Study of the Energy Levels in the ^{23}Mg Radionuclide by Using Proton Beams and a ^{24}Mg Target

Kyung Yuk CHAE* · Min Sik KWAG · Eun Ji LEE

Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

Kyujin KWAK

School of Natural Science, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, Korea

(Received 6 November 2016 : revised 23 November 2016 : accepted 1 December 2016)

The energy levels of the ^{23}Mg radionuclide are very important for astrophysical reactions such as the $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ and the $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ reactions, depending on their excitation energies. In the present manuscript, two independent $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ transfer reaction measurements, which were performed by using 31- and 41-MeV proton beams from the Holifield Radioactive Ion Beam Facility of the Oak Ridge National Laboratory in the United States and ^{24}Mg solid targets, are summarized. Recoiling deuterons from the (p,d) reactions were detected by using a silicon strip detector array. By comparing the experimental angular distributions with the results of calculations using theoretical distorted-wave Born approximation, we were able, for the first time, to constrain the spins and the parities of seven energy levels in ^{23}Mg .

PACS numbers: 21.10.-k, 21.10.Hw, 24.50.+g, 25.40.Hs

Keywords: Nuclear astrophysics, $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ reaction, $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ reaction, $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ transfer reaction, Radionuclide ^{23}Mg

양성자 빔과 ^{24}Mg 표적을 이용한 방사성 핵종 ^{23}Mg 의 핵구조 연구

채경욱* · 곽민식 · 이은지

성균관대학교 물리학과, 수원 16419, 대한민국

곽규진

울산과학기술원 자연과학부, 울산 44919, 대한민국

(2016년 11월 6일 받음, 2016년 11월 23일 수정본 받음, 2016년 12월 1일 게재 확정)

방사성 핵종 ^{23}Mg 의 에너지 레벨은 그 위치에 따라 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 및 $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 와 같은 천체물리학적 의미있는 핵반응의 이해에 매우 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 미국 Oak Ridge National Laboratory의 Holifield Radioactive Ion Beam Facility에서 생성 및 가속한 31과 41 MeV의 양성자 빔 및 ^{24}Mg 고체 표적을 이용하여 수행한 두 건의 $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ 핵자 전달반응 측정 결과를 소개한다. (p,d) 핵반응의 결과로 생성된 중양자를 실리콘 검출 시스템으로 관찰하였다. 실험적으로 얻은 중양자의 각분포와 찌그러진 파동 보른 근사법 (distorted wave Born approximation, DWBA) 계산 결과를 비교하여 총 7개의 ^{23}Mg 에너지 레벨에 대한 스핀과 패리티를 최초로 규명하였다.

PACS numbers: 21.10.-k, 21.10.Hw, 24.50.+g, 25.40.Hs

Keywords: 핵천체물리, $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응, $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응, $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ 핵자 전달반응, 방사성 핵종 ^{23}Mg

I. 서론

양성자, 중양자 (deuteron, 이중수소의 원자핵), 그리고 α 입자 등의 가벼운 하전입자를 가속하여 안정 핵종과의 핵반응 결과를 연구하는 분야는 1970년대까지 매우 활발하게 진행되었다. 활용 가능한 빔과 안정핵 표적의 조합이 점점 끝을 보이던 무렵에는 비교적 긴 반감기를 갖는 방사성 핵종을 표적으로 활용하기도 하였으나 1970년대 후반에 이르러서는 이마저도 한계에 부딪히고 말았다. 이에 한동안 침체기에 들었던 저에너지 핵구조 연구는 1990년대 방사성 중이온 빔의 개발과 더불어 중흥기를 맞게 되었다.

2016년 현재, 저에너지 핵물리 실험 분야에서 가장 주목받고 있는 영역 중 하나는 방사성 빔을 이용한 핵자 전달반응 측정이다. 1970년대까지 오랜 기간에 걸쳐 사용을 함으로써 그 효용성이 충분히 증명된 찌그러진 파동 보른 근사법 (distorted wave Born approximation, DWBA) 계산 결과와 실험 결과의 비교를 통해 단일 입자 상태 (single-particle state) 의 분광학적 성질을 방사성 핵종에 대해서도 확장할 수 있다는 이점 때문에 방사성 빔과 안정핵 표적을 이용한 핵자 전달반응 측정이 활발하게 진행 중이다.

1990년대부터 활발하게 연구 개발이 진행되어온 하전입자 검출기의 영향으로, 1970년대의 고전적인 실험을 재연하는 근래의 실험에서도 새로운 결과를 얻고 있다. 대표적인 예가 2007년 미국 오크리지 국립연구소의 Holifield Radioactive Ion Beam Facility (HRIBF) 에서 41- 그리고 41.5-MeV의 양성자 빔과 ^{24}Mg 고체 표적을 사용한 실험이다. 이 실험에서는 $^{24}\text{Mg}+p$ 시스템에서 생성된 삼중양자 (triton, 삼중수소의 원자핵) 및 ^3He 핵종을 검출하여 각각 ^{22}Mg [1] 및 ^{22}Na [2] 방사성 핵종의 핵구조를 연구하였다. 이처럼 가벼운 입자 빔과 무거운 안정핵 표적을 이용한 정운동학 (normal kinematics) 측정법으로도 중요한 물리량들을 얻어낼 수 있는 점에 착안하여, 본 논문에서는 41 MeV와 31 MeV의 양성자 빔을 이용한 $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ 핵반응 연구 결과를 소개하려고 한다.

II. 핵천체물리학적으로 중요한 핵반응

1. $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응

전 우주에서 관측되는 1.275 MeV의 감마선은 방사성 핵종 ^{22}Na (반감기 2.603년)의 베타붕괴에서 비롯된 것으

로 알려져있다. 이 감마선은 유럽 항공우주국 (European Space Agency)에서 2002년 궤도에 올려놓은 International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL)의 중요한 표적 중의 하나이다 [3, 4]. 신성 폭발 이후 우주 공간으로 퍼진 잔해물들이 감마선에 대해 다시 투명해지기까지는 다소간의 시간이 걸리는데, ^{22}Na 핵종은 비교적 긴 반감기를 갖기 때문에 그 시간동안 충분히 살아남을 것으로 예측된다 [5]. 따라서 1.275 MeV의 우주 감마선을 측정하는 것은 신성 폭발과정에서 일어날 것으로 여겨지는 여러 핵반응의 반응속도를 이해하는데 매우 중요한 역할을 한다.

^{22}Na 핵종은 신성 폭발 중에 ^{21}Ne 의 양성자 포획과정 혹은 ^{22}Mg 의 베타붕괴를 통해 생성된다 [6]. 이렇게 생성된 ^{22}Na 은 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응이 진행됨에 따라 소멸한다 [6-8]. 이 핵반응은 ^{23}Mg 핵종의 에너지 레벨 중 양성자 문턱값 (proton threshold, ^{23}Mg 의 경우에는 7.581 MeV) 보다 높은 곳에 위치한 레벨들을 통해 일어나기 때문에, 이 에너지 레벨들의 스핀, 패리티, 공명 세기 (resonance strength) 등과 같은 공명 변수 (resonance parameter) 들을 실험적으로 구해내는 것이 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응 속도를 계산하는데 가장 중요한 작업이 된다. 이러한 중요성 때문에 $^{24}\text{Mg}(^3\text{He},\alpha)^{23}\text{Mg}$ [9], $^{25}\text{Mg}(p,t)^{23}\text{Mg}$ [10], 그리고 $^{22}\text{Na}(^3\text{He},d)^{23}\text{Mg}$ [11] 등의 다양한 핵자 전달반응을 통해 ^{23}Mg 핵종의 구조를 연구하려는 노력이 있었다. 이들 선행 연구들로 인해 많은 ^{23}Mg 에너지 레벨들의 성질이 밝혀졌지만, 아직도 알아야 할 내용들이 많이 있다. 그 중 대표적인 것이 양성자 문턱값보다 높은 에너지의 레벨들이 갖는 스핀과 패리티 값이다. 따라서 본 논문에서는 $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ 중성자 전달반응의 연구를 통해 이들 에너지 레벨의 성질에 대한 연구를 진행하였다.

2. $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응

한편, 방사성 핵종 ^{23}Mg 에서 9.650 MeV에 위치한 α 문턱값보다 높은 곳에 위치한 에너지 레벨들은 X-ray burst와 같은 폭발적인 천문현상 중의 $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 핵반응 속도를 설명하는데 매우 중요한 역할을 한다. CNO 순환과정 (carbon-nitrogen-oxygen cycle)은 주계열성을 비롯한 매우 다양한 별에서의 에너지 생성을 담당하고 있다 [12]. pp 연쇄반응 (proton-proton chain)과 더불어, 이 CNO 순환 과정은 네 개의 양성자를 헬륨으로 융합하는데 이 과정에서 약 20 MeV 이상의 에너지가 방출된다.

*E-mail: kchae@skku.edu

X-ray burst는 이중항성계의 중성자별 표면에서 일어나는 열핵반응으로 설명할 수 있다 [13]. 동반성으로부터 수소 및 헬륨 가스가 중성자별의 표면에 유입이 되어 임계질량을 넘어서게 되면 CNO 순환과정을 시작으로 매우 급격한 열핵반응이 순식간에 일어나게 된다 [14,15]. 이 경우 표면에서의 온도가 매우 높아져, CNO 순환과정으로부터 빠져나오게 만드는 탈출 (break-out) 반응들이 가능해지기 시작한다. 정확한 탈출 경로는 아직까지 확실히 알려진 바가 없지만, $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$, $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$, 그리고 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 핵반응 등이 가장 유력한 후보로 꼽히고 있다 [13,16]. X-ray burst 중에 CNO 순환과정으로부터 빠져나오게 되면, 빠른 양성자 포획과정 (rapid proton capture process, rp -process)이 시작되면서 Sn-Sb-Te 영역까지의 무거운 입자들이 수 초 이내에 생성 된다 [17]. 위의 세 핵반응은 모두 α 포획과정을 그 기반으로 하기 때문에 높은 온도를 요구한다. 예를 들어, $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ 반응의 경우에는 온도가 약 4×10^8 K 이상이 되어야 가능하다 [18,19]. 이렇게 생성된 방사성 핵종 ^{19}Ne 은 대부분 $^{19}\text{Ne}(p, \gamma)^{20}\text{Na}$ 반응을 통해 소멸될 것으로 여겨지는데, 이러한 중요성으로 인해 이 양성자 포획과정에 대한 연구는 상당히 많이 진행되었다 [20–24]. 하지만 ^{19}Ne 핵종을 소멸할 수 있는 또 다른 핵반응인 $^{19}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 이에 본 논문에서는 ^{23}Mg 의 에너지 레벨들 중 $^{19}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응 속도에 영향을 미치는 α 문턱값 (9.650 MeV) 위에 위치한 레벨들의 스핀과 패리티를 측정하기 위해 $^{24}\text{Mg}(p, d)^{23}\text{Mg}$ 중성자 전달반응 연구를 진행하였다.

III. $^{24}\text{Mg}(p, d)^{23}\text{Mg}$ 중성자 전달반응

양성자 문턱값 (7.581 MeV) 과 α 문턱값 (9.650 MeV) 보다 높은 곳에 위치한 ^{23}Mg 핵종의 에너지 레벨을 연구하기 위해서, 각각 31 MeV와 41 MeV의 양성자 빔을 이용하였다. 양성자 빔은 미국 Oak Ridge National Laboratory의 저에너지 핵물리 연구시설인 Holifield Radioactive Ion Beam Facility에서 생성하여 25 MV 탠덤 가속기를 이용 가속하였다. 두 실험에서 사용한 실험 장비 개요도를 Fig. 1에 보였다(그림 출처: 참고문헌 [25]). 양성자 빔과 순도 99.999% 이상의 ^{24}Mg 고체 표적을 사용하였으며(두께 $\sim 500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), (p, d) 반응에서 생성된 중양자는 실리콘 검출기 어레이(SIDAR)를 이용하여 검출하였다 [26]. 표적 챔버의 가장 뒷부분에는 흑연 빔 차단 (beam stop)을 설치하여 빔을 멈추고 동시에 빔 전류를 측정하는 용도로 사용하였다. SIDAR를 구성하고 있는 각각의 실리콘 검출기는 16개의

Fig. 1. Schematic diagram of the $^{24}\text{Mg}(p, d)^{23}\text{Mg}$ reaction measurement. 31- and 41-MeV proton beams and isotopically-enriched ^{24}Mg targets were used. The figure is taken from Ref. 25.

Fig. 2. (Color online) An example of particle identification plot obtained from the ΔE and E telescope. This specific figure is taken at $\theta_{lab} = 38.0^\circ$ using 30 MeV of proton beam [27].

방사형 조각 (radial strip)으로 나뉘어져있어 중양자를 총 16개의 각도에서 동시에 측정할 수 있었다.

$^{24}\text{Mg}+p$ 시스템을 구성하고 나면, 중양자 뿐 아니라 양성자, 삼중양자, ^3He , 그리고 ^4He 등의 가벼운 하전입자들이 함께 생성된다. 따라서 이들 입자들로부터 중양자를 구분해내는 작업이 필요한데, 이는 Fig. 1의 개요도에 보인 것과 같이 두 겹의 실리콘 검출기를 설치함으로써 해결할 수 있다. 본 실험에서는 $100 \mu\text{m}(\Delta E)$ 와 $1000 \mu\text{m}(E)$ 두께의 실리콘 검출기를 이용하였다. 이 경우, 검출기에 입사한 입자의 질량을 M , 전하량을 Z 라고 하면 이 입자가 각 검출기에 남기는 에너지는 MZ^2 에 비례하게 된다. 이를 이용하여 ΔE 와 $\Delta E + E$ 사이의 관계를 그래프로 그려보면 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있다 (그림 출처: 참고문헌 [27]). 이 그래프는 31 MeV 양성자 빔을 이용하여 $\theta_{lab} = 38.0^\circ$ 에서 얻은 결과이다. 양성자(p), 중양자(d), 삼중양자(t), ^3He ,

Fig. 3. (Color online) Total deuteron energy plot after the internal energy calibrations. The figure was obtained at $\theta_{c.m.} = 28.8^\circ$ using the 31 MeV of proton beam. All energies are in MeV. The figure is taken from Ref. 27.

Fig. 4. (Color online) Experimental angular distribution and DWBA calculations for the $E_x = 9.476$ MeV energy level.

그리고 ^4He 등의 가벼운 하전입자들이 서로 잘 구분되어 있는 것이 보인다. 그림의 빨간색 gate 안에 들어온 입자들을 중양자로 판단하였다.

이와같이 중양자의 에너지를 재구성하기 위해서는 중양자가 실리콘 조각(strip)에 남긴 에너지를 정확히 파악해야 할 필요가 있다. 실험에 사용한 실리콘 검출 어레이는 총 96개의 조각으로 구성되어 있는데, 이들 조각의 에너지 반응을 살피기 위해 ^{244}Cm α 선원을 사용하였다. 이 방사성 핵종은 약 85%의 비율로 5.805 MeV의 α 입자를 방출하며 붕괴하는 것이 잘 알려져 있으므로, 이 에너지를 이용하여 실리콘 검출기의 에너지 보정을 진행하였다.

에너지 보정을 마친 후에는 Fig. 3(그림 출처: 참고문헌 [27])과 같은 중양자의 총에너지 그래프를 16개의 각도에서 얻었다. 그림에서 명확히 보이는 것처럼, 한 번의 (p,d) 핵

자 전달반응 측정을 통해 ^{23}Mg 핵종의 여러 에너지 레벨을 동시에 관측하였다. 그림은 31 MeV의 양성자 빔을 이용한 실험 데이터의 $\theta_{c.m.} = 28.8^\circ$ 인 각도에서 얻은 결과이다. 여기에서는 $E_x = 9.642$ MeV까지의 에너지 레벨들만 보였으나, 41 MeV 양성자 빔 에너지 데이터에서는 11.998 MeV까지의 에너지 레벨들도 추가적으로 관측할 수 있었다.

각 에너지 레벨에 대한 미분산란단면적을 16개 각도에서 추출하여 각분포로 표시한 후, DWBA 계산 결과와의 비교를 위해 DWUCK4 code를 사용하였다 [28]. 이전 탄성 산란실험 연구들에서 도출된 $A = 20$ 근처 핵종들에 대한 광학 모형 변수(optical model parameters)를 사용하였다 [29–31]. 이 비교과정을 통해 다음 7개 에너지 레벨들의 스핀과 패리티 값을 세계 최초로 한정할 수 있었다: $E_x = 8.038$ MeV – $(7/2^+, 9/2^+)$, $E_x = 8.324$ MeV – $(3/2^+, 5/2^+)$, $E_x = 8.430$ MeV – $(7/2^+, 9/2^+)$, $E_x = 8.920$ MeV – $(7/2^+, 9/2^+)$, $E_x = 11.518$ MeV – $(3/2^+, 5/2^+)$, $E_x = 11.773$ MeV – $(3/2^+, 5/2^+)$, $E_x = 11.998$ MeV – $(7/2^+, 9/2^+)$. 대표적인 실험 데이터와 DWBA 계산결과를 비교한 과정을 Fig. 4에 보였다. 그림의 실험 데이터는 $E_x = 9.476$ MeV 에너지 레벨의 각분포이며, DWUCK4 계산 결과는 l 전이 값이 0부터 4인 경우를 모두 표시하였다. 그림에서 보이듯이 이 에너지 레벨의 경우, $l = 2$ 인 전이를 가정하는 것이 가장 타당한 결과라 할 수 있다.

IV. 천체물리학적 핵반응 속도

본 연구에서 처음 한정된 스핀과 패리티 값들은 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 과 $^{19}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 반응 속도를 천체물리

학적 온도 영역에서 계산하는데 사용될 예정이다. 이들 핵반응 속도는 각각의 에너지 레벨들이 독립적으로 반응 속도에 기여를 한다는 좁은 공명 계산법 (narrow resonance formalism)을 이용하여 계산할 수 있다:

$$N_A < \sigma v > = 1.54 \times 10^{11} (\mu T_9)^{-3/2} \sum_r (\omega \gamma)_r \\ \times \exp(-11.605 E_r / T_9) [\text{cm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}] (1)$$

여기에서 T_9 은 GK 단위로 표현한 온도, $(\omega \gamma)_r$ 은 공명 세기, 그리고 E_r 은 레벨의 에너지를 의미한다. 모든 에너지는 MeV 단위이다. 위의 식에서 공명 세기는 ^{23}Mg 에너지 레벨의 스핀과 패리티 값에 큰 영향을 받으므로, 본 연구에서 규명해낸 7개 에너지 레벨의 분광학적 정보들이 위의 핵반응 속도를 계산하는데 매우 중요한 역할을 담당하게 될 것이다. 현재 반응 속도 계산을 위해 공명 변수를 확정하는 작업을 수행 중이다. $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 및 $^{19}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 핵반응 속도를 새로 계산하고 나면, 해당 결과를 이용하여 신성 폭발 및 X-ray burst 현상 중의 환경을 가정하여 핵합성 (nucleosynthesis) 계산을 수행할 것이다. 최종 계산 결과는 향후에 Physical Review C [27] 및 Journal of the Korean Physical Society [25]에 게재될 예정이다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다 (2014S1A2A2028636, 2015R1D1A1A01056918, 2016M7A1A1004555, 2016K1A3A7A09005579, 2016R1A5A1013277).

REFERENCES

- [1] K. Y. Chae, D. W. Bardayan, J. C. Blackmon, K. A. Chipps and R. Hatarik *et al.*, *Phys. Rev. C* **79**, 055804 (2009).
- [2] K. Y. Chae, D. W. Bardayan, J. C. Blackmon, K. A. Chipps and R. Hatarik *et al.*, *Phys. Rev. C* **82**, 047302 (2010).
- [3] M. Hernanz and J. Jose, *New Astron. Rev.* **48**, 35 (2004).
- [4] A. L. Sallaska, C. Wrede, A. García, D. W. Storm and T. A. D. Brown *et al.*, *Phys. Rev. C* **83**, 034611 (2011).
- [5] D. D. Clayton and F. Hoyle, *Astrophys. J.* **187**, L101 (1974).
- [6] J. Jose, A. Coc and M. Hernanz, *Astrophys. J.* **520**, 347 (1999).
- [7] C. Iliadis, A. Champagne, J. José, S. Starrfield and P. Tupper, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **142**, 105 (2002).
- [8] W. R. Hix, M. S. Smith, S. Starrfield, A. Mezzacappa and D. L. Smith, *Nucl. Phys. A* **718**, 620 (2003).
- [9] L. C. Haun, N. R. Roberson and D. R. Tilley, *Nucl. Phys. A* **140**, 333 (1970).
- [10] H. Nann, A. Saha and B. H. Wildenthal, *Phys. Rev. C* **23**, 606 (1981).
- [11] S. Schmidt, C. Rolfs, W. H. Schulte, H. P. Trautvetter and R. W. Kavanagh *et al.*, *Nucl. Phys. A* **591**, 227 (1995).
- [12] H. A. Bethe, *Phys. Rev.* **55**, 434 (1939).
- [13] M. Wiescher, J. Gorres and H. Schatz, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **25**, R133 (1999).
- [14] J. L. Fisker, F.-K. Thielemann and M. Wiescher, *Astrophys. J.* **608**, L61 (2004).
- [15] J. L. Fisker, J. Gorres, M. Wiescher and B. Davids, *Astrophys. J.* **650**, 332 (2006).
- [16] R. K. Wallace and S. E. Woosley, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **45**, 389 (1981).
- [17] H. Schatz, A. Aprahamian, V. Barnard, L. Bildsten and A. Cumming *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3471 (2001).
- [18] K. Langanke, M. Wiescher, W. A. Fowler and J. Gorres, *Astrophys. J.* **301**, 629 (1986).
- [19] P. V. Magnus, M. S. Smith, P. D. Parker, R. E. Azuma and C. Campbell *et al.*, *Nucl. Phys. A* **470**, 206 (1987).
- [20] L. O. Lamm, C. P. Browne, J. Gorres, S. M. Graff and M. Wiescher *et al.*, *Nucl. Phys. A* **510**, 503 (1990).
- [21] M. S. Smith, P. V. Magnus, K. I. Hahn, A. J. Howard and P. D. Parker *et al.*, *Nucl. Phys. A* **536**, 333 (1992).
- [22] C. Wrede, J. A. Clark, C. M. Deibel, T. Faestermann and R. Hertenberger *et al.*, *Phys. Rev. C* **81**, 055503 (2010).
- [23] E. T. H. Clifford, E. Hagberg, J. C. Hardy, H. Schmeing and R. E. Azuma *et al.*, *Nucl. Phys. A* **493**, 293 (1989).

- [24] D. Seweryniak, P. J. Woods, B. Blank, M. P. Carpenter and T. Davinson *et al.*, [Phys. Lett. B **590**, 170 \(2004\)](#).
- [25] E. J. Lee and K. Y. Chae, submitted to J. Korean Phys. Soc. (2016).
- [26] D. W. Bardayan, J. C. Blackmon, W. Bradfield-Smith, C. R. Brune and A. E. Champagne *et al.*, [Phys. Rev. C **63**, 065802 \(2001\)](#).
- [27] M. S. Kwag and K. Y. Chae, submitted to Phys. Rev. C (2016).
- [28] P. D. Kunz, <http://spot.colorado.edu/~kunz/DWBA.html> (unpublished).
- [29] D. G. Fleming, J. C. Hardy and J. Cerny, [Nucl. Phys. A **162**, 225 \(1971\)](#).
- [30] N. M. Clarke, [J. Phys. G: Nucl. Phys. **5**, L33 \(1979\)](#).
- [31] R. L. Kozub, [Phys. Rev. **172**, 1078 \(1968\)](#).