

희귀동위원소와 이론물리학

DOI: 10.3938/PhiT.24.051

김영만·임연환·신익재

Rare Isotopes and Theoretical Physics

Youngman KIM, Yeunhwan LIM and Ik Jae SHIN

With the advent of the next-generation rare isotope beam facility at the Rare Isotope Science Project (RISP), the study of rare earth isotopes has become an indispensable component of contemporary nuclear physics. In this article, we summarize some of the theoretical activities for rare-isotope-beam experiments at the RISP.

서 론

원자핵에 관한 연구는 이론물리학, 천체물리학 등 전반적인 과학 영역에서 중요한 영역으로 간주되고 있다. 특히 가속기를 이용하여 인위적으로 만들지 않는 이상 지구상에 거의 존재하지 않는 희귀동위원소(rare earth isotope)는 현재 물리학의 중요한 아이콘 중 하나이다. 희귀동위원소들은 주로 초신성(supernova) 폭발을 통해 많은 양이 만들어지며, 중성자 별의 바깥 껍질(neutron star crust)에도 많이 존재한다고 보고되고 있다.

그림 1과 같이 원자핵은 복잡한 양자 다체계(quantum many body system)로서 강한 상호작용(strong interaction)을 낮은 에너지에서 이해하는데 중요한 역할을 한다. 일반적으로 강한 상호작용을 설명하는 근본 이론은 쿼크(quark)와 글루온(gluon)

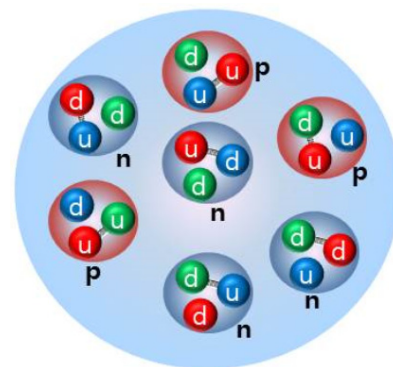


Fig. 1. The conceptual structure of nucleus and sub-particles : nucleus consists of protons and neutrons, which are composed of quark (u,d).

을 기본 자유도(degree of freedom)로 갖는 양자색역학(quantum chromodynamics: QCD)이라고 믿어진다. 양자색역학은 에너지가 높은 경우 여러 물리 현상들을 성공적으로 설명하지만, 핵물리 현상이 일어나는 에너지가 낮은 영역에서는 글루온끼리의 혹은 쿼크와 글루온 사이의 상호작용 크기를 결정짓는 결합상수(coupling constant)가 상당히 커서 표준적인 섭동방법이 더 이상 유용한 이론적인 도구가 될 수 없다. 이에 대한 대안으로 격자 양자색역학(lattice QCD)이 궁극적인 수치적 해답이 될 수 있을 것이라고 일반적으로 믿어지지만 핵물리학에 산재한 문제들에 대해 신뢰할 수 있는 해답을 언제쯤 제시할 수 있을지는 명확하지 않다.

원자핵에 대한 정밀한 이론 및 실험적 이해는 별들의 진화, 중성자별들의 물리적 성질, 초신성 폭발 등을 이해하는데 중요한 단초를 제공한다. 중성자별은 희귀동위원소로 둘러싸인 거대한 중성자 과잉(neutron rich) 핵이라 할 수 있다. 중성자별 내부에는 '대략' 90%의 중성자와 10%의 양성자로 이루어져 있다고 추정된다. 크기는 반지름이 약 10 km이고 질량은 태양 질량의 1.5배 내지 2배 정도이다. 즉 중성자별은 태양을 반지름 10 km 정도로 압축시킨 별이라 생각할 수 있고 내부 중심 근처에서의 밀도는 보통 원자핵 중심 밀도보다 3배에서 10배 정도 크다고 추정되나 이론적 불확실성이 상당히 크다.

희귀동위원소 빔(beam)을 활용한 차세대 시설의 도래와 함께

저자약력

김영만 박사는 1999년 한양대학교에서 박사학위를 취득하였으며, 아시아 태평양이론물리연구센터(APCTP)에서 Junior Research Group 리더 등을 거쳐 현재 중이온가속기건설구축 사업단에서 연구위원으로 재직 중이다. (ykim@ibs.re.kr)

임연환 박사는 2012년 미국 Stony Brook University에서 박사학위를 취득하였으며, 대구대학교 박사 후 연구과정을 거쳐 현재 중이온가속기건설구축 사업단에서 연구위원으로 재직 중이다. (ylim9057@ibs.re.kr)

신익재 박사는 2009년 서울대학교에서 박사학위를 취득하였으며, APCTP에서 박사 후 연구과정을 거쳐 현재 중이온가속기건설구축 사업단에서 연구위원으로 재직 중이다. (geniean@ibs.re.kr)

이론물리학, 특히 핵물리학은 중대한 전환점을 맞이하고 있다. 중이온가속기건설구축 사업단에서는 중이온가속기 및 실험 장치 개발과 함께 관련 이론 연구를 동시에 진행하고 있다. 아래에서는 이러한 일련의 이론 연구 현황을 몇 가지 소개하고자 한다.

희귀동위원소 가속기를 이용한 실험 결과들을 물리적으로 이해하기 위해 우선적으로 필요한 이론은 핵 구조, 핵반응 및 핵 이송(nuclear transport) 모형이다.

핵 구조

핵물리학의 중요한 질문 중 하나는 ‘얼마나 많은 핵자를 가진 원자핵이 존재하는가?’라는 것이다. 즉 기존에 발견되거나 합성된 원자핵 이외에 우리가 아직 알지 못하는 원자핵은 무엇이 있으며 어떤 성질을 가지고 있는가 하는 것이다. 결합된 원자핵의 경계는 드립라인(drip line)으로 불리는데, 양성자 과잉 원자핵의 양성자 드립라인, 중성자 과잉 원자핵의 중성자 드립라인이 있으며, 두 가지 경계선으로 원자핵의 결합상태를 판단한다. 드립라인 바깥쪽에서는 원자핵이 결합된 상태로 존재하기 어려운데, 이는 결합된 상태보다 따로 떨어져 존재하는 것이 에너지가 더 낮기 때문이다. 핵 이론 모형으로 드립라인은 핵자 분리 에너지(nucleon separation energy)를 계산함으로써 구할 수 있다.

한 중성자 분리에너지 : $S_{1n} = B(Z, N) - B(Z, N-1)$,

두 중성자 분리에너지 : $S_{2n} = B(Z, N) - B(Z, N-2)$,

한 양성자 분리에너지 : $S_{1p} = B(Z, N) - B(Z-1, N)$,

두 양성자 분리에너지 : $S_{2p} = B(Z, N) - B(Z-2, N)$

위의 정의에 따라 각각의 값이 0보다 클 때, 원자핵이 결합 상태로 존재한다고 예측한다. 여기서 B 는 핵의 전체 결합에너지를 나타낸다. 이와 더불어 양성자 및 중성자 화학에너지(chemical potential)가 0보다 작을 때 원자핵이 결합된 상태라고 본다.

양성자 드립라인은 핵 모형에 관계없이 비교적 일치하는 결과를 보인다. 이는 양성자 과잉 영역에 들어갈수록 전자기적 척력(Coulomb repulsion)이 증가하여 원자핵이 결합 상태를 더 이상 유지하지 못하기 때문이다. 반면, 중성자 드립라인은 핵 모형에 따라 상당히 다른 결과를 보인다. 이는 두 가지 원인에서 기인한다고 볼 수 있다.

i) 핵 모형의 알려지지 않은 계수들(unknown parameters)을 찾는 방법이 다르기 때문이다. 원자핵 모형의 계수는 first principle에서 구하는 것이 불가능하다. 따라서 모형의 계수는 일반적으로 원자핵의 결합에너지를 통해서 구해지고, 모형을 사용하는 목적에 따라 표면에너지와 핵붕괴, 중성자 과잉 핵,

중성자 껍질(neutron skin) 등이 추가적으로 계수를 결정하는 요인으로 고려된다. 대부분의 모형으로부터 안정된 원자핵에 대해서는 비슷한 성질을 예측할 수 있고, 안정된 계곡(valley of stability)에서 멀어질수록 계산된 원자핵의 성질이 모형 따라 크게 달라진다.

ii) 중성자 과잉 영역의 현상을 설명하는 중성자-양성자 사이의 유효 힘(effective force)이 정확하게 결정되지 않았기 때문이다. 따라서 중성자 과잉 핵물질이나 순수 중성자 물질(pure neutron matter)에 대한 연구는 중성자 드립라인 연구에 확실한 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

본 사업단에서는 중국 베이징 대학과 협력하여 상대론적인 핵 밀도 함수론(nuclear density functional)의 발전된 모형인 CDFT(covariant density functional theory)를 이용하여 원자핵의 성질을 연구하고 있다. 현재 핵 밀도 함수론에서는 하트리 폭 근사 방법을 발전시킨 하트리 폭 보골리우보프(Hartree Fock Bogoliubov) 근사를 많이 사용하는데, 이는 핵자 상호간의 짝 얹힘 현상을 이론적으로 잘 설명하고자 함에 있다. 이는 원자핵의 바닥상태는 “각각 핵자의 상태가 주어진 에너지 준위를 완전히 채운 것이 아니라 부분적으로 채웠을 때이다”라는 전제에서 출발한다. 핵자 상호간의 짝 얹힘으로 인해 발생하는 에너지는 하나의 핵자가 주어진 에너지 준위를 부분적으로 채우는 것을 허락한다. 이미 잘 알려진 BCS 짝 얹힘은 스핀이 다른 두 입자 상호간의 얹힘만을 생각하는데 비해, Bogoliubov transformation에서는 모든 입자 사이의 상호 얹힘을 허락한다. 이렇게 함으로써 물리적으로 다양한 형태의 얹힘 에너지(pairing energy)를 비교 분석할 수 있다.

이러한 특징을 가진 핵 밀도 함수론은 기본적으로 원자핵의 바닥상태에 대해 잘 기술하는데, 여기서 바닥상태의 성질이란 원자핵의 결합에너지, 거리에 따른 밀도 분포, 평균 제곱근 반지름(root mean square radius) 등을 말한다. 원자핵의 결합에너지는 무거운 핵의 기원과 밀접한 관련이 있다. 자연계에 존재하는 원자핵 중 가장 안정한, 즉 핵자당 결합에너지가 가장 큰 원자핵은 ^{56}Fe 이다. 실제로 초신성 폭발은 별의 중심에 철이 생성되어 더 이상 핵 연소 반응이 일어나지 못해 별 내부에 존재하는 가스 상태의 원자핵들이 중력을 이기지 못해 일어난다고 본다. 또한 이 초신성 폭발 과정에서 철 이외의 무거운 핵종들이 생성된다고 알려져 있다. 철 이외의 무거운 핵은 급속 양성자 포획(rapid proton capture)과 급속 중성자 포획(rapid neutron capture)으로 생성되며, 이는 양성자 드립라인 혹은 중성자 드립라인 근처에서 이루어진다. 또한 결합상태가 매우 약한 특이한 원자핵(exotic nuclei)의 구조는 핵천체 물리에 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 원자핵의 구조에 대해 설명해 줄 수 있는 것이 바로 핵 밀도 함수론이고, 핵 밀도 함수론의

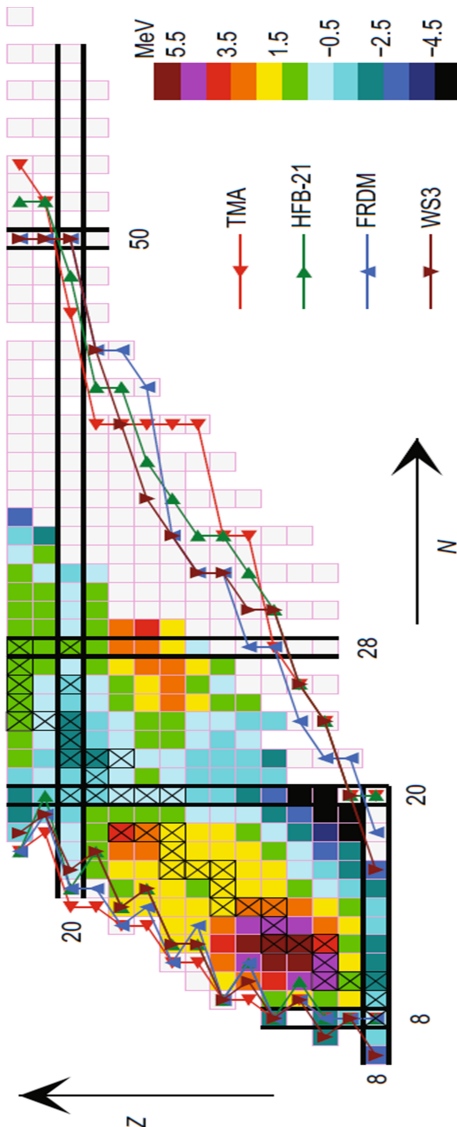


Fig. 2. Nuclear chart.^[1]

획기적인 발전을 위해서는 양성자, 중성자 과잉영역에 대한 실험적 이론적 연구뿐만 아니라, 핵자간의 짝 얽힘 현상에 대한 연구, 그리고 순수 중성자 물질에 대한 연구가 요구된다.

사업단에서는 중국 베이징 대학과의 협력을 통하여 얻어진 PC-PK1 functional을 사용하여 현재 구대칭을 가정한 원자핵의 결합 에너지를 계산하여 핵질량 표(mass table)를 그림 2와 같이 완성하였다. 그림 2의 핵도표($Z=8 \sim 120$)는 여러 가지 핵 밀도 함수론을 이용하여 구성된 핵 도표의 일부($Z=8 \sim 22$)를 나타낸 것이다. 각 모델을 통하여 찾아낸 양성자 중성자 드립라인은 서로 다른 곡선으로 연결되어 있다. 각각의 모델은 양성자 드립라인에서는 대체로 일치하는 결과를 보이지만, 중성자 드립라인에 대해서는 서로 다른 결과를 보여준다. 구대칭 PC-PK1 코드를 이용하여 찾아낸 결합된 원자핵은 박스로 표시되어 있으며, 원자 수 8부터 120까지 모두 9035개의 결합

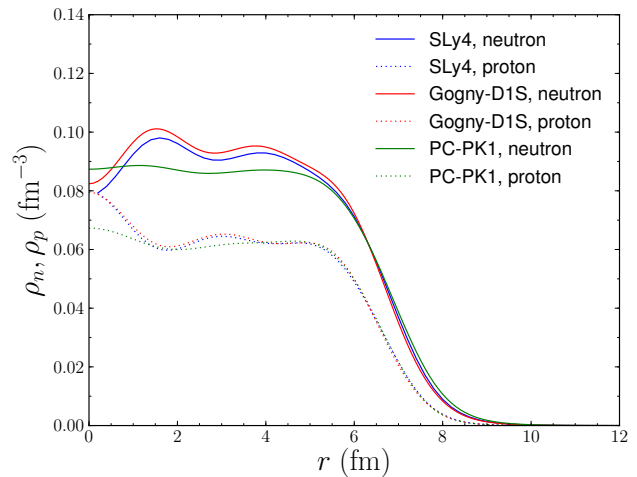


Fig. 3. Density distribution of ^{208}Pb calculated by the functional theory.

된 원자핵이 존재함을 예측하였다.

일그러진 원자핵(deformed nucleus)의 경우 현재 가벼운 원자핵(light nucleus)부터 바닥상태 원자핵의 구조에 대해 활발하게 연구 중이다.(그림 3 참고) 비상대론적 모형인 SLy4, Gogny-D1S는 비슷한 밀도 분포를 보이는데 반해, PC-PK1을 사용한 밀도 분포는 앞선 두 모델과는 상이한 결과를 보인다. 이는 상대론적 모델과 비상대론적 모델 사이의 차이점으로 인해 발생한 것으로 보인다.

핵 밀도 함수론 방법은 무거운 핵종까지 연구가 가능하다는 장점이 있으나 Hartree-Fock 근사 방법 등 여러 가지 근사 방법을 사용한다는 단점이 있다. 본 사업단에서는 Iowa 주립대 등과 공동 연구를 통하여 양성자와 중성자들이 기본적인 강한 상호작용을 통해서 원자핵을 형성하는 과정을 근본적으로 연구하는 선형적(ab initio) 핵 구조 연구를 수행하고 있다. 이러한 연구를 통해서 원자핵 및 핵물질의 새로운 성질을 예측할 수 있으며, 핵물리학에서 양자색역학의 진공(quantum chromodynamics vacuum) 및 쿼크와 글루온들의 역할에 대한 이해를 위한 단초를 제공할 수 있다.

선형적 방법으로 핵 구조를 연구하는 이들의 목표는 핵을 구성하고 있는 핵자들, 양성자와 중성자 사이의 상호작용으로부터 원자핵이 어떻게 만들어지는지, 그리고 이렇게 생성된 핵들이 어떠한 성질을 보이는지 이끌어 내는 것이다. 해결해야 할 문제는 비교적 간단해 보이지만 실제로 풀어야 할 문제는 가벼운 핵종의 경우라도 기본적으로 다체 문제이기 때문에 매우 복잡하다. 따라서 선형적 핵 구조 연구는 핵물리 이론뿐만 아니라

REFERENCES

- [1] X. Qu, Y. Chen, S. Zhang, P. Zhao, I. J. Shin, Y. Lim, Y. Kim and J. Meng, Sci. China Phys. Mech. Astron. **56**, 2031 (2013).

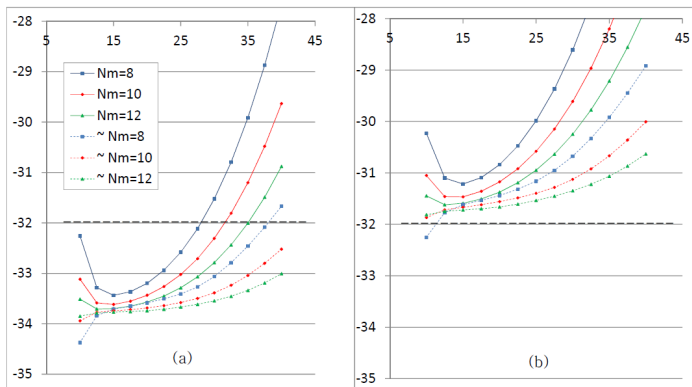


Fig. 4. Ground state energy of ${}^6\text{Li}$ using (a) N3LO-SRG and (b) N3LO-SRG-PET (Daejeon16). Solid lines represent calculation values and dot lines are the results of extrapolation. Black dash line is the measured value of -31.995 MeV.

라 수치적으로 해결하는 방법의 발달이나 이를 토대로 실제로 계산을 수행할 슈퍼컴퓨터 자원 및 알고리즘의 발달에 크게 영향을 받고 있다.

또한 핵자 사이의 상호작용에 대한 이해도 선형적 핵 구조 연구를 위해 필수적이나, 여전히 잘 알려지지 않아 이에 대해서도 지속적으로 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 양자색역학의 효과론 중 하나인 카이랄 효과장이론(chiral effective field theory)으로부터 핵자 사이의 상호작용을 이끌어 내고 있다.

사업단에서 이번에 최적화 대상으로 택한 N3LO(next-to-next-to-next-to-leading-order) 핵력도 카이랄 효과장이론으로부터 얻어진다. 안타깝게도 이를 이용하여 원자핵의 상태별 에너지들을 계산한 결과는 비교적 느리게 수렴하기 때문에 엄밀한 외삽(extrapolation) 결과를 얻기 위해서는 더 큰 모델공간까지의 계산이 필요하다. 그러나 아주 큰 계산을 수행하는데 현실적으로 한계가 있으므로 계산 자원을 효율적으로 사용하기 위해 이러한 상호작용에 SRG(similarity renormalization group) 방법을 적용했다. SRG 방법은 momentum 크기에 따라 포텐셜을 효과적으로 분리시켜 보다 soft한 상호작용을 얻을 수 있으며 이를 사용한 계산 결과는 더 빠른 수렴성을 보인다.(그림 4 참조)

수렴성이 향상된 N3LO 상호작용은 기본적으로 두 핵자로 이루어진 계에 맞추어져 있기 때문에 다양한 핵종을 다루기 위해서 PET(phase equivalent transformation)를 적용하였다. 보통 상호작용에 PET를 적용하면 두 핵자 사이 산란과 관련된 대부분의 관측값들을 유지하면서 다른 성질들, 예를 들면 이중수소의 사중극자 모멘트(quadrupole moment)나 질량수가 3 이상인 원자핵의 에너지 스펙트럼(energy spectrum)도 바꿀 수 있다. 새롭게 얻어진 상호작용은 p-껍질 핵종들을 잘 설명하기 위해 ${}^3\text{He}$ 부터 ${}^{16}\text{O}$ 까지 몇몇 대표 핵종들의 바닥상태 에너지 및 ${}^6\text{Li}$ 과 ${}^{12}\text{C}$ 의 낮은 들뜬 상태 에너지를 잘 구현할 수

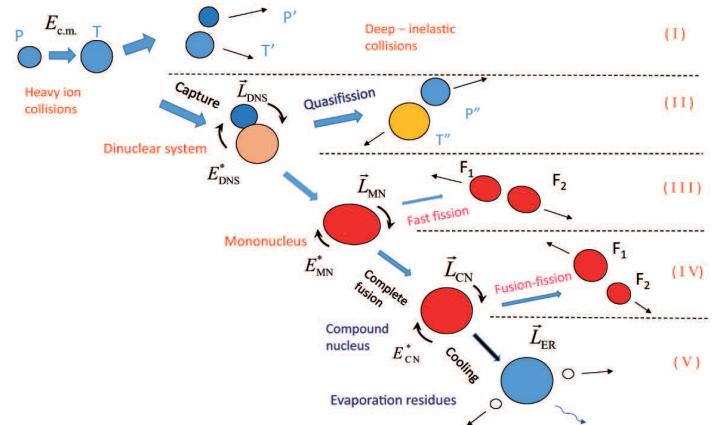


Fig. 5. Nuclear reaction process from two nucleus collision to super heavy nucleus formation.

있도록 PET 변수를 결정하였다. 이렇게 새롭게 얻어진 핵력의 이름을 대전16(Daejeon16)이라고 명명하고자 한다. 이는 이미 사용되고 있는 JISP16^[2]에서 적용된 것과 같은 방식으로 차이점은 산란실험 결과로부터 얻어진 ISTP(inverse scattering tri-axial potentials) 상호작용 대신 SRG 방법을 적용한 N3LO를 PET의 대상으로 사용한다는 점이다. PET를 통해 얻어진 상호작용은 일반적으로 세 개의 핵자 상호작용(three nucleon interaction)을 도입하지 않고도 기존 핵종들의 성질을 비교적 정확하게 얻을 수 있다.

핵반응

실험을 통한 초중핵(super heavy elements) 합성 가능성이나 중성자 드립라인 근처에 있는 중성자 과잉 핵종의 발견 가능성을 이론적으로 예측하기 위해서는 핵반응 모형을 이용하여 산란단면적이나 생성율 등을 계산하여야 하며 이 결과를 이용해 성공적인 실험을 위한 최적의 빔과 표적의 조합을 찾을 수 있다. 이러한 계산에 사용하는 여러 가지 모형들 가운데 하나인 DNS(dinuclear system) 모형은 핵반응 과정에서 두 핵 사이에서 핵자 교환(특히 작은 핵에서 큰 핵으로 핵자의 이동)에 중점을 둔다. 사업단에서는 이를 이용하여 초중핵 합성을 위한 핵융합 산란단면적 및 초중핵을 실험에서 합성 가능한지를 가늠할 수 있는 evaporation residue 산란단면적을 이론적으로 계산하였다. 그림 5는 초중핵 합성에 이르는 핵반응을 단계별로 보여준다. 입사된 빔의 에너지와 상대적 각운동량에 크기에 따라서 입사된 핵과 표적 핵은 deep-inelastic collision(II) 혹은

REFERENCES

- [2] A. M. Shirokov, J. P. Vary, A. I. Mazur and T. A. Weber, Phys. Lett. B **644**, 33 (2007).

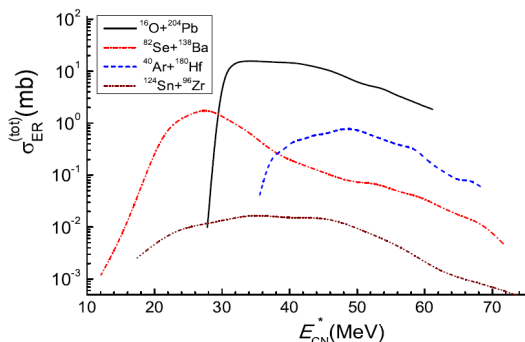


Fig. 6. Evaporation residue cross sections for ^{220}Th synthesis.

잡힘(capture) 반응이 일어난다. 잡힘 반응 후 표적 핵과 입사 핵은 하나의 시스템(DNS)을 이루며 이후 준핵분열(quasi-fission) 반응(II) 단계를 거치거나 하나의 거대한 핵(mononucleus)으로 진행되어서 빠른 핵분열(fast fission)(III) 혹은 핵융합 단계로 진화한다. 핵융합을 통해 형성된 합성 핵(compound nucleus)은 대부분은 핵분열 반응(IV)을 통해 희귀동위원소를 생성하며 아주 낮은 확률로 중성자 등을 내보내고 안정화가 된 후에 초중핵을 합성한다(V).

그림 6은 최근 RISP-BLTP 공동연구를 통하여 계산한 ^{220}Th 합성 산란단면적을 여러 가지 빔과 표적 조합을 통해 얻어낸 결과이다.^[3]

핵 이송 모형

빔과 표적이 충돌부터 새로운 희귀동위원소 생성까지의 전 과정을 시뮬레이션하는 것이 핵 이송 모형의 목표이며 이를 통하여 검출기가 측정하지 못하는 이론적으로 계산한 물리량과 실제 실험에서 측정하는 물리량을 서로 연결시켜 줄 수 있다. 예를 들면 라온에서 핵 충돌 중에 약 20-30 fm/c(약 10^{-22} 초) 동안 핵 내부 평균 밀도보다 2배 정도 높은 밀도를 가진 핵물질이 생성되는데, 이러한 고밀도 물질에서 여러 가지 새로운 물리 현상이 나타날 수 있으나 검출기에 도착하기 전에 사라진다. 이렇듯 찰나에 일어나는 물리적 현상은 검출기에서 측정할 수 있는 물리량을 핵 이송 모형을 이용하여 분석함으로써 역으로 추적할 수 있다. 그림 7은 핵 이송 모형이 기술하는 핵 충돌을 보여준다.

그림 8은 현재 사업단에서 개발 중인 QMD(quantum molecular dynamics) 코드를 사용하여 ^{40}Ca 빔을 ^{181}Ta 표적에 핵자당 140 MeV 에너지로 충돌했을 때를 시뮬레이션한 결과이다.

결 론

지금까지 중이온가속기건설구축사업단 내 이론 연구 현황에 대해 알아보았다.

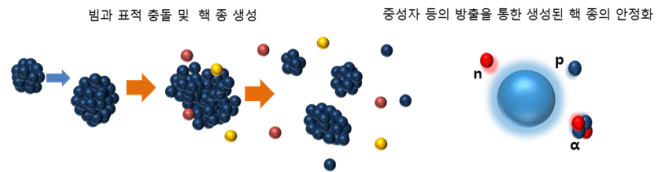


Fig. 7. Formation of a new nucleus by collision (left) and stabilization process (right).

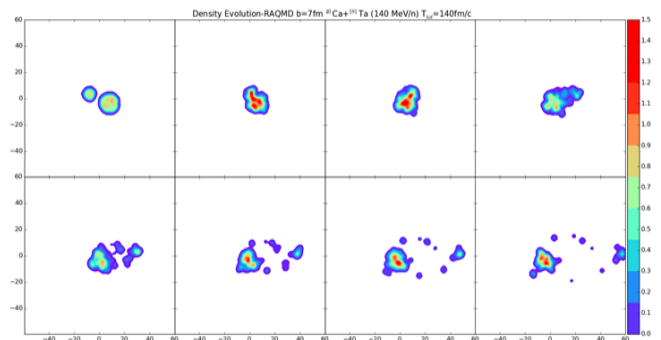


Fig. 8. Collision simulation of ^{40}Ca beam to ^{181}Ta target with 140 MeV/u.

첫째, 원자핵의 바닥상태의 결합에너지와 들뜬 상태의 에너지를 기술하기 위하여 핵 밀도함수론(DFT)과 선형적(ab initio) 핵 구조 연구를 수행하고 있다. 둘째, 초중핵의 합성 및 매력적인 핵(exotic nucleus) 생성 가능성을 알아보기 위해 DNS 모형을 이용하여 핵반응 과정에서의 산란단면적을 계산하고 있다. 셋째, 가속기 내 빔과 표적의 충돌과 관련된 전 과정의 이해를 목표로 핵이송 연구를 진행하고 있다. 현재 사업단 내에서는 이와 관련된 QMD 코드를 개발하고 있으며, 다양한 테스트를 진행 중이다. 이외에도 희귀동위원소 관련 연구들을 수행 중이다. 앞에서 언급한 바와 같이 이러한 원자핵에 대한 연구는 강한 상호작용, 별들의 진화, 그리고 중성자별의 성질을 이해하는데 중요한 역할을 한다.

중이온가속기 구축사업의 성공적인 수행과 이후의 효율적인 활용을 위해서는 핵물리 이론에 대한 지속적인 투자와 관심이 필요하다. 또한 이를 뒷받침하기 위하여 핵물리 전문가의 양성과 저변 확대가 요구된다. 사업단에서 현재 진행 중인 일들이 가까운 미래에 세계적인 수준의 희귀동위원소 관련 연구 수행과 전문가 양성을 위한 밑거름이 될 것이라 확신하며, 앞으로 5년, 길게는 10년에 걸친 노력과 결실은 대한민국 고유의 중이온가속기 운용과 이를 바탕으로 세계적인 선도연구를 담당하는 주축이 될 것이다.

REFERENCES

- [3] K. Kim, Y. Kim, A. K. Nasirov, G. Mandaglio and G. Giardina, Phys. Rev. C **91**, 064608 (2015).