원자핵 물리학의 전망과 미래

DOI: 10.3938/PhiT.23.016

공국진·유병길

Perspective and Future of Nuclear Physics

Kook Jin KONG and Byung Geel YU

We present a brief survey of nuclear physics starting from human interest in the search for the extremes of matter and finally opening the human eye to an understanding of the universe. We introduce the rare isotope accelerator called RAON in our country, which is planned to unravel the unknown territory of the nuclear chart. We give our expectations for its role not only in science but also in the technology for our future life. We expect nuclear physics and its applications to provide a better solution to the problem of energy production in the future.

보통 ‘핵물리’하면 많은 사람들이 제일 먼저 떠올리는 것은 아마 2차 세계대전을 종식시킨 일본에 떨어진 원자폭탄일 것이다. 그리고 여기서 더 나아가 미국과 구소련의 군비경쟁이 만들어낸 수많은 핵무기들을 떠올리며 인류에게 드리워진 죽음의 그림자를 연상할지도 모르겠다. 이처럼 핵물리학에는 ‘대량학살’ 또는 ‘인류의 마지막 날’이라는 등의 부정적인 어감들이 짙게 배어있지만, 현재 추진되고 있는 핵물리학의 연구 주제를 설명하여 일반인들이 갖고 있는 이러한 오해들을 불식시키고 더 나아가 미래를 꿈꾸는 젊은 학생들에게 핵물리학에 한번 도전해 보고 싶은 호기심을 불러일으키기 위하여 이 글을 작성하였다.

저자약력

공국진 연구원은 연세대학교 물리학과에서 핵물리학 이론으로 박사과정을 수료하고 학술연구 및 과학저술과 편저에 종사하였으며, 2013년부터 현재까지 한국항공대학교 기초학문 연구소 핵물리 연구원으로 재직하고 있다. (kong@kau.ac.kr)

유병길 교수는 연세대학교 물리학과에서 핵물리학 이론을 전공한 이학박사로 1993년부터 2014년 현재까지 한국항공대학교 인문자연학부 교수로 재직하고 있다. (bgyu@kau.ac.kr)

한 여름 어느 날 바닷가나 깊은 산에 캠핑을 가서 모닥불 주위에 둘러 앉아있다고 상상해보자. 문득 타오르는 모닥불에서 고개를 들어 캄캄한 밤하늘을 쳐다본다면 이제껏 본 적이 없는 무수한 별들이 우리의 눈에 들어 올 것이다. 말할 수 없는 경이로움이 밀려오며 우리는 어디서 왔는가? 저 깊고 넓은 우주 어디에 있으며 어디로 가고 있는가? 저 많은 별들은 어떻게 해서 존재하는가? 끊임없는 질문이 가슴 속에서 일어날 것이다. 어느덧 당신은 핵물리학자의 길에 들어선 것이다. 자, 이제부터 핵물리학을 탐험하는 여행을 시작해 보자.

핵물리학, 물질의 궁극에 도달하다

물질의 본질은 무엇인가? 그들은 한없이 쪼갤 수 있는가? 아니면 더 이상 쪼갤 수 없는 알갱이로 구성되어 있는가? 알갱이가 있다면 그것은 하나일까 아니면, 여러 가지일까? 쪼개 데 없이 무얼 그리 따지느냐고 반문하는 사람도 있겠지만, 인간의 지적 호기심은 식욕이나 성욕을 능가하는 인간만이 가지고 있는 또 하나의 본능이다. 우리 인류를 지금에 이르기까지 발전시킨 원동력 중 하나일 것이다. 이천 년이 넘는 탐구 끝에 인간의 지성은 18~19세기에 이르러 옹스트롬(10^{-8} cm) 크기의 원자 세계를 발견하였고, 20세기에 들어와서는 원자에 비해 훨씬 극미한 세계를 구성하고 있는 페르미(10^{-13} cm) 크기의 원자핵을 발견하기에 이르렀다.

원자핵 물리학은 20세기 중반에 세계의 지식을 선도하는 가장 흥미로운 주제거리였으며 핵의 세계가 생각처럼 단순한 것이 아니라 매우 복잡하다는 것이 드러나기 시작했다. 1940년대의 지식에 의하면 핵은 기본적으로 핵자라고 불리는 양성자(proton), 중성자(neutron)와 중간자라고 불리는 파이(pi) 입자로 구성되어 있음이 밝혀졌다. 이 세 입자를 하드론(hadron)이라 부른다.

그러나 시간이 흐르면서 하드론의 종류는 위에서 언급한 3개만 있는 것이 아니라, 점점 늘어나 현재에 와서는 매우 두꺼운 책 한권이 될 정도로 종류가 늘어났다. 핵을 구성하는 기본 조성물이 이렇게 많다는 것을 알고 사람들은 그들이 궁극의 입자일 것이라는 사실에 짙은 회의를 품게 되었다.

이런 의심에서 출발하여, 1964년 Murray Gell-Mann과 George Zweig은 하드론이 더욱 작은 입자로 구성되어 있다는 가설을 발표하였으며, 그 입자를 쿼크(quark)라고 명명하였다. 현재까지 6종류의 쿼크가 존재함이 실험적으로 밝혀지면서 쿼크 모델은 가정의 수준을 넘어서 표준 이론으로 대접을 받고 있는 중이다. 여기서 한 걸음 더 나아가 1974년에 Gell-Mann은 Harald Fritzsch, Heinrich Leutwyler과 함께 쿼크 모델을 더욱 발전시켜 쿼크들 사이의 상호작용을 도입한다. 그들은 Yang Mill의 게이지 이론(gauge theory)에서 힌트를 얻어 “쿼크가 글루온(gluon)을 주고받으며 상호작용하여 하드론이 된다”는 이론(양자색역학, QCD)을 제시하였다.

그러나 QCD를 직접 이용하여 하드론의 여러 반응들을 연구함에는 “쿼크 갇힘(quark confinement)”이라는 문제가 가로막고 있어서 매우 어렵기 때문에, 현재 이를 우회하는 여러 가지 방식들이 사용되고 있다. 요즘 각광받는 방식은 섭동론적 QCD, Lattice QCD 그리고 모델에 무관하게 계산하는 QCD sum rule 등이 있다.

현재까지 연구된 바에 따르면, 에너지가 낮은 영역(~ 2 GeV)에서는 하드론은 쿼크로 묘사하는 것보다 기존의 하드론 모형만 사용해도 충분하다. 이 영역을 하드론 영역이라 부른다. 그러나 고에너지 영역으로 가면(10 GeV 이상, QCD 영역) 쿼크 효과가 보이기 시작하여 하드론에 기초한 모델보다는 QCD에 기초한 모델들이 힘을 얻는다. 그리고 그 둘 사이의 중간 영역(혼합 영역)에서는 쿼크와 하드론 자유도가 서로 섞여있어서, 어떤 방식으로 접근해야 하는지 아직 확실한 모델이 존재하지 않는다.

이러한 때에 고무적인 소식으로 미국의 Jefferson 연구소에서는 빔의 에너지를 12 GeV로 높이는 작업을 진행하고 있다는 점이다. 이제 그 동안 많은 핵물리학자들에게 궁금했던 중간 영역에서 하드론이 어떤 형식으로 상호작용을 하는지 밝힐 수 있는 문이 열리기 시작한 것이다. 그들이 진정 QCD가 예측한 대로 움직이는지 아니면 새로운 이론이 필요한지 검증할 수 있는 시점에 우리는 와 있는 것이다. 앞으로 핵물리학을 시작하는 물리학도에게는 매우 고무적인 시대가 될 것이다.

우리 주변에 존재하는 물질은 어디서 온 것인가

우리 주변을 이루는 많은 물질들은 기본적으로 92종의 원소들로 이루어져있다. 이 원소들이 어떻게 생겨난 것인지 당신은 의문을 품었던 적이 있는가? 만일 없다면, 이제부터 그런 의문을 갖고 주변을 살펴보기 바란다. 주위의 많은 물질들은 영원한 과거부터 존재했던 것이 아니라, 먼 과거의 어느 순간에 만들어졌을지도 모른다.

핵물리학에 따르면, 이러한 물질의 기원은 각 원소의 핵이 어떻게 만들어졌는가 하는 문제와 직결되어 있다. 현재까지 밝혀진 바에 의하면 철(Fe) 원소가 중요한 분기점이 된다. 철보다 가벼운 원소들은 양성자들의 핵융합 반응을 통하여 만들어

Fig. 1. Nuclear chart with proton and neutron drip lines. Region between radioactive nuclides and neutron drip line is called terra incognita where knowledges of nuclides are less known up to present. It is one of the region that RAON accelerator are planned to investigate. (taken from Michigan State Univ./National superconducting cyclotron lab.)

지고 철보다 무거운 원소들은 핵분열과정 즉 우라늄이 먼저 만들어지고 여기서부터 분열하여 만들어져야 한다.

조금 더 자세하게 말하면 철보다 작은 원소들은 태양과 같은 항성의 내부에서 만들어진다. 항성의 내부에서 핵융합 사이클이 돌아가면서 수소가 헬륨이 되고 차례로 철까지 원소들이 형성되는 것이다. 따라서 핵반응 연료를 소진하여 거의 꺼져가는 별의 내부에는 철 원소가 중심부분에 농축되어 있을 것이다.

그러면 철보다 큰 원소들은 어떻게 만들어진 것인가? 이것은 우라늄이 어떻게 만들어졌는가 하는 질문과 관련되어 있다. 대략적인 설명에 의하면 철보다 무거운 원소들은 초신성의 폭발에 의하여 형성된다고 믿고 있다. 현재까지 알려진 시나리오에 따르면, 별이 폭발할 때 쏟아져 나오는 중성자를 주위의 철 원소들이 흡수하여 매우 질량수가 큰 동위원소가 되고 이 동위원소가 베타붕괴와 알파붕괴를 통하여 자연에 존재하는 원소들을 만들어 낸다는 것이다. 내 몸을 이루고 있던 많은 원소들이 초신성의 폭발에 의해 생겼다니! 그렇다면 우리 몸은 과거 수도 없이 많은 별들 속에 존재하다 이제 서로 만나 나의 몸을 이룬 것이 아닌가! 내 몸속에 존재하는 엄청난 우주적인 인연을 깨닫는다면 여러분은 황홀한 경이감에 사로잡힐 것이다.

그러나 위의 시나리오를 제대로 이해하려면 “드립 라인(Drip Line)”이라는 개념을 먼저 이해할 필요가 있다. 어떤 원자핵에 중성자를 하나씩 증가시켜 가다가 중성자 수가 어느 특정한 수 이상이 되면 그 핵은 더 이상 원자핵을 이루지 않게 되는 순간이 온다. 이때의 중성자 수를 원자번호에 따라 죽 그려놓은 선을 드립라인이라고 하는데, 현재 질량수가 작은 가벼운 원자핵에 대해서는 이것이 알려져 있지만 무거운 핵에 대해서는 이론적인 예측과 실험 사이에 괴리가 큰 상태이다.

Fig. 2. Map of RISP with RAON accelerator. (taken from RISP home-page)

요즘 이를 밝히기 위하여 과학 선진국이라는 미국, 유럽, 일본에서는 중이온 가속기를 건설 중에 있으며, 우리나라에서도 2009년부터 핵물리학자들의 건의에 의해 정부의 주도하에 RISP(Rare Isotope Science Project)로 명명된 거대한 프로젝트가 진행 중이다. 이 프로젝트는 무거운 원자핵을 가속시켜 드립 라인 근방의 희귀 동위원소를 얻어, 그들의 성질을 연구하려는 야심찬 프로젝트이다. 아직 선진국에서도 막 시작하는 단계에 있으므로, 그야말로 한국의 핵물리학이 세계를 선도할 수 있는 좋은 기회가 지금 열리고 있는 중이다. 드립 라인 근처에 존재하는 희귀 동위원소에 대한 연구는 예전의 핵물리학이 누렸던 새로운 노벨상의 전성기를 다시 열어줄 것이 확실하다. 우리의 후배들이 세계적인 수준의 가속기 센터에서 연구하며 노벨상도 수상하게 되는 그 날이 올 수 있기를 기대한다.

더 나아가서 중이온 빔이 만들어 내는 고밀도에서 핵물질이 갖는 특성은 현재 우리가 알고 있는 우주에 대해서 지식의 새로운 지평을 열어줄 가능성이 높다. 현재까지 자연계에는 중력, 전자기력, 강력, 약력이라는 4가지 힘이 발견되었다. 이들 중에서 핵물리학의 주된 대상은 강력과 약력이며, 이들에 대한 연구는 빅뱅 초기의 우주에 대한 이해와 그 이후에 진행되는 은하와 별의 탄생 과정 등에 중요한 역할을 한다. 지금까지 주로 QCD와 대통일 이론(GUT)으로 알려진 통합 이론에 기초하여 이론적으로 우주를 이해했을 뿐이지만 이제는 그러한 이론들이 타당공론인지 아닌지를 실험을 통하여 검증할 수 있는 시대가 다가오고 있는 것이다.

게다가 이 가속기는 새로운 미래를 열어줄 것이다. 새로 발견된 희귀 동위원소들을 통하여 우리는 새로운 상태의 물질을 만들어 낼 수 있으며 이를 현실에 다양하게 응용할 수 있기 때문이다. 일례로 유럽 여러 나라와 일본에서는 중이온 가속기를 이용하여 암을 치료하는 장비를 개발하여 사용하고 있는 중이다. 이 장비는 몸속 깊이 숨어 있는 암세포만을 표적으로

삼아 공격하기 때문에 부작용이 작아서 암의 완치율을 높이는 데 일조하고 있다. 인류의 적으로 알려진 암을 극복하는 날도 이제 얼마 남지 않을 것 같다. 몇 년 안에 “암은 사형선고와 같다”는 암에 대한 인식을 핵물리학이 바꾸어 줄지도 모른다.

빅뱅, 중성자별 그리고 감마선폭발 천체들

밤하늘의 별은 우리에게 무한한 상상력을 자극한다. 그들이 신화와 상상의 세계에서 과학의 세계로 내려온 것은 불과 100년 이 넘지 않을 정도로 최근의 일이다. 물리학과 천문학이 발전하면서 지구를 중심으로 하늘에는 별들의 세계가 있다는 소박한 우주에서 벗어나, 빅뱅이라는 엄청난 폭발을 통하여 우주가 만들어졌으며, 우주는 지금도 팽창 중이라는 여러 가지 증거들이 발견되었다. 이 우주가 먼 미래의 어느 날 팽창을 멈추고 다시 수축할지 아니면 영원히 팽창할 것인지? 사실, 이런 의문은 핵물리학보다는 중력의 본질을 이해하는 것과 더욱 관련되어 있다. 그러나 빅뱅의 초기에 우주가 식으면서 중력이 갈라져 나간 후부터는, 핵물리학이 그러한 질문을 이어 받는다. 이때 우주는 초고온과 초밀도 상태, 전문적 용어로 표현하면, 쿼크 글루온 플라스마(Quark Gluon Plasma, QGP) 상태에 존재하고 있다. 이러한 초기 우주의 상태는 고에너지 중이온 가속기를 통하여 그 실마리가 조금씩 밝혀지고 있는 중이다. 현재 금 원자의 핵을 가속하여 충돌시킨 결과 얻어진 물질은 마치 거의 완벽한 완전 액체(perfect liquid)처럼 팽창한다는 것이 밝혀졌으며, 그 외에도 제트 소멸(jet quenching)이라 불리는 흥미로운 현상도 관측되었다. 이것들은 앞으로 십 년 이상 고속의 중이온 가속기를 통하여 연구할 매우 흥미로운 연구 주제 중 하나이다. 우주가 더욱 팽창하면서 은하계가 생기고 각각의 별 내부에서 핵융합 반응이 일어나기 시작하면 그 별은 찬란한 빛을 방출하기 시작할 것이다. 그리고 내부에 존재하는 연료를 소모한 별들은 하나씩 죽음의 길로 들어 설 것이다. 가벼운 별들은 다시 수축하며 서서히 식어갈 것이고, 조금 무거운 별은 초신성(supernova)이라는 엄청난 폭발을 하며 서서히 죽어갈 것이다. 초신성의 잔해는 블랙홀(black hole)이나 중성자 별(neutron star)이라는 불가사의한 천체로 변한다. 이러한 별들의 일생을 결정짓는 중요한 요소의 하나가 바로 핵물리학의 주제인 강한 힘과 약한 힘이다. 최근에 핵물리학자들이 머리를 맞대고 연구하고 있는 주제 중 하나가 바로 중성자 별이다. 그 별의 내부에서 일어나는 핵반응과 중력과의 상호작용이야말로 미래 물리학의 핵심 주제가 될 것이다.

더 나아가서 하늘에는 우리가 아직 알지 못하는 많은 별들이 존재한다. 그중의 하나가 감마선 폭발(Gamma Ray Burst, GRB)천체이다. 이 별은 눈에 보이는 가시광선 대신 보이지 않는 감마선을 방출하는 천체이다. 그것도 아주 짧은 순간에 은

Fig. 3. An illustration of black hole, Cygnus X-1, pulling material from a blue companion star in the right. (taken from NASA)

하게 전체가 방출하는 규모와 같은 엄청난 에너지를 방출하고 사라지는 것이다. 현재 이 별에 대하여 많은 연구가 진행되고 있지만 아직 표준 이론은 확립되지 않았다. 게다가 현재 우리가 알고 있는 핵물리학의 지식 역시 발전 중이므로 지금까지 논의했던 시나리오도 끊임없이 수정 향상될 것이다. 지금 필요한 것은 미래의 핵물리학도가 될 여러분의 열정일 것이다.

인류의 에너지문제

19세기 중반에 영국의 물리학자 패러데이에 의하여 전기를 발전하는 원리가 밝혀지면서 인류는 전기시대라는 새로운 문명을 열 수 있었으며, 20세기 후반에 원자력 발전소를 건설하면서 인류는 에너지 위기를 극복할 수 있다는 환상을 갖기 시작하였다. 그러나 구소련에서 발생한 체르노빌 사고와 일본의 후쿠시마에 발생한 쓰나미는 우리가 가졌던 핵에너지에 대한 환상에 먹구름을 짙게 드리웠다.

우리는 요즘 에너지 소비량이 늘어나면서 핵폭탄의 위협에 버금가는 새로운 위기에 직면하고 있다. 지구에 존재하는 그 어떤 천연자원도 지금과 같은 속도로 에너지를 소비한다면 곧 고갈되고 말 것이 분명하다. 태양 에너지, 조력, 풍력 등을 이용하는 에너지도 효율적이긴 하지만 근본적으로 문제를 해결해 주지는 못한다는 것은 너무나 자명하다.

그러나 아직 포기하기에는 이르다. 인류가 아직 시도하지 못한 에너지가 우리를 기다리고 있다. 바로 핵물리학자들에 의해서 연구가 진행되고 있는 핵융합로를 이용한 방법이다. 핵융합로는 현재 만들어진 원자력 발전소에 비해 방사능이 적은 매우 깨끗한 에너지로 유명하다. 게다가 이때에 발생하는 에너지 역시 우리들을 이용한 경우에 비해 훨씬 강력한 에너지를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 한 가지 더 언급한다면, 우리들은

얻기 매우 어려운데 비해 핵융합로의 경우에는 우리 주변에 흔하디흔한 바닷물을 이용한다는 점을 들 수 있다. 이 방법이 성공하기만 하면 인류는 바다 속에 존재하는 수소를 이용하여 거의 무한에 가까운 에너지를 얻을 수 있을 것이다.

그러나 핵융합로 건설에는 극복해야 하는 문제가 많이 있다. 먼저 핵융합을 위해서는 양성자와 양성자의 반발력을 이겨내는 매우 빠른 운동 에너지가 필요하다. 다시 말해 높은 온도가 필요하다. 대략 1억 도 이상의 고온이 필요하다. 그리고 핵융합로를 가동시키기 위해서는 이런 온도를 높은 밀도로 일정 시간 유지해야 할 필요가 있다. 1억 도를 어떻게 만들며, 게다가 그런 고온에서 건디는 물질이 과연 존재할까? 이 엄청난 의문 앞에 많은 사람들이 고개를 흔들었지만, 이 문제는 1950년대 구소련의 핵물리학자 안드레이 사하로프와 그의 스승인 이고르 탐에 의해 해결되었다. “토카막”이라 불리는 그들이 설계한 핵융합로는, 강력한 자기장을 걸어 플라스마 상태의 물질을 진공 속에 가두어서 고온으로 가속시키는 장치이다.

토카막이 나오면서 인류는 새로운 꿈을 꾸기 시작했다. 그 당시 전문가들은 앞으로 30년 안에 핵융합로가 건설되어 에너지 문제를 깨끗하게 해결할 것이라고 장담하기도 했다. 그러나 토카막이 나온 지 60년가량이 지나 그들이 장담했던 기간의 2배가 지났지만 아직도 핵융합로 건설은 요원하기만 하다. 어떤 문제가 우리를 가로막고 있는지 궁금한 생각이 든다면, 여러분이 직접 연구에 뛰어들어 인류에게 새로운 희망을 심어주기를 기대해 본다.

현재 세계 각국이 이를 건설하기 위하여 막대한 돈을 투자하고 있으며, 우리나라에서도 국가핵융합연구소(NFRI)를 중심으로 핵융합로를 연구하고 있는 중이다. 국가 핵융합연구소는 미래의 핵물리학도 여러분을 환영한다.

맺음말

사실 핵물리학은 인류를 궁극의 극소한 세계와 우주라는 극대를 바라볼 수 있도록 이끌어 주었지만 이에 반해 적지 않은 누를 끼친 것도 사실이다. 그러나 원자폭탄을 만든 오펜하이머는 수소폭탄의 개발에 반대하며 그동안 쌓아올렸던 자신의 모든 명성과 부를 모두 포기하였다. 그리고 수소폭탄을 개발했던 소련의 물리학자 안드레이 사하로프는 수소폭탄을 평화적으로 이용하는 토카막이라는 장비를 설계하여 발표하였으며, 후루시초프의 수소폭탄 실험에 반대하며 이를 서방세계에 알렸다. 그는 결국 시베리아에 유형을 가서 인생의 말년을 비참하게 보내는 길을 기꺼이 선택하였다. 이들의 이러한 노력을 통하여 핵물리학은 지금까지 매우 건전한 길을 걸어가고 있으며, 우주와 별들의 미래를 예측하고 우리 주변에 존재하는 물질의 궁극과 그들이 어떻게 만들어졌는가 하는 매우 심오한 질문에 답하려고 노력하고 있다.