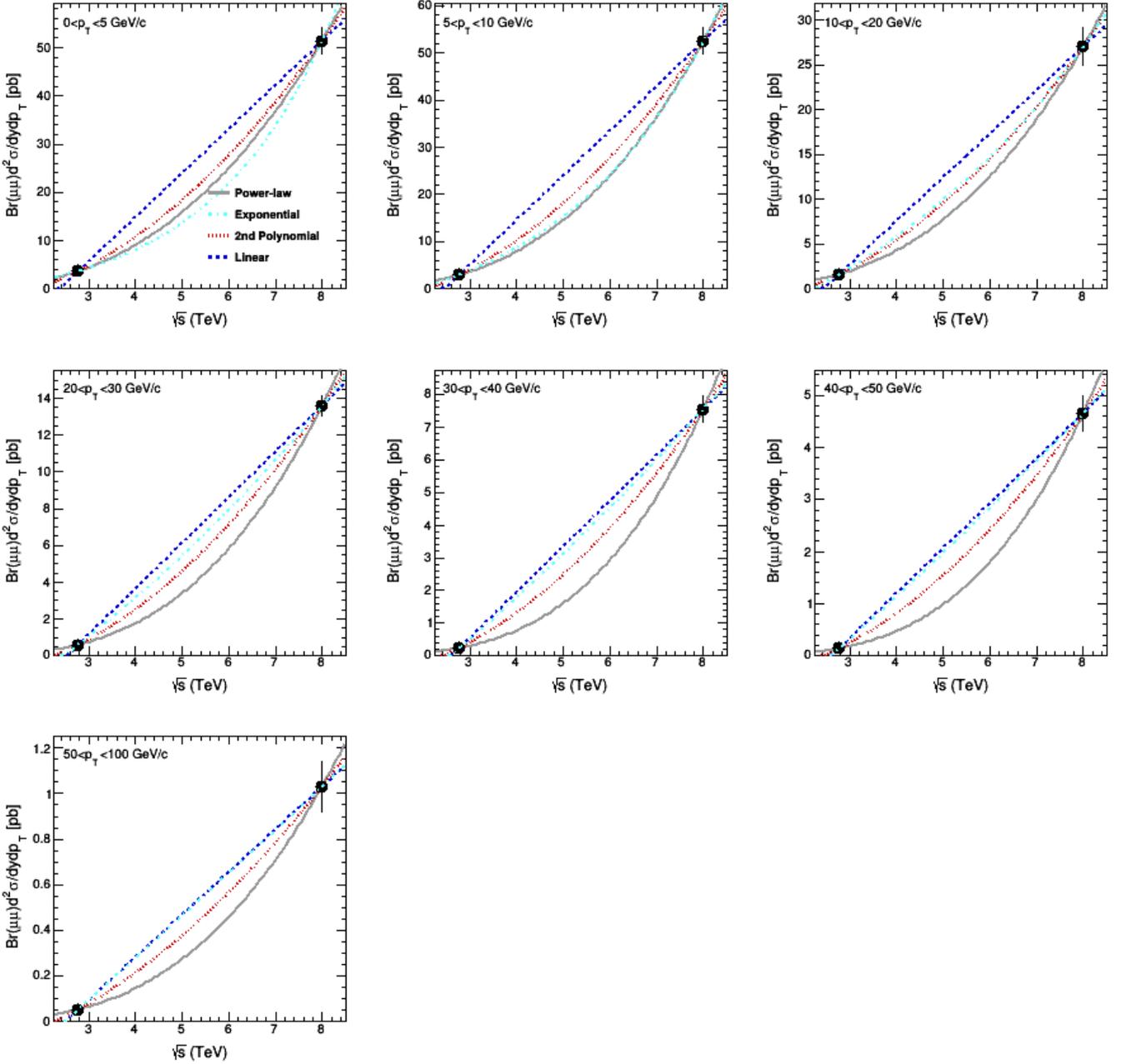


Fig. 3. (Color online) Systematic study of the transverse momentum bins using three different kinds of fitting functions. The gray line marks our default power-law fit, while the green, red, and blue dashed lines correspond to exponential, 2nd-order polynomial, and linear fitting functions, respectively.

해서 초기상태효과(Initial State Effect)라 부르는데 QGP 효과에 비해 상대적으로 적은 편이지만 QGP의 정밀측정을 위해서는 결코 무시할 수준은 아닌 것으로 보고되고 있다. 또한 최근 LHC의 충돌 휘도가 높아짐에 따라 정밀측정이 가능해졌기 때문에, 초기상태효과와 QGP 효과를 분리하는 것이 중요한 과제로 자리잡게 되었다.

2016년 LHC가 수행한 양성자-납핵(pPb) 충돌은 바로 이

러한 이유로 실행되었으며 관성계에서의 충돌에너지가 8.16 TeV 였다. 이 실험에서는 많은 양의 고에너지 강입자와 W 및 Z 보손이 생성되었을 것으로 예상되는데, 특히 Z 보손은 질량이 크기 때문에 높은 Q^2 값을 가진 강한 산란 이벤트의 초기상태효과를 측정하기에 적합하다 [4]. 이를 수치화한 값은 양성자-납핵 충돌에서의 산란단면적을 양성자-양성자로 나눠줘서 구하는데 (R_{AA} 에서와 같이) R_{pA} 라고 부른

Table 1. CMS 실험 결과 및 내삽과 외삽으로 구한 Z 보손 생성 산란 단면적 [5–7].

	생성 산란 단면적 (nb)
CMS 2.76 TeV	0.498 ± 0.0054
CMS 7 TeV	0.924 ± 0.022
내삽 방법 7 TeV	0.916
CMS 8 TeV	1.16 ± 0.036
외삽 방법 8.16 TeV	1.10487

다. 문제는 현재 LHC가 8.16 TeV에서 양성자-남핵 실험만 수행하였고 양성자-양성자 충돌실험은 하지 않았기 때문에, R_{pA} 계산에 필요한 기준값을 측정할 수 없다는 점이다. 이 논문에서는 이에 필요한 양성자-양성자 충돌 실험을 대체하기 위한 방법을 소개하고 그 값들을 예측하고자 한다. LHC의 입자검출기 중 하나인 CMS (Compact Muon Solenoid)는 양성자-양성자 충돌에서 생성되는 Z 보손의 산란단면적을 2.76 TeV [5]와 7 TeV [6] 및 8 TeV [7], 13 TeV [8]에서 측정하였는데, 우리는 이 데이터값들을 power-law 함수를 이용해 외삽해내고 8.16 TeV에서의 R_{pA} 계산에 사용될 수 있는 값을 제공하고자 한다. 특히 전체산란단면적(total cross section)뿐만 아니라, 횡운동량에 따른 미분 단면적(differential cross section)을 제공함으로써 핵의 초기상태 효과를 더욱 정밀하게 측정할 수 있도록 정보를 제공하는 것이 최종목표이다. 이 때 사용한 power law 함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$f(\sqrt{s}) = A \cdot (\sqrt{s})^b. \quad (2)$$

섹션 II에서 Z 보손의 생성 단면적을 구하는 방법에 대해 설명하고 섹션 III에서는 블라인드 테스트를 통해 이 방법이 7 TeV 결과와 잘 맞음을 확인하고, 8.16 TeV에서의 미분산란단면적을 예측할 것이며 마지막 섹션에서 결과를 정리하고 논문을 마치도록 하겠다.

II. 내삽(Interpolation)과 외삽(Extrapolation) 방법

먼저 양성자-양성자 충돌에너지에 따른 Z 보손의 산란 단면적 값이 power law 함수를 따르는지를 확인하기 위해 CMS가 2.76, 7, 8 그리고 13 TeV에서 측정한 전체산란 단면적 결과를 사용하였다(그림 1). 먼저 7 TeV 데이터를 제외한 2.76, 8, 13 TeV의 Z 보손 생성 산란 단면적을 이용해 power law 함수의 매개 변수를 정한 뒤, 7 TeV에서 이 함수의 결과를 예측해 보았다. CMS 실험의 결과가

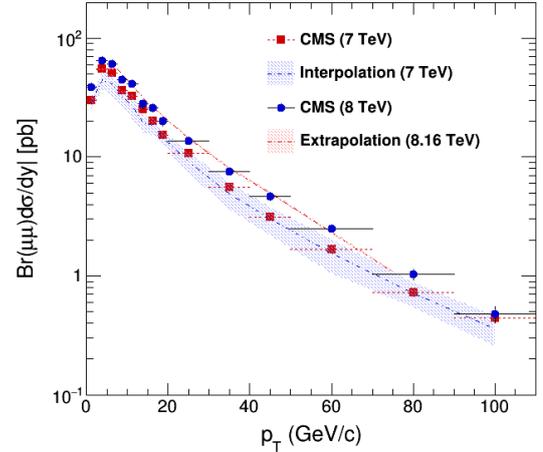


Fig. 4. (Color online) Z boson production cross-sections as a function of transverse momentum. The closed red squares and closed blue circles correspond to CMS 7 TeV and 8.16 TeV data points, respectively. The blue dashed lines mark interpolated results, while the blue shaded areas indicate their corresponding uncertainties. The red dashed line shows the extrapolated results, with the red shaded areas marking the associated estimated uncertainties.

미분산란단면적으로 나와있는 경우에는 저자가 직접 그 수치를 합하였고 오차는 구적법을 이용하여 계산하였다. Figure 1에서 보는 바와 같이 내삽 결과는 실제 CMS 실험에서 측정된 7 TeV 결과와 잘 일치함을 확인하였으며, 이 때 사용한 함수를 이용하여 8.16 TeV에서의 전체산란단면적이 얼마인지를 예측할 수 있었다. 이 때 구한 값들은 Table 1에 정리하였다.

III. 결과 : 횡운동량 분포

횡운동량에 따른 R_{pA} 값은 Z 보손의 생성에 관여하는 쿼크 혹은 글루온의 운동량 비율 ($x = p/\sqrt{s}$) 및 Q^2 에 의존하기 때문에, nPDF 효과를 정밀하게 측정하기 위해서는 횡운동량 스펙트럼을 측정하는 것이 필수적이다. 이 섹션에서는 이전 섹션에서 소개한 외삽 방법을 이용하여 8.16 TeV에서의 양성자-양성자 충돌에서 생성되는 Z 보손의 횡운동량 분포를 예측하고자 한다.

Figure 2는 횡운동량 분포를 7개의 bin으로 나눠 각각의 bin에서 CMS 실험 결과를 이용하여 8.16 TeV에서의 외삽으로 구한 결과를 보여주고 있다. 이 때 나눈 bin은 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50, 50–100 GeV/c 이고 사용된 fit 함수는 Fig. 1에서 사용된 power law 함수를 이용하였다. 각 bin에 사용된 parameter들을 Table 2에, 그리고 외삽 결과를 Table 3에 정리하였다. 이 외삽 결과의 신뢰도

Table 2. Power law fit parameters for the extrapolations shown in Fig. 2.

p_T Bins (GeV/c)	Parameter A	Parameter b
0.0–5.0	0.2863 ± 0.0481	4.9931 ± 0.1834
5.0–10.0	0.1831 ± 0.0371	5.4421 ± 0.2136
10.0–20.0	0.1079 ± 0.0205	5.3115 ± 0.2226
20.0–30.0	0.0300 ± 0.0080	5.8836 ± 0.2655
30.0–40.0	0.0083 ± 0.0035	6.5539 ± 0.4129
40.0–50.0	0.0049 ± 0.0026	6.5878 ± 0.5270
50.0–100.0	0.0030 ± 0.0012	5.6224 ± 0.4347

Table 3. Extrapolated z boson production cross-sections in marked transverse momentum bins.

p_T Bins (GeV/c)	Extrapolated Cross Section (pb)
0.0–5.0	54.06 ± 1.15
5.0–10.0	55.39 ± 1.39
10.0–20.0	28.47 ± 0.68
20.0–30.0	14.44 ± 0.42
30.0–40.0	8.06 ± 0.28
40.0–50.0	4.98 ± 0.18
50.0–100.0	1.09 ± 0.03

를 계산하기 위해 다양한 함수들(지수함수, 일차함수, 2차 다항함수) 사용하여 가장 큰 차가 벌어지는 경우를 오차로 지정하였다.

IV. 결론

LHC에서 수행한 8.16 TeV 의 양성자-중이온 충돌 실험은 차가운 핵효과를 포함한 초기상태효과를 이해하기 위한 중요한 데이터를 제공해 주며, 특히 Z 보손은 높은 Q^2 값을 가진 이벤트에 접근하는 데에 유용하게 쓰인다. 이를 위해서는 같은 충돌에너지에서의 양성자-양성자 충돌 결과가 필수적이거나 현재 8.16 TeV 에서의 양성자-양성자 충돌 데이터가 존재하지 않기 때문에 이 논문에서는 Z 보손의 산란단면적을 외삽 하였다. 기존의 CMS 실험이 2.76, 7, 8 및 13 TeV 에서 측정한 전체산란단면적의 결과를 이용하여

power law 함수를 이용한 내삽 및 외삽 방법이 유용하다는 것을 밝혔고, 같은 방식으로 횡운동량의 미분 산란 단면적을 예측하였다. 이 방법의 오차를 계산하기 위해 2차 다항식 및 지수함수를 이용하여 같은 과정을 거쳐 외삽 결과를 계산하였고, 기존의 값과의 차이를 오차로 사용하였다.

본문에서 보여준 대로 이 방법은 매우 빠르고 효과적이며 이 논문이 제공하는 결과는 향후 CMS, ATLAS 그리고 ALICE에서 Z 보손의 R_{pA} 값을 계산할 때 양성자-양성자 충돌 실험을 따로 하지 않도록 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(NRF-2018R1A2B6008231, NRF-2018M7A1A1072274)의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

- [1] H. Bohr, H. B. Nielsen, *Nucl. Phys. B* **128**, 275 (1977).
- [2] D. Gross, F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* **30**, 1343 (1973).
- [3] A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam and F. Ambrogio *et al.*, *J. High Energ. Phys.* **04**, 039 (2017).
- [4] CMS Collaboration, *Phys. Lett. B* **759**, 36 (2016).
- [5] M. Montero, A. M. Uranga and I. Valenzuela, *J. High Energ. Phys.* **03**, 032 (2015).
- [6] S. Chatrchyan *Phys. Rev. D* **85**, 032002 (2012).
- [7] V. Khachatryan, A. M. Sirunyan, A. Tumasyan and W. Adam *et al.*, *J. High Energ. Phys.* **02**, 096 (2017).
- [8] A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam and F. Ambrogio *et al.*, *Eur.Phys.J.C* **78**, 965 (2018).