고에너지 핵물리학

DOI: 10.3938/PhiT.28.001

High Energy Nuclear Physics

MinJung KWEON, Dongho MOON, Sungtae CHO and Byungsik HONG

Quantum ChromoDynamics, the theory of the strong interaction, predicts a phase transition from ordinary hadronic matter to a plasma of deconfined quarks and gluons, called the quark-gluon plasma, at sufficiently high temperature, pressure, and density. The field of ultra-relativistic heavy-ion physics focuses on the study of strongly interacting matter under the extremely high temperatures and densities created in heavy-ion collisions at high energies. Because the quark-gluon plasma is very similar to the state created right after the Big Bang, one can also say that ultra-relativistic heavy-ion physics is studying extreme matter in the early universe. Over the last three decades, the field has developed tremendously, with great advances in dedicated accelerators and has provided many of discoveries. In this article, we present the theoretical basis for the phase transitions in, as well as the important characteristics of, the quark-gluon plasma uncovered

권민정·문동호·조성태·홍병식

from relativistic heavy-ion collision experiments.

강한 상호작용을 설명하는 양자색소역학 이론은 강입자 속에 갇혀있던 쿼크와 글루온들이 고온, 고압, 고밀도 환경에서 경계를 벗어나 자유롭게 움직이는 쿼크-글루온 플라즈마의 생성을 예측한다. 고에너지 핵물리학에서는 상대론적 중이온 충돌을 이용해 아주 높은 온도와 밀도를 갖는 극한 핵물질을 생성시키고 이 물질의 특성을 연구한다. 그런데 쿼크-글루온 플라즈마는 대폭발 직후 생성된 물질과 매우 흡사하여 상대론적 중이온 충돌은 우주의 초기 물질 상태를 연구한다는 의미이기도 하다. 지난 30여 년간 이 분야는 가속기의 발전과 함께 눈부신 발전을 거듭해 왔고, 이를 통해 극한 핵물질의 존재와 특성에 대한 새로운 사실을 많이 알게 되었다. 이 글에서는 우선 핵물질의 상전이 현상에 대한 이론적인 근거를 소개하고 상대론적 중이온 충돌실험에서 그동안 찾아낸 쿼크-글루온 플라즈마의 중요한 특성들을 소개한다.

들어가는 글

물질을 구성하는 기본 단위로 알려진 원자를 작게 쪼개면 전자와 양성자, 중성자로 나뉜다. 전자는 현재 더 작은 내부구조를 알 수 없는 기본입자 가운데 하나로써 톱슨의 음극선 실험과 같은 간단한 장치를 통해 쉽게 존재를 확인할 수 있다. 그러나 양성자와 중성자는 쿼크라는 더 작은 기본입자로 이루어져 있는데, 쿼크는 강입자(hadron)의 속에서만 존재할 수 있고 독립적으로 발견된 적이 아직 없다.

쿼크는 전자와 달리 세 가지 다른 종류의 전하를 가질 수 있다. 이 전하를 색깔 전하라고 부른다. 그러므로 쿼크들 사이의 힘은 전자들 사이에 작용하는 힘보다 훨씬 더 복잡하다. 전자는 광자를 서로 교환하며 힘을 주고받지만, 쿼크는 여덟 가지의 색깔 전하 조합을 가진 글루온을 주고받고, 글루온은 광자와는 달리 자신들끼리도 상호작용하므로 다루기가 무척 까다롭다. 이 쿼크들 사이의 강한 힘을 설명하는 이론이 양자색소역학(Quantum ChromoDynamics, QCD)이다.

게다가 색깔을 지닌 쿼크는 강입자 안에 영원히 갇힌 채 살

저자약력

권민정 교수는 고려대 물리학과에서 학사, 동대학원에서 석박사 학위를 받았다. 박사학위과정 중 상대론적중이온충돌형가속기(RHIC)의 PHENIX 실험에 참여하였다. 2006년부터 독일 하이델베르크 대학에서 박사후연구원으로 거대강입자충돌형가속기(LHC)의 ALICE 실험에 참여해왔으며, 2013년부터 인하대 물리학과 교수로 재직 중이다. (minjung@inha.ac.kr)

문동호 교수는 고려대 물리학과에서 학사, 동대학원에서 석박사 학위를 받았다. 2008년부터 LHC의 CMS 실험에 참여해왔으며, 2011년 고려대학교, 2012년 University of Illinois at Chicago 박사후연구원을 거쳐 2014년부터 전남대 물리학과 교수로 재직 중이다.

조성태 교수는 미국 뉴욕주립대학(스토니브룩)에서 박사학위 취득 후, 연세대학교 연구원을 거쳐 2014년부터 강원대학교 과학교육학부 교수로 재직 중이다.

홍병식 교수는 미국 뉴욕주립대학(스토니브룩)에서 박사학위 취득 후, 독일 GSI 연구소 연구원을 거쳐 1997년부터 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 현재 우수연구센터인 극한핵물질연구센터(CENuM)의 연구책임자이다.

Fig. 1. QCD phase diagram.^[2]

아기야만 한다. 우리가 눈으로 볼 수 있는 건, 색깔이 없는 강입자일 뿐이다. 하지만 외부에서 쿼크들 사이의 상호 작용력을 극복할 만한 에너지를 가해주면, 쿼크가 강입자 밖으로 뛰쳐나와 전자와 같이 자유롭게 이동하는 상황을 상상해 볼 수 있다. 실제로 쿼크 간 상호 작용력은 온도 또는 에너지가 커질수록 그 세기가 감소한다는 사실이 이미 밝혀졌는데 이 사실을 점근 자유성(asymptotic freedom)이라 부르며, 쿼크물질과 강입자 간 상전이 이론의 근거이기도 하다.^[1] 고에너지 핵물리학은 상대론적 중이온 충돌을 이용해서 이와 같은 상전이를 발생시켜 쿼크가 강입자로부터 벗어나서 자유롭게 움직이는 쿼크-글루온 플라즈마(Quark-Gluon Plasma, QGP)를 생성하고 새로운 물질의 특성을 연구한다. 이 글에서는 우선 핵물질의 상전이 현상에 대한 이론적인 근거를 소개한 다음, 상대론적 중이온 충돌실험에서 알아낸 쿼크-글루온 플라즈마의 중요한 특성을 소개하고자 한다.

QCD 상전이의 이론적 근거

상대론적 중이온 충돌이 일어나면 쿼크가 강입자로부터 자유로운 상태가 되었다가 다시 강입자로 돌아가는 과정을 거칠 것으로 예상하는데, 이 과정을 쿼크-강입자 상전리로 설명할 수 있다(그림 1). QCD 격자 이론에 의하면 쿼크-강입자 상전이가 일어나려면, 약 2×10^{12} °C(2조 °C)까지 물질을 달굴 수 있는 충분한 에너지가 외부에서 공급되어야 한다. 이러한 쿼크-강입자의 상전이는 우리가 실생활에서 볼 수 있는 상전이와 크게 다르다.^[3]

온도가 100 °C에 도달하는 순간 물은 수증기로 바뀌는데 이를 물의 액체-기체 상전이라고 부른다. 하지만 물이 기체 상태가 되었다고 물의 분자 성분인 H_2O 가 변하는 것은 아니다. 반면 쿼크-강입자 상전이에서는 강입자가 그 성분인 쿼크와 글

루온으로 해체된다. 따라서 쿼크-강입자 상전이의 전과 후에는 입자들의 개수가 변하므로 쿼크-강입자 상전이를 자유도의 변화라고 이해하는 것이 더 적합할 수도 있다.

지상에서 물은 100 °C에 도달하면 수증기로 상이 바뀌지만, 높은 산에 올라가면 기압이 낮아져 100 °C보다 더 낮은 온도에서 끓는다. 즉 물의 상전이 현상을 이해할 때 온도뿐만 아니라 압력도 동시에 고려해야 한다. 이와 비슷하게 쿼크-강입자 상전이를 설명하려면 온도와 중입자(baryon) 밀도(또는 화학퍼텐셜)를 함께 따져야 한다. 중입자 밀도가 커지면 물질 내 쿼크 사이의 틈이 작아져 점근 자유성의 원리 때문에 쿼크-강입자 상전이가 일어날 수 있다.

쿼크-강입자 상전이는 물의 상전이보다 훨씬 더 이해하기 어렵다. 그 이유는 상전이가 일어나려면 에너지가 많이 필요하고, 쿼크와 글루온 사이의 상호작용을 매개하는 강력의 작용시간이 약 10^{-23} 초에 불과하기 때문이다. 이렇게 짧은 시간에 일어나는 쿼크-강입자 상전이를 알아볼 수 있는 수단으로 상전이 전과 후에 변할 것으로 예측되는 여러 물리량이 제안되었다. 이 물리량들은 한결같이 상전이 전후의 대칭성 변화에 근거를 두고 있다는 점에서 통한다. 쿼크가 강입자 안에 갇혀있으면 여러 대칭성이 깨질 수 있는데, 그 가운데 대표적인 것이 손지기 대칭성(chiral symmetry)이다. 손지기 대칭성의 깨짐을 나타내는 물리량이 손지기 응축(chiral condensate)이다. 쿼크가 질량을 무시할 만큼 가벼운 입자라면 쿼크가 대칭성을 회복한 이후 손지기 응축은 사라지지만, 그렇지 않으면 유한한 값을 갖는다. 따라서 손지기 응축은 손지기 대칭성이 깨졌는지 아닌지를 나타내는 질서매개변수(order parameter)의 역할을 할 수 있다. 따라서 손지기 대칭성을 연구하면 쿼크-강입자 상전리와 관련된 정보를 알 수 있다.

한편 쿼크-강입자 상전이의 질서매개변수 역할을 하는 또 다른 대상으로 폴리야코프 고리(Polyakov loop)를 들 수 있다. 무시할 만한 질량을 갖는 쿼크의 경우, 손지기 응축의 변화를 살펴 쿼크-강입자 상전리로 인해 손지기 대칭성이 회복되었다고 이해하는 반면, 무거운 쿼크의 경우에는 폴리야코프 고리를 이용해 쿼크-강입자 상전리로 인한 쿼크 구속현상의 변화를 이해한다.

REFERENCES

- [1] D. J. Gross and F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **30**, 1343 (1973); H. D. Politzer, Phys. Rev. Lett. **30**, 1346 (1973).
- [2] B. Hong, J. Korean Phys. Soc. **72**, 1515 (2018).
- [3] Y. Aoki, Z. Fodor, S. D. Katz and K. K. Szabo, Phys. Lett. B **643**, 46 (2006); Y. Aoki, S. Borsanyi, S. Durr, Z. Fodor, S. D. Katz, S. Krieg and K. K. Szabo, JHEP **0906**, 088 (2009); S. Borsanyi *et al.* [Wuppertal-Budapest Collaboration], JHEP **1009**, 073 (2010).

상전이는 크게 1차 상전이와 2차 상전리로 구분된다. 물처럼 상이 변할 때 온도가 일정하게 유지되는 경우를 1차 상전이라고 한다. 1차 상전이는 상전이 온도에서 부피, 압력, 열용량 등이 동시에 급격히 변화하는 반면, 2차 상전이는 상의 변화가 특정 온도에서 갑자기 일어나지 않고 일정한 온도 범위에서 서서히 일어나며, 상전이에 수반되는 여러 물리량의 변화가 각기 다른 온도 범위 내에서 독립적으로 일어난다. 높은 온도에서 일어나는 쿼크-강입자 상전이는 2차 상전이에 해당하므로 어느 특정 온도 범위에서 변하는 특정 물리량만으로는 쿼크-강입자 상전이를 구분할 수 없다.^[4]

손지기 응축 또는 폴리야코프 고리는 쿼크-강입자 상전이 과정에서 그 양이 변할 것으로 예측되는 이론적인 변수로써 쿼크-강입자 상전이에 대한 실험 측정량과 직접 비교할 수는 없다. 더욱이 손지기 응축이나 폴리야코프 고리는 모두 쿼크-강입자의 2차 상전이에서는 질서매개변수 역할을 하지 못하고, 각기 다른 온도 범위에서 연속적으로 변한다. 따라서 쿼크-강입자 상전이를 이해하려면 쿼크-강입자 상전이에 의해 변하는 여러 물리량을 종합적으로 분석하여 상전이 온도의 범위와 특성을 알아낼 필요가 있다.

한편 쿼크-강입자 상전이에 의해 변하는 또 다른 물리량으로 자유도와 밀접하게 관련된 쿼크 수 민감도(quark number susceptibility)를 들 수 있다. 온도가 상승해 쿼크-강입자 상전이 일어나면 쿼크의 개수가 증가하는데, 이는 쿼크-강입자 상전이에 의한 온도 변화에도 영향을 받는다. 실제로 QCD 격자 이론에 따르면 가벼운 위(u)/아래(d) 쿼크와 기묘(s) 쿼크의 개수 민감도 크기가 온도 변화에 의존한다.

쿼크 수 민감도와 같이 쿼크-강입자 상전이에 의한 자유도 변화와 관련된 물리량으로 궤적 변칙(trace anomaly)도 있다. 상태방정식 연구에 많이 사용되는 에너지 밀도(ε)와 압력(P)을 이용하면 궤적 변칙은 $\varepsilon - 3P$ 로 주어진다. 만약 쿼크들이 이상기체처럼 행동한다면 궤적 변칙은 영이 되어야 하나 실제로는 그렇지 않다. 특히 상전이 임계 온도 근처에서는 값이 연속적으로 변하므로 온도 변화에 따른 쿼크 수 민감도 및 궤적 변칙의 변화를 연구하면 쿼크-강입자 상전이를 이해할 수 있다.

1970년대 초 접근 자유성이 밝혀지고 QCD 격자 이론을 이용한 연구결과가 발표된 이후, 지금까지 핵물리학자들은 쿼크-강입자 상전이 현상을 이해하기 위해 끊임없이 노력하고 있다. 강력과 관계된 쿼크-강입자 상전이는 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 상전이와는 달리 매우 복잡하다. 쿼크-강입자 상전이는 “양-밀스(Yang-Mills) 이론의 질량 틈 문제(mass gap problem)”라고 하는 어려운 수학 난제와도 깊이 연관되어 있다. 참고로 미국 클레이 수학 연구소(Clay Mathematics Institute)는

Fig. 2. Lightcone diagram of a collision for the case (a) without a QGP and (b) with a QGP.^[5]

이 문제 해결에 백만 달러의 상금을 걸어 놓은 상태이다.

상대론적 중이온 충돌은 지구상에서 쿼크-강입자 상전이를 이해하기 위한 유일한 실험적 방법이다. 상대론적 중이온 충돌 실험은 다양한 온도와 중입자 밀도에서 쿼크-강입자 상전이를 구현하고 이때 나타나는 여러 물리 현상을 측정할 수 있다. 앞으로 이러한 노력의 결실로 강력을 이해하고 우주 초기 물질의 성질도 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

특별한 강한상호작용 물질의 실험적 증거

실험실에서 원자량이 큰 핵(중이온)을 아주 높은 에너지로 충돌시키면 우주 대폭발 직후의 초기 물질을 재현할 수 있다. 충돌 직후에 만들어진 물질의 온도와 중입자 밀도가 임계값을 넘어서면 아주 짧은 시간이나마 쿼크-글루온 플라즈마가 만들어지고, 이후 그림 2와 같은 과정을 거쳐 입자들이 형성된다.

그러면 아주 짧은 시간 동안만 존재하는 QGP의 성질은 어떻게 연구할 수 있을까? 다시 말하면 강한상호작용을 기술하는 게이지 이론의 근원적인 열역학적 특성을 어떻게 실험적으로 검증할 수 있을까? 이 질문에 대답하려면 물질의 온도와 밀도를 극한으로 높이고 계의 특성이 반영된 물리량을 알아내는 것이 무엇보다 중요하다.

REFERENCES

- [4] Y. Aoki, G. Endrodi, Z. Fodor, S. D. Katz and K. K. Szabo, Nature **443**, 675 (2006).
- [5] S. Salur, Investigation of Hadronic Resonances with STAR, Dissertation thesis, Yale University (2006).

쿼크-글루온 플라즈마의 성질을 규명하고 상전이의 실험적 증거를 찾기 위한 고에너지 핵물리 실험은 1980년대부터 지금까지 다양한 중이온 가속기를 이용해 진행되었다. 1980-90년대의 가변경사 싱크로트론(Alternating Gradient Synchrotron, AGS)과 초양성자 싱크로트론(Super Proton Synchrotron, SPS), 2000년대의 상대론적 중이온 충돌형가속기(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC), 그리고 2009년부터 본격적으로 가동을 시작한 대형 강입자 충돌형가속기(Large Hadron Collider, LHC) 등 많은 종류의 가속기를 이용해 다양한 에너지 영역대에서 실험을 해왔다. 현재 LHC에서는 질량중심에너지가 5 TeV나 되는 전례 없이 높은 에너지로 납(Pb) 핵들을 충돌시키고 있다. 이처럼 실험실에서 물질의 온도와 밀도를 극한으로 높이며 극한 핵물질의 특성을 체계적으로 연구할 수 있게 되었다.

RHIC과 LHC는 지금까지 여러 종류의 중이온을 서로 충돌시켜 매우 특이한 핵물질을 만들었다. 이 물질은 지금까지 알려진 어떤 물질과도 크게 달라 강한상호작용을 하면서도 점성은 거의 없음이 밝혀졌다. 그리고 이 물질은 생성 직후에 엄청난 속도로 팽창하며 다양한 강입자와 광자 등을 방출하고 우주 폭발 초기와 비슷한 과정을 거쳐 진화한다는 사실도 알려졌다.^[6] 아래는 지금까지 RHIC과 LHC 실험에서 알아낸 QGP의 특성을 중요한 실험 결과들을 바탕으로 소개하고 앞으로의 전망도 살펴보고자 한다.

유체역학과 중이온 충돌실험 결과

1957년 란다우(Landau)는 처음으로 유체역학을 이용해 양성자 충돌과정을 기술했으며 몇몇 물리량을 잘 설명했다. 이후 페르미(Fermi)는 입자들이 열적인 평형 분포를 따른다고 가정하여 실험 결과를 성공적으로 기술했다.^[6] 그리고 1970대 후반부터 상대론적 중이온 충돌실험의 효시라 할 수 있는 미국 로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)의 낮은 에너지 이온 충돌을 통해 압축 핵물질이 유체적인 성질을 갖고 있음을 알아냈다.

낮은 에너지에서 생성된 핵물질은 핵자와 조각핵들로 이루어진 반면, RHIC이나 LHC와 같이 높은 에너지에서 생성된 핵물질은 쿼크와 글루온 등의 기본입자들로 이루어져 있으므로 이들의 유체적인 성질은 서로 크게 다를 수 있다. 그렇다면 실험에서 측정한 물리량들을 이용해 핵물질의 유체적인 성질을 어떻게 이해할 수 있는지 살펴보자.

1. 입자들의 생성 비율과 운동량 분포

유체역학으로 물리계가 잘 기술된다면 매 순간 전 영역에서

Fig. 3. Thermal model fits to the light flavour hadron yields in central (0-10%) Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV.^[7]

열적, 화학적 평형이 이뤄졌다는 가정이 타당하다는 의미이다. 입자들이 서로 충돌하며 생성 또는 소멸되는 과정에 각 종류의 입자수가 일정하게 유지될 때 계는 화학적 평형 상태에 있다고 한다. 나아가 입자들 사이의 빈번한 탄성충돌로 입자들의 운동량이 통계역학적 분포를 따르며 온도를 정의할 수 있는 상태를 열적 평형 상태라고 한다. 충돌에너지가 높을수록 더 많은 수의 글루온이 상호작용에 관여하므로 열적 평형을 이루기 쉬울 것으로 예상된다. 따라서 유체역학적으로 물질의 상태를 기술할 가능성이 있고, 초기 에너지 밀도나 중입자 밀도 등을 잘 선택하여 유체역학 방정식을 풀면 여러 입자들의 생성 비율과 그들의 운동량 분포를 동시에 잘 설명할 수 있다.^[6]

유체역학에서는 핵물질의 진화를 다음과 같이 설명한다. 고에너지 중이온 충돌 직후 중입자와 그들의 반입자 수가 서로 비슷한 물질이 만들어지고, 이 물질은 내부에 축적된 엄청난 압력으로 순식간에 팽창한다. 팽창하는 동안 계가 차가워지다 임계온도에 도달하면 쿼크들이 강입자로 바뀌는데 이를 강입자화(hadronization)라고 부른다. 만약 강입자로 이루어진 계의 팽창 속도가 충분히 크면 입자들 간의 충돌확률이 작아져 각 입자들의 운동 상태가 변하지 않은 채 검출되고 이를 동결(freeze-out)이라 한다. 따라서 실험에서 강입자의 수를 측정하면 강입자화가 일어나는 순간 계의 정보를 알 수 있다.

평형이론에서 동결 당시 입자의 개수는 온도(T_{ch})와 화학퍼텐셜(μ_{ch})을 이용해 추정할 수 있다. 그림 3은 실험적으로 측정된 여러 종류의 입자 생성 비율을 이론으로 잘 설명할 수 있음을 보여준다. 한편 입자들이 열적 평형에 도달한 상태에서 물질이 계속 팽창한다면 실험실 계에서 입자의 열적 평형 분포가 상대론에 의해 로렌츠 변환한다. 이때 u^μ 를 각 지점의 팽창속도 벡터라고 하면, 입자들의 가로운동량 분포함수는

REFERENCES

- [6] G. R. Shin, K. S. Lee and S. H. Lee, Phys. High Technol. 19(1/2), 2 (2010).
- [7] ALICE Collaboration, Nucl. Phys. A 971, 1 (2018).

$dN/dp_t \sim e^{-p_t u^{\mu}/T_{th}}$ 와 같이 표현된다.^[6] 이를 실험에서 측정 한 여러 입자들의 가로운동량 분포와 비교하면 계의 열적평형 온도(T_{th})를 얻을 수 있다.

지금까지 모든 중이온 충돌실험 결과를 분석해 보면 T_{ch} 가 T_{th} 보다 항상 크다. 이는 계의 화학적 평형이 먼저 깨진 후, 열적 평형이 깨짐을 의미한다. 즉 우선 열적, 화학적 평형상태에 있던 계가 팽창에 의해 냉각되며, 온도가 T_{ch} 에 이르러 화학적 평형이 깨지고 입자의 수가 고정된다. 이후 계는 계속 팽창하지만 입자 사이의 탄성충돌에 의해 열적 평형은 여전히 유지되며 온도가 더 낮아지는데, 온도가 T_{th} 에 도달하면 입자들 간의 충돌확률이 거의 없어 열적 평형도 깨진다. 이후로는 더 이상의 온도 변화가 없으므로 실험으로 측정된 강입자들은 온도가 T_{th} 인 순간 열적평형 상태의 운동량분포를 갖는다.^[6] 이렇듯 중이온 충돌에서 만들어진 물질계의 변화과정을 3차원적인 상대론적 유체역학을 풀어 이해할 수 있으며, 이를 이용해 입자들의 생성량과 가로운동량 분포 데이터를 잘 설명할 수 있다.

2. 비등방흐름계수(anisotropic flow coefficient): 타원흐름계수와 고차흐름계수

비등방흐름계수(v_n)는 중이온 충돌과정에 유체역학 이론을 적용하는 것이 적합한지 알아보는 또 다른 물리량이다. 생성된 입자들에 대한 각분포의 비등방성을 이용하면 이 계수를 구할 수 있고, 이를 이용해 물질의 초기 상태를 밝힐 수 있다. 예를 들어, 흐름계수가 크면 충돌 후 생성되는 극한 핵물질을 구성하는 입자 사이의 다중 상호작용이 크다고 할 수 있고, 이는 계가 좀 더 열적 평형상태에 근접했다는 뜻이다.

입자들 사이의 평균자유행로가 계의 크기보다 훨씬 더 작을 때 유체역학을 적용할 수 있고 흐름계수와 같은 거시적인 물리량도 중요해진다. 실험에서는 빔 진행 방향(z)과 충돌계수 방향(x)에 의해 정의되는 반응평면(Ψ_{RP})을 기준으로 각 입자의 방위각 분포를 얻고(그림 4의 위), 이 분포를 다음과 같은 푸리에 급수전개식으로 맞춰 비등방흐름계수를 구한다.^[8]

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_t dp_t dy} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\varphi - \Psi_{RP})] \right)$$

여기서 E, p, p_t, φ, y 는 각각 입자의 에너지, 운동량, 가로운동량, 방위각 그리고 신속도(rapidity)를 나타낸다. 이때 2차 계수인 v_2 가 타원흐름계수인데 다음과 같이 이해할 수 있다. 그림 4와 같이 중이온들이 살짝 빋겨 충돌할 경우, 기하학적으로

Fig. 4. Almond shaped interaction volume after a non-central collision of two nuclei (top). The initial transverse energy density profile and its time dependence in coordinate space (bottom).^[8]

아몬드 형태의 비등방적 초기 물질이 생성되고 계의 압력분포도 방위각에 따라 달라진다. 이와 같이 균일하지 않은 초기의 압력조건이 시간에 따라 운동량의 비등방적 방위각 분포로 변환된다(그림 4의 아래).

타원흐름계수의 크기는 충돌 후 생성된 극한 핵물질의 마찰에 크게 의존하고 이는 점성도(η)/엔트로피밀도(s) 비율로 특징지을 수 있다. 물과 같이 마찰이 거의 없는 유체는 작은 η/s 값을 가지므로 파도와 같은 흐름꼴을 만들 수 있지만, 꿀과 같이 끈적이는 유체는 흐름꼴이 생성되더라도 금방 사라져 버린다. RHIC과 LHC는 지난 이십여 년간 얻은 방대한 자료를 분석해 중이온 충돌로 생성된 극한 핵물질의 η/s 값이 양자 유체적인 최소값인 $1/4\pi$ 에 가까운 거의 완전한 유체와 비슷하다는 사실을 밝혀냈다.^[9] 이로부터 상대론적 중이온 충돌로 만들어진 극한 핵물질은 구성입자들이 강한상호작용을 함에도 불구하고 점성은 거의 양자역학적으로 허용된 최솟값에 가까운 매우 특이한 물질임을 알 수 있다.

한편 고차흐름계수(n 이 2 이상인 v_n)는 타원흐름계수보다 극한물질의 상태에 더 민감한 물리량이다. RHIC과 LHC에서 측정된 결과에 따르면 입자 흐름의 고차 비등방성은 생성된 핵물질의 초기 요동(fluctuation)에 기인한다. 향후 더 많은 데이터를 수집, 분석한 후 이론연구 결과와 비교해 η/s 를 비롯

REFERENCES

- [8] P. F. Kolb and U. W. Heinz, *Quark gluon plasma*, edited by R. C. Hwa *et al.* (World Scientific Publ. Co., Singapore), pp. 634-714.
- [9] M. Luzum and R. Romaschke, *Phys. Rev. C* **78**, 034915 (2008).

Fig. 5. (Left) Quarkonium thermometer.^[12] (T_c is the critical temperature for the QGP formation). (Middle) Energy level diagram for $c\bar{c}$ states. (Right) Summary of mass, radius, and dissociation temperature for various quarkonium states.^[10]

Fig. 6. (Top) Relative yield of J/ψ with respect to the expectation as a function of the number of participant nucleons in In-In and Pb-Pb collisions at SPS.^[13] (Bottom) Nuclear modification factor for J/ψ in Au-Au collisions from the PHENIX Collaboration at RHIC.^[14]

한 유체역학 변수를 좀 더 정확히 얻으면 상대론적 중이온 충돌 초기 조건에 관한 많은 정보를 얻을 것으로 기대된다.

쿼크니움 생성 억제 현상(Quarkonium suppression)

쿼크니움이란 비교적 질량이 큰 매혹쿼크(c)와 바닥쿼크(b)가 자신의 반입자와 쌍으로 결합된 중간자를 일컫는다. 특히 매혹

쿼크와 반매혹쿼크의 쌍인 $c\bar{c}$ 를 매혹자(charmonium)라 부르고, 바닥쿼크와 반바닥쿼크의 쌍인 $b\bar{b}$ 를 바닥자(bottomonium)라고 부른다. 쿼크의 구성이 동일하다 하더라도 들뜬상태가 되면 명칭이 달라진다. 그림 5와 같이 J/ψ 와 ψ' 은 모두 $c\bar{c}$ 이지만 에너지 준위가 상대적으로 높은 ψ' 이 약 500 MeV 정도 더 무겁다. 매혹자의 대표적인 입자는 J/ψ 이고 바닥자의 경우는 Υ 이다.

쿼크니움은 가벼운 강입자들과 성질이 매우 다르다. 가벼운 강입자들은 쿼크와 글루온들이 상호작용하며 질량을 만들지만, 쿼크니움은 그들을 구성하는 쿼크 자체의 질량이 대부분을 차지한다. 따라서 가벼운 강입자들과 달리 매혹쿼크와 바닥쿼크는 상대론이 필요 없을 정도로 느리게 움직이는 상태로 이해하고 여러 가지 기본적 특성을 계산할 수 있다. 몇몇 대표적인 쿼크니움의 특성들이 그림 5의 오른쪽 표에 요약되어 있다.^[10] 이로부터 쿼크니움의 질량이 커질수록 쿼크와 반쿼크 사이의 결합거리가 대체로 늘어나고 QGP 내에서의 해체확률이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 여러 종류의 쿼크니움을 이용하여 결합거리에 따라 입자가 색소 차폐현상에 의해 순차적으로 해체되는 과정을 확인하면(1986년에 Mastui와 Satz가 처음 예측하였듯이) QGP의 생성온도를 알아낼 수 있다.^[11]

LHC 실험이 시작되기 전 약 20여 년간 CERN의 SPS와 BNL의 RHIC을 이용해 중이온 충돌에 의한 J/ψ 생성을 측정해 왔다. 그림 6의 위와 같이 SPS에서의 중이온 충돌실험 결과는 예측했던 J/ψ 양보다 더 많이 억제되었음을 보여주었다.^[13] 이후 RHIC에서도 정면충돌에 가까워질수록 J/ψ 의 생성률이 상대적으로 억제됨을 확인했다(그림 6 아래).^[14] 여기서

REFERENCES

- [10] H. Satz, J. Phys. G 32, R25 (2006).
- [11] T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. B 178, 416 (1986).
- [12] <http://dnp.nslc.msu.edu/current/quarkonia-2009-08.html>.
- [13] Na60 Collaboration, Nucl. Phys. A 830, 354c (2009).
- [14] PHENIX Collaboration, Phys. Rev. C 84, 054912 (2011).

Fig. 7. (Left) Nuclear modification factor for J/ψ in Pb-Pb collisions from the CMS Collaboration at the LHC.^[15,16] (Middle) Same as the left panel, but for Y .^[17,18] (Right) Nuclear modification factor for J/ψ in Pb-Pb collisions from the ALICE Collaboration at the LHC.^[19,20]

핵변형인자 R_{AA} 는 중이온 충돌에 의해 핵자충돌 당 생성된 입자의 개수를 양성자 충돌 당 생성된 입자의 개수로 나누어 준 변수이다.

그럼 충돌에너지가 RHIC의 20배에 가까운 LHC는 어떻게? RHIC이 가동하기 전에는 충돌에너지가 크게 증가하여 QGP의 온도와 쿼크밀도가 높아진 결과, 더 많은 양의 쿼크니움이 녹아서 사라질 것으로 예측했었다. 그러나 이와 반대로 오히려 무거운 매혹쿼크나 바닥쿼크의 개수가 많아져 이들의 재결합에 의해 나중 단계에서 생성되는 쿼크니움이 녹아 사라지는 양보다 더 많아질 가능성에 대한 예측도 있었다.

그림 7은 현재까지 LHC에서 측정한 J/ψ 와 Y 의 핵변형인자에 대한 결과인데, 역시 정면충돌에 가까울수록 양성자 충돌에 비해 상대적으로 생성이 크게 억제됨을 볼 수 있다.^[15-18] 이 결과가 색소 차폐에 의한 생성을 억제 효과만에 의한 현상인지, 아니면 쿼크 재결합 효과가 함께 나타난 결과인지는 구분하기 어렵다. 다만 낮은 운동량 입자 검출에 더 유리한 ALICE 실험결과는 쿼크 재결합 과정을 포함한 모델을 더 선호하고 있다. 그리고 재결합 성분이 주로 모여있는 낮은 운동량 영역의 ALICE 결과와 CMS 결과를 서로 비교함으로써 쿼크 재결합에 의한 생성량 증가 효과를 간접적으로 확인할 수 있다(그림 7의 오른쪽과 왼쪽 비교).^[19,20] 향후 더 많은 데이터를 수집, 분석해 들뜬 상태 쿼크니움들의 생성량까지 더 정확하게 측정하면 결합거리에 따라 순차적으로 해체되는 과정을 이해할 수 있고, 이를 통해 QGP 생성온도도 알아낼 수 있을 것이다.

제트소멸 현상(Jet quenching)

쿼크-글루온 플라즈마의 내부를 들여다볼 수 있는 훌륭한 도구 가운데 하나가 높은 에너지 입자의 다발인 제트이다. 중이

Fig. 8. (Left) Azimuthal angle ($\Delta\phi$) distribution of jets in p+p, d+Au, and Au+Au collisions from STAR Collaboration at RHIC.^[23] (Right) Cartoon for the dijet production in p+p and single jet production in Au+Au collisions.

온도가 높은 에너지에서 충돌하면 제트가 서로 반대 방향으로 방출될 확률이 높는데, 주변 물질의 영향으로 핵물질 내에서 통과하는 거리에 따라 제트의 에너지나 모양이 달라질 수 있다. 제트의 에너지는 보통 수십에서 수백 기가전자볼트로 매우 큰데, 오직 QGP와 같이 엄청난 에너지 밀도를 갖는 물질만이 제트를 저지시킬 수 있다. 이렇게 물질 안에서 제트가 에너지를 잃어버리는 현상을 제트소멸(jet quenching)이라 부른다.^[21,22]

RHIC 실험 초기에 STAR 그룹은 제트와 관련해 매우 흥미

REFERENCES

- [15] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/HIRaaCompilation>.
- [16] CMS Collaboration, Eur. Phys. J. C **78**, 509 (2018).
- [17] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **770**, 357 (2011).
- [18] CMS Collaboration, arXiv:1805.09215.
- [19] ALICE Collaboration, JHEP **05**, 179 (2016).
- [20] ALICE Collaboration, PLB **765**, 212-224 (2017).
- [21] M. Gyulassy and M. Plumer, Phys. Lett. B **243**, 432 (1990).
- [22] X. N. Wang and M. Gyulassy, BNL RHIC Workshop 1990: 0079-102.
- [23] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. **91**, 072304 (2003).

Fig. 9. (Top) Nuclear modification factor of various hadrons and photons from the PHENIX and STAR Collaboration at RHIC.^[24] (Bottom) Same as the left panel, but from the CMS Collaboration at LHC.^[25]

로운 결과를 발표하였다. 그림 8의 왼쪽은 제트의 방위각분포인데 양성자 충돌 시에는 두 개의 제트가 서로 반대 방향으로 방출되나, 무거운 금(Au) 이온의 충돌 시에는 제트가 한쪽으로만 방출되었다.^[23] 이렇게 한쪽 제트가 거의 사라진 현상은 QGP가 아주 강하게 상호작용하는 쿼크와 글루온들로 이루어진 유체라는 사실을 뒷받침한다.

제트는 입자다발로 구성되어 있기 때문에 입자들의 핵변형인자를 살펴보면 제트 소멸을 정량적으로 확인할 수 있다. 그림 9의 위쪽은 RHIC에서 측정한 여러 입자들의 핵변형인자 결과인데, 모든 실험이 중이온 충돌 시 제트를 비롯한 입자의 생성이 억제됨을 보여준다.^[24] 이는 강한상호작용을 전혀 하지 않는 광자와 정반대의 결과인데, 제트나 높은 운동량 쿼크들이 극단적으로 높은 온도와 밀도의 물질을 통과하며 받은 영향 때문

이다.

충돌에너지가 RHIC보다 20배 가량 높은 LHC에서 측정한 결과가 그림 9의 아래에 있다. 이 결과에 의하면 하전입자들의 핵변형인자는 1보다 작지만 광자와 W , Z 입자들의 결과는 1에 가깝다.^[25] 이는 광자를 비롯한 약전자기 입자들은 QGP를 통과할 때 물질에 의해 거의 영향을 받지 않고, 오직 쿼크로 이루어진 강입자만이 물질과 강하게 상호작용을 해 양성자 충돌결과에 비해 생성량이 줄어들었음을 의미한다.

2018년 11월에는 LHC에서 2010년에 취득했던 데이터의 16배에 달하고 충돌에너지가 2배 증가한 중이온 충돌실험이 수행되었다. 이를 통해 그동안 자세하게 보기 힘들었던 무거운 쿼크에서 시작된 제트나 광자와 쌍을 이루는 제트 생성을 세밀히 살펴볼 수 있게 되었으므로, 계속해서 CERN에서 들려오는 소식에 귀를 기울일 필요가 있다.

나오는 글

올해부터 2020년까지 LHC는 빔의 휘도(luminosity)를 2배로 높이기 위한 가속기 업그레이드를 진행한다. 동시에 많은 양의 데이터를 취득하기 위해 검출기의 성능을 높이는 업그레이드도 진행된다. 예를 들어 복합형 실리콘픽셀(하이브리드 이미징 CMOS 센서)을 기반으로 한 ALICE 내부배적장치(ITS) 업그레이드는 충돌에 의해 생성된 입자들의 붕괴 꼭지점 위치 분석능력을 획기적으로 개선하고, 데이터 수집 속도를 100배 이상 향상시킬 수 있다. 그리고 CMS는 새로운 실리콘 검출기와 전방 에너지 검출기를 제작 및 설치하고 트리거 전자장비를 교체하여 획기적으로 증가한 양성자와 중이온 충돌 데이터를 받을 준비에 들어갔다. 이렇듯 검출기 업그레이드를 통해 매우 드물게 생성되는 입자의 수집 개수를 늘려 분석이 필요한 물리량을 좀 더 정확하게 측정할 계획이다. 이를 통해 실험 데이터와 이론 계산 결과와의 엄밀한 비교가 가능해지고, 어떤 이론이 더 진실에 가까운지를 가려낼 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 LHC에서 연구하는 높은 온도-낮은 중입자 밀도 핵물질의 연구결과와 앞으로 우리나라에 건설 중인 RAON에서 연구할 낮은 온도-높은 중입자 밀도 핵물질의 연구결과를 결합할 경우 핵물질의 3차원 QCD 상전이를 완성할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [24] B. Betz, Eur. Phys. J. A **48**, 164 (2012).
- [25] G. Veres and CMS Collaboration, Nucl. Phys. A **904-905**, 146c-153c (2013).