

$n+^{10\sim 40}\text{X}$ 핵반응에서 광학모형포텐셜파라미터에 대한 연구

김혁, 김래성

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 원자력기술을 개발하고 원자력발전소를 건설하기 위한 문제를 자체의 기술, 자체의 힘으로 자력갱생하여 완성하여야 합니다.》(《김일성전집》 제62권 459페이지)

핵반응연구는 핵기술의 발전에서 중요한 자리를 차지한다. 핵반응에서는 이론적으로 구한 핵반응자름면적과 실험자료와의 비교를 통하여 구체적인 핵적과정을 연구한다.[2]

핵반응자름면적은 일반적으로 입사립자와 표적핵과의 호상작용과정을 나타내는 광학모형을 리용하여 계산한다. 광학모형에서는 입사립자와 표적핵의 종류, 입사립자의 에너지를, 핵반응물립자에 따라 포텐셜파라미터들을 구체적으로 줄것을 요구한다.

논문에서는 일반화된 광학모형포텐셜파라미터들에서 실수부포텐셜깊이를 나타내는 식을 변화시켜 가벼운 핵들에서도 실험자료와의 좋은 일치를 보여주는 파라미터들을 얻었다.

1. 광학모형포텐셜

광학모형포텐셜은 실수부, 허수부 및 스핀-궤도결합포텐셜부분으로 나눌수 있다.

$$V = U + iW + V_{SO}(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}) \quad (1)$$

실수부와 허수부, 스핀-궤도호상작용을 포함하는 구체적인 광학포텐셜의 대표적인 형태는 다음과 같다.[1]

$$u(r, E) = -v_V(r, E) - iw_V(r, E) - iw_D(r, E) + v_{SO}(r, E) + iw_{SO}(r, E) \quad (2)$$

$$v_V(r, E) = V_V(E)f(r, R_V, a_V): \text{실수부-체적항}$$

$$w_V(r, E) = W_V(E)f(r, R_V, a_V): \text{허수부-체적항}$$

$$w_D(r, E) = -4a_D W_D(E) \frac{d}{dr} f(r, R_D, a_D): \text{허수부-표면항}$$

$$v_{SO}(r, E) = V_{SO}(E) \left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, a_{SO}): \text{실수부-스핀궤도항}$$

$$w_{SO}(r, E) = W_{SO}(E) \left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, a_{SO}): \text{허수부-스핀궤도항}$$

위의 식들에서 $f(r, R, a)$ 는 포텐셜형태로서 대체로 Woods-Saxon포텐셜을 리용한다.

$$f(r, R, a) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - RA^{1/3}}{a}\right)}$$

광학모형포텐셜에서 실수부는 입사립자의 산란을 나타내고 허수부는 흡수를 나타낸다. 그리고 체적항은 표적핵의 중심부를 나타내고 표면항은 표적핵의 중심부밖을 나타낸다.

다. 실제로 실수부-스핀궤도항은 입사입자와 표적핵의 스핀궤도호상작용에 의한 산란을 의미한다.

중성자가 입사할 때 페르미에너지는 다음과 같다.

$$E_f({}^N_Z A) = -\frac{1}{2}[S_n({}^N_Z A) + S_n({}^{N+1}_Z A + 1)] \quad (3)$$

여기서 S_n 은 중성자결합에너지이다.

식 (2)에서 매 항들에 대하여 비교적 넓은 에너지구역과 핵종들을 포함하는 식들은 다음과 같다.

$$V_V(E) = v_1[1 - v_2(E - E_f) + v_3(E - E_f)^2 - v_4(E - E_f)^3] \quad (4)$$

$$W_V(E) = w_1 \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + w_2^2}$$

$$W_D(E) = d_1 \exp[-d_2(E - E_f)] \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + d_3^2}$$

$$V_{SO}(E) = v_{SO1} \exp[-v_{SO2}(E - E_f)]$$

$$W_{SO}(E) = w_{SO1} \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + w_{SO2}^2}$$

2. 가벼운 핵들에서 광학모형포텐셜의 실수부변화특성

중성자가 입사할 때 광학모형포텐셜의 실수부와 허수부, 스핀-궤도항들의 깊이값들은 식 (4)에서와 같이 입사에너지에 의존한다.

그림 1에 표적핵이 ${}^{27}\text{Al}$ 인 경우 입사에너지에 따르는 광학모형포텐셜의 실수부와 허수부의 포텐셜깊이변화를 보여주었다.

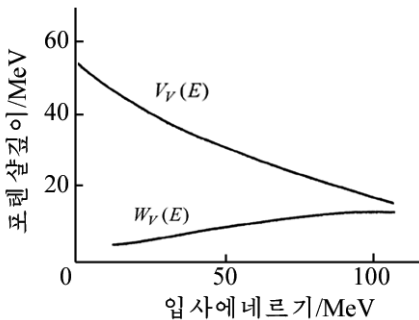


그림 1. 표적핵이 ${}^{27}\text{Al}$ 인 경우 입사에너지에 따르는 광학모형포텐셜의 실수부와 허수부의 포텐셜깊이변화

사를 리용하여야 한다.[3]

그림 1에서 보는것처럼 입사에너지에 따라 변화가 크게 나타나는것은 실수부이다.

표적핵의 질량수가 작아질 때에는 실수부곡선의 곡률이 작아지는 경향이 나타난다. 이것은 질량수가 작아짐에 따라 표적핵을 구형핵으로 볼수 없고 표면에 있는 핵자들이 상대적으로 많기때문에 나타나는 현상이다. 식 (4)의 실수부의 항들을 보면 입사에너지에 3차다항식형태로 관계되어있다. 이 식들은 질량수가 큰 구형핵들인 경우에는 잘 맞지만 질량수가 작은 핵들에 대해서는 잘 설명하지 못한다. 실제로 가벼운 핵들에 대해서는 다음과 같은 국부에너지근

$$V_V(E) = V_{HF}(E) + \Delta V_V(E) V_V(E) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W_V(E')}{E' - E} dE' \quad (5)$$

$$V_{HF}(E) = V_{HF} \exp\{-\mu\beta^2[E - V_{HF}(E)]/2\hbar^2\} \exp\{4\mu^2\gamma^2[E - V_{HF}(E)]^2/\hbar^2\}$$

그러면 식 (5)와 같이 무한구간에서의 에네르기적분을 계산하여야 하고 허수부항도 관계되므로 복잡해진다.

논문에서는 일반적인 광학모형포텐셜에서 실수부의 고차다항식을 다음과 같이 분수함수형태로 바꾸어 맞추기를 진행하였다.

$$V_V(E) = v_1 \left[1 + \frac{v_2}{(E - E_f)^2 + v_3} \right] \quad (6)$$

가벼운 핵들은 중심부의 핵자들의 수가 표면의 핵자들의 수보다 작으므로 입사입자의 에네르기가 클수록 산란으로 인한 뭉이 인차 작아지므로 분수함수형태로 근사시킬수 있다. 결과 파라메터의 수는 1개 줄어들고 계산량도 줄어들었다.

다른 허수부와 스핀-궤도항은 기여뭉이 실수부에 비하여 작으므로 일반식을 그대로 리용하여도 좋은 일치를 보여준다.

그림 2에 중성자와 질량수가 40이하인 5개의 표적핵들과의 핵반응자름면적과 에네르기사이관계를 나타내는 려기함수를 보여주었다.

그림 2에서 실선은 광학모형포텐셜파라미터를 넣어 계산한 곡선이고 점들은 실험점들이다. 그림 2에서 보는것처럼 변형된 광학모형포텐셜을 리용하여 실험과 잘 맞는 결과를 얻었다.

논문에서는 핵반응자름면적계산프로그램 EMPIRE를 리용하여 실험자료와의 맞추기로 다음의 파라메터들을 구하였다.

$$v_1 = 59.30 - 21.0(N - Z)/A - 0.024A \text{ (MeV)} \quad (7)$$

$$v_2 = 0.007 \ 228 - 1.48 \cdot 10^{-6} A \text{ (MeV}^{-1}\text{)}$$

$$v_3 = 1.994 \cdot 10^{-5} - 2.0 \cdot 10^{-8} A \text{ (MeV}^{-2}\text{)}$$

$$w_1 = 12.195 + 0.016 \ 7A \text{ (MeV)}$$

$$w_2 = 73.55 + 0.079 \ 5A \text{ (MeV)}$$

$$d_1 = 17.0 - 16.0(N - Z)/A \text{ (MeV)}$$

$$d_2 = 0.018 \ 0 + 0.003 \ 802 / \{1 + \exp[(A - 156.0)/8.0]\} \text{ (MeV}^{-1}\text{)}$$

$$d_3 = 11.5 \text{ MeV}$$

$$v_{SO1} = 5.922 + 0.003A \text{ (MeV)}$$

$$v_{SO2} = 0.004A \text{ (MeV}^{-1}\text{)}$$

$$w_{SO1} = -3.1 \text{ MeV}$$

식 (7)에 얻어진 파라메터들은 입사입자가 중성자이고 표적핵의 질량수가 10~40인 핵들에 잘 맞는 광학모형포텐셜파라메터들이다.

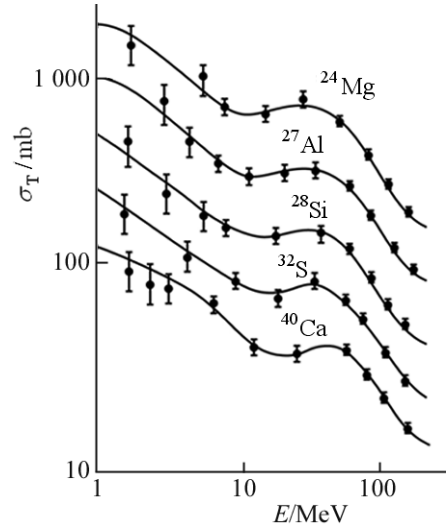


그림 2. 중성자와 질량수가 40이하인 5개의 표적핵들과의 핵반응자름면적과 에네르기사이관계를 나타내는 려기함수

맺는 말

론문에서는 중성자가 질량수범위 10~40인 표적핵과의 호상작용과정을 나타낼수 있는 광학모형포텐셜파라미터들을 결정하였다.

질량수가 40이상인 일반적인 구형핵의 광학모형포텐셜공식에서 실수부의 고차다항식을 분수형태로 변화시켜 질량수가 40이하인 가벼운 핵들의 광학모형포텐셜파라미터들을 결정하였다. 결과적으로 파라미터의 수를 줄이고 허수부까지 고려하는 무한구간에네르기적분을 하지 않고 파라미터들을 결정할수 있다.

참고 문헌

- [1] V. M. Grichine; Nucl. Instrum. Meth., B 289, 2460, 2015.
- [2] C. T. Liang et al.; J. Phys., G 46, 1510, 2014.
- [3] A. Ingemarsson et al.; Nucl. Phys., A 712, 345, 2014.

주체106(2017)년 12월 5일 원고접수

Optical Model Potential Parameters in the Nuclear Reaction $n+^{10\sim40}\text{X}$

Kim Hyok, Kim Thae Song

In this paper we determined the OMP parameters that well agreed with the experiment data in light nuclei less than 40 of mass number by changing the real high-order polynomial in the OMP formula of the spherical nuclei more than 40 of mass number into the fraction form.

As a result we decreased the number of parameters and decided them without integrating energy within infinity interval.

Key words: OMP, Empire, cross section