대형이온충돌실험(ALICE)의 근황과 전망

- 대형강입자충돌기(LHC)의 RUN2 이후 전망에 초점을 맞추어

DOI: 10.3938/PhiT.24.034

권민정·유인권

A Large Ion Collider Experiment (ALICE) at the Large Hadron Collider (LHC) - Outlook beyond LHC RUN2

Minjung KWEON and In-Kwon YOO

The ALICE (A Large Ion Collider Experiment) is a general purpose experiment dedicated to the study of heavy-ion collisions at the Large Hadron Collider (LHC). A new state of matter such as a quark-gluon plasma, which had to exist in the early stage of the universe, can be produced in relativistic heavy-ion collisions. The hard probes, especially heavy hadrons containing heavy quarks produced in the initial stage of the collisions are ideal tools to study the properties of quark matter, such as the gluonic energy loss and its mechanism. Some recent results for the nuclear modification factor (R_{AA}) of heavy flavor hadrons indicate different energy loss patterns depending on the flavor. So far about 0.1 nb^{-1} of data have been collected in Pb-Pb collisions from the LHC RUN1 and are being analyzed and furthermore 10 times more data will be collected in Pb-Pb collisions at the highest energy ($E_{CM} = 5.1 \text{ TeV/u}$) during LHC RUN2. Accordingly, the statistical uncertainty will be dramatically reduced, thus allowing some theoretical models on the nuclear modification in hot matter to be excluded.

Furthermore, for an enhanced vertex position resolution and data acquisition rate of the daughter particles that decay from such hard probes, an upgrade of the ALICE - ITS (Inner Tracking System) is already ongoing and will continue during the LHC RUN2. The new ITS is, therefore, based on the latest silicon pixel technology and is designed with a new readout system to raise the data taking rate and to reduce the pixel size and the material budget. The Korean team consisting of researchers at Pusan National University, Yonsei University and Inha University is in charge of a mass test of all (53k) silicon chips of 12.5 billion pixels and the HIC (hybrid integrated circuit) assembly as one of the 5 stations in the world.

들어가는 말

인류 최대의 연구시설이라는 스위스 제네바 소재 유럽핵입자물리연구소(CERN)의 대형강입자충돌기(Large Hadron Collider, LHC)가 첫 운전을 시작한 2008년 이래 만 6년 반이 지났다. 2008년에 잠시 시행착오가 있었지만, 2009년부터 2013년 초까지 약 3년 반 동안 최대 중심에너지 7 TeV의 양성자-양성자 충돌실험 및 핵자당 2.76 TeV의 Pb-Pb 충돌실험 및 5.02 TeV의 양성자-납핵 충돌실험이 성공적으로 이루어졌다. 2013년 초부터 금년(2015년) 초까지 2년간 1차 장기셧다운(Long Shutdown 1, LS1)이 있었으며, 이 기간 동안 LHC는 가속기 업그레이드를 통하여 2015년 5월부터 최대중심에너지 13 TeV의 양성자-양성자 충돌실험이, 12월경 핵자당 5.1 TeV(핵자수를 모두 더하면 총에너지 1 PeV)의 Pb-Pb 충돌실험이 예정되어 있다. 이것은 인류역사상 이제까지 기록된 최대에너지의 입자충돌실험으로 기록될 것이다. 이 에너지는 1평방미터당 무려 10^{24} J 의 에너지가 가해지는 것으로, 시속 300 km로 달리는 고속철 10^{16} 대가 한꺼번에 충돌하는 것과 같은 에너지이다. LS1 이후의 LHC 운영계획은 그림 1과 같다. 일반적으로 충돌실험이 일어나는 기간을 런(RUN)이라 부르는데, Physics 런(그림 1의 초록색 부분)은 대체로 10:1의 비율로 양성자-양성자

저자약력

권민정 교수는 고려대 물리학과 학사, 동대학원에서 이학석박사 학위를 받았다. 박사 과정 중 브룩헤이븐 국립연구소(Brookhaven National Laboratory)의 상대론적 중이온 가속기(RHIC) PHENIX 실험에 참여하였다. 2006년부터 독일의 하이델베르크(Heidelberg) 대학에서 박사 후 연구원으로 일하며 거대 강입자 가속기(LHC)의 ALICE 실험에 참여해왔으며, 2013년 3월부터 인하대 물리학과에서 조교수로 일하고 있다.

유인권 교수는 서울대학교 천문학과 학사, 독일 마부르크대학교 물리학과 석박사, 독일 중이온연구소(GSI) 박사후연구원을 거쳐 2003년부터 부산대학교 물리학과 교수로 재직하고 있다. 2009년부터 현재까지 ALICE 한국 실험팀 대표를 맡아 한국 ALICE 실험을 총괄하고 있다.

(yoo@pusan.ac.kr)

Fig. 1. LHC Schedule beyond the Long Shutdown 1 (LS1).

충돌 런과 Pb-Pb 충돌 런으로 이루어진다. 양성자 충돌은 핵자 1개의 충돌인데 비해, 납핵 충돌은 핵자 200여 개의 충돌이므로 사실상 충돌실험을 통해 얻는 데이터양은 납핵 충돌의 경우가 훨씬 많아진다. 이렇게 막대한 에너지의 입자충돌을 통해 어떤 물리적 현상을 이해하고자 하는 것일까?

1. 입자물리학과 핵물리학, 그리고 가속기

많은 이들이 - 심지어 물리학자조차도 - 도대체 입자물리학과 핵물리학이 어떤 차이가 있는지 묻곤 한다. 두 분야 모두 마찬가지로 가속기라는 고가의 대형 시설을 활용한 입자충돌을 연구대상으로 하고 또한 비슷한 기능의 입자검출기를 이용하고 있다는 점에서, 많은 경우에 핵 및 입자물리학이라는 범주로 함께 통용되고 있지만 두 분야는 근본적인 시각적 차이가 있다. 핵물리학은 기본적으로 이러한 통계적인 물리량들로부터 물질의 실질적인 결합양태에 초점이 맞춰져 있는 반면, 입자물리는 더 근원적인 입자 하나하나에 초점을 두는 분야이다.

막대한 에너지(운동량)로 가속된 입자는 아주 짧은 파장($\lambda = h/p$)의 파동적 성질로 인해 아주 작은 미시세계를 살피는 도구가 될 수 있으며, 동시에 에너지-질량 등가원리($E=mc^2$)에 따라, 현재 우주에는 존재하지 않는 불안정한 대단히 무거운 입자들의 생성을 가능하게 하기도 한다. 이러한 이유에서 입자를 고에너지로 가속하는 가속기시설은 아직도 많이 알려져 있지 않은 미지의 미시세계를 탐구함과 동시에, 우주최초의 상태를 실험실에 재현시키는 타임머신이 될 수 있다.

2. 대형이온충돌실험(A Large Ion Collider Experiment, ALICE)

대형강입자충돌기(LHC)에는, 입자들이 각각 시계방향과 반시계방향으로 회전하는 두 개의 가속관이 있는데, 6개 지점에

Fig. 2. Overview of A Large Ion Collider Experiment (ALICE) detector system.

서 교차한다. 그 중 4군데 교차지점에 다음과 같은 대형 충돌 검출장치가 설치되어 있다. 가장 규모가 큰 ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus)와 CMS(Compact Muon Solenoid)가 힉스 입자연구를 주목적으로 설치되었고, 가장 규모가 작은 LHCb/LHCf가 암흑물질, 여분차원, 초대칭입자 등 표준모형을 넘어서는 연구를 위하여 가동 중이며, 유일하게 핵(중이온) 충돌실험에 초점을 맞추어 우주의 최초 물질상태에 대한 연구를 진행 중인 것이 대형이온충돌실험(ALICE)이다.

ALICE는 전 세계 37개국, 154개 기관 소속의 1500여 명의 공동연구자들이 연구그룹을 형성하고 있으며, 약 14개의 부검출기들로 구성되어 있다(그림 2). ALICE 한국실험팀은 CMS (Compact Muon Solenoid)와 함께 2007년부터 정부의 한-CERN 협력사업의 두 축을 이루고 있으며, 2015년 현재 5개 기관(강릉원주대, 부산대, 세종대, 연세대, 인하대)으로부터 약 35명(박사급 12명)의 학생들과 연구자가 참여하고 있다.

본 론

강한 상호작용을 기술하는 이론인 양자 색소 역학(Quantum Chromodynamics 또는 QCD) 계산에 의하면, 초기 우주와 같은 고온, 고밀도의 상태에서는 강입자들 속에 갇혀 있었던 쿼크들과 글루온들도 자유로워지고 손지기 대칭성도 회복되는 쿼크-글루온 플라즈마(Quark-Gluon Plasma, QGP)라 불리는 새로운 물질상태의 존재가 가능하다. 따라서 쿼크-글루온 플라즈마를 연구하는 일은 우주 최초의 물질상태를 연구하는 중요한 일이다. 우주 초기로 돌아가 물질을 연구하는 것은 불가능하지만, 전술했듯이 고에너지의 핵-핵(중이온-중이온) 충돌은 통계 물리학적 접근이 가능한 앙상블을 만들어 낼 것으로 예측된다. 양성자 충돌과 다른 점이다. 통계적 물리량인 온도와 바리온밀도가 그림 3에서 보인 것과 같이 강입자 상태의 임계값을 넘어서면, 잠시나마 쿼크-글루온 플라즈마를 만들어 낼 수 있을

Fig. 3. QCD Phase Diagram.

것으로 기대된다.

그렇다면 이러한 충돌을 통해서 과연 새로운 상태의 물질이 만들어졌을까? 만들어졌다면 아주 짧은 시간 동안에만 존재하는 이 물질의 성질은 어떻게 연구할 수 있을까? 좀 더 흥미진진한 형태의 질문으로 바꾸자면, 강한 상호작용을 기술하는 게이지 이론의 어떤 근원적인 열역학적 특성이 고에너지 중이온-중이온 충돌을 통해 실험적으로 검증될 수 있을까? 이 질문에 대답하기 위해서는 가장 적절한 탐사침(probe)을 생각해내는 것이 무엇보다 중요하다.

쿼크-글루온 플라즈마는 대략 10 fm/c 정도의 아주 짧은 순간 동안 fm 단위의 아주 작은 공간에만 존재한다. 따라서 우리가 이용할 탐사침은 중이온-중이온 충돌이 이루어진 직후 아직 열적 평형상태에 도달하기 이전(쿼크-글루온 플라즈마 생성 전)에 생성되고, 큰 에너지를 갖고 있어 쿼크-글루온 플라즈마를 뚫고 나오면서 그 정보를 우리에게 전달할 수 있어야 한다. 이런 면에서 무거운 쿼크는 새로운 상태의 물질을 탐구하기에 가장 적절한 탐사침으로 여겨지는데, 그 이유를 간단히 살펴보자.

중이온을 높은 에너지로 가속하면 이 에너지를 중이온 안의 쪽입자(parton)들이 나누어 갖는다. 에너지의 대부분은 원래의 쿼크입자들(valence quarks)이 나누어 갖고, 일부만이 나머지 그들 사이에 존재하는 쪽입자들(sea quarks and gluons)에게 분배된다.^[1] LHC에서와 같이 가속된 중이온의 에너지가 아주 크면 통계적으로 개수가 많은 이 쪽입자들의 충돌을 통해 쿼크-글루온 플라즈마로의 상전이가 일어난다. 에너지가 큰 두 쿼크가 충돌해 고에너지의 무거운 쪽입자가 새롭게 생성된다면 이는 쿼크-글루온 플라즈마의 특성을 연구하기에 아주 적합한 탐사침으로 사용될 수 있다. 이러한 탐사침을 경성 탐사침(hard probes)이라고 부른다. 쿼크-글루온 플라즈마가 생성되지 않을 것이라 예측되는 양성자-양성자 충돌 실험 결과로부터

Fig. 4. Flavor and mass dependencies of parton interactions with the QCD matter. u, d, s, c, b and g indicate up, down, strange, charm, bottom quarks and gluon, respectively, whereas g indicates gluon with $C_R = 3$. According to QCD, at LHC environment the gluonic energy loss will be dominant due to the larger coupling constant (C_R) than quarks. Furthermore small energy loss is expected heavy quarks due to the dead cone effect. See the text.

경성 탐사침의 특성을 알아낼 수 있고, 이를 중이온-중이온 충돌시 생성, 관측되는 경성 탐사침의 성질과 비교함으로써 쿼크-글루온 플라즈마의 성질을 이해할 수 있게 된다. 이런 측면에서 매혹쿼크(charm quark) 혹은 바닥쿼크(bottom quark)를 포함하는 무거운 강입자는 상대론적 중이온-중이온 충돌을 통해 생성된 물질을 연구하는데 가장 효과적인 탐사침이다.

글루온, 가벼운 쿼크(up, down, strange), 무거운 쿼크(charm, bottom)와 같은 경성 쪽입자들(hard partons)은 상대론적 중이온-중이온 충돌의 초기에 형성된다. 이 쪽입자들은 QCD 매질(쿼크-글루온 플라즈마)과 상호작용을 하는데, 이 상호작용의 정도는 매질의 에너지 밀도와 에너지 손실 메커니즘에 의존한다. 경성 쪽입자의 QCD 매질 내에서의 에너지 손실은 글루온 방사(gluon radiation)와 같은 비탄성 충돌 또는 입자간의 탄성충돌을 통해 일어난다고 여겨진다. QCD 입자들(쿼크와 글루온) 간의 상호작용의 크기는 커플링 상수로 표현할 수 있는데 QCD 이론에 의하면 쿼크는 글루온에 비해 작은 커플링 상수를 갖고 있다(그림 4).^[2] 따라서 QCD 매질과의 상호작용시 쿼크는 글루온에 비해 적은 양의 에너지를 잃어버릴 것으로 예상된다. 또한 “데드 콘 효과(dead-cone effect)”^[3]에 의하면 진행하는 쪽입자의 질량이 클수록 높은 에너지를 갖는 글루온의

REFERENCES

- [1] A. Accardi *et al.*, hep-ph/0308248.
- [2] Francis Halzen and Alan D. Martin, *Quarks and leptons: An introductory course in modern particle physics* (John Wiley & Sons, 1984).
- [3] Yu. L. Dokshitzer and D. E. Kharzeev, Phys. Lett. B **519**, 199 (2001).

Fig. 5. Nuclear modification factor of D mesons.

복사량이 줄어든다. 결과적으로 쪽입자의 질량이 클수록 QCD 매질과의 상호작용으로 인한 에너지 손실이 상대적으로 적어진다. 따라서 중이온-중이온 충돌시 생성되는 경성 쪽입자들을 측정해 그 특성을 비교하면, QCD 매질과 쪽입자 상호작용의 색전하(color charge) 의존성, 쪽입자 질량 의존성 등을 이해할 수 있다. 덧붙여 QCD 매질과 상호작용하는 동안 매혹쿼크나 바닥쿼크의 종류(flavour)는 바뀌지 않으며 새롭게 생기거나 소멸되지 않는다. 이렇듯 여러 가지 면에서 무거운 쿼크는 QCD 매질의 성질을 이해하는데 가장 적합한 탐사침이라 할 수 있다.

ALICE 검출장치는 고에너지 중이온-중이온 충돌실험을 위해 특화된 검출기다. 낮은 횡운동량 영역(p_T)까지 입자의 운동량과 종류 식별 분해능이 뛰어나서 중이온-중이온 충돌로부터 생성되는 강입자, 전자, 뮤온, 광자 및 제트를 심도있게 연구하는데 최적화되어 있다. 특히 가장 안쪽에 설치되어 있는 실리콘 검출기인 내부궤적장치를 이용해 뛰어난 붕괴 꼭지점 분해능을 얻을 수 있다. 무거운 쿼크를 포함하는 강입자들(D 중간자 혹은 B 중간자)은 강한 상호작용이나 전자기 상호작용을 통해 붕괴하는 다른 강입자들보다 상대적으로 긴 수명을 갖는다. 따라서 이러한 ALICE 검출기들의 특성을 조합하면 매혹쿼크나 바닥쿼크를 포함하는 강입자의 생성량을 낮은 횡운동량 영역까지 측정할 수 있다. 2010년부터 2013년까지 ALICE 실험에서는 약 0.1 nb^{-1} (전형적인 핵단면적 - barn - 당 약 10^8 개 중

* $\text{b}=\text{barn}=100 \text{ fm}^2$ (전형적인 핵의 단면적)

Fig. 6. Nuclear modification factors of D mesons and non-prompt J/ψ (decayed from B mesons).

돌데이터)의 Pb-Pb 충돌 사건을 수집했다.* 더불어 QCD 매질이 생성되지 않았을 때 나타나는 물리량을 측정하여 Pb-Pb 충돌 실험 결과와 비교하기 위해 약 250 nb^{-1} 의 pp 충돌 사건과 약 30 nb^{-1} 의 p-Pb 충돌 사건도 수집했다.

양성자-양성자 충돌과 중이온-중이온 충돌에서의 결과를 비교하기 위해서는 적절한 비교변수가 필요한데, 그것이 경성 쪽입자들과 QCD 매질의 상호작용에 민감한 물리량 중의 하나인 핵변형인자(nuclear modification factor) R_{AA} 이다(그림 5와 그림 6의 y축). 이는 양성자충돌에서의 결과에 대한 상대적인 생성량으로서, 핵자충돌의 개수로 규격화시킨 양이다. 일반적으로 이 핵변형인자는 입자의 운동량의 함수로서 만약 경성 입자와 QCD 매질과의 상호작용이 없다면 (양성자 충돌과 차이가 없다면) 그 비율은 1이 된다.

그림 5는 중이온-중이온 충돌시 생성되는 D-중간자의 핵변형인자(R_{AA})를 보여준다. 겹침이 큰 중이온-중이온 충돌에서는 횡운동량의 값이 5 GeV/c 이상인 지점에서 R_{AA} 값이 약 0.2 ~ 0.3 정도이다. 이는 QCD 매질과 매혹쿼크의 상호작용이 커서 매혹쿼크가 충돌시 갖고 있던 에너지를 상당량 잃었음을 의미한다. 충돌의 겹침의 정도가 적을수록 R_{AA} 값이 커지며 양성자-중이온 충돌에서는 더 이상 D-중간자의 억제 현상이 일어나지 않는다. 이는 매혹쿼크가 초기 생성시 갖고 있던 에너지를 그대로 유지한다는 의미로 양성자-중이온 충돌로부터는 QCD 매질이 생성되지 않는다는 사실을 나타낸다. 결론적으로 중이온-중이온 충돌시 QCD 매질이 생성되고 이는 매혹쿼크와

같은 무거운 쪽입자와도 강하게 상호작용함을 알 수 있다.

그림 6는 중이온-중이온 충돌시 생성되는 D-중간자의 R_{AA} 와 B-중간자로부터 붕괴한 J/ψ 입자의 R_{AA} 를 비교하여 보여준다. B-중간자로부터 붕괴되는 J/ψ 입자의 핵변형인자 값이 상대적으로 더 크며 이는 질량이 큰 바닥 쿼크와 QCD 매질과의 상호작용이 상대적으로 질량이 작은 매혹쿼크와의 상호작용보다 적음을 알 수 있다. 이를 통해 QCD 매질과 쪽입자 상호작용이 쪽입자의 질량에 의존함을 알 수 있다.

결론

올해부터 2018년 초까지 진행되는 RUN2 동안에는 질량중심에너지 핵자당 5.1 TeV로 약 1 nb^{-1} 의 Pb-Pb 충돌 사건을 수집할 계획이다. 이는 RUN1보다 약 10배가량 많은 양의 데이터로 통계오차를 상당히 줄이는데 기여할 것이다. 또한 한차례 p-Pb 데이터를 수집할 계획이며, 13 TeV뿐만 아니라 5.1 TeV 질량중심 에너지를 갖는 pp 데이터를 수집할 계획이다. 이를 통해 현재까지의 오차로는 옳고 그름을 판단할 수 없었던 이론적 계산 결과와의 엄밀한 비교가 가능하고, 어떤 이론이 더 실제에 가까운가를 가려낼 수 있을 것이라 기대된다.

ALICE 한국실험팀은 그동안 ALICE 검출장치의 연구, 개발 및 제작과 같은 직접적인 기여보다는 이미 다른 나라의 연구진에 의해 제작, 설치된 검출기의 운용을 통해 실험에 참여해 왔으며, 또한 획득된 데이터를 분석하는 것에 중점을 두어 왔다. 2007년 불과 10여명에 불과했던 한국연구진은 2015년 현재 30여 명으로 늘어났으며, 많은 학생들이 박사과정으로 성

장함에 따라 자연스럽게 데이터분석 그룹에서도 그 역할을 크게 확대하면서 국제적 지명도를 신장시키고 있다. 이에 따라 최근 들어 본격적인 주저자로서 데이터분석 결과논문들의 발표가 이루어지고 있으며, 그 물리적 결과들로부터 요청된 내부궤적장치(Inner Tracking System, ITS)의 업그레이드에서 주도적인 역할로 참여하게 되었다.

ALICE의 내부궤적장치(ITS)의 업그레이드는 충돌시 생성된 입자들의 붕괴 꼭지점 위치 검출 분해능을 획기적으로 높이고, 데이터수집 속도를 100배 이상 향상시키는 등 ALICE 검출장치 전체의 검출효율 향상에 결정적인 역할을 미치게 될 전망이다. 이를 위하여 첨단 신기술을 이용한 복합형 실리콘픽셀(하이브리드 이미징 CMOS 센서)의 제작을 통한 새로운 내부궤적장치(ITS)를 개발, 제작하게 된다(그림 2의 오른쪽 상단에 현재 개발진행 중인 내부궤적장치를 나타내었다).^[4] 이미 LS1 기간 동안 상세기술보고서까지 출판되었으며, 한국실험팀(부산대, 연세대, 인하대)에서는 하이브리드칩의 성능모의실험, 약 5만3천개의 칩(약 125억 개의 실리콘픽셀) 테스트를 전담하고, 세계 5곳에서 이루어질 검출기 조립에도 참여한다. 2차 장기셋다운(LS2) 기간 동안 ALICE 검출기 심장부에 있는 기존 내부궤적장치를 업그레이드된 것으로 교체할 예정이다. 이후 획기적으로 개선된 충돌지점의 공간분해능과 데이터수집을 이용한 무거운 쿼크계 연구는 우주최초의 물질상태(쿼크-글루온 플라즈마) 연구에 아주 중요한 기여를 할 전망이다.

REFERENCES

- [4] ALICE Collaboration, ALICE-TDR-017, 2013.