https://bph.kaznu.kz

МРНТИ 29.15.17;29.15.19;29.15.39

# <sup>1</sup>Н. Буртебаев<sup>(D)</sup>, <sup>2</sup>А.К. Морзабаев, <sup>1,2</sup>Н. Амангелді<sup>(D)</sup>, <sup>1,3</sup>Б. Мәуей, <sup>2\*</sup>F. Ерғалиұлы, <sup>1</sup>Д.К. Алимов

<sup>1</sup>Институт ядерной физики Республики Казахстан, Казахстан, г. Алматы <sup>2</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан, <sup>\*</sup>e-mail: gani.yergaliuly@mail.ru <sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Россия, г. Дубна

### ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ИОНОВ <sup>15</sup>N НА ЯДРАХ <sup>9</sup>ВЕ ПРИ Е<sub>148</sub> = 18,75 МЭВ

Аннотация. В настоящей работе нами были измерены угловые распределения упругого рассеяния ионов <sup>15</sup>N на ядрах <sup>9</sup>Be при энергии  $E_{lab} = 18,75$  МэВ в диапазоне углов  $\theta_{LM}$  от 43° до 164°. Вывод ионных пучков <sup>15</sup>N осуществлялся в Нур-Султанском филиале ИЯФ РК на циклотроне ДЦ-60. Детектирование частиц проводилось в рамках двухмерной ΔЕ-Е методики с использованием кремниевых поверхностно барьерных детекторов dE и E фирмы ORTEC, толщина которых составляла 8 и 300 микронов соответственно. В качестве мишеней использовались пленки <sup>9</sup>Be толщиной около 31 мкг/см<sup>2</sup>. Основной целью данной работы было получение новых информации о параметрах оптического потенциала для системы <sup>15</sup>N + <sup>9</sup>Be при низких энергиях. Полученные данные были проанализированы с использованием кодов Fresco и DFPOT, в рамках оптической модели (OM) и метода двойной свертки, в результате которых были получены несколько наборов оптических параметров.

**Ключевые слова:** легкие ядра, упругое рассеяние,  $\Delta E$ -E методика, оптические потенциалы, метод свертки.

<sup>1</sup>N. Burtebayev, <sup>2</sup>A.K. Morzabayev, <sup>1,2</sup>N. Amangeldi, <sup>1,3</sup>B. Mauyey, <sup>2\*</sup>G. Yergaliuly, <sup>1</sup>D.K. Alimov

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Physics of the Republic Kazakhstan, Kazakhstan, Almaty <sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Astana, e-mail: gani.yergaliuly@mail.ru <sup>3</sup>Joint Institute of Nuclear Research, Russia, Dubna

#### Study of the elastic scattering of <sup>15</sup>N ions on <sup>9</sup>Be nuclei at E<sub>lab</sub> = 18,75 MeV

**Abstract.** In present work, we measured the angular distributions of elastic scattering of 15N ions on 9Be nuclei at an energy of Elab = 18.75 MeV in the range of angles  $\theta$  cm from 43 ° to 164 °. The extraction of 15N ion beams was carried out at the Nur-Sultan branch of the INP RK on the DC-60 cyclotron. The particles were detected in the framework of the  $\Delta$ E-E technique using the silicon surface-barrier detectors dE and E from ORTEC, the thickness of which was 8 and 300 microns, respectively. 9Be films with a thickness of about 31  $\mu$ g/cm2 were used as targets. The purpose of this work was to obtain new data on the parameters of the optical potential for the <sup>15</sup>N + <sup>9</sup>Be system. The obtained data were analyzed using the Fresco and DFPOT codes, within the framework of the optical model (OM) and the duble folding method as a result of which several sets of optical parameters were obtained.

Key words: light nuclei, elastic scattering,  $\Delta$ E-E technique, optical potentials, convolution method.

## <sup>1</sup>Н. Буртебаев, <sup>2</sup>А.К. Морзабаев, <sup>1,2</sup>Н. Амангелді, <sup>1,3</sup>Б. Мәуей, <sup>2\*</sup>Ғ. Ерғалиұлы, <sup>1</sup>Д.К. Алимов

<sup>1</sup>Қазақстан Республикасының ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ. <sup>2</sup>Λ.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ., e-mail:gani.yergaliuly@mail.ru <sup>3</sup>Біріккен ядролық зерттеулер институты, Ресей, Дубна қ.

### E<sub>lab</sub> = 18,75 МэВ шамасында<sup>15</sup>N ионының <sup>9</sup>Ве ядросында серпімді шашырауын зерттеу

Аңдатпа. Бұл ұсынылып отырған жұмыста біз <sup>15</sup>N иондарының <sup>9</sup>Be ядроларынан Elab = 18,75 МэВ энергия шамасында  $\theta_{cM}43^{\circ}$ -ден 164°-ке дейінгі аралықта серпімді шашырауын зерттедік. <sup>15</sup>N иондарының шоғыры ҚР ЯФИ Нұр-Сұлтан қ. филиалындағы ДЦ-60 циклотронында алынды. Бөлшектерді тіркеу  $\Delta$ E-E әдістемесі аясында ORTEC фирмасының қалыңдығы 8 және 300 микрон болатын кремнийлік беттік-барьерлік dE және E-детекторларын пайдалану арқылы жүзеге асырылды. Нысана ретінде қалыңдығы шамамен 31 мкг/см<sup>2</sup> құрайтын бериллий пленкалары қолданылды. Бұл жұмыстың негізгі мақсаты <sup>15</sup>N + <sup>9</sup>Be үшін төмен энергия шамасында оптикалық потенциал параметрлері туралы жаңа деректерді алу болды. Алынған мәліметтер оптикалық модель (OM) және екі реттік фолдинг әдісі шеңберінде Fresco және DFPOT кодтарын қолдану арқылы талданды, соның нәтижесінде бірнеше оптикалық параметрлер жиынтығы алынды.

**Түйін сөздер:** жеңіл ядролар, серпімді шашырау, ΔЕ-Е әдісі, оптикалық потенциалдар, фолдинг әдісі.

#### Введение

Данная работа является продолжением цикла работ по исследованию рассеяния ионов  $^{15}$ N на ядрах 1-р оболочки. Ранее нами были исследованы столкновения ионов  $^{15}$ N с ядром  $^{16}$ O при E<sub>ЦM</sub>= 11,59 МэВ [1] и с ядрами  $^{10,11}$ B при энергии 43 МэВ [2]. В этих работах значительное увеличение сечений при обратных углах интерпретировалось как передача протонов и  $\alpha$ -кластеров. Эти данные служили наглядным примером того что, упругое взаимодействие ядер 1-р-оболочки с  $^{15}$ N является хорошим примером для изучения механизмов обмена, передачи особенно при низких энергиях, близких к энергий кулоновского барьера.

В ранних работах по переводу потенциалов рассеяния тяжелых ионов на более фундаментальный уровень с использованием метода двойной свертки [3, 4] показали, что большинство взаимодействий может быть хорошо описано, за исключением трех ядер: <sup>6</sup>Li, <sup>7</sup>Li и <sup>9</sup>Be. Для этих трех ядер значения рассчитанных реальных потенциалов пришлось уменьшить на  $\sim 0,6$  [5]. Поскольку эти три ядра имеют сильную поляризуемость, считалось, что это условие вызвало необходимость снижении потенциалов. Кроме того, переориентация в основном состоянии ядер <sup>7</sup>Li и <sup>9</sup>Be может дать вклад в упругое рассеяние из-за их больших квадрупольных моментов в основном состоянии, что еще больше усложняет наше понимание их рассеяния.

Экзотическое ядро <sup>9</sup>Ве одно из экспериментально хорошо изученных ядер [6]. Например в широком диапазоне энергий исследованы упругое рассеяние систем <sup>9</sup>Ве+<sup>12</sup>С [7-9] и <sup>9</sup>Ве+<sup>13</sup>С [10, 11], при околобаръерных энергиях были исследованы и системы <sup>9</sup>Ве+<sup>14</sup>N [12], <sup>9</sup>Ве+<sup>16</sup>О [13].

В публикациях [14–16] для определения структуры остаточных ядер были исследованы реакции  ${}^{9}\text{Be}({}^{15}\text{N},{}^{14}\text{O}), ({}^{15}\text{N},{}^{17}\text{F}), ({}^{15}\text{N},{}^{12}\text{N})$  при 240 МэВ. Однако, насколько нам известно, по упругому рассеянию  ${}^{9}\text{Be}({}^{15}\text{N},{}^{15}\text{N})$  <sup>9</sup>Веимеется лишь работа [17].

В этой статье [17] приведеные данные по упругому и неупругому рассеянию <sup>15</sup>N на ядре <sup>9</sup>Be при  $E_{lab}$  (<sup>15</sup>N)= 84 МэВ. В результате командой А.Т. Rudchik et al., было обнаружено, что для упругого рассеяния <sup>9</sup>Be + <sup>15</sup>N рассеяние потенциала доминирует на малых углах и дает некоторый вклад в угловое распределение на средние и большие углы, но в этом угловом диапазоне доминирует спиновая переориентация <sup>9</sup>Be. Одно и двухступенчатые реакции переноса дают лишь малые вклады в упругое рассеяние <sup>9</sup>Be+<sup>15</sup>N.

Целью данной работы было получение информации о параметрах оптического потенциала для упругого рассеяния ионов <sup>15</sup>N на ядрах <sup>9</sup>Be. Данная работа является частью цикла нашего исследования системы<sup>15</sup>N+ <sup>9</sup>Вепри около баръерных энергиях.

#### Экспериментальная часть

В настоящей работе были получены угловые распределения упругого рассеяния  $^{15}$ N на  $^{9}$ Be при  $E_{lab}$ =18,75 МэВ в диапазоне углов в системе центра масс от 43° до 164°. Детекти-

рование частиц осуществлялась в филиале ИЯФ РК (г. Нур-Султан) на циклотроне ДЦ-60 с использованием кремниевых поверхностнобарьерных детекторов dE и E, толщиной 8 и 300 микронов, соответственно. В качестве мишеней использовались пленки <sup>9</sup>Ве толщиной ~ 31 мкг/см<sup>2</sup> [18]. Спектры упругого рассеяния были детектированы с использованием крейта ΔЕ-Е методики (рисунок 1).



Рисунок 1 – Крейт для детектирования с использованием ΔЕ-Е методики

Данные полученные этой методикой идентифицировались с помощью программного обеспечения Win\_EdE (в виде локусов) [1, 2]. Пример типичных данных для системы <sup>15</sup>N+<sup>9</sup>Be по этой программе показан на рисунке 2. Как видно спектры хорошо разрешались как по массе, так и по заряду.



Рисунок 2 – Спектры для упругого рассеяния  ${}^{15}N + {}^{9}Be$  при E(лаб) = 18.75 M ЭB

Систематические ошибки допушенные в эксперименте обусловлены погрешностями в определении толщины мишени, калибровки интегратора тока, телесного угла спектрометра и т.п. статистическими ошибками и не превышали 10%.

#### Теоретическая часть

Данные по упругому рассеянию анализировались в рамках стандартной оптической модели (ОМ) ядра, в которой влияние неупругих каналов учитывается феноменологическим введением мнимой поглощающей части в потенциал взаимодействия между сталкивающимися ядрами. В рамках этой модели упругое рассеяние описывается комплексным потенциалом взаимодействия с радиальной зависимостью в форме Вудс-Саксона:

$$U(r) = -Vf(x_v) - i[Wf(x_w)] + V_c(r), \quad (1)$$

где  $f(x_i) = (1 + \exp(x_i))^{-1}$ ,  $x_i = (r - R_i) / a_i$  $R_i = r_i A^{1/3}$ ,  $V_C(r)$  – кулоновский потенциал равномерно заряженной сферы радиусом  $R_C =$ 1,25  $A^{1/3} \phi M$ . Учитывая компактные размеры налетающей частицы, мы ограничились объемным типом потенциала поглощения для мнимой части.

Параметры оптических потенциалов (ОП) подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими и экспериментальными угловыми распределениями. Теоретические расчеты выполнялись по программе FRESCO [19]. Автоматический поиск параметров оптических потенциалов производился путем минимизации величины  $\chi^2/N$ .

Для ограничения дискретной неоднозначности в параметрах ОП был проведен анализ данных в рамках метода двойного фолдинга (свертка).

Потенциал двойной свертки рассчитывается с использованием распределений ядерной материи как ядра-снаряда, так и ядра-мишени вместе с эффективным потенциалом нуклоннуклонного взаимодействия (v<sub>NN</sub>). Потенциал двойной свертки можно записать следующим образом:

$$V_{DF}(r) = \int dr_1 \int dr_2 \rho_p(r_1) \rho_t(r_2) v_{NN}(r_{12}), \quad (2)$$

где  $\rho_p(r_1)$  и  $\rho_t(r_2)$  – плотность ядерной материи ядер снаряда и мишени, соответственно.

Расчеты потенциала двойной свертки для системы <sup>9</sup>Be+<sup>15</sup>N проводились с использованием кода DFPOT [20, 21] при помощи нуклон-

нуклонного потенциала M3Y (Reid) и распределений заряда в <sup>9</sup>Ве и <sup>15</sup>N [22] откуда и были получены значения среднеквадратичных радиусов для <sup>9</sup>Ве = 2.5 фм и <sup>15</sup>N =2,65 фм. Плотности ядерной материи, необходимые для расчета потенциала двойной свертки <sup>9</sup>Ве+<sup>15</sup>N, были получены из распределений зарядов методом, описанным в [20, 21].

#### Полученные результаты

Данные упругого рассеяния ионов <sup>15</sup>Nна ядрах <sup>9</sup>Ве при энергии 18,75 МэВ были обработаны с использованием графической программы Origin Pro8. На рисунке 3 показаны экспериментальное дифференциальное сечение и теоретические расчеты.

В таблице 1 представлены оптические параметры полученные с использованием программных кодов FRESCO и DFPOT.



Рисунок 3 – Результаты экспериментальных данных и теоретического анализа

Таблица 1 – Параметры оптического потенциала для системы <sup>15</sup>N+<sup>9</sup>Be.

Set	V (MeV)	r <sub>V</sub> (fm)	a <sub>V</sub> (fm)	W (MeV)	r <sub>W</sub> (fm)	a <sub>W</sub> (fm)	Nr
1	100.0	1.12	0.47	10.0	1.16	0.38	0.6
2	95.0	1.15	0.46	10.5	1.2	0.32	0.5
3	65.0	0.8	0.8	12.0	1.25	0.6	0.7
4	65.5	0.85	0.82	27.0	1.15	0.58	0.7

Как видно, метод двойной свертки не смог определить наглядно, какой из полученных параметров является более физическим. Максимальное значение нормировочного коэффициента Nr составило 0,7 для наборов 3 и 4. Кулоновский радиус был зафиксирован при 1,25 фм.

#### Выводы

В настоящей работе при  $E_{na6}$ =18,75 МэВбылы представлены новые даные по упругому рассеянию ионов <sup>15</sup>Nна <sup>9</sup>Вепри  $\theta_{IIM}$ 43°-164°. Данные были проанализированы в рамках методов оптической модели и двойной свертки. Из рисунка 3 видно что все полученные результаты оптической модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Несмотря на получение нескольких наборов оптического потенциала фолдинг методне смог выявить более физический из них что еще раз указывает нам о деформированности ядра мишени <sup>9</sup>Ве.

Следующей нашей задачей является оптимизация параметров полученные из анализа данных ОМ упругого рассеяния в рамках метода связанных каналов (МСК) включающий в себя упругое и неупругое рассеяние, спиновые переориентации <sup>9</sup>Ве в основном и возбужденном состояниях и <sup>15</sup>N в возбужденных состояниях, а также наиболее важные одно- и двухступенчатые реакции переноса.

#### Литература

1 Burtebayev N. et al. Elastic Scattering of <sup>15</sup>N Ions by <sup>16</sup>O at the Energy 11.59 MeV //Acta Phys. Polon. -2017. - Vol. 48. - P.495-498.

2 Burtebaev N. et al. Scattering of 15N Ions by 10, 11B Nuclei at the Energy of 43 MeV //ActaPhysicaPolonica B, Proceedings Supplement. - 2018. - Vol. 11. - P. 99-107.

3 Satchler G.R., Love W.G. Folding model potentials from realistic interactions for heavy-ion scattering //Physics Reports. – 1979. – Vol. 55 (3). – P. 183-254.

4 Satchler G.R. The optical potential for 9Be scattering: Another anomaly //Physics Letters B. - 1979. - Vol. 83 (3-4). - P. 284-288.

5 Glover C.W., Cutler R.I., Kemper K.W. Double folding model analysis of 7Li scattering //Nuclear Physics A. – 1980. – Vol. 341. – № 1. – P. 137-148.

6 Selove F.A. Energy levels of light nuclei: A=5-10 //Nucl. Phys. A. - 1988. - Vol. 490. - P. 1-10.

7 Zamora J.C. et al. 7, 9, 10Be elastic scattering and total reaction cross sections on a 12 C target //Physical Review C. – 2011. – Vol. 84. – № 3. – P. 034611.

8 Oliveira R.A.N. et al. Study of 9Be+ 12C elastic scattering at energies near the Coulomb barrier //Nuclear Physics A. – 2011. – Vol. 856. – No. 1. – P. 46-54.

9 Li Z.H. et al. New determination of the proton spectroscopic factor in 9 Be from the 13 C (9 Be, 8 Li) 14 N angular distribution //Physical Review C. -2013. - Vol. 87. -  $N_{\odot}$ . 1. - P. 017601.

10 Barbadoro A. et al.  $\alpha$ -transfer contribution to Be 9+ 13 C elastic and inelastic scattering //Physical Review C. – 1990. – Vol. 41. – No. 5. – P. 2425.

11 Jarczyk L. et al. Large angle elastic scattering of 9Be ions on carbon isotopes //Nuclear Physics A. – 1979. – Vol. 316. –  $N_{2}$ . 1-2. – P. 139-145.

12 Bock R. et al. N14-induzierte transfer-reaktionen in Be9 von 20 bis 30 MeV //Nuclear Physics. – 1965. – Vol. 70. – No. 3. – P. 481-496.

13 Glukhov Y.A. et al. Nuclear rainbow in elastic scattering of 9 Be nuclei //Physics of Atomic Nuclei. – 2010. – Vol. 73. –  $N_{2}$ . 1. – P. 14-23.

14 Bohlen H. . et al. Nuclear structure studies of bound and unbound states in drip-line nuclei //II NuovoCimento A (1971-1996). -1998. - Vol. 111. - No. 6-7. - P. 841-846.

15 Bohlen H.G. et al. Spectroscopy of 7 He states using the (15 N, 17 F) reaction on 9 Be //Physical Review C. -2001. – Vol. 64. – No. 2. – P. 024312.

16 Bohlen H. G. et al. Structure studies of neutron-rich beryllium and carbon isotopes //Nuclear Physics A. -2003. - Vol. 722. - P. C3-C9.

17 Rudchik A.T. et al. Elastic and inelastic scattering of 15N ions by 9Be at 84 MeV //Nuclear Physics A. – 2016. – Vol. 947. – P.161-172.

18 Burtebayev N. et al. Alpha cluster transfer in the elastic scattering of 13C ions on 9Be nuclei //Memoriedella Societa AstronomicaItaliana. - 2017. - Vol. 88. - P. 440.

19 Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics //Computer Physics Reports.  $-1988. - Vol. 7. - N_{\odot}. 4. - P.167-212.$ 

20 Cook J. DFPOT-A computer code for calculating double folding potentials //Computer Phys. Commun. – 1982. – Vol. 25. – P.125.

21 Cook J. DFPOT-A computer code for calculating double folding potentials //Computer Phys. Commun. – 1984 – Vol. 35. – P. 775.

22 De Vries H., De Jager C. W., De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering //Atomic data and nuclear data tables. -1987. -Vol. 36.  $-N_{2}$ . 3 - P. 495-536.

#### References

- 1 N. Burtebayev, S.B. Sakuta, A.K. Morzabayev et al., Acta Phys.Polon. B 48, 495(2017).
- 2 N. Burtebayev et al., Acta Phys. Polon. BProceedings Supplement 11, 99-107, (2018).
- 3 G.R. Satchler, W.G. Love, Phys. Rep. 55, 183(1979).
- 4 G.R. Satchler, Phys. Lett. B83,284(1979).
- 5 C.W. Glover, R.I. Cutler, K.W. Kemper, Nucl. Phys. A341, 137(1980).
- 6 F. Ajzenberg-Selove, Nucl. Phys. A 490, 1 (1988).
- 7 J.C. Zamora, V. Guimaraes, A. Barioni, et al., Phys. Rev., C84, 034611(2011).
- 8 R.A.N. Oliveira, N.Carlin, et al., Nucl. Phys., A856, 46–54(2011).
- 9 Z.H.Li, Y.J.Li, J.Su, B.Guo, et al., Phys.Rev., C87, 017601(2013).
- 10 A.Barbadoro, F.Pellegrini, et al., Physical Review, C41, 2425-2428(1990).
- 11 L. Jarczyk, J. Okolowicz, et al., Nuclear Physics, A316,139-145(1979).
- 12 R.Bock, H.H.Duhm, M.Grosse-schulte, R.Ruedel, Nuclear Physics, 70,481-496 (1965).
- 13 Yu.A. Glukhovet al., Physics of Atomic Nuclei.73,14-23(2010).
- 14 H.G. Bohlen, W. von Oertzen, R. Kalpakchieva, et al., Nuovo Cimento 111A, 841(1998).
- 15 H.G. Bohlen, R. Kalpakchieva, A. Blazevic, et al., Phys. Rev. C 64, 024312(2001).
- 16 H.G. Bohlen, R. Kalpakchieva, W. von Oertzen, et al., Nucl. Phys. A 722,3 (2003).
- 17 A.T.Rudchik, et al., Nuclear Physics, A947,161(2016).
- 18 N. Burtebayevet al., Mem.S.A.It. 88, 440-443 (2017).
- 19 I. J. Thompson, Comput. Phys. Rep. 7, 167 (1988).
- 20 J. Cook, Comput. Phys. Commun. 25, 125(1982).
- 21 J. Cook, Comput. Phys. Commun. 35, 775(1984).
- 22 H. De Vries, C.W. De Jager, C. De Vries, At. Data Nucl. Data Tables 36, 495(1987).