희귀동위원소 핵물리학

DOI: 10.3938/PhiT.28.003

Nuclear Physics for Rare Isotopes

Insik HAHN and Chang Ho HYUN

Supernova and neutron stars are phenomena observable in the Universe that happen at extreme environments. The highest temperature achieved in a supernova is believed to be more than 1,000 billion degrees, and the average density of a neutron star is estimated to be around two times the nuclear saturation density ($\sim 2.7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$). Supernovae are treated as birth places of elements heavier than iron as a result of diverse nuclear reactions. Nuclear reactions are closely related and are affected by nuclear structures, such as the ground state and the energy levels of the excited states of nuclei. We measure astrophysically important nuclear reactions relevant to novae, X-ray bursts, and supernovae by using rare isotopes. The extreme neutron-rich matter that is expected to be present in neutron stars is also studied. In this article, in the era of third-generation rare-isotope accelerators such as RAON, which is currently under construction in Korea, we present a research plan for investigating nuclear structures, nuclear reactions, and nuclear astrophysics by using rare isotopes.

우주에서 가장 극한의 관측대상을 꼽는다면 초신성과 중성자별을 들 수 있다. 초신성은 내부 반응이 절정에 이를 때, 최고 1조 도의 초고온에 이르고, 중성자별의 평균 밀도는 핵 평균밀

저자약력

한인식 교수는 UCLA에서 학사, 예일대학교에서 핵천체물리학으로 박사학위를 취득하였다. 이후 칼텍에서 박사후연구원, 일본 이화학연구소에서 RIKEN Fellow, 휴스턴대학교에서 연구교수를 거쳐 현재 이화여자대학교 과학교육과 및 물리학과 교수로 재직 중이다. (ishahn@ewha.ac.kr)

현창호 교수는 서울대학교 물리학과에서 이학사, 석사, 박사학위를 받고 성균관대학교에서 박사후연구원을 거쳐 2008년부터 대구대학교 물리교육과 교수로 재직 중이다.

한인식·현창호

도($\sim 2.7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$)의 두 배에 이르는데, 이와 같은 상태는 지구상에서 자연적으로 얻을 수 없다. 초신성은 무거운 원소의 주요 탄생지로 알려져 있는데, 초신성 내부에서 일어나는 복잡하고 다양한 핵반응으로부터 철보다 무거운 핵종이 만들어진다. 핵반응은 핵의 에너지 준위 분포 등과 밀접하므로 핵의 구조와 서로 떼어놓을 수 없는 관계이다. 핵천체물리와 핵물리의 상관관계를 규명하려면 희귀동위원소 빔을 이용하여 신성, X-선 버스터, 초신성 등에서 무거운 핵종이 만들어지는 주요 반응률을 측정하고 중성자별 내부에 존재할 것으로 짐작되는 특이한 핵물질의 특성을 알아내야 한다. 본 기고는 특히 현재 국내에서 건설 중인 제3세대 희귀동위원소 가속기 라온(RAON)을 활용하여 연구 가능한 희귀동위원소의 구조와 핵반응, 핵천체물리를 소개하고자 한다.

들어가는 글

저에너지 핵물리학은 핵이 어떻게 생겼는지, 핵과 핵이 느린 속력으로 서로 충돌하면 어떤 일이 일어나는지 연구한다. 이러한 연구를 핵구조와 핵반응 연구라고 부른다. 그리고 핵천체물리학은 저에너지 핵물리학에서 얻은 결과를 응용해서 별에서 일어나는 핵반응과 특정 핵의 구조 등이 어떻게 관련되어 있는지 연구하는 학문이다. 최근 첨단 가속기들이 이전에는 생성 불가능했던 희귀동위원소들을 인공적으로 생성하며, 핵천체물리학의 새로운 전성시대가 열렸다. 이 글에서는 먼저 희귀동위원소 빔을 이용한 핵천체물리와 핵구조 실험에 관해 설명하고 핵력, 핵구조와 관련된 이론 핵물리학의 주요 쟁점을 살펴볼 것이다.

원자핵은 양성자와 중성자가 매우 작은 공간에 강하고 조밀하게 결합하고 있는 상태다. 핵구조 물리학은 이 원자핵의 바닥 상태를 먼저 이해한 다음, 외부에서 에너지를 받아 들뜨는 과정과 들뜨 때 나타나는 여러 가지 공명 현상을 다룬다. 핵구조 물리학을 좀 더 쉽게 이해하기 위해 가장 간단한 수소 원자를 예로 들어보자.(주의: 수소원자와 원자핵은 본질적으로 다르다. 그 이유는 잠시 뒤에 설명하겠다.) 양자역학에서도 배우지만 수소 원자의 운동에너지와 쿨롱에너지로 이루어진 해밀토

니언을 이용하여 슈뢰딩거 방정식을 풀면 자기 양자수 m_l , 부양자수 l , 주양자수 n 을 얻고 수소 원자의 에너지 준위를 알 수 있다. 게다가 수소 원자 빛띠 역사 중 난제였던 비정상 제만 효과(anomalous Zeeman effect)가 스핀이라 부르는 물질을 기술하는 데 필요한 새로운 양자수를 탄생시켰다. 여기에 배타원리가 더해지면 수소원자는 껍질 구조를 가지게 되고 우리가 보는 물질계의 기본 원소를 형성한다.

수소 원자는 양성자 하나와 전자 하나가 정전기력으로 묶여 있는 가장 단순한 물리계이다. 그런데 수소 원자 안에 달랑 하나 들어있는 양성자와는 달리, 양성자와 중성자가 모여 있는 원자핵 안의 핵자(양성자와 중성자의 통칭)는 주변의 다른 핵자와 상호작용하며 스스로 묶여있는 상태(self-bound state)를 이루므로 수소 원자를 다룰 때 사용했던 방법을 그대로 원자핵을 설명하는 데 쓸 수는 없다. 더욱이 핵자는 강한 핵력으로 원자핵 안에 묶여있으므로 수소 원자처럼 단순한 정전기력만으로는 설명할 수 없고, 훨씬 더 복잡하고 다양한 항이 요구되는 핵력을 필요로 한다. 즉 원자핵을 기술하고 이해하는 것은 수소 원자를 다루는 것보다 훨씬 더 어려운 문제이다.

현재 국내에 희귀동위원소 가속기인 RAON이 건설 중이므로 실험핵물리학자들은 거기에 발맞춰 핵구조, 핵반응, 핵천체물리를 어떻게 연구할 것인지 준비하고 있다. 특히 핵천체물리학에서는 희귀동위원소 빔(또는 방사성 동위원소 빔)을 이용해 우주에서 무거운 핵종이 만들어지는 반응과정을 찾아내고, 실험실 내에서 중성자별 내부에 존재할 것으로 짐작되는 특이한 핵물질을 만들어 내고자 한다. 그리고 핵물질이 상전이하면서 중성자와 양성자의 비율이 변하는데, 이때 정상상태를 벗어난 영역에서 극한의 희귀 핵물질이 존재할 수 있다. 이러한 극한 희귀 핵물질을 이해하려면 쿼크 단위까지 이론을 확장하여야만 하므로 양자색소역학을 고려해야만 한다. 여기서 극한 희귀 핵물질이란 핵의 안정선(stability line)과 방울선(drip line) 사이에 존재하는 불안정한 방사성 동위원소를 의미한다. 최근 핵물리학자들은 이러한 불안정한 동위원소들이 서로 반응하며 무거운 원소가 어떻게 생성되는지, 그리고 초신성과 중성자별의 내부에 존재하는 특별한 핵물질의 특성이 어떤지 이해하기 위해 노력을 많이 기울이고 있다.

핵천체물리와 희귀동위원소 가속기

‘우리 주변에 있는 무거운 원소들은 별에서 만들어진다’라는 연구 결과로 노벨물리학상을 받은 윌리 파울러(Willy Fowler)는 핵천체물리학을 핵물리학의 중요한 연구분야로 만드는 데 크게 공헌하였다. 파울러는 이미 1980년대에 천체물리학에서 매우 중요하지만 이전에는 실험이 불가능하였던 핵반응들을 연

Fig. 1. Bird's eye view of the rare isotope accelerator called RAON, which is currently being built in Sindong, Daejeon City, South Korea.

구하기 위해 희귀동위원소 가속기가 필요하다고 주장하였다. 1990년대에 미국, 일본, 유럽에서 희귀동위원소 가속기를 이용하며 관련 핵물리학이 크게 활성화되며 새로운 연구결과가 많이 발표되었다. 일본의 이화학연구소(RIKEN)에서는 2008년부터 제3세대 희귀동위원소 가속기 시설인 RIBF(Radioactive Ion Beam Factory)를 운영하고 있으며, 현재 세계에서 가장 강력한 방사성 동위원소 빔을 제공하고 있다. 그러나 앞으로 4~5년 후에는 미국 미시간주립대학의 FRIB(Facility for Rare Isotope Beam)과 우리나라에 건설하고 있는 RAON에 그 자리를 내어줄 가능성이 높다(그림 1). RAON이 완공되면, 우리나라에서도 고강도 중이온가속기를 이용해 이전에 생성된 적이 없는 희귀동위원소 빔 충돌실험을 수행할 수 있게 된다. 핵의 존재 한계선 근처에서 일어나는 핵반응을 이용해서 무거운 핵의 생성과정을 밝혀내고, 최초로 중성자별 내부에 존재할지도 모르는 특이한 중성자 물질도 생성시킬 수 있다.

별의 진화와 밀접한 무거운 원소들은 천체에서 일어나는 다양한 핵합성 반응에서 만들어진다. 우주에는 핵융합과 관련된 흥미로운 천체 현상들이 많이 있는데, 대표적인 예로 X-선 버스터, 신성, 초신성 폭발 등을 들 수 있다. 그림 2는 핵도표에 CNO cycle, Hot CNO cycle, rp-process(빠른 양성자 포획과정), r-process(빠른 중성자 포획과정), s-process(느린 중성자 포획과정) 등과 같이 원소의 기원과 관련된 여러 핵합성 과정을 보여준다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 수많은 핵반응이 존재하지만 아직은 핵반응 단면적 실험 데이터가 매우 부족해 많은 핵합성 과정이 정확하게 규명되지 않았다. 다양한 핵합성 과정들은 모두 희귀동위원소들의 핵반응 또는 핵구조와 직접 연관되므로 이를 우주가 아닌 지상에서 관측하고 조사하기 위해서 희귀동위원소 가속기가 꼭 필요하다.

Fig. 2. Chart of nuclides showing several processes and the stellar sites where such processes may occur.^[1]

강한 핵력과 핵구조 모형

강한 핵력은 쿼크와 글루온의 강한 상호작용에서 온다고 여겨지지만, 아직 분명하게 알려지지 않았다. 역사적으로 핵자들 사이에 작용하는 강한 핵력은 중간자 교환을 통해 이해되기 시작했고, 그러한 관점은 21세기인 현재에도 여전히 유효하다. 중간자를 이용한 강한 핵력 모형의 한 보기로 Argonne v18 모형을 간략히 살펴보자.^[2] Argonne v18 모형에서 핵자 사이의 상호작용은 전자기력, 파이중간자 교환에서 오는 강한 핵력, 파이중간자보다 무거운 중간자의 교환에 의한 강한 핵력으로 구성되어 있다. 강한 핵력 부분에는 중심력 항, 궤도 각운동량 제공 항, 스핀 텐서 항, 스핀-궤도 결합 항, 스핀-궤도 결합 제공 항이 포함되어 있어서 모형 상수가 40개나 된다. 40개의 상수는 엄청난 수이지만 유가와 히데키 교수가 중간자 모형을 발표한 후 60여 년에 걸쳐 모형이 발전해왔다는 점을 생각하면 그리 놀랄 일도 아니다. 모형 상수는 대개 두 핵자의 산란 실험 자료를 맞추도록 결정되는데, 중간자 교환 모형은 중요한 개선이 더 이상 어려울 만큼 높은 정밀도로 개발된 상태이다. 두 핵자계를 포함한 소수 핵자계는 중간자 모형을 이용하여 정확하게 이해하고 있지만, 중간자 모형에는 중요한 문제점이 있다. 이 문제점을 크게 두 가지로 요약할 수 있는데, 첫째는 “중간자 교환 이론이 강한 상호작용의 근본 이론인 양자색소역학(QCD)과 어떻게 연결되는가?”라는 것과 둘째는 “모형 예측의 불확실성을 어떻게 추산하며 모형의 적용 가능 범위는 어떻게 결정할 수 있는가?”라는 것이다. 이에 대한 대답과 기존의 중간자 교환 모형의 대안으로서 저에너지 유효장 이론이 20여 년 전에 개발되었으며, 이후 현재까지 지속적으로 개선되며 정확성이 매우 높아졌다. 기존의 중간자 교환 모형과 비교해 볼 때 유효장이론은 섭동 이론을 바탕으로 모형을 전

개하는 규칙이 있으며, 모형의 적용 범위와 예측의 불확실성을 정량적으로 제시할 수 있다는 점에서 핵물리학을 탄탄하게 재정립하였고 할 수 있다. 유효장이론의 또 다른 중요한 의미는 예측의 정량화라는 화두를 핵구조 물리학에도 제시하고 쟁점화한 것이다.

원자핵은 기호로 A_ZX 와 같이 나타내는데, 여기서 Z 는 원자번호(양성자 수), A 는 질량수(양성자와 중성자 수의 합)라고 부른다. 원자핵을 기술하는 모형은 대략 A 가 20보다 작을 때 *ab initio* 방법이 주로 이용된다. 이 방법에서는 두 핵자 및 세 핵자 간 상호작용을 기술하는 모형, 그러니까 앞서 설명한 Argonne v18 모형과 몬테칼로와 같은 수치 계산 방법을

이용하여 핵자 수가 많지 않은 계의 고유값 문제를 직접 계산한다. A 가 20에서 50 정도인 중간크기의 원자핵에서는 껍질 모형이 가장 활발하게 이용되고 있다. 껍질 모형에서는 현상론적 퍼텐셜을 도입하여 핵자 간 상호작용을 기술하는데, 껍질 모형의 역사도 오래되었으므로 현재까지 개발된 현상론적 상호작용은 안정 원자핵의 특성을 잘 설명하고 있다. 하지만 초신성 내에서 중성자의 수가 양성자의 수에 비해 극단적으로 많은 중성자 과잉 원자핵의 핵반응을 좀 더 신빙성 있게 예측을 하기 위해서는 새로운 형태의 상호작용을 도입할 필요가 있으므로 모형이 발전할 여지는 아직 많다. A 가 50보다 큰 무거운 핵과 $A \sim \infty$ 인 무한 핵물질을 기술하는 데는 평균장 모형이 여전히 가장 적절한 방법이다. 대표적으로는 Hartree-Fock 근사법, 상대론적 평균장 모형, 밀도 범함수 이론(density functional theory, DFT)과 같은 방법이 있는데, 최근에는 평균장 근사를 뛰어넘는(beyond mean field) 모형을 개발하는 데 관심이 집중되고 있다. 이러한 움직임의 중심에는 DFT를 기반으로 가장 범용적인 에너지 밀도 범함수(energy density functional, EDF)를 개발하고 오차의 정량화와 모형의 적용 범위를 구체화하여 원자핵 및 핵물질의 이해 범위와 깊이를 극대화하는 목표가 있다. 최근 국내 연구진들도 DFT를 이용한 EDF 모형을 개발하여 다양한 핵구조의 특성 연구를 활발히 진행하고 있다.^[3] 이어지는 절에서는 새로운 모형들이 도전해야 할 중요한 문제들을 소개한다.

REFERENCES

- [1] M. S. Smith and K. E. Rehm, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 51, 91 (2001).
- [2] R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks and R. Schiavilla, Phys. Rev. C 51, 38 (1995).
- [3] G. Hana, P. Papakonstantinou, C. H. Hyun and Y. Oh, arXiv:1805.11321 [nucl-th].

핵구조 물리학의 도전 과제

현재까지 발견된 원자핵의 종류는 약 1,000여 개에 이르고, 이 중 300여 개는 안정된 원소로 알려져 있다. 안정된 원소 중 가벼운 원자핵에서는 중성자 수(N)와 양성자 수가 거의 비슷하지만, 질량 수가 커질수록 중성자가 많은 핵이 좀 더 안정하다. 껍질 모형에서 밝혀낸 중요한 발견 중 하나는 N 또는 Z 가 2, 8, 20, 28, 50, 82, 128일 때 원자핵이 유난히 안정해진다는 것이다. 이 숫자들을 마법수(magic number)라 하는데 구형 대칭 평균장 이론을 이용하여 마법핵(마법수가 하나 또는 둘인 핵)의 특성과 들뜬 상태 모드 등을 잘 설명할 수 있다. 하지만 원자핵의 특성을 좀 더 광범위하고 면밀하게 이해하려면, 마법수 사이에 있는 N 또는 Z 값을 갖는 원자핵에서 핵자가 점유하는 양자 상태를 현재보다 더 정확하게 기술할 수 있어야 한다. 더욱이 중성자가 훨씬 많이 포함된 원자핵에서 마법수가 바뀌는 현상이 최근 이론에서 예측되고 실험에서도 부분적으로 관찰되고 있으므로, 다양한 조건 하에서 핵구조 변화에 대한 이해는 그 필요성과 중요성이 배가된다고 할 수 있다.

이와 같은 연구를 위해서는 안정한 원소에서부터 N/Z 가 2를 넘는 중성자 초과인 원자핵에 이르기까지 다양한 종류의 원자핵의 생성과 이를 이용한 핵반응 실험이 필요한데 현재 국내에 건설 중인 희귀동위원소 가속기 RAON에서 이러한 연구를 수행할 수 있다. 다음은 희귀동위원소 가속기를 이용하여 연구할 수 있는 중요한 핵구조 연구 몇 가지를 소개한다.

1. 핵구조 개념의 검증과 재정립

1949년 M. G. Mayer와 J. Hans D. Jensen은 핵구조를 설명하는 껍질 모형 연구로 노벨상을 수상하였고 계속해서 지금까지 껍질 모형을 이용해 다양한 핵구조 연구가 진행되고 있다. 특히 N 과 Z 가 마법수 또는 그 근처에 있는 핵종의 에너지 준위는 껍질 간의 에너지 준위가 뚜렷이 구별되어 껍질 모형이 적절하다. 하지만 중성자 과잉이 극단적일 경우 껍질 구조가 안정핵에 비해 심하게 변형되어 안정핵과는 다른 마법수가 존재할 수 있다는 예측이 발표되었다. 실제 최근의 실험에서는 새로운 마법수를 발견했다는 결과가 보고되기도 했다.^[4]

실험적으로 한 핵자가 원자핵에 추가되거나 방출되는 반응을 이용하면 원자핵의 껍질 구조를 파악할 수 있다. 특히 관심을 끄는 핵종은 N 과 Z 가 동시에 마법수이며 불안정한 ^{48}Ni , ^{56}Ni , ^{78}Ni , ^{100}Sn , ^{132}Sn 등을 예로 들 수 있는데, 이들을 이용하면 새로운 핵구조와 마법수를 이해할 수 있다.

2. 중성자 껍질

안정된 원자핵에 양성자 또는 중성자를 추가하면, 원자핵은

잠시 형태를 유지하다가 곧 붕괴하는 불안정 동위원소가 된다. 여기에 핵자를 더 추가하면 어떤 시점부터는 아예 불안정 동위원소로도 존재하지 못하는 단계에 이르게 되는데, 이 불안정 동위원소의 존재 한계를 방울선(drip line)이라 부른다. 안정핵으로부터 멀리 떨어져 있는 중성자 과잉 원자핵에서는 일부 또는 다수의 중성자가 원자핵에 약하게 결합될 수 있고 결과적으로 중성자의 분포 범위가 양성자에 비해 현저히 넓어지는 현상이 나타난다. 이때 양성자는 거의 없이 중성자만 분포해 있는 영역을 중성자 껍질(skin)이라 부른다. 중성자 껍질의 두께는 여러 면에서 물리적으로 중요한 의미를 내포한다. 대표적인 보기는 다음과 같다.

우선 중성자 껍질의 확장은 원자핵의 형태 및 에너지 준위의 변화를 유발한다. 새로운 핵구조는 광자 또는 전자와 같은 외부 입자와의 충돌에서 새로운 형태의 공명 반응을 일으킬 수 있는데, 새로운 공명 모드는 중성자 포획과 같은 핵반응의 산란 단면적에 적잖은 변화를 가져올 수 있다. 현재 철(Fe)보다 무거운 핵종의 절반 정도는 초신성의 중심부의 불안정 핵이 붕괴하여 형성된 것으로 보고 있다. r-process에 참여하는 원소 가운데 지구상에서 발견되는 안정핵은 초신성 내부에서 형성된 불안정 핵들이 일련의 붕괴 과정을 거쳐 만들어진 결과물로 짐작한다. 중성자 과잉 핵의 연구는 그 효과가 핵구조에 국한되지 않고 원소의 기원, 별의 진화 원리를 다루는 천체 물리학에서도 중요한 의의가 있다.

두 번째 보기로는 핵의 대칭에너지(nuclear symmetry energy)를 들 수 있다. 원자핵 또는 핵물질의 입자 당 평균에너지 $E(\rho, \delta)$ 는 핵자 밀도 $\rho = \rho_p + \rho_n$ 와 핵비대칭도 $\delta = (\rho_n - \rho_p) / (\rho_n + \rho_p)$ 에 의존한다. (ρ_n 과 ρ_p 는 각각 중성자와 양성자의 밀도이다.) 강한 핵력에서는 양성자와 중성자가 동일한 입자로 취급되므로 (스핀 up인 전자와 스핀 down인 전자가 하나의 전자로 취급되는 것과 마찬가지로) $E(\rho, \delta)$ 는 δ 의 짝수 지수항만을 가질 수 있다. 특히 $E(\rho, \delta)$ 의 전개식 가운데 δ 에 대한 의존성을 나타내는 첫 번째 항인 δ^2 항의 계수를 핵 대칭에너지라고 부른다. 핵 대칭에너지 연구에서 가장 우선적으로 해결해야 할 문제는 밀도에 따른 변화 양상이다. 핵 대칭에너지는 다양한 방법으로 연구할 수 있는데, 최근 많은 주목을 받는 방법이 중성자 과잉 핵의 중성자 껍질 두께이다. 가장 최근에 납(^{208}Pb) 표적을 이용한 실험에서는 이 두께가 $0.33^{+0.16}_{-0.18}$ fm로 측정되었는데, 아직 오차가 매우 큰 상태이다.^[5] 실험 결과의 오차가 커서 핵

REFERENCES

- [4] X. Xu *et al.*, Chin. Phys. C **39**, 104001 (2015).
- [5] S. Abrahamyan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 112502 (2012).

대칭에너지 값을 정확하게 결정하는 데는 한계가 있으므로 계속해서 중성자의 껍질 두께를 좀 더 정밀하게 측정하려는 실험이 계획되고 있다. 한편 우리나라에 건설 중인 RAON의 LAMPS 실험에서는 다양한 핵 충돌을 이용하여 저밀도부터 고밀도에 이르기까지 광범위한 영역에서 핵 대칭에너지를 측정할 예정이다.

핵 대칭에너지에 관한 정확한 이해는 중성자별의 성질 연구에도 파급 효과가 매우 크다. 중성자별은 자연에서 관찰되는 가장 밀도가 높은 물체로서 중성자별의 평균 밀도는 원자핵 평균 밀도($\sim 2.7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$)의 2배가 넘는다. 이와 같은 고밀도 영역에서는 핵물질의 특성을 결정하는 상태방정식이 아직 제대로 알려지지 않았다. 특히 중성자별은 지구상에서 생성 가능한 어떤 중성자 과잉 핵보다도 중성자가 많이 포함되어 있는 물질로써 이들의 구조를 잘 알려면 핵 대칭에너지를 정확하게 이해하여야만 한다. 최근 간섭계를 이용한 중력과 측정 국제공동연구와 함께 인공위성을 이용한 중성자별 정밀 관측 프로젝트인 NICER(Neutron star Interior Composition Explorer)가 진행되고 있는 시점에서 RAON을 이용한 핵 대칭에너지 실험은 원자핵 구조와 핵반응, 그리고 고밀도 핵물질의 상태방정식과 중성자별의 특성을 이해하는 데 커다란 기여를 할 것이다.

희귀동위원소 빔을 이용한 핵구조 및 핵천체물리 연구

1. 핵구조 연구

앞에서 설명했듯이 중성자 과잉 원자핵은 그 안에 중성자가 지나치게 많아서 구형을 유지하지 못하고 모양이 변형된다. 이 때문에 기존의 껍질 모형에서 알려졌던 마법수가 사라지거나 바뀌며 새로운 마법수 구조가 나타나는 핵 껍질의 진화가 일어난다. 또한 $Z=10-12$ 와 $N=20-22$ 에 해당하는 원자핵에서는 원자핵의 결합에너지가 주변의 원자핵들에 비해 매우 강한 영역인 island of inversion이 나타나기도 한다.^[6] 그리고 ^{14}C 와 같이 질량이 가벼운 중성자 과잉 원자핵은 알파 입자들의 클러스터 구조를 만든다.^[7] 최근 희귀동위원소 가속기가 발달하면서 희귀동위원소 빔을 활용한 원자핵의 여러 변칙적인 현상을 연구할 수 있게 되었다. 아래는 일본의 이화학연구소(RIKEN)에서 최근 수행된 실험 내용과 일부 결과이다.

새로운 마법수 구조 연구를 위해 RIKEN에서는 에너지가 345 MeV/u인 $^{70}\text{Zn}^{30+}$ 이온 빔을 이용해 생성시킨 ^{55}Sc 과 ^{56}Ti 와 같은 희귀동위원소 빔으로 ^{54}Ca 의 마법수 연구를 진행하였다. ^{55}Sc 과 ^{56}Ti 빔을 1 센티미터 두께의 베릴륨(Be) 표적에 충돌시키면 하나 혹은 두 개의 양성자가 제거되며 ^{54}Ca 빔이 생성된다. 이후 그림 3과 같은 불안정한 ^{54}Ca 로부터 방출되는 감마선 분포를 얻어 새로운 마법수를 확인하였다.^[8]

그리고 다른 실험에서는 중성자 과잉 원자핵인 ^{14}C 의 알파

Fig. 3. Energy spectrum of ^{54}Ca by gamma-ray spectroscopy.^[8]

클러스터 구조를 발견하였다. 알파 클러스터 구조는 지금까지 ^8Be , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne 등과 같이 질량수가 4의 배수인 안정핵에서 많은 연구가 되어있다. 하지만 이론적으로 중성자 혹은 양성자 과잉 원자핵에서도 알파 클러스터 구조를 가질 수 있으므로, 이를 입증하기 위한 실험이 이루어졌다. 동경대학교 CNS(Center of nuclear study) 연구팀은 ^{14}C 의 클러스터 구조를 연구하기 위해 RIKEN의 CRIB 시설을 활용하여 $^{10}\text{Be} + \alpha$ 탄성산란 실험을 하였다. 이 실험에서는 안정핵인 ^{11}B 를 저온의 수소 표적에 충돌시켜 $^{11}\text{B}(\text{d}, \text{He})^{10}\text{Be}$ 반응을 일으키고, 생성된 ^{10}Be 을 기체헬륨 표적에 다시 한번 충돌시켜 $^{10}\text{Be} + \alpha$ 탄성산란을 일으켜 ^{14}C 의 구조를 연구하였다. 그림 4는 이 실험의 결과인데, 들뜸에너지(E_x)가 15.1, 16.2, 18.7 MeV일 때 알파 클러스터 구조가 관측된다.^[7] 그리고 이 결과는 비대칭 분자동역학(Anti-symmetrized Molecular Dynamics, AMD) 계산 결과와 일치한다. 최근에는 국내 물리학자들이 중심이 되어 방사성 동위원소인 ^{19}Ne 의 알파 클러스터 구조 연구가 활발히 진행되고 있다.

2. 핵천체물리 연구

원자핵 실험 연구의 중요성은 비단 핵구조에만 국한되지 않고 핵천체물리 현상을 이해하는 데도 중요하다. 특히 핵합성이 활발히 일어나는 X-선 버스터, 신성, 초신성 등의 천체현상을 이해하는 데 큰 역할을 한다. 이들은 주로 밀도가 매우 높은 주성과 가벼운 기체로 이루어진 동반성으로 이루어진 쌍성(binary star) 형태로 존재한다. 이때 주성은 커다란 중력으로 동반성의 수소나 헬륨과 같은 가벼운 원소를 빨아들여 핵반응의 연료로 사용한다.

이렇게 시작된 별 내부의 핵반응 과정 중 Hot-CNO 순환 반응

REFERENCES

- [6] E. K. Warburton, J. A. Becker and B. A. Brown, Phys. Rev. C **41**, 1147 (1990).
- [7] H. Yamaguchi *et al.*, Phys. Lett. B **766**, 11 (2017).
- [8] D. Steppenbeck *et al.*, Nature **502**, 207 (2013).

Fig. 4. Energy spectrum of ^{14}C . Each peak represents an excited state of ^{14}C (top). The bottom figure shows the comparison between experimental results and AMD calculation values.^[7]

은 탄소, 질소, 산소가 끊임없이 양성자와 반응하며 에너지를 생산한다. 그러다 어느 순간 이 순환과정을 벗어나며 rp-process로 진입하여 무거운 원소까지 빠르게 합성해 간다. 이러한 순간을 탈출(break-out) 지점이라고 하며 주요 탈출 반응으로는 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$, $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ 등이 있다.^[9] rp-process를 거쳐 무거운 원소가 합성되므로 이러한 탈출 반응이 일어나는 조건은 무거운 원소의 생성과정을 이해하는 데 매우 중요하다.

핵천체물리에서 핵반응률은 서로 다른 원자핵이 반응하여 합성이 될 확률을 의미하며, 아래 식에서부터 계산할 수 있다. 예를 들어 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ 핵반응률은 ^{15}O 동위원소가 ^4He 를 만나 ^{19}Ne 를 생성하는 확률을 나타내며, 그것은 천체 내부의 온도 (T), ^{19}Ne 의 공명준위 에너지(E), 공명준위 변수에 의존한다.

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \int_0^\infty E \sigma_{BW}(E) \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE.$$

그림 5는 미국 Notre Dame 대학의 FN 탄뎀 가속기에서 인출된 24 MeV ^3He 빔을 40 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ 두께의 CaF_2 표적에 입사시켜 생성한 ^{15}O 빔에 의한 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ 핵반응률을 계산한 결과

Fig. 5. Reaction rate for $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$.^[10]

이다.^[10] 그림과 같이 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ 핵반응률은 오차 범위가 크며, 이전 실험 결과보다 ^{19}Ne 이 매우 드물게 생성되는 것을 알 수 있다. 하지만, 아직 오차가 매우 크기 때문에 정확한 핵천체 현상의 예측을 위해 ^{19}Ne 관련 연구는 계속 진행 중이다.

나가는 글

희귀동위원소와 관련된 핵구조와 핵반응, 핵천체물리학은 앞으로 활발히 연구될 것이다. 특히 rp-process 및 r-process와 관련된 여러 중요한 핵반응 연구를 위해서는 RAON과 같은 제 3세대 희귀동위원소 가속기가 필요하므로, 앞으로 우리나라가 이 분야를 주도하며 세계적인 연구결과를 얻을 가능성이 많다. 그리고 우리나라의 이론 물리학자들도 희귀동위원소의 구조 및 반응을 이해하기 위한 다양한 연구를 진행 중이다.

앞서 언급했듯이 자연에 존재하는 안정동위원소는 고작 300개에 불과하고, 약 10,000개로 추정되는 희귀동위원소들 가운데 아직도 7,000개나 더 발견되어야 한다. 아직 인간이 가보지 못한 무수히 많은 천체와 무한히 넓은 우주 공간이 있는 것처럼, 아직 찾지 못한 많은 희귀동위원소들이 첨단 희귀동위원소 가속기에서 발견되길 애타게 기다리고 있다.

우리나라에 RAON이 완공되면 희귀동위원소의 핵구조와 이와 관련된 핵반응 연구가 더욱더 활발하게 진행될 것이다. 그리고 궁극에는 희귀동위원소의 핵물리학이 아직 우리에게 알려지지 않은 중성자 과잉 원자핵과 양성자 과잉 원자핵들의 기본 상호작용과 함께 천체에서 열핵반응으로 만들어지는 무거운 원소들의 기원을 이해하는 데 꼭 필요한 정보를 제공해 줄 것이다.

REFERENCES

- [9] A. Kim *et al.*, Phys. Rev. C **92**, 035801 (2015).
- [10] W. P. Tan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 242503 (2007).