

⑤ 쿼크 글루온 플라즈마

초기우주의 세계 만들어 관측한다

글 | 이수형 _ 연세대학교 물리학과 교수 suhoung@phya.yonsei.ac.kr

물질의 기본단위인 원자는 전자와 핵으로 이루어져 있다. 물질의 화학적 성질은 전자의 구조에 기인하는데, 물리학과 화학의 여러 분야에서 다양하게 다루어진다. 반면, 원자 질량의 99% 이상을 차지하는 핵과 그 핵의 기본단위인 쿼크의 성질에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 그 이유는 보통 상태에서 쿼크가 핵자 내에 구속됨으로써 그 본래의 정체가 가려져 있기 때문이다. 그러나 주위 온도가 약 170MeV(섭씨 약 10^{12} 도)가 되면 쿼크는 구속 상태에서 풀려나오고 질량도 매우 작아지는 상전이가 일어날 것으로 기대된다. 이러한 상태를 쿼크 글루온 플라즈마(QGP) 라고 하는데 빅뱅 이후 약 100만분의 1초의 우주 초기의 상황에서 존재했을 물질의 기본 상태이다. 쿼크들 사이에 작용하는 힘은 양자 색소역학(QCD)이라는 이론으로 표현되는데 이것이 결국 핵력의 기본이론이다. QCD의 구속현상은 아직까지 풀리지 않는 세기의 문제인데 쿼크 글루온 플라즈마로의 상전이를 이해하면 이 난제의 해답도 얻게 될 것으로 기대되고 있다.

상대론적 중이온 충돌실험으로 쿼크물질 존재 확인

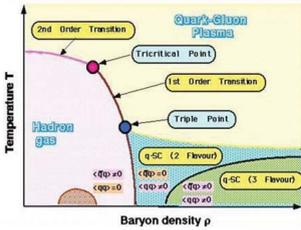
지구상에서 쿼크물질의 존재를 확인하고 그 특성을 연구하기 위해서는 상대론적 중이온 충돌 실험이 가장 이상적이다. 약 20년 전부터 세계적인 여러 연구 그룹에서 쿼크물질을 실험적으로 확인하기 위한 새로운 도전을 시작하였다. 즉, 쿼크물질의 형성을 탐색하기 위하여 1980년대 중반 미국 브룩헤이븐 국립연구소(BNL)의 AGS 가속기를 필두로 상대론적 중이온 충돌 실험을 시작하였고,

1980년대 후반에 유럽핵연구센터(CERN)의 SPS 가속기에서도 비슷한 실험을 수행하였다. 이보다 더 높은 에너지에서 쿼크물질 생성을 확인하기 위해서는 새로운 가속기 건설이 필요하다는 1983년 미국 DOE/NSF 산하 원자력자문위원회의 장기계획의 의견에 따라, 미국 BNL에서 상대론적 중이온 충돌기(RHIC)를 건설하여 2000년부터 본격적인 상대론적 중이온 충돌실험을 진행하고 있다. 또한 2008년 9월에 CERN에서 완공된 거대 하드론 충돌기(LHC)를 이용하여 더 높은 에너지 영역에서 쿼크물질의 생성을 확인하기 위한 상대론적 중이온 충돌 실험이 진행될 예정이다.

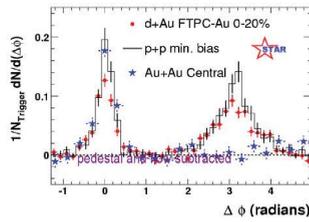
한국의 이론 연구가들도 초기 단계에서부터 관련연구를 많이 해왔다. 대표적으로 전남대학교 이강석 교수의 화이어볼 모델, 프랑스 기초연구원 노만규 교수의 브라운-로 이론 모델, 연세대학교 이수형 교수의 QGP와 'vector meson mass shift' 에 관한 논문들이다. 뿐만 아니라 국내 실험 연구가들도 초기 BNL 중이온 실험에서부터 적극적으로 참여하여 많은 결과를 얻었고, 앞으로 진행될 LHC의 중이온 충돌 실험에서도 적극적인 활동이 기대되고 있다.

RHIC 실험에서 새로운 제트 소멸 현상 발견

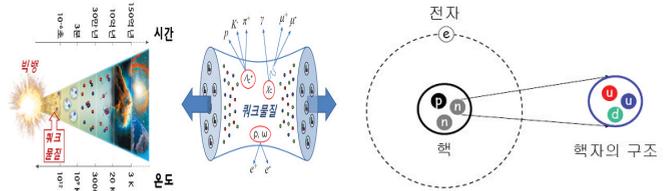
QGP로의 상전이는 격자이론에 의하여 임계온도가 150MeV 정도의 높은 온도에서도 일어난다는 것이 증명되었다. 또한 높은 핵자밀도에서는 색 초전도 현상도 일어날 것으로 기대된다. 상대론적 중이온 충돌실험은 중핵 속에 있는 보통의 핵자들을 충돌시켜 충돌 초기에 QGP에 도달하게 하려는 실험이다. 문제는 '무엇을 측정함



QCD에서 예상되는 핵물질의 여러 상. 세로축은 핵자밀도를 나타내고 가로는 온도를 나타낸다.



RHIC 실험에서 발견된 제트 소멸 현상.



왼쪽은 초기우주의 진화를 나타내고 오른쪽은 초기우주 상태의 쿼크물질을 상 대론적 중이온 충돌에서 재현한 그림

원자는 핵과 전자로 이루어졌고 핵을 이루는 핵자는 (u,d) 등의 쿼크들로 이루어졌다

으로써 QGP로의 상전이 현상이 일어났는가와 ‘그 성질을 알 수 있는가’이다.

물론 상전이를 알려면 그 질서매개변수를 알아야 한다. 격자이론에 의하여 QGP로의 상전이 현상을 보는 방법은 색 탈 구속 현상, 카이랄 대칭성 회복, QCD 상태 방정식(QCD) 등을 통해서이기 때문에 QGP 신호로 여겨진 것은 이와 관련된 현상들, 즉 J/ψ 감쇄 현상, 가벼운 중간자의 질량변화, v_2 등이다.

RHIC 실험이 실시되기 전에 이미 SPS/CERN에서는 핵자 당 에너지가 20GeV 이하인 상대론적 중이온 충돌 실험이 행해져 왔고 이미 논의한 상전이 신호와 관련된 흥미로운 결과를 얻었다. Pb-Pb 충돌실험에서 횡축에너지가 증가하면서 J/ψ 감쇄현상이 급격히 증가함을 보였고 이것은 충돌초기에 색가림 효과와 관련된 탈 구속 현상과 관련되어 나타난 현상으로만 해석이 가능한 상태이다. 브룩헤이븐 실험에서도 이러한 실험은 계속되었고 감쇄현상과 또한 나오는 부위에 따라 QGP 존재에 의한 약간의 증감효과도 나타난다는 결과가 나타났다. 또한 쌍렙톤이 300~800MeV 사이에 설명할 수 없이 많이 측정되었는데 이것은 가벼운 벡터 중간자가 충돌초기 높은 온도와 밀도의 카이랄 대칭성이 회복된 주위 환경에 의하여 그 성질이 변하여 나타난 현상으로 설명되고 있다. 이러한 일련의 결과는 CERN/SPS와 BNL/RHIC의 중이온 충돌실험에서 QGP 생성을 이미 간접적으로 확인한 것으로 여겨지고 있다.

RHIC 실험에서는 특히 새로운 제트 소멸 현상이 발견되었다. 이 현상은 충돌 초기에 QGP가 생기면 그러지 않았을 경우와 비교하여 예상되는 제트의 운동량이 줄어드는 현상을 의미한다. 그 이유는 제트가 색전하를 갖고 진행해 갈 때 주위가 컬러 싱글렛 소스 혹은 컬러 트리플렛 소스인지에 따라 줄어드는 힘을 더 받기 때문이다. 가로축이 0도인 곳에서 큰 신호가 발견되면 제트가 있는 것인데 빨간 점이나 p+p(양성자+양성자 충돌) 실험에서는 반대쪽에서도 신호(제트)가 발견되는 반면 Au+Au(중핵충돌)에서는 반대쪽에 신호가 나타나지 않는다는 것이 관측되었다. 이는 중이온 충돌 후에 QGP로 예상되는 아주 강하게 작용하는 물질이 생겼다는

것을 의미하는데 소위 v_2 라 불리는 양을 측정해도 같은 결과를 얻었다.

10년 안에 QGP 존재 · 성질 규명 기대

이렇듯 SPS/CERN과 브룩헤이븐/RHIC 실험에서 QGP를 확인한 것으로 여겨지는 증거들을 보기 시작하였고 QGP가 우리가 처음 예상했던 것과는 다르게 매우 강하게 작용하는 쿼크와 글루온의 물질이라는 것이 밝혀졌다. 그러나 아직도 상전이가 일어나 QGP 상태가 생겼다는 결정적인 증거는 없다. 즉 예를 들어 전도도를 측정해 초전도현상을 확인하는 것 같은 증거는 찾지 못한 상태이다.

그러나 LHC는 지금까지 지구에서 행하여온 그 어떠한 실험에서 보다는 높은 5.5TeV 에너지의 중이온(납)을 충돌시킬 계획이다. 이는 RHIC에서 실험한 에너지의 약 30배에 해당하는 높은 에너지이다. 이는 그만큼 많은 양의 입자와 많은 정보를 가진 신호가 나타난다는 것을 의미한다. 뿐만 아니라 매혹 쿼크, 바닥 쿼크도 많이 생겨나서 구속 현상과 직접 관련된 많은 신호가 나타날 것으로 기대된다. 또한 이러한 신호를 분석하는데 있어서 전자기적인 신호를 잘 관측할 CMS 실험과 많은 강입자들을 관측할 중이온 전용시험인 ALICE 실험으로 정확한 신호를 측정할 계획이다.

한국의 중이온 실험 물리학자들도 20여 명이 참가하고 있으며 이론 물리학자들도 관련 이론을 연구하고 결정적인 신호가 무엇이 될까에 대한 연구를 진행하고 있다. 따라서 중이온 실험이 본격적으로 진행되는 약 1년 후를 기점으로 앞으로 10년에 걸쳐 QGP의 존재와 성질에 대해서 해답을 얻을 것으로 기대되며, 이러한 국제적인 노력에 한국의 물리학자들도 지대한 공헌을 하리라 기대된다. 뿐만 아니라 그 누구도 보지 못한 그 초기우주의 세계를 만들고 관측하는 놀라운 경험을 인류는 하게 될 것이다. 



글쓴이는 연세대학교 물리학과 졸업 후 미국뉴욕주립대학교 스토니브룩에서 석사·박사학위를 받았다. 메릴랜드 대학교 연구원, 워싱턴대학교 연구원, 독일 중이온 연구소 방문교수, 싸이크로트론 연구소 방문교수 등을 지냈다.