중이온 물리와 한국아이디어

DOI: 10.3938/PhiT.19.003

김영만·이수형·이창환

Heavy Ion Physics and Korean Ideas

Youngman KIM, Su Hwang LEE and Chang-Hwan LEE

In this article we compile the theoretical ideas related to heavy ion physics put forward by Korean researchers. The ideas include changes of hadron properties in matter, specific signals in heavy ion collisions and nuclear astrophysics related results. Also discussed are results obtained from applying AdS/QCD methods to the physics of quark-gluon plasma.

들어가는 말

상대론적 중이온 충돌은 많은 핵자들이 아주 높은 에너지에서 충돌하기 때문에 충돌 이후 많은 입자들이 생성되고, 그 생성시기도 에너지 밀도가 아주 높은 충돌 초기에서부터 핵물질이 분산되어 입자들이 더 이상 충돌하지 않는 열적방출(Thermal freezeout)까지의 전 충돌과정에 걸쳐 있을 것으로 예상된다. 이러한 상황에서 충돌 초기에 있었을 상전이 현상을 확인하기란 그리 쉽지 않을 것이다. 실제로 관련 실험이 시작된 지 20여 년이 지났지만 아직까지 열역학적 관점의 정확한 상전이 현상은 포착하지 못한 상황이다. 이 사실은 실망스럽지만 한편으로는 아직까지도 이 분야에서 결정적인 공헌을 할 기회가 있다는 것을 이야기하고 있다.

이와 관련하여 한국 핵물리학자들은 이 분야가 발전하기 시작한 초기부터 관련 이론에서 독창적인 아이디어로 이 분야 발전에 공헌하였다. 대표적인 예를 몇 개 들면 다음과 같다. 논문^[1,2]에서 한국 연구진은 불덩이 모델(fireball model)을 처음으로 상

대론적 중이온 충돌 현상에 도입하였다. 논문^[3]에서는 손지기 대칭성 회복에 따라 모든 가벼운 강입자들의 질량이 비례하여 변한다는 가정을 제시하여 Brown-Rho scaling hypothesis^[3]라는 단어를 만들어낸 만큼 전 세계적인 돌풍을 일으켰다. 논문^[4]에서는 핵물질 속에서의 벡터 중간자의 질량변화와 손지기 대칭성의 관계를 양자색소역학 합법칙(QCD sum rule)을 통하여 구체적으로 보여 많은 후속 논문을 낳게 하였다. 논문^[5]에서는 강입자들의 개수와 전하 요동(fluctuation)이 상전이의 신호가 될 수 있다는 아이디어를 처음으로 도입하였다. 또한, 논문^[6]에서는 케이온(Kaon)이 유한 핵자 밀도 하에서 질량이 변화하여 응축현상(Kaon condensation)을 유발한다는 이론을 발표하였다. 이 밖에도 국내연구진은 손지기 대칭성과 HBT puzzle^[7]과 쪽입자 다단계반응(parton cascade)^[8] 등에 대한 주제에 대해서도 독창적인 연구를 수행해 오고 있다. 최근 들어 상대론적 중이온 충돌 현상을 AdS/QCD 방법들을 이용하여 이해하려는 시도가 일고 있는데 그 중심에도 한국의 연구자들이 큰 기여를 하고 있다.

이렇듯 상대론적 중이온 충돌 현상과 관련하여 국내연구진은 주목할 만한 연구결과를 계속 배출하고 있고 2004년에는 Heavy Ion Meeting(HIM)^[9]을 조직하여 그 역량을 극대화하고 있다.

본 글에서는 이 모든 업적을 설명하기에는 그 한계가 있어 저자들의 제한된 안목으로 최근까지 논의되고 또한 최근에 제시된 몇 개의 국내연구결과를 소개하려 한다. 본 저자는 이를 “한국 아이디어”로 명칭하려 하는데 그 이유는 이러한 국내연구진들의 아이디어들이 실제로 거대 가속기 센터에서 실현되고 검증되는 날이 곧 오리라는 기대와 확신에서이다.

REFERENCES

- [1] K. S. Lee, M. J. Rhoades-Brown and U. W. Heinz, Phys. Lett. B **174**, 123 (1986).
- [2] K. S. Lee, U. W. Heinz and E. Schnedermann, Z. Phys. C **48**, 525 (1990).
- [3] G. E. Brown and M. Rho, Phys. Rev. Lett. **66**, 2720 (1991).
- [4] T. Hatsuda and S. H. Lee, Phys. Rev. C **46**, 34 (1992).
- [5] S. Jeon and V. Koch, Phys. Rev. Lett. **83**, 5435 (1999); Phys. Rev. Lett. **85**, 2076 (2000).
- [6] C.-H. Lee, Phys. Rept. **275**, 255 (1996).
- [7] J. Cramer, G. A. Miller, J. M. S. Wu and J. H. Yoon, Phys. Rev. Lett. **94**, 102302 (2005).
- [8] G. R. Shin and B. Muller, J. Phys. G **28**, 2643 (2002).
- [9] <http://him.phys.pusan.ac.kr>.

저자약력

김영만 박사는 1999년 한양대학교에서 박사학위를 취득하였고 현재 아시아태평양이론물리연구센터(APCTP)에서 Junior Research Group 리더로 재직 중이다. (ykim@apctp.org)

이수형 교수 약력은 2쪽 참조.

이창환 교수는 1996년 서울대에서 박사학위를 취득하였고 현재 부산대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (clew@pusan.ac.kr)

Fig. 1. Λ_c and D production through coalescence of u - d quark. The additional production is small for D meson as diquark density is smaller than that of u and d quarks.

중이온 충돌 관련 한국아이디어

본 장에서는 중이온 충돌과 관련된 3개의 한국 아이디어를 소개하려 한다. 가벼운 벡터 중간자, 무거운 벡터 중간자 및 Λ_c/D 비율 증가들이다.

가벼운 벡터 중간자에 대한 연구: 핵의 일상 상태(normal nuclear matter)의 내부에서 핵자들이 차지하는 부피는 핵 전체의 약 20%에 달한다. 따라서 일상 상태의 핵 내부에서도 손지기 대칭성이 일부 회복되고 구속현상의 변화가 일부 나타나는 등 상전이의 전조 현상이 일어날리라 예상할 수 있다. 실제로 논문^[4]에서는 ρ , ω , ϕ 벡터 중간자가 핵물질 속에서 질량이 각각 16%와 3% 정도 변하게 될 것이라고 양자색소역학 합법칙 방법을 이용하여 계산하였다. Brown-Rho scaling의 구체적인 예라 할 수 있다. 이러한 현상은 가벼운 벡터 중간자를 무거운 핵 속에서 생성시키고 경입자쌍(dilepton)으로 붕괴하는 것을 관측함으로써 확인할 수 있을 것이라는 기대 하에 일본을 중심으로, 독일, 미국에서도 관련 실험이 진행되고 있다. 지금까지의 결과는 서로 엇갈리고 있는데 최근 가동을 시작한 J-PARC 가속기 센터에서 관련실험을 집중적으로 진행할 계획이어서 몇 년 안에 모든 의문은 해결될 것으로 보인다.^[10] 이러한 실험 결과는 결과적으로 QCD에서 강입자와 더 나아가 원자핵의 질량 대부분을 차지하고 있는 핵의 질량이 어떻게 만들어지는가에 대한 단서를 제공해 줄 것으로 기대하고 있다.

무거운 벡터 중간자에 대한 연구: 무거운 쿼크계는 쿼크와 반쿼크 사이에 작용하는 포텐셜에 의해 그 성질이 결정되기 때문에 포텐셜에 잘 나타나는 구속현상과 그 변화를 볼 수 있는 가장 적합한 강입자라고 여겨지고 있다. 실제로 Matsui와 Satz가 J/ψ 생성량 억제현상이 상대론적 중이온 충돌에서

Fig. 2. The interior structure of a neutron star. Kaons, hyperons and quarks, that would not be stable in usual vacuum, could exist in the core of the neutron star.

탈 구속 현상을 볼 수 있는 열쇠라고 지적한 이후 많은 실험들이 그 현상을 측정하였다. 그러나 기대와 달리 여러 가지 이유로 감쇄현상이 일어나고 구속 현상이 없어지더라도 쿨롱 힘으로만으로도 무거운 쿼크계가 존재할 수 있기 때문에 첫 예상과는 달리 결정적인 상전이 징후를 J/ψ 신호만으로는 찾지 못하고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 상전이 온도에서 무거운 쿼크계의 질량이 작지만 급격히 변하고 그와 관련된 전조 현상을 핵물질에서도 확인할 수 있다는 연구결과가 나오게 되었다.^[11] 또한 그 변화의 크기가 ψ' , χ_c 등의 강입자에 더 크게 나타나 이들을 모두 측정한다면 상전이 현상을 이해하는데 결정적인 단서를 찾을 수 있으리라 기대되고 있다. 특히 핵물질 속에서 탈구속현상의 전조현상으로 나타나는 작은 징후는 독일의 차세대 가속기 프로젝트 및 일본 J-PARC^[10] 등에서 반-양성자-무거운 핵 충돌 실험을 통해 무거운 쿼크계를 핵 속에서 생성시킴으로써 확인할 수 있다.

Λ_c/D 비의 증가: 본 특집의 첫 번째 글의 QCD 상태도에서 보았듯이 쿼크-글루온 플라스마는 온도와 밀도에 따라 그 성질이 약간 변하리라 예상된다. 따라서 각 상태의 특성을 잘 파악하면 상대론적 중이온 충돌 후 그 상태를 거치면서 나오는 특별한 신호를 포착할 수 있을 것이다. 그 상태의 공통적인 특성 중 하나가 이중 쿼크이다. 그중에서도 특히 color, flavor, spin이 모두 반대칭(anti symmetric)한 쌍이 가장 안정적이어서

REFERENCES

- [10] <http://www-conf.kek.jp/hadron1/hehp-th10/>.
- [11] K. Morita and S. H. Lee, Phys. Rev. Lett. **100**, 022301 (2008).

많은 양이 존재할 것으로 예상되고, 심지어 온도가 낮을 때는 Bose Einstein 응축(condensate)을 이룰 가능성이 있는 것으로 예상된다. 이러한 (ud)¹⁾ 이중 쿼크는 바로 Λ_c (udc로 이루어진 핵자)의 (ud) 상태이기도 하기 때문에 상대론적 중이온 충돌에서 쿼크 글루온 플라즈마를 이룬다면 이후 식는 과정에서 Λ_c 가 많이 만들어지리라 예상할 수 있다. 이러한 증가는 (ud) 쌍을 갖고 있지 않고 무거운 쿼크 c만을 갖고 있는 중간자 D와 생성 비를 비교한다면 곧바로 나타나리라 예상된다. 특히 RHIC 실험이나 앞으로 진행될 LHC 중이온 실험에서 Λ_c 와 D 입자를 모두 측정할 계획이어서 그 비를 통한 쿼크 글루온 플라즈마 확인은 아주 유망한 신호가 되리라 기대된다.^[12]

중성자별 관련 중이온물리와 천체물리

지상의 실험실에서 이루어지고 있는 중이온 실험과 중성자별 및 블랙홀을 연구하는 천체물리는 연구 대상의 크기 및 성질이 다른 것이 사실이다. 중이온 실험은 원하는 방식으로 실험을 설계할 수 있지만, 천체물리는 우주에서 오는 신호를 기다려야 한다는 점에서 근본적인 차이가 있다. 또한, 지상의 실험실에서 이루어지는 실험을 통하여 얻을 수 있는 고밀도 물질은 아주 짧은 시간만 존재가 가능한 반면, 중성자별 내부에 존재하는 고밀도 물질은 아주 긴 시간 동안 존재가 가능하다. 하지만, 이러한 차이에도 불구하고, 중이온 실험과 중성자별은 고밀도 상태의 구현이라는 공통점을 가지고 있다. 따라서 중성자별은 중이온 실험의 일부 결과를 검증할 수 있는 아주 중요한 천체이다. 중성자별에 관한 국내 연구진의 노력은 중성자별 내부 구조에 관한 물리학적 접근 방법과 중성자별 외부의 관측 현상과 관련된 천체물리학적 접근 방법 두 가지로 나누어진다.

중성자별 내부 구조와 관련된 국내 연구진의 노력: 중성자별은 중성자뿐 아니라 양성자 및 전자로 구성되어 있다. 이는 중성자가 같은 상태에 두 입자가 존재할 수 없는 페르미온이므로, 중성자로 구성된 별보다 중성자뿐 아니라 양성자와 전자가 동시에 존재하는 별이 훨씬 안정하기 때문이다. 하지만 중성자별 중심부는 밀도의 증가로 중성자 및 양성자와 같은 핵자뿐 아니라 기묘(strange) 쿼크를 가진 새로운 입자가 존재할 것으로 예측된다. 국내 연구진에 의해 연구된 대표적인 이론으로 케이온이 중성자별 중심부에 형성되는 ‘케이온 응축(Kaon Condensation)’을 들 수 있다.^[6,13,14] 이 이론에 의하면 케이온 입자를 생성하는 데 필요한 에너지는 밀도가 증가함에 따라 감소하게 되는 반면, 전자를 생성하는 데 필요한 에너지는 밀도가 증가함에 따라 증가하게 된다. 특정한 밀도에서 케이온과 전자를 생성하는 데 필요한

에너지가 같아지게 되는데 이 밀도를 임계밀도라고 한다. 임계 밀도보다 높은 밀도에서는 전자를 생성하는 것보다 케이온 입자를 생성하는 것이 더 에너지가 적게 들어서 케이온이 만들어지게 된다. 이를 ‘케이온 응축’이라고 한다. 임계밀도를 결정하기 위해서는 고밀도 물질에서 중성자와 양성자를 생성하는 데 필요한 에너지 차이를 이해하는 것이 필수적이다. 이를 핵자의 ‘대칭 에너지’로 부른다. 케이온 응축 결과 중성자별이 안정적으로 존재할 수 있는 최대 질량이 기존의 이론보다 감소하여 태양질량의 1.5배 정도로 감소하게 된다. 이를 관측을 통하여 확인하려는 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다.

위에 설명한 케이온 입자의 성질 변화는 중이온 실험에서 케이온 입자의 형성에 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다. 또한 핵자의 대칭에너지를 국내에서 건설이 추진 중인 중이온가속기를 이용하여 실험적으로 규명하려는 노력이 현재 진행되고 있다.

중성자별과 관련된 천체물리학에 대한 국내 연구진의 노력: 중성자별은 전기적으로는 중성이지만, 10^{57} 개 이상의 핵자로 구성된 거대한 핵에 비유될 수 있으므로, 중성자별-중성자별의 충돌은 ‘우주에서 일어나고 있는 중이온 충돌’이라고 불린다. 아래에 중성자별의 충돌을 통하여 고밀도 상태에서의 핵자의 성질을 밝히려는 국내연구진의 노력을 소개하고자 한다.

중성자별의 최대 질량 감소는 중성자별 자체의 관측뿐 아니라, 중성자별-중성자별 쌍성계의 충돌 또는 중성자별-블랙홀 쌍성계의 충돌에서 발생하는 중력과 검출 결과에 결정적인 역할을 한다. 태양질량의 1.5배 이상의 질량을 가진 중성자별은, 기존 이론에 의하면 안정적으로 존재할 수 있지만, 케이온 응축 이론에 의하면 블랙홀로 존재할 수밖에 없다. 결과적으로 케이온 응축 이론은 질량이 작은 블랙홀이 많이 존재할 수 있음을 보여주고 있다. 이 이론을 바탕으로 중성자별-중성자별 쌍성계보다 중성자별-블랙홀 쌍성계가 훨씬 많이 존재한다는 이론이 국내 연구진이 주도적으로 수행한 국제 공동연구에 의해 제기가 되었다.^[13-15] 이는 현재 중력과 검출 국제 공동연구그룹인 LIGO(Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)에서 2014년 이후 가동 예정인 Advanced LIGO에서 관측이 가능할 것으로 기대된다. 기존의 Advanced LIGO 중력과 예상 관측빈도는 현재까지 관측된 중성자별-중성자별 쌍성계의 정보를 근거로 하고 있으므로, 중성자별-블랙홀 쌍성계의 관측이 상대적으로 어려운

REFERENCES

- [12] S. H. Lee, K. Ohnishi, S. Yasui, I.-K. Yoo and C. M. Ko, Phys. Rev. Lett. **100**, 222301 (2008).
- [13] G. E. Brown, C.-H. Lee and M. Rho, Phys. Rev. Lett. **101**, 091101 (2008).
- [14] G. E. Brown, C.-H. Lee and M. Rho, Phys. Rept. **462**, 1 (2008).
- [15] C.-H. Lee, H.-J. Park and G. E. Brown, Astrophysical Journal **670**, 741 (2007).

1) u(위) 쿼크와 d(아래) 쿼크가 모여 이론 이중 쿼크.

점을 감안하면, Advanced LIGO에서 관측 가능한 중력과 관측 빈도는 크게 늘어날 것으로 기대된다.^[14,15] 또한, 중력과 검출을 통하여 중성자별의 내부 구조에 관한 정보를 얻을 수 있는 이론적 가능성에 대한 연구가 진행 중에 있다.

중성자별과 관련된 최근의 관측은 거대 전파망원경 또는 위성탐재 엑스선 망원경과 같은 첨단장비를 필요로 하고 있으므로 국내에서 독자적으로 연구를 수행하기 어렵다. 따라서 국제적인 공동 연구를 통하여 이루어지고 있는 것이 현실이다. 하지만, 국내 연구진이 주도적으로 수행한 케이온 응축에 의한 중성자별의 내부 구조 변화가 국제적인 공동 연구를 통하여 밝혀질 수 있기를 희망한다.

AdS/QCD 관련 한국아이디어

중이온 물리학 연구에 필요 불가결한 요소 중의 하나는 강하게 상호작용하는 계에 관한 정밀한 이해이다. 이러한 강하게 상호작용하는 계의 연구에서는 기존의 섭동론적 방법의 사용은 상당히 제한적이며, 체계적이고 해석적인 비섭동론적 방법은 아직 개발되지 않았다.

하지만 최근에 $d+1$ 차원 anti-de Sitter (AdS_{d+1}) 공간 위의 중력이론과 강하게 상호작용하는 평평한 d 차원 등각장론 사이의 대응성(AdS_{d+1}/CFT_d correspondence)에 근거하여 강하게 상호작용하는 QCD를 약하게 상호작용하는 5차원 중력이론을 통해서 접근하는 방법이 활발하게 연구되어지고 있다. 이 대응성은 또한 좀 더 일반적으로 게이지이론과 중력이론 사이의 대응성(gauge/gravity correspondence)으로 확장되어 사용되어지고 있다. 이러한 대응성을 이용하여 양자색역학을 이해하려는 방법을 일반적으로 AdS/QCD 또는 홀로그래픽(holographic) QCD라 한다. 홀로그래픽 QCD는 접근 방식에 따라 양자색역학으로부터 출발해서 5차원 중력모형을 AdS 배경에서 구성하는 bottom-up 모형과 D-brane 배열을 기반으로 해서 양자색역학을 연구하는 top-down 모형으로 나누어진다. AdS/QCD 분야에서 국내 연구진의 연구 활동에 관해서 상대론적 중이온 충돌 연구와 관련된 연구를 위주로 소개하고자 한다.

AdS/QCD 분야는 대략 2005년부터 시작되었다고 볼 수 있는데, 이미 그때부터 국내 연구진은 중요한 결과들을 학계에 보고하기 시작했다. 예를 들면, 상대론적 중이온 충돌 후 생성되는 쿼크-글루온 플라즈마 상태 연구에 중요한 단서를 제공하는 제트 소멸 현상에 관한 AdS/CFT 대응성을 이용한 중력이론이 국내 연구진과 해외 연구진의 공동 연구를 통해 세계 최초로 2004년도에 발표가 되었다.^[16]

쿼크-글루온 플라즈마 상태 연구에 있어서 중요한 물리량 중의 하나인 무거운 벡터 중간자의, 예를 들면 랩시입자

(charmonium), 유한 온도에서의 성질에 관한 AdS/QCD를 이용한 연구도 국내 연구진에 의해서 주도적으로 이루어졌으며 또한 계속 되고 있다. 기존에 제안된 AdS/QCD 모형을 무거운 중간자를 기술할 수 있게 확장한 뒤 AdS_5 블랙홀 배경에서 고전적인 중력이론을 통해서 무거운 중간자의 질량이 구속상태에서 탈구속 상태로의 상전이가 일어나는 임계온도에서 급격히 작아지고, 이후 유한온도의 효과에 의해 다시 질량이 조금씩 증가한다는 예측을 내놓았다.^[17] 이러한 예측은 QCD sum rule 계산과 임계온도 근처에서는 일치함이 밝혀졌다.^[11] 좀 더 일반적이고 변형된 AdS 배경에서의 연구가 뒤를 따랐고, 예측된 결과에 대한 이론적인 검증이 진행 중이다.

구속 상태에서 탈구속 상태로의 상전이는 중력이론에서 Hawking-Page 전이로 설명할 수 있다. 이는 중력이론에서 열적 AdS 배경에서 AdS 블랙홀 배경으로의 전이가 QCD의 구속 상태에서 탈구속 상태로의 상전이에 대응한다는 것에 기초한다. AdS 배경에서 중력 작용량(gravity action)뿐만 아니라 중간자 작용량(meson action)을 고려함으로써 임계온도가 쿼크 맛깔(flavor) 개수, 쿼크의 질량, 핵자 밀도에 따라 어떻게 변화하는지에 관한 연구가 국내 연구진에 의해서 이루어졌다.^[18] 또한 최근에는 바리온 화학포텐셜뿐만 아니라 아이소스핀 또는 기묘도(strangeness) 화학 포텐셜이 있는 경우 핵물질에 대한 연구도 국내 연구진이 선도적으로 수행하고 있다. 이러한 연구를 통해서 핵물질에서 하이퍼온 물질로의 상전이가 일어남을 보였고, 파울리 배타 원리와 비슷한 효과가 D-brane 모형에서도 구현됨을 볼 수 있었다.^[19] 이러한 일련의 연구는 QCD 상태도를 이해하는 데 기여할 것으로 기대된다.

맺음말

한국 연구자들은 쿼크-글루온 플라즈마 연구가 시작된 초기부터 중요한 공헌을 하기 시작하였다. 전 세계적으로 상대론적 중이온 충돌실험이 진행되고 있지만, 아직까지도 결정적인 상전이 징후는 포착하지 못한 상황이다. 이러한 시점에서 한국 아이디어를 일부 소개하였는데 이러한 한국 아이디어와 또한 앞으로 나올 새로운 한국 아이디어가 실제로 거대 실험에서 확인되어 쿼크-글루온 플라즈마를 확인하는 결정적인 역할을 하게 되기를 기대한다.

REFERENCES

- [16] S.-J. Sin and I. Zahed, Phys. Lett. B **608**, 265 (2005).
- [17] Y. Kim, J.-P. Lee and S. H. Lee, Phys. Rev. D **75**, 114008 (2007).
- [18] Y. Kim, B.-H. Lee, S. Nam, C. Park and S.-J. Sin, Phys. Rev. D **76**, 086003 (2007).
- [19] Y. Kim, Y. Seo and S.-J. Sin, e-Print: arXiv:0911.3685 [hep-th].