

<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>Г. Ергалиұлы, <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,

\*e-mail: [gani.yergaliuly@mail.ru](mailto: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>BE ПРИ E<sub>LAB</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<sub>lab</sub> = 18,75 МэВ в диапазоне углов  $\theta_{\text{ЦМ}}$  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  $\Delta E$ -E 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 новой 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 DFROT, в рамках оптической модели (ОМ) 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. Burtabayev, <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](mailto: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 <sup>15</sup>N ions on <sup>9</sup>Be nuclei at an energy of E<sub>lab</sub> = 18.75 MeV in the range of angles  $\theta$  cm from 43° to 164°. The extraction of <sup>15</sup>N 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. <sup>9</sup>Be films with a thickness of about 31  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  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 DFROT codes, within the framework of the optical model (OM) and the double 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.



нашего исследования системы  $^{15}\text{N} + ^9\text{Be}$  при около барьерных энергиях.

### Экспериментальная часть

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

рование частиц осуществлялась в филиале ИЯФ РК (г. Нур-Султан) на циклотроне ДЦ-60 с использованием кремниевых поверхностно-барьерных детекторов dE и E, толщиной 8 и 300 микронов, соответственно. В качестве мишеней использовались пленки  $^9\text{Be}$  толщиной  $\sim 31$  мкг/см $^2$  [18]. Спектры упругого рассеяния были детектированы с использованием крейта  $\Delta E$ -E методики (рисунок 1).



Рисунок 1 – Крейт для детектирования с использованием  $\Delta E$ -E методики

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

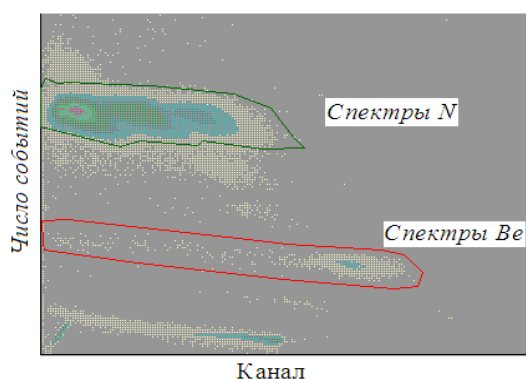


Рисунок 2 – Спектры для упругого рассеяния  $^{15}\text{N} + ^9\text{Be}$  при  $E_{\text{лаб}} = 18,75$  МэВ

Систематические ошибки допущенные 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  $R_C = 1,25 A^{1/3}$  фм. 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 FRESKO [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 нуклон-нуклонного взаимодействия ( $v_{NN}$ ). 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  ${}^9\text{Be}+{}^{15}\text{N}$  проводились с использованием кода DFROT [20, 21] при помощи нуклон-

нуклонного потенциала M3Y (Reid) и распределений заряда в  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^{15}\text{N}$  [22] откуда и были получены значения среднеквадратичных радиусов для  ${}^9\text{Be} = 2.5$  фм и  ${}^{15}\text{N} = 2,65$  фм. Плотности ядерной материи, необходимые для расчета потенциала двойной свертки  ${}^9\text{Be}+{}^{15}\text{N}$ , были получены из распределений зарядов методом, описанным в [20, 21].

### Полученные результаты

Данные упругого рассеяния ионов  ${}^{15}\text{N}$  на ядрах  ${}^9\text{Be}$  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 FRESKO и DFROT.

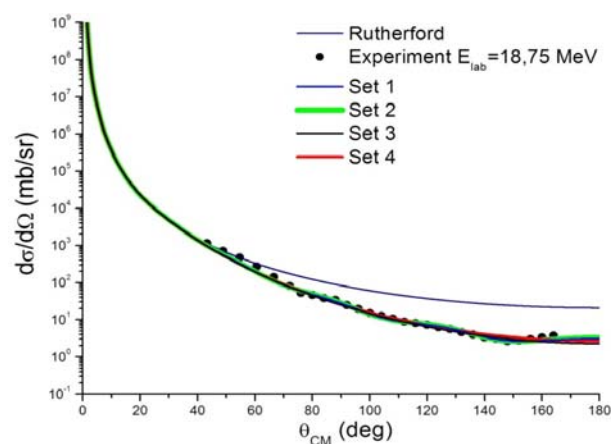


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных данных и теоретического анализа

Таблица 1 – Параметры оптического потенциала для системы  ${}^{15}\text{N}+{}^9\text{Be}$ .

Set	V (MeV)	$r_v$ (fm)	$a_v$ (fm)	W (MeV)	$r_w$ (fm)	$a_w$ (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  $E_{\text{лаб}}=18,75$  МэВ были представлены новые данные по упругому рассеянию ионов  $^{15}\text{N}$  на  $^9\text{Be}$  при  $\theta_{\text{ЦМ}}43^\circ-164^\circ$ . Данные были проанализированы в рамках методов оптической модели и двойной свертки. Из рисунка 3 видно что все полу-

ченные результаты оптической модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Несмотря на получение нескольких наборов оптического потенциала фолдинг метод не смог выявить более физический из них что еще раз указывает нам о деформированности ядра мишени  $^9\text{Be}$ .

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  $^9\text{Be}$  в основном и возбужденном состояниях и  $^{15}\text{N}$  в возбужденных состояниях, а также наиболее важные одно- и двухступенчатые реакции переноса.

### Литература

- 1 Burtebayev N. et al. Elastic Scattering of  $^{15}\text{N}$  Ions by  $^{16}\text{O}$  at the Energy 11.59 MeV //Acta Phys. Polon. – 2017. – Vol. 48. – P.495-498.
- 2 Burtebaev N. et al. Scattering of  $^{15}\text{N}$  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  $^9\text{Be}$  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  $^7\text{Li}$  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.  $^7, 9, 10\text{Be}$  elastic scattering and total reaction cross sections on a  $^{12}\text{C}$  target //Physical Review C. – 2011. – Vol. 84. – №. 3. – P. 034611.
- 8 Oliveira R.A.N. et al. Study of  $^9\text{Be}+^{12}\text{C}$  elastic scattering at energies near the Coulomb barrier //Nuclear Physics A. – 2011. – Vol. 856. – №. 1. – P. 46-54.
- 9 Li Z.H. et al. New determination of the proton spectroscopic factor in  $^9\text{Be}$  from the  $^{13}\text{C} (^9\text{Be}, 8\text{Li}) ^{14}\text{N}$  angular distribution //Physical Review C. – 2013. – Vol. 87. – №. 1. – P. 017601.
- 10 Barbadoro A. et al.  $\alpha$ -transfer contribution to  $^9\text{Be}+^{13}\text{C}$  elastic and inelastic scattering //Physical Review C. – 1990. – Vol. 41. – №. 5. – P. 2425.
- 11 Jarczyk L. et al. Large angle elastic scattering of  $^9\text{Be}$  ions on carbon isotopes //Nuclear Physics A. – 1979. – Vol. 316. – №. 1-2. – P. 139-145.
- 12 Bock R. et al.  $^{14}\text{N}$ -induzierte transfer-reaktionen in  $^9\text{Be}$  von 20 bis 30 MeV //Nuclear Physics. – 1965. – Vol. 70. – №. 3. – P. 481-496.
- 13 Glukhov Y.A. et al. Nuclear rainbow in elastic scattering of  $^9\text{Be}$  nuclei //Physics of Atomic Nuclei. – 2010. – Vol. 73. – №. 1. – P. 14-23.
- 14 Bohlen H. . et al. Nuclear structure studies of bound and unbound states in drip-line nuclei //Il NuovoCimento A (1971-1996). – 1998. – Vol. 111. – №. 6-7. – P. 841-846.
- 15 Bohlen H.G. et al. Spectroscopy of  $^7\text{He}$  states using the  $(^{15}\text{N}, ^{17}\text{F})$  reaction on  $^9\text{Be}$  //Physical Review C. – 2001. – Vol. 64. – №. 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  $^{15}\text{N}$  ions by  $^9\text{Be}$  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  $^{13}\text{C}$  ions on  $^9\text{Be}$  nuclei //Memorie della Societa AstronomicaItaliana. – 2017. – Vol. 88. – P. 440.
- 19 Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics //Computer Physics Reports. – 1988. – Vol. 7. – №. 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. – №. 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. Burtebayev et 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).