특별한 강한상호작용 물질의 실험적인 증거

DOI: 10.3938/PhiT.19.005

권민정·김동조·홍병식

Experimental Evidence for Special Strongly-Interacting Matter

Minjung KWEON, DongJo KIM and ByungSik HONG

It has been almost ten years since the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at the Brookhaven National Laboratory (BNL) in US started its operation in 2000. In the end of this year, the Large Hadron Collider (LHC) at the European Organization for Nuclear & Particle Physics (CERN) will also start its operation for heavy-ion collisions. RHIC has confirmed the production of very special matter by heavy-ion collisions at relativistic energies. The characteristics of this matter are quite different from ordinary matter as the viscosity is close to zero despite the fact that the constituent particles are interacting strongly. Furthermore, this matter expands with huge velocity right after the production, emitting various hadrons, photons, and several nuclear species, which resembles the explosion of the primordial matter of the universe. At LHC, we will soon investigate in detail the properties of the strongly interacting matter with the energy density much larger than RHIC. In this article, we will summarize the experimental evidence for the production of the special strongly-interacting matter produced at RHIC.

저자약력

권민정 박사는 고려대학교 이학박사(2006)로서 현재 독일 하이델베르크대학 연구원으로 재직 중이며, 유럽핵입자물리연구소의 ALICE 국제공동연구에 참여하고 있다. (minjung@physi.uni-heidelberg.de)

김동조 박사는 연세대학교 이학박사(2005)로서 현재 핀란드 유바스킬라대학 연구원으로 재직 중이며, 유럽핵입자물리연구소의 ALICE 국제공동연구에 참여하고 있다. (Dong.Jo.Kim@cern.ch)

홍병식 교수는 미국 뉴욕주립대학(Stony Brook) 이학박사(1995)로서 독일 중이온 연구소(GSI) 연구원을 거쳐 1997년부터 고려대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (bhong@korea.ac.kr)

들어가는 글

2000년 미국 브룩헤븐 국립연구소(BNL)의 상대론적 중이온 충돌가속기(RHIC)에서 중이온 충돌실험을 시작한 지 어언 10년이 지났다. 그리고 올해 말에는 유럽핵입자물리연구소(CERN)의 거대 강입자 충돌가속기(LHC)에서 중이온 충돌실험을 시작할 예정이다.

RHIC에서는 지금까지 여러 가지 중이온 간의 충돌을 통하여 매우 특이한 물질이 생성됨을 확인하였다. 이들의 성질은 지금까지 알려진 어떤 물질과도 매우 상이하여 강한 상호작용을 하면서도 점성은 거의 없음이 밝혀졌다. 또한 이 물질은 생성 직후 엄청난 속도로 팽창하며 다양한 강입자와 광자, 그리고 여러 핵종 등이 방출되어 우주 폭발 초기와 비슷한 과정을 거쳐 진화한다는 사실도 밝혀졌다. 앞으로 LHC의 중이온 충돌실험에서는 에너지밀도가 RHIC보다 더 높은 강한상호작용 물질을 생성시켜 그들의 성질을 정밀하게 연구할 예정이다.

이 글에서는 지금까지 RHIC 실험을 통하여 밝혀진 특이한 강한상호작용 물질의 생성 및 특성에 대한 몇몇 중요한 실험 결과를 요약해 본다.

특이물질의 유체적 성질

원자핵이 유체와 비슷한 성질을 갖고 있으며 압축하기 매우 어렵다는 사실은 1930년대에 이미 보어와 폰바이체커의 물방울 모델에 의해 널리 알려졌다. 그리고 상대론적 중이온 충돌실험의 효시라고 할 수 있는 미국 로렌스버클리 국립연구소(LBNL)의 이온 충돌실험들은 1980년대에 낮은 에너지 충돌로 생성된 핵물질도 이미 유체적인 성질을 갖고 있음을 알아냈다. 핵물질의 유체적인 성질은 그림 1과 같이 반응평면 위에서의 흐름성과 흔히 타원흐름으로 부르는 빔 진행방향에 수직인 평면 위에서의 흐름성으로 대변된다.

낮은 에너지에서 생성된 핵물질은 핵자 및 조각핵들의 유체 흐름성이 중요한 반면, RHIC과 같은 높은 에너지에서는 쿼크 및 글루온 등 기본입자의 유체흐름성이 중요하다. 유체흐름성에 대한 분석결과는 물질의 상태방정식(Equation of State)에 대한 결정적인 정보를 제공해 준다. 여기서 상태방정식은 물질

Fig. 1. (Left) Definition of the reaction plane in heavy-ion collisions. (Right) Effect of the elliptic-flow parameter(v_2) in the xy -plane, which is perpendicular to the beam axis. The length of the arrow reflects the average momentum.

Fig. 2. Energy dependence of the elliptic-flow parameter. The LHC value at 5.5 TeV is the theoretical prediction.^[1]

이 얼마나 단단한지를 반영하며, 핵 충돌에 의한 압축, 폭발, 팽창, 이차입자 생성 등을 제어하므로 매우 중요한 물리량이다.

그림 2는 지금까지 측정된 타원흐름 변수(v_2)의 빔에너지 의존성을 보여주고 있다.^[1] 그림 1의 오른쪽과 같이 타원흐름 변수가 양의 값일 경우 상대적으로 더 높은 운동량의 입자가 반응평면 방향으로 더 많이 방출되고, 반대로 음의 값일 경우 반응평면에 수직인 방향으로 더 많이 방출된다. 따라서 그림 2는 높은 운동량의 입자가 아주 낮은 에너지에서는 반응평면 방향으로 주로 방출되다가, 중간 에너지 영역(핵자 당 2~3 GeV)에서는 수직인 방향으로 더 많이 방출되고, 아주 높은 에너지에서는 다시 반응평면 방향으로 많이 방출됨을 보여주고 있다.

아직 이 현상을 정성적으로 설명할 수는 없으나 정량적으로 다음과 같이 이해할 수 있다. 즉 낮은 에너지에서는 충돌 핵들의 각운동량 보존이 중요하므로 반응평면 상에서 회오리 모양으로 핵물질이 흘러가며, 중간 에너지 영역에서는 반응평면 상의 충돌에 직접 참여하지 않은 원자핵 조각들이 방출 입자들을 흡수해 버리는 그림자 현상이 발생하여 상대적으로

Fig. 3. Momentum dependence of the elliptic-flow parameter at RHIC. Three lines represent the theoretical calculations for different viscosity-to-entropy density ratios. In theoretical calculations, no special effect such as shadowing was considered.^[2]

더 많은 입자들이 수직방향으로 방출된다. 그리고 아주 높은 에너지에서는 두 핵의 이동 속도가 너무 빨라 그림자 현상이 매우 미미해지므로, 주로 압축 핵물질의 내부 압력이 방위각에 따라 어떻게 변화하는지가 중요하다.

특히 RHIC 또는 LHC 등의 고에너지 중이온 충돌실험에서는 타원흐름 변수가 쿼크 및 글루온으로 구성된 물질의 상태 방정식을 결정하는 데 매우 유용하다. 그래서 고에너지 중이온 충돌에 의해 생성된 물질이 무한한 충돌확률을 갖는 유체적인 극한상태에 얼마나 근접하였는지 연구할 수 있다.

한편 그림 3은 RHIC에서 측정한 타원흐름 변수를 운동량의 함수로 보여준다. 또한 동시에 이 실험결과를 물질의 점성도/엔트로피밀도(η/s) 비를 변화시켜가며 계산한 핵모형의 예측결과와 비교하고 있다.^[2] 이 비교는 고에너지 중이온 충돌에 의해 만들어진 물질이 $\eta/s \approx 0.08 \approx 1/4\pi$ 의 특성을 가짐을 알려준다. 그런데 이때 $1/4\pi$ 는 끈이론에 근거한 AdS/CFT 모델에서 예측하는 쿼크물질의 최소 η/s 값에 대응된다. 따라서 RHIC에서 만들어진 고밀도 물질은 강한상호작용을 함에도 불구하고 점성은 거의 양자역학적으로 허용된 최소값을 갖는 매우 이상한 물질임을 알 수 있다. 하지만 그림 3의 이론적인 계산에는 원자핵 내에서 낮은 운동량 영역의 쿼크 및 글루온에 대해 존재하는 파톤 그림자 효과 등이 전혀 고려되지 않았음에 주의하여야 한다. 만약 이와 같은 원자핵의 특이한 효과들이 고려될 경우, η/s 값에 대한 결론이 달라질 수도 있다.

REFERENCES

- [1] N. Borghini and U. A. Wiedemann, J. Phys. G **35**, 023001 (2008).
- [2] M. Luzum and R. Romaschke, Phys. Rev. C **78**, 034915 (2008).

p+p or d+Au

Au+Au central

Fig. 4. (Top) Azimuthal correlations of two hadrons.^[3] Two hadrons used in this analysis have relatively high momenta. (Bottom) Schematic diagram for the suppression of one jet in central Au+Au collisions.

제트소멸 및 QCD 마하원뿔

RHIC의 중이온 충돌실험에서는 최초로 제트소멸 현상을 발견하였다. 원래 제트는 전자-반전자 또는 양성자 간의 충돌 등에 의해 쌍으로 생성된 쿼크와 반쿼크가 각각 강입자로 변환해 가며 만들어내는 높은 운동량 입자의 다발을 의미한다. 따라서 가장 많이 발견되는 경우는 서로 반대방향으로 두 개의 제트가 방출되는 상황이다.

그림 4는 STAR 국제공동연구가 얻은 상대적으로 높은 운동량을 보유한 강입자들 사이의 방위각 상관관계를 보여준다. 이 결과로부터 양성자 간의 충돌 또는 중양성자와 금핵 간의 충돌에서는 서로 반대방향으로 방출되는 제트가 분명히 관측되지만, 금핵 간의 정면충돌에서는 한쪽 제트가 완전히 억제됨을 알 수 있다.^[3]

이에 대한 매우 그럴듯한 해석이 그림 4의 아래 부분에 도식적으로 설명되어 있다. 즉 양성자 간의 충돌이나 중양성자와 금핵 간의 충돌에서는 고밀도 물질의 부피가 충분히 작으므로 두 개의 제트가 방출되는데 아무런 방해가 일어나지 않는다. 그러나 금핵 간의 정면충돌에서는 매우 커다란 부피의 고밀도 물질이 생성되므로 상황이 완전히 달라진다. 즉 표면 근처에서 생성된 후, 곧 물질을 빠져나오는 쿼크나 글루온은 별 다른 방해받지 않고 제트를 형성할 수 있다. 하지만 반

Fig. 5. (Left) Shock wave generated by wings as the plane moves faster than the speed of sound in air. (Right) Simulation result of the shock wave generated by the quark with 99.9% of the speed of light in high temperature, high density QCD matter.^[4]

대 방향으로 방출된 쿼크나 글루온은 고밀도 물질 내에서 장거리를 진행하며 주변의 다른 쿼크나 글루온과 강한 상호작용을 하며 많은 에너지를 잃어버려 결과적으로 커다란 운동량의 강입자 또는 제트가 거의 검출되지 못한다. 따라서 이 결과를 쿼크-글루온 플라즈마 생성의 증거로 볼 수도 있다.

그림 4와 같이 놀라운 실험결과가 발견된 이후, RHIC의 연구자들은 낮은 운동량 영역에서 강입자 상관관계를 다시 분석하였다. 만약 높은 운동량의 쿼크나 글루온이 주변의 입자들과 강하게 상호작용하여 에너지를 상실할 경우, 이들 중 일부가 낮은 운동량 영역에서 제트로 발견될 가능성이 있기 때문이다. 그림 5에 이에 대한 이론적 계산결과를 비행기가 음속보다 빨라지는 순간에 발생하는 원뿔모양의 마하 충격파와 비교하여 보여주고 있다. 그림 5의 오른쪽은 광속의 99.9%로 이동하는 쿼크 또는 글루온이 고온, 고밀도의 QCD 매질을 통과할 때 발생할 것으로 예상되는 충격파를 보여주고 있다.^[4]

그림 6은 PHENIX 국제공동연구에서 상대적으로 낮은 운동량 영역 강입자들 간의 방위각 상관관계 함수를 보여준다.^[5] 특히 그림 6의 아래 부분은 이 실험결과를 2차원 평면상에서 표현한 결과로써 QCD 마하원뿔의 존재를 잘 보여준다. 하지만 아직도 QCD 마하원뿔을 정량적으로 이해하지 못하고 있는 상황이며, 앞으로 LHC에서의 실험 결과가 강한상호작용 이론을 정립하는 데 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

파톤 재결합

쿼크와 글루온을 통틀어 일컫는 파톤이 무색의 강입자를 형성하는 과정은 QCD로 계산하기 힘든 비섭동적인 문제로 널리 알

REFERENCES

- [3] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 072304 (2003).
- [4] G. Torrieri *et al.*, Acta Phys. Pol. B **39**, 3281 (2008).
- [5] PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 052301 (2006).

Fig. 6. (Top) Azimuthal correlation of two hadrons with relatively low momenta in semi-central collisions.^[5] (Bottom) Two-dimensional representation of the azimuthal correlation. One can observe the QCD Mach cone.

려져 있다. 현재 QCD는 실험결과의 도움을 받아 높은 운동량의 파톤들이 강입자를 형성해 가는 과정을 정량적으로 잘 설명하고 있다. 그러나 낮은 운동량 영역에서는 QCD의 체계적인 적용이 불가능하므로 또 다른 강입자 생성 이론이 필요한데, 그 중의 하나가 파톤 재결합 모델이다. 이 모델은 상대론적 중이온 충돌에 의해 생성된 열적 평형상태 하의 파톤들이 서로 결합함으로써 강입자를 형성시킨다. 파톤 재결합 모델은 원래 RHIC의 중이온 충돌에 의해 생성된 핵자의 개수가 어떤 특정한 운동량 영역에서 중간자의 개수보다 훨씬 많다는 사실과 강입자에 대한 타원흐름 변수의 구성쿼크 축척 현상을 효과적으로 설명하기 위하여 고안되었다.^[6,7]

예를 들어, 그림 7은 타원흐름 변수의 운동량 의존성을 각 입자의 구성쿼크의 개수로 나누어 준 결과가 입자의 종류에 관계없이 잘 일치함을 보여준다. 이는 충돌 직후 쿼크 및 글루온으로 이루어진 물질상태일 때부터 이미 타원흐름 현상이 존재하였음을 의미한다. 또한 그림 8은 무거운 핵들이 서로 충돌할 때, 핵자와 중간자를 각각 대변하는 양성자와 파이온의 생성비가 정면충돌에 가까울수록 증가함을 보여준다. 핵자는 구성쿼크가 3개이고 중간자는 구성쿼크가 2개임을 고려해 볼 때, 이 실험결과는 구성쿼크의 개수가 많을수록 파톤 재결합에 의한 생성량이 상대적으로 많을 것이라는 예측과 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7. Quark-number scaling of the elliptic-flow parameter.^[6] When scaled by the number of constituent quarks, the correlations between the elliptic-flow parameter versus momentum for mesons and nucleons agree each other.

Fig. 8. Momentum dependence of the nucleon(proton)-to-meson (pion) yield ratios.^[7] The right hand side shows the schematic diagram of the nuclear collision in the xy plane. The ratio increases as the collision becomes more central.

쿼코니움 생성

쿼코니움이란 무거운 쿼크와 반쿼크 사이의 결합상태를 의미한다. 일반적으로 매혹쿼크(c)와 반매혹쿼크($\bar{c}$)의 결합상태인 매혹자(charmonium), 바닥쿼크(b)와 반바닥쿼크($\bar{b}$)의 결합상태인 바닥자(bottomonium), 그리고 이들의 들뜬상태를 일컫는다. 한편 꼭대기자(toponium)는 존재하지 않는데, 이는 꼭대기 쿼크의 질량이 매우 크고 수명이 짧아 결합상태를 형성하기 이전에 약한 상호작용을 통해 붕괴하기 때문이다.

쿼코니움은 강입자의 한 종류임에도 불구하고 일반적인 강입자와는 사뭇 다른 특성을 갖고 있다. 파이온과 같이 질량이

REFERENCES

- [6] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. **92**, 052302 (2004).
- [7] PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 172301 (2003).

Table 1. Characteristics of quarkonia from the nonrelativistic potential model.^[9] Here, various quarkonia are stable bound states with different quantum numbers.

State	J/ψ	χ_c	ψ'	Υ	χ_b'	Υ''
Mass [GeV/c^2]	3.1	3.53	3.68	9.46	10.26	10.36
Distance between Q and $\bar{Q}$ [fm]	0.5	0.72	0.9	0.28	0.68	0.78

작은 강입자의 경우, 그 질량의 대부분이 가벼운 쿼크들 사이의 상호작용 에너지로부터 오며 쿼크들은 강입자 속에서 상대론적 운동을 한다. 반면 쿼코니움은 질량의 대부분이 쿼크들의 본래 질량에 의해 결정된다. 더욱이 무거운 쿼크들은 쿼코니움 속에서 상대적으로 느리게 운동하므로, 비상대론적 퍼텐셜 이론을 이용하여 쿼코니움의 여러 가지 기본적인 특성을 계산할 수 있다. 표 1은 이 이론으로부터 계산된 몇 가지 쿼코니움들의 특성들을 보여준다. 파이온의 전하분포 반지름이 약 1.3 fm임을 고려해 보면,^[8] 쿼코니움들은 보통 강입자에 비해 훨씬 작고 강하게 결합되어 있으며, 각각의 상태마다 구성쿼크들 사이의 거리가 다를 수 있다.

그러면 이 쿼코니움을 쿼크-글루온 플라즈마의 존재 여부와 특성을 알아내는데 어떻게 이용할 수 있을까? 이 질문에 대한 해답은 1986년 Matsui와 Satz에 의해 처음 제시되었다.^[10] 이들은 전자기적 상호작용에서 관측되는 데바이 차폐현상(Debye screening)을 양자색소역학에 적용해 본 결과, 쿼크-글루온 플라즈마가 생성되었다면 색소차폐(color screening)에 의한 해체 때문에 쿼코니움의 생성량이 상대적으로 더 작아질 것으로 예측하였다. 즉 그림 9와 같이 색소차폐에 대한 특성 거리가 매혹(또는 바닥)쿼크와 반매혹(또는 반바닥)쿼크 간의 상호작용 거리보다 작을 경우, 더 이상 이들이 쌍으로 결합되어 쿼코니움을 형성하기 어려울 것이다. 더욱이 표 1에서 보듯이 각 쿼코니움들의 결합거리가 서로 다르므로 쿼크-글루온 플라즈마의 온도변화에 따라 각각 다른 온도에서 색소차폐의 영향을 받게 되리라 예측할 수 있다. 따라서 쿼코니움들의 생성량은 쿼크-글루온 플라즈마의 생성여부를 알려줌과 동시에 그림 10과 같이 생성 물질의 온도를 측정하는 온도계와 같은 역할을 할 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 쿼코니움은 상대론적 중이온 충돌 시 만들어지는 새로운 물질의 특성을 이해하기 위한 중요한 입자로 오랫동안 연구되고 있다.

이와 같은 배경 하에, 지난 20여 년간 CERN의 SPS 및 BNL의 RHIC의 중이온 충돌실험에서는 J/ψ 의 생성량을 측정해 왔다. 이때 중이온 빔의 종류와 빔에너지는 물질의 온도(또는 에너지 밀도)를 조절하는 실험적 변수가 된다. 그림 11은 지금까지 얻은 J/ψ 의 생존확률에 대한 실험결과를 에너지

Fig. 9. Schematic figure of the interaction and the color screening effect between the charm and anticharm quarks in the quark-gluon plasma.

밀도의 함수로 요약해서 보여준다.^[9] 이로부터 현재 RHIC으로부터 얻을 수 있는 최고의 온도 또는 에너지 밀도에서 약 50%의 J/ψ 가 살아남았음을 알 수 있다.

앞에서 언급한 이론에 의하면 표 1과 같이 쿼코니움마다 결합거리가 서로 다르므로 χ_c 나 ψ' 는 약 $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 부터 색소차폐에 의한 생성량 억제 가 시작되고 J/ψ 는 약 $10 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 까지 살아남는다. 따라서 그림 11과 같이 (현재까지 실험에서 도달한) 최고 에너지 밀도에서 약 50%의 J/ψ 가 억제되었다는 사실은 이 정도의 J/ψ 가 χ_c 나 ψ' 붕괴에 의해 생성되었고, 나머지는 중이온 충돌로부터 직접 생성된 후 적어도 약 $5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 까지는 억제되지 않았음을 의미한다. 그러나 확실한 결론에 도달하기 위해서는 각 쿼코니움의 생성량을 직접 측정할 필요가 있다.

또한 그림 11과 같이 실험적으로 측정된 억제 현상이 단순히 색소차폐에 의한 억제만 반영하는지, 아니면 억제와 파톤 재결합 과정이 복합적으로 일으킨 결과인지 아직 알 수 없다. 이 질문에 대한 결정적인 해답은 LHC의 중이온 충돌실험이 제공해 줄 것으로 기대된다. LHC에서는 빔에너지가 RHIC의 거의 30 배에 달하므로 만약 파톤 재결합 과정에 의한 쿼코니움 생성이 실제로 존재한다면, 억제된 쿼코니움의 양보다 재결합에 의해 생성된 쿼코니움의 양이 훨씬 많을 것으로 예상된다.

Fig. 10. Schematic diagram to measure the temperature of the quark-gluon plasma by using several quarkonium states.^[11]

REFERENCES

- [8] W. Weise, Contemporary Physics **31**, 261 (1990).
- [9] H. Satz, J. Phys. G **32**, R25 (2006).
- [10] T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. B **178**, 416 (1986).
- [11] <http://dnp.nslc.msu.edu/current/quarkonia-2009-08.html>.

Fig. 11. Experimental data on the survival probability of J/ψ as a function of the energy density(ϵ) of the matter produced by heavy-ion collisions.

작은 x -영역 물리학

RHIC의 중이온 충돌실험에서 발견된 특이한 물리적 현상으로는 제트소멸이나 파톤 재결합, 쿼크니움 억제 외에도 작은 x -영역에서의 색소유리응축(coloured glass condensate; CGC) 현상을 들 수 있다.^[12] (여기서 x 는 흔히 Bjorken- x 라고 부르며 파톤이 지닌 핵자의 운동량 비율을 의미한다.) 핵자와 다르게 원자핵 내부에는 작은 x -영역의 글루온 밀도가 매우 높다. 더욱이 중이온을 서로 충돌시켜 생성시킨 물질에서는 작은 x -영역의 글루온 밀도가 더욱 높아진다. 이 영역의 글루온 밀도가 너무 높아 결국 글루온들은 재결합하게 되며 그들의 밀도는 줄어든다. 따라서 HERA의 전자-양성자 실험에서 직접 측정된 작은 x -영역의 글루온 밀도함수^[13]와 함께 RHIC의 중앙성자-금핵 충돌에 의해 매우 적게 생성된 입자의 개수^[14]는 CGC의 증거로 제시된 바 있다.

RHIC 실험 초기에 BRAHMS 실험 공동연구자들은 원자핵의 색소유리응축 현상을 연구하기 위하여 중앙성자와 중이온 간의 충돌 시 전방 부근에서 생성되는 강입자를 측정하였다.^[15] 그 결과 작은 x -영역에서는 정면충돌에 의한 강입자 생성량이 측면 충돌에 의한 측정치보다 더 작음을 발견하였다. 또한 더욱 전방으로 가면 갈수록 정면충돌에 의한 강입자 생성량이 더 감소하였다. 이 결과는 중앙성자와 중이온의 초기조건과 관련되어 궁극적으로 색소유리응축에 대한 증거로 제시된 바 있다. 하지만 이후 중앙성자와 중이온의 충돌뿐만 아니라 중이온 간의 정면충돌에서 생성되는 높은 운동량의 강입자에서도 비슷한 현상이 발견됨에 따라 아직 뚜렷한 결론을 내리지 못하고 있는 상황이다. 앞으로 제트소멸에 의한 강입자 감소와 색소유리응축에 의한 강입자 감소의 구분이 분명한 측

정량에 대한 이론적 연구가 필요하다. 아울러 가까운 장래에 실시될 LHC에서의 중이온 충돌실험 결과가 작은 x -영역 물리학 연구에 획기적인 전환점을 마련해 줄 것으로 기대된다.^[16]

나오는 글

이 글에서는 주로 상대론적 중이온 충돌가속기 RHIC에서 지난 10여 년간 얻은 놀라운 실험 결과들 중 대표적인 몇 가지를 소개하였다. 이 실험 결과들은 대부분 상대론적 중이온 충돌 초기에 쿼크-글루온 플라즈마와 같은 고밀도 파톤물질의 존재 가능성을 강하게 시사하고 있다. 또한 이 물질은 강한 상호작용을 함에도 불구하고 점성이 매우 낮은 이상한 물질일 가능성도 높다. 그러나 실험 결과를 설명하기 위해 여기서 인용한 이론은 전혀 완벽한 것이 아니며, 때로는 정반대의 결론에 이르는 다른 이론들도 존재함을 염두에 두어야 한다. 그런데 상대론적 중이온 충돌 연구에서 올바른 이론을 찾아가는 과정은 실험을 통해서만 가능하다. 즉 실험적으로 여러 가지 물리량들을 측정함으로써 이론계산에 필요한 정보를 제공해주고, 이를 통해 새로운 이론을 이끌어 나갈 수 있다.

쿼크-글루온 플라즈마를 비롯한 핵물질의 상전이 현상에 대한 최종 결론을 내리기에는 아직 긴 여정이 우리 앞에 놓여 있다. 우선 RHIC에서도 정밀한 실험 자료가 충분치 않은 상황이다. 현재 진행되고 있는 여러 실험적인 징후의 빔에너지 및 다양한 충돌계에 대한 의존성을 자세히 이해할 필요가 있다. 그리고 희귀한 입자의 생성 및 현상에 대한 정밀 측정을 위하여 더욱 많은 충돌사건 자료가 필요하다. 이는 2012년까지 현재 빔의 강도를 10배 이상 증가시키고자 하는 RHIC-II 계획에 의하여 해결될 전망이다.

그렇지만 무엇보다도 현재 논쟁 중인 여러 가지 문제들이 LHC의 중이온 충돌실험에 의해 해결될 가능성이 매우 높다. LHC는 RHIC보다 약 30배 가까운 빔에너지로 중이온을 충돌시켜 생성물질의 에너지밀도를 10배 이상 높여줄 것이다. 우리나라의 핵물리 실험 연구자들은 LHC의 ALICE와 CMS 중이온 충돌실험에 참여하며 데이터 분석뿐만 아니라 정밀 입자검출기 개발 등 다방면에 많은 기여를 하고 있다.

REFERENCES

- [12] L. McLerran and R. Venugopalan, Phys. Rev. D **49**, 2233 (1994).
- [13] J. Breitweg, *et al.*, Eur. Phys. J. C **7**, 609 (1999).
- [14] D. Kharzeev, E. Levin and M. Nardi, Nucl. Phys. A **730** (2004).
- [15] BRAHMS collaboration, Phys. Rev. Lett. **93**, 242303 (2004).
- [16] B. Hong, J. Phys. G **36**, 064038 (2009).