초기우주의 여행 - Mini Big Bang: 중이온 충돌실험

DOI: 10.3938/PhiT.19.004

강주환·심광숙·유인권

Journey to Early Universe - Mini Big Bang: Relativistic Heavy Ion Collision

Ju-Hwan KANG, Kwang-Souk SIM and In-Kwon YOO

In this article, we introduce experiments on Relativistic Heavy Ion Collisions - A Mini Big Bang produced in the laboratory, which offers a clue to the formation of the early universe. The experimental developments over the past 3 decades on heavy ion collisions at various energies in the world - AGS, SPS, RHIC and LHC will be briefly presented with the outlook in this era.

들어가는 말

앞서 이론적으로 살펴본 극한 상태의 핵물질인 쿼크-글루온 플라스마(QGP)를 규명하고, 상전이의 실험적 증거를 찾기 위하여, 입자가속기를 이용하여 큰 핵(중이온) 충돌계의 온도와 밀도를 높여가면서 강입자 상태로는 설명할 수 없는 새로운 성질관측이 진행되고 있다. 이러한 시도는 1980년대부터 가변-경사-싱크로트론(Alternating Gradient Synchrotron: AGS), 1990년대의 초양성자싱크로트론(Super Proton Synchrotron: SPS), 2000년부터 가동한 상대론적중이온충돌기(Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC)를 지나 2009년 본격가동이 시작된 대형강입자충돌기(Large Hadron Collider: LHC)에 이르기까지 여러 가지 가속기를 활용하여, 다양한 에너지의 충돌

저자약력

강주환 교수는 미국 뉴멕시코대학 이학박사(1987)로서 미국 캘리포니아대학(UCR) 연구원을 거쳐 1994년부터 연세대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (jhkang@phya.yonsei.ac.kr)

심광숙 교수는 프랑스 스트라스부르대학 이학박사(1978)로서 한국물리학회 부회장(2005-2006)을 역임하고 1982년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (kssim@korea.ac.kr)

유인권 교수는 독일 마부르그대학 이학박사(2001)로서 독일 중이온 연구소(GSI) 연구원을 거쳐 2003년부터 부산대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (yoo@pusan.ac.kr)

Fig. 1. The QCD phase diagram. The regions of the confined and the deconfined matter are schematically illustrated.

실험이 이루어져 왔다. 중이온가속기를 이용한 초기우주에 대한 연구는 자연현상에 대한 아래와 같은 근본적인 의문들에 대한 해답을 얻기 위함이다. 즉

- 물질을 태양 중심온도의 10만 배 이상으로 가열하면 과연 어떤 일이 일어날 것인가?
- 중성자별과 블랙홀의 내부에서와 같은 고밀도 상태에서 물질은 어떻게 될 것인가?
- 왜 양성자와 중성자의 질량은 그들을 구성하고 있는 쿼크들의 질량보다 100배 이상 클까?
- 핵을 구성하고 있는 양성자와 중성자 안에 속박되어 있는 쿼크들을 과연 자유롭게 해체시킬 수 있을 것인가?

본 기사에서는 특히 1980년대를 전후하여 시작된 극한상태 핵물질의 상전이 현상을 규명하기 위한 상대론적 중이온 충돌실험들과 그 결과를 개괄적으로 소개하고, 향후의 전망에 대해서 살펴보고자 한다.

1980-90년대: 미국 브룩헤이븐 연구소 AGS에서의 중이온 충돌 실험

이미 1960년부터 가동 중이었던 미국 브룩헤이븐 연구소(BNL) 소재 AGS는 역사적으로 뮤온-중성미자, CP 깨짐 현상

Fig. 2. A photo of the Alternating Gradient Synchrotron (AGS), where the first experimental QGP research was performed.^[1]

및 J/ψ 입자의 발견으로 인한 3개의 노벨상과 Ω 및 Λ_c 입자의 최초 발견이 있었던 곳이다. 1986년도부터 QGP 연구를 위하여 양성자 대신 산소(^{16}O)와 실리콘(^{28}Si) 등의 중이온을 핵자당 운동량¹⁾이 14.6 GeV/c까지 도달하도록 변경하여, 최초로 QGP 탐색을 위한 중이온충돌 실험이 수행된 곳이다 (그림 2). AGS 실험들(E802, E810, E814 등)은 입자식별을 잘하기 위하여 높은 분해능의 비행시간(TOF) 검출기 및 기체 체렌코프 검출기 등을 갖춘 전자식 스펙트로미터를 주로 사용하였다.

AGS에서 QGP 신호와 연관이 있었던 측정은 기묘입자 증가(strangeness enhancement) 현상이다. QGP인 경우에는, 이미 많이 존재하고 있는 가벼운 쿼크들(up, down 쿼크)에 가벼운 쿼크를 추가하는 것보다 오히려 좀 더 무거워서 훨씬 드물게 존재하는 기묘(strange) 쿼크를 추가로 만드는 것이 쉽기 때문에 기묘입자 수가 증가할 것이라는 것이 예견되었는데, 실제로 14.6 GeV/c Si 빔에 대한 초기 결과는 π^+ 에 비하여 K^+ 가 훨씬 많이 생성되어 이와 같은 이론적 예측과 일치하는 것처럼 보여 많은 관심을 얻게 되었다. 그러나 그 후 11.1 GeV/c Au 빔을 포함하는 여러 종류의 충돌 시스템과 사건의 중심도(centrality)에 따른 체계적인 측정을 통하여, 이것은 충돌 시스템이 커지면서 생긴 재산란(re-scattering) 효과에 의한 것이며, QGP로 인한 것이 아니라는 것을 알게 되었다.^[2]

1980-90년대: 스위스 CERN의 초양성자싱크로트론 (SPS)에서의 중이온 충돌 실험

1980년대 BNL의 AGS의 중이온 충돌로부터 물질의 새로

Fig. 3. A fixed target experiment at SPS (NA49) with an event display.

운 상태에 대한 존재 가능성을 시사하는 물리적 발견과 더불어 스위스 제네바에 위치한 유럽연합 핵 및 입자물리 연구소(CERN)에서는 Pb 이온을 최대 핵자당 158 GeV까지 가속시킬 수 있는 초양성자싱크로트론(Super Proton Synchrotron: SPS, 둘레길이 약 7 km, Pb-Pb 충돌실험 시 핵자당 최대 중심충돌에너지 17 GeV)가 1980년대에 완공되어 본격적인 실험과 데이터 분석에 착수하였다. 대표적인 실험 프로젝트들은 NA49 (그림 3), NA45, NA57/WA97 등이며, 이 실험들은 고정 표적 실험들로서, 핵자당 충돌 중심에너지 5 - 17 GeV에서 각각 QGP 상전이의 징후로 예측되었던 이론적 물리량들에 대한 집중적인 관측결과를 도출하였다.²⁾

(1) 기묘입자들의 생성량 증가: AGS, SPS 및 RHIC 실험으로부터 구체적으로 도출된 에너지 및 충돌 시스템에 따른 여러 가지 기묘입자들의 생성량이 양성자-양성자 (p-p) 충돌에서보다 훨씬 많아지는데, 충돌에너지에 따른 결과는 그림 4(왼쪽)

REFERENCES

- [1] http://www.bnl.gov/bnlweb/history/AGS_history.asp.
- [2] G. J. Odyniec, Nucl. Phys. A **638**, 135c (1998).
- [3] M. Gazdzicki, Eur. Phys. J. Special Topics **155**, 37 (2008).

1) 상대론적으로 운동량은 eV/c, 에너지는 eV, 질량은 eV/c²로 동일한 수치에 단위만 다르게 하여 통용된다. 1 MeV/c는 전자가 약 0.89 c, 1 GeV/c는 양성자가 약 0.73 c의 속도를 갖는 정도의 운동량이다.
2) 'QCD 상전이와 상대론적 중이온 충돌' 기사 참조.

Fig. 4. (left) The center of mass energy dependence of the K^+/π^+ yield ratio.^[3] (right) Dilepton invariant mass spectrum with the known hadronic cocktail.^[4]

와 같다.^[3]

(2) **경입자쌍의 불변질량 스펙트럼:** 당초 중간질량 영역의 경입자쌍의 생성량이 특이하게 증가할 것이라는 이론적 예측대로 실제 커지는 것이 관측되었다 (그림 4(오른쪽)).^[4] 약 $0.2 - 0.8 \text{ GeV}/c^2$ 질량 영역에서 기본입자충돌에서 충분히 연구된 경입자쌍의 생성과의 분명한 차이를 보여주고 있다.

(3) **매혹자(J/ψ : Charmonium) 입자의 생성량 억제:** SPS 실험에서 경입자쌍으로 붕괴하는 J/ψ 입자의 재구성을 통하여 그 생성량을 측정한 결과, 충돌에너지가 커질수록 그 생성량이 단계적으로 억제되는 뚜렷한 경향이 관측되었다. 상세내용은 주요 실험 결과 기사에서 다루어질 예정이다.

2000년대: 미국 브룩헤이븐 국립연구소

RHIC에서의 중이온 충돌 실험

BNL에서 1984년도에 상대론적 중이온 충돌기(Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC) 건설에 대한 공식제안서가 있었고, 1991년부터 실제 건설이 시작되어서 2000년 여름부터 RHIC이 가동하게 되었다. 우선 AGS 가속기에서 핵자당 운동량이 약 $11 \text{ GeV}/c$ 까지 가속된 Au 빔은 둘레가 3.83 km 인 RHIC으로 옮겨진 후에 서로 반대 방향으로 핵자당 에너지가 100 GeV 까지 다시 가속된 후에 네 개의 실험 장소에서 핵자당 질량 중심에너지가 200 GeV 인 충돌을 하게 된다 (그림 5). 이곳에서 두 개의 대형 실험인 PHENIX와 STAR 그리고 두 개의 소형 실험인 PHOBOS와 BRAHMS에서 상대론적 중이온 충돌을 이용한 QGP 연구가 수행되었다. 현재 두 개의 대형 실험에서만 실험 및 자료 수집이 계속되고 있으며 RHIC의 휘도(luminosity)를 높이는 작업과 각각의 검출기 성능을 향상시키는 작업이 병행되고 있다.

두 개의 대형 실험만 간단히 소개하면, 우선 STAR 실험은 대표적 검출기인 시간-투영-상자(Time Projection Chamber: TPC)를 통해 비교적 넓은 영역에서 다양한 강입자를 측정할 수 있도록 고안되었다. 반면에 PHENIX 검출기는 중앙검출기

Fig. 5. A schematic overview of the accelerator facilities at the Brookhaven National Laboratory: AGS^[1] and RHIC.^[5]

Fig. 6. The event display of an Au-Au collision at $200 \text{ GeV}/u$ observed by STAR.

(Central arm)와 뮤온검출기(Muon arm)를 각각 중앙 급속도(rapidity) 부근과 빔 방향에 배치하여 제한된 각도 영역에서 좀 더 나은 입자식별기능으로 광자, 전자, 그리고 뮤온까지도 측정하도록 설계되었다. 그림 6은 STAR 검출기로 측정된 핵자당 중심충돌에너지 200 GeV 의 Au-Au 충돌이벤트이고, 그림 7은 PHENIX 실험에 대한 검출기 사진이다.

RHIC에서 얻은 가장 대표적인 실험결과로는 제트-소멸(jet quenching) 현상과 타원흐름 현상(elliptic flow)을 꼽을 수 있다.^[6] 두 개의 Au-Au이 정면충돌하였을 때 높은 횡운동량(Transverse Momentum: p_T)을 갖는 강입자들이 두 개의

REFERENCES

- [4] D. Miskowiec *et al.*, Nucl. Phys. A **774**, 43 (2006).
- [5] <http://www.bnl.gov/rhic/>.
- [6] RHIC White Papers, "First Three Years of Operation of RHIC", Nucl. Phys. A **757**, Issue 1-2, 1-283 (2005).

Fig. 7. PHENIX Detector system at RHIC.

Fig. 8. Transverse momentum dependent nuclear modification factors in d-Au and Au-Au collisions at 200 GeV per nucleon.

양성자(p-p)가 충돌하였을 경우와 비교하여 훨씬 적게 생성되는 현상이 처음으로 관측되었다. 이는 충돌초기과정에서 생긴 높은 횡운동량의 쪽입자(parton)가 Au-Au 충돌 과정에 만들어진 극한상태의 핵물질에 통과하면서, p-p 충돌에 비하여 훨씬 많은 에너지를 잃게 되어 결과적으로 큰 횡운동량의 입자들이 소멸된다는 것이다. 이러한 현상이 충돌 이전에 빠르게 움직이는 Au 핵인 경우 이미 파톤의 운동량 분포가 양성자의 그것과 다르기 때문일 수도 있다는 가능성을 배제하기 위하여 충돌 시스템의 크기가 훨씬 작은 d-Au 충돌실험이 수행되었다. 그림 8은 d-Au에서는 제트소멸 현상이 발생하지 않고 Au-Au 충돌에서만 발생한다는 것을 분명하게 보여주고 있다. 색전하(color charge)를 띤 쪽입자가 무색인 강입자 상태보다는 Au-Au 충돌 후 만들어진 QGP를 지날 때 훨씬 많은 에너지를 잃기 때문인 것으로 해석된다.

RHIC에서 관측된 제트 소멸 및 타원흐름의 결과는 유체역

Fig. 9. Large Hadron Collider shown with the 4 detectors (ATLAS, CMS, ALICE, LHCb).

학 모델에서 점성(viscosity)이 제로에 가까운 완전액체(perfect fluid) 상태 즉 구성입자 사이에 매우 강한 상호작용이 존재한다는 것을 암시하는 동시에, 구속 상태를 벗어난 쿼크들이 거의 자유로운 상태의 플라스마를 이룰 것이라는 이제까지의 예측과 전혀 다른 충격적인 사실로서, 상세한 물리적 고찰은 주요 실험 결과 기사에서 다를 예정이다.

2010년대: 스위스 CERN의 대형강입자충돌기(LHC)에서의 중이온 충돌 실험

2009년 11월 스위스와 프랑스 국경 근처의 제네바 교외에 위치한 유럽핵·입자물리연구소(CERN)에서는 자연현상의 기본 상호작용 현상을 보다 명확히 이해하기 위하여, 인류 역사상 가장 큰 규모의 가속기인 대형강입자충돌기(Large Hadron Collider: LHC)가 그 역사적인 가동을 개시하였다. 충돌실험을 위한 4개의 초대형 검출기 시스템은 지하 100 m에 설치된 둘레 27 km의 대형강입자충돌기(LHC)의 원형가속관 내부에 각각 설치되어 있다(그림 9).

2009년 11월 양성자-양성자 충돌을 개시한 CERN의 LHC는 오는 2010년 12월에 중이온을 핵자당 충돌 중심에너지 5.5 TeV로 충돌시키는 실험을 실시하려고 만반의 준비를 다하고 있다. 특히 LHC의 주요 4개의 검출기 중 한국 중이온물리연구진은 CMS와 ALICE에 적극적으로 참여하고 있는데, CMS는 주로 pp 충돌반응 정점(vertex)을 중심으로 발생하는 다양한 입자들을 입체각 4π 에서 동시에 모두 측정할 수 있는 대형 입자검출기이며, ALICE는 중이온 충돌에 초점을 맞추어서 많은 수의 입자 환경에서도 작동할 수 있도록 제작된 검출기이다. CMS 검출기(그림 10)는 집약형 뮤온 솔레노이드

Fig. 10. The event display of a pp collision at 2.4 TeV observed by CMS.

Fig. 11. The event display of a pp collision at 900 GeV observed by ALICE.

(Compact Muon Solenoid)의 약칭으로서, 자기장하에서 날아가는 뮤온을 선별하여 측정하는 검출기이다.^[7] 특히 한국연구진은 CMS 검출기의 충돌중심점으로부터 입자 빔이 날아오는 앞 방향에 기체검출기의 일종인 저항판 검출기를 제작, 설치하여 뮤온입자의 검출과 트리거 효율을 극대화시키는데 중심적 역할을 하고 있다. 또한 ALICE는 Pb 핵과 같은 중이온을 충돌시켜 빅뱅 직후 우주탄생 당시 나타났던 것으로 예상되는 매우 높은 온도와 에너지밀도 하에서 발생된 많은 입자들($dN_{ch}/dy = 8000$) 즉 강입자, 전자, 뮤온 및 광양자 등을 잘 검출할 수 있도록 특별히 제작된 검출기이다.^[8] ALICE의 경우 보다 낮은 횡운동량을 가지고 생성되는 많은 입자들을 잘 구별해 낼 수 있는 반면 CMS는 보다 큰 횡운동량을 가진 입자들을 잘 측정하도록 설계되어 있다. 그림 11은 2009년 11월 LHC가 최초로 가속한 양성자가 중심충돌에너지 900 GeV로 충돌하여 생성된 입자들이 ALICE 검출기에 측정된 궤적을 보여주고 있다.

고밀도 핵물질 연구 및 중이온 충돌 실험의 전망

고에너지 중이온 충돌 실험들과 더불어 고밀도 핵물질에

Fig. 12. A conceptual design of the CBM(Compressed Baryonic Matter) Detector at FAIR.

대한 연구를 위한 중이온 충돌실험이 독일 중이온연구소(GSI)의 새로운 가속기 시설(FAIR: 2016년경 완성 예정)에서 준비되고 있다.^[9] FAIR에서는 가장 무거운 핵종인 우라늄을 핵자당 최대 30 GeV까지 가속시켜서 우라늄 고정표적에 충돌시키는 실험(그림 12)이 진행될 예정이며, 상전이 임계점(Critical End Point) 주위에서 급격하게 변하는 물리량에 대한 집중적인 연구가 수행될 예정이다. 한국 연구진도 적극 참여하고 있는데, 특히 입자들의 비행시간 측정을 위한 저항판 검출기 및 경입자 검출을 위한 체렌코프 검출기의 연구 개발에 참여하고 있다.

LHC를 사용하여 어느 임계온도(T_c) 이상에서 쪽입자(parton)들이 속박상태를 벗어나 해체된 QGP 상태를 탐색하기 위한 중이온충돌의 핵자당 질량중심 충돌에너지는 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV이다. 이처럼 높은 에너지는 BNL의 RHIC에서의 최대 충돌 에너지에 비해 28배의 에너지이며, 1990년대에 이루어진 CERN의 SPS에 비하면 무려 320배가 넘는 높은 에너지이다. 따라서 LHC의 고에너지 중이온충돌에서는, 형성된 QGP 상태의 온도가 훨씬 뜨겁고, 보다 큰 에너지밀도를 이루며, 크기도 더 클 뿐만 아니라 보다 긴 시간 동안 지속될 것으로 예상된다. 따라서 LHC를 통한 상대론적 고에너지 중이온 충돌실험은 포화된 색유리응축(Color Glass Condensate: CGC) 상태와 같은 다양한 물질의 극한 상태에 대한 새로운 미지의 영역을 개척할 전망이다.

REFERENCES

- [7] <http://cms.web.cern.ch/cms/>.
- [8] <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>.
- [9] http://www.gsi.de/fair/index_e.html.