

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика.  
Астрономия сериясы, 2020, том 131, №2, 87-91 беттер  
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest\_phys@enu.kz

**ХҒТАР: 29.15.03; 29.15.19**

Ғ. Ергалиұлы<sup>1</sup>, Н. Амангелді<sup>1,2</sup>, Б. Мәуей<sup>2,3</sup>, Д. Солдатхан<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>2</sup> Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup> Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

(E-mail: gani.yergaliuly@mail.ru, nur19792@mail.ru, bahytbek01@yandex.kz,  
soldathan.dauren@mail.ru )

**Энергиясы 12-30 МэВ аралығындағы <sup>9</sup>Ве ядросының <sup>28</sup>Si ядросынан серпімді шашырауын оптикалық модель негізінде талдау**

**Аннотация:** ұсынылып отырған жұмыста <sup>9</sup>Ве ядросының <sup>28</sup>Si ядросында серпімді шашырау процестері қарастырылды. Негізгі зерттеу моделі ретінде ядроның оптикалық моделі қолданылды. Талдау үшін 12-30 МэВ аралығында жасалған эксперименттік мәліметтері жинақталды. Кулондық тосқауылға жақын энергиялардағы мәліметтерді талдау оптикалық потенциал параметрлерін нақтылауда өте маңызды болып табылады. Потенциалдың радиусы мен диффуздығының нақты және жорамал бөліктері бір-біріне тең деп болжамданып  $r_r = r_i$  және  $a_r = a_i$ , потенциал тереңдіктерінің нақты және жорамал құраушыларының қатынасы  $V_0 / W_0 \sim 10$  деген болжам бойынша ізделінді. Талдау жұмыстары FRESKO коды көмегімен іске асырылды.

**Түйін сөздер:** <sup>9</sup>Ве ядросы, серпімді шашырау, ядроның оптикалық моделі,  $V_0 / W_0$  арақатынасы, Fresco коды.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2020-131-2-87-91>

Түсті: 24.04.2020 / Қайта түзетілді: 05.05.2020 / Жарияланымға рұқсат етілді: 29.05.2020

**Кіріспе.** Атом ядроларының серпімді және серпімсіз түрде әсерлесу процестерін зерттеуге бағытталған жұмыстар ХХІ ғасырда да [1-5] қарқыны мен құндылығын жоғалтқан емес. Өйткені шашыраудың нәтижелері бойынша ядроның құрылымы мен қасиеттері жөнінде көптеген мағлұматтар алуға болады. Ол мәліметтердің дұрыс әрі нақты болуы, шашырау процесінің әсерлесу потенциалдары мен шұңқыр тереңдігінің параметрлерін нақтылау жұмыстарына тікелей түрде тәуелді. <sup>9</sup>Ве ядросын ион түрінде үдету мүмкіндігі іске асқан кезден бастап [6] оның басқа ядролармен соқтығысуы және одан туындаған реакцияларды зерттеу қызықты болып табылады. Оның негізгі себебі–<sup>9</sup>Ве ядросының экзотикалық ядро болып табылуында.

Бериллий ядросының спектроскопиясы, электрондар шашырауының форм-факторы, электромагниттік ауысымдары мен бета ыдырауының матрицалық элементтері эксперименттік тұрғыда [7-9] жақсы зерттелген. Мысалы, Mg-ден Ag-ге дейінгі түрлі ядролардан <sup>9</sup>Ве ядросының 14-26 МэВ энергиялық деңгей аралығында серпімді шашырауы Balzer R. мен әріптестерінің жұмысында [6] қарастырылды, <sup>9</sup>Ве ионы көміртегі <sup>12</sup>C ядросында серпімді шашырауы [10] жұмыста зерттелсе, келесідей мақалаларда [11,12] серпімді шашырау процесі кезіндегі «серпімді ауысым» механизмі сипатталды. Сондай-ақ басқа да еңбектерде [13-16] бериллий <sup>9</sup>Ве ядросының кремний <sup>28</sup>Si ядросымен серпімді шашырауы бақыланып зерттелді.

Ұсынылған жұмыстың негізгі мақсаты ретінде жоғарыда аталған <sup>9</sup>Ве ядросының <sup>28</sup>Si-ден  $E_{lab} = 12-30$  МэВ энергиялық диапазоны аралығындағы серпімді шашырау бойынша алынған эксперименттік мәліметтерді жақсы сипаттай алатын потенциал тереңдігінің параметрлерін алу болып қабылданды.

**Оптикалық модель (ОМ) негізінде талдау.** Атом ядросында бөлшектердің өзара соқтығысу потенциалдарын есептеуде ең көп қолданылатын әдістердің бірі, ол

серпімді шашырау мәндерін анализдеудің оптикалық моделіне (ОМ) негізделген – феноменологиялық түрде талдау әдісі [17].

Әдетте, есептеулер соқтығысатын бөлшектердің массалық центрі қашықтықтарына ғана тәуелді болатын орталық потенциалдармен шектеледі. Бұндай түрдегі оптикалық потенциалды келесідей жазуға болады:

$$U(r) = V_C(r) - V(r) - i[W_V(r) + W_S(r)], \quad (1)$$

бұл жерде теңдіктің алғашқы мүшесі -  $V_C(r)$  кулондық потенциал,  $V(r)$  - ядролық потенциалдың нақты құраушысы,  $W_V(r)$  және  $W_S(r)$  - жорамал потенциалдың тиісінше көлемдік және беттік мәндері. Талдау жұмыстары көлемдік түрдегі Саксон-Вудстық потенциалымен жүргізілді. Саксон-Вудс форм-факторын потенциалдың нақты және жорамал құраушылары үшін келесідей түрде жаза аламыз:

$$V = V_0 [1 + \exp\left(\frac{r - R_r}{a_r}\right)]^{-1}, \quad (2)$$

$$W = W_0 [1 + \exp\left(\frac{r - R_i}{a_i}\right)]^{-1}, \quad (3)$$

$V_0$  және  $W_0$ ,  $a_r$  және  $a_i$ ,  $R_r$  және  $R_i$  - потенциалдың реал және жорамал құраушыларының сәйкесінше тереңдіктері, диффузиялығы мен радиустары. Радиустарды әрекеттесетін ядролардың  $A_1$  және  $A_2$  массалық сандары негізінде сипаттай аламыз:

$$R = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}), \quad (4)$$

Кулондық радиус шамасы  $R_C$  үшін де дәл осы түрдегі тәуелділік орынды болады. Анализдеу жұмыстарында кулондық  $r_{0C} = 1,25$  фм ретінде тіркелді. Ядролардың серпімді шашыраудың дифференциалдық қимасы қарапайым шашырау амплитудасының квадратымен анықталады:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{el}} = |f(\theta)|^2 \quad (5)$$

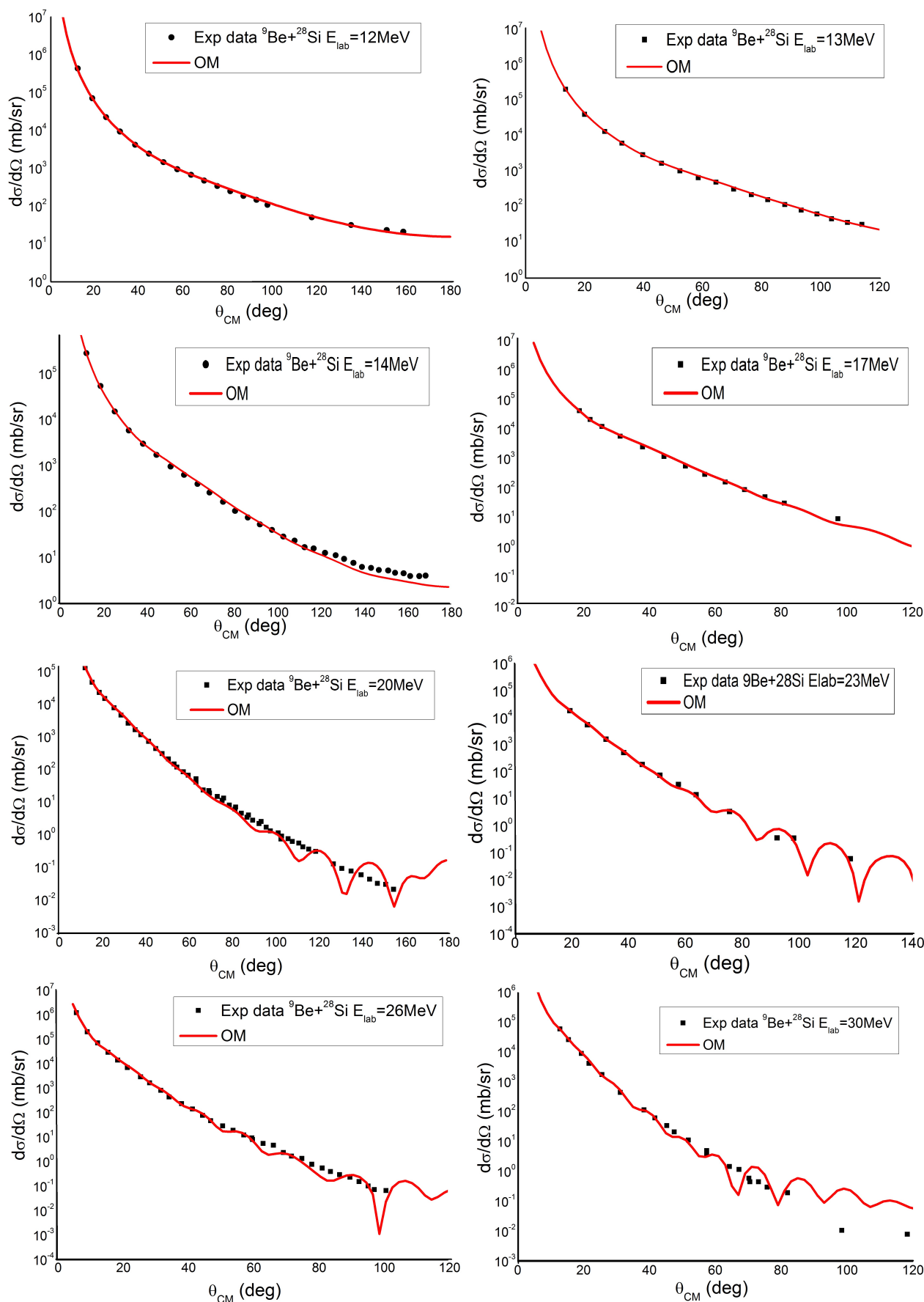
Оптикалық потенциалдың (ОП) параметрлері эксперименттік және теориялық бұрыштық таралулар арасында жақсы үйлесімділік табатындай етіп таңдалды. ОМ негізделген теориялық есептеулер FRESCO компьютерлік коды арқылы іске асырылды [18].

**Анализ нәтижесі.** ОП мәндерінің реал және жорамал радиустары мен диффуздығы өзара бір-біріне тең деген болжам бойынша  $r_r = r_i$  және  $a_r = a_i$  тіркелініп алынып, ал потенциалдық тереңдіктердің реал және жорамалдық бөліктерінің өзара қатынасы  $V_0/W_0 \sim 10$  деген болжамға тәуелді ізделініп, сәйкесінше 100 МэВ және 10 МэВ деп қабылданды. Талдаулар арқылы алынған параметрлердің нәтижелері 1-ші кестеде көрсетілген. Эксперименттік қима мен анализдік қималар қатынасының нәтижелерін төмендегі 1-суреттен бағалауға болады. 13 МэВ энергиядағы эксперимент нәтижелері [14] жұмыстан, қалған нәтижелер [13,15] жұмыстардан алынды. Эксперименттік нүктелерден қималардың біркелкі осцилляциялық тербеліссіз кему заңдылығын байқай аламыз. Ол төмен энергия аймағында (тосқауылға жақын энергиялар) фраунгоферлік түрдегі шашырауға қарағанда френелдік типтегі шашыраудың басымырақ екендігін көрсетеді. Дегенмен де, атом ядросының оптикалық моделінің негізгі мақсаты мен міндеті алдыңғы жартышардағы ( $<90^\circ$ ) қималарды нақтылау болып табылады.

Кесте 1 – <sup>9</sup> Ве+ <sup>28</sup> Si үшін қабылданған потенциал тереңдігінің параметрлері

$E_{lab} = 12-30$ МэВ	$V_0$ МэВ	$r_r$ фм	$a_r$	$W_0$ МэВ	$r_i$ фм	$a_i$ фм
ОМ	100	1.1	0.6	10	1.1	0.6

**Талдау қорытындысы.** <sup>9</sup> Ве ядросының <sup>28</sup> Si ядросынан 12-30 МэВ энергия аралығында серпімді түрде шашырауының эксперименттік мәндері ядроның оптикалық моделі негізінде Fresco бағдарламасы арқылы есептелді. Анализде  $r_r = r_i$  және  $a_r = a_i$  бекітілген мәндері



СҮРЕТ 1 –  $E_{lab} = 12\text{--}30$  МэВ аралығында  ${}^9\text{Be}$  ядросының  ${}^{28}\text{Si}$  ядросынан серпімді шашырауының бұрыштық таралуы. Қара нүктелер – эксперименттік мәндер, қызыл сызықтар – OM анализінің нәтижелері

мен  $V/W \approx 10$  шамасында деген болжам заңдылығы бойынша сипатталып көрсетілді. Талдау нәтижелері негізінде теориялық дифференциалдық қималардың эксперимент нүктелерін жақсы сипаттайтыны айқындалды. Зерттеудің алға қойған мақсаты белгілі бір энергия аралығындағы локалдық ОМ параметрлер жиынын алу болған. Бұл тұрғыда жұмыстың мақсаты орындалды деп айтуға болады. Алдағы уақытта осы нәтижелерді әрі қарай нақтылап, басқа да заңдылықтар, модельдер (нуклон-нуклондық) негізінде тексеру жұмыстары жоспарланып отыр.

### Әдебиеттер тізімі

- Behairy K. O., Mahmoud Z. M. M., Anwar M.  $\alpha$ -particle elastic scattering from <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, <sup>24</sup>Mg, and <sup>28</sup>Si // Nuclear Physics A. – 2017. – Т. 957. – С. 332-346.
- Burtebayev N. et al. Исследование упругого рассеяния ионов <sup>15</sup>N на ядрах <sup>9</sup>Be при Elab= 18, 75 МэВ // Recent Contributions to Physics (Rec. Contr. Phys.). – 2019. – Т. 71. – № 4. – С.4-9.
- Rudchik A. A. et al. Li 7+ B 11 elastic and inelastic scattering in a coupled-reaction-channels approach // Physical Review C. – 2005. – Т. 72. – № 3. – С. 034608.
- Mezhevych S. Y. et al. The <sup>13</sup>C+<sup>11</sup>B elastic and inelastic scattering and isotopic effects in the <sup>12</sup>C, <sup>13</sup>C+ <sup>11</sup>B scattering // Nuclear Physics A. – 2003. – Т. 724. – № 1-2. – С. 29-46.
- Deshmukh N. N. et al. Elastic and inelastic scattering for the B 11+ Ni 58 system: Target and projectile reorientation effects // Physical Review C. – 2015. – Т. 92. – № 5. – С. 054615.
- Balzer R. et al. Elastic scattering of <sup>9</sup>Be on heavy target nuclei // Nuclear Physics A. – 1977. – Т. 293. – № 3. – С. 518-530.
- Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei A= 5–10 // Nuclear Physics A. – 1984. – Т. 413. – № 1. – С. 1-168.
- Tilley D. R. et al. Energy levels of light nuclei A= 8, 9, 10 // Nuclear Physics A. – 2004. – Т. 745. – № 3-4. – С. 155-362.
- Ajzenberg-Selove F., Wardaski R. D., Middleton R. States in <sup>9</sup>Be from <sup>10</sup>B (t,  $\alpha$ ) <sup>9</sup>Be // Nuclear Physics A. – 1968. – Т. 116. – № 3. – С. 481-488.
- Ungricht E. et al. Elastic scattering of <sup>9</sup>Be on light target nuclei // Nuclear Physics A. – 1979. – Т. 313. – № 3. – С. 376-384.
- Jarczyk L. et al. Large angle elastic scattering of <sup>9</sup>Be ions on carbon isotopes // Nuclear Physics A. – 1979. – Т. 316. – № 1-2. – С. 139-145.
- Mateja J. F. et al. C 12 (Be 9, Be 9) C 12 (gs, 4.43 MeV) reaction // Physical Review C. – 1979. – Т. 20. – № 1. – С. 176.
- Bodek K. et al. The energy dependence of fusion in the <sup>9</sup>Be+ <sup>28</sup>Si system // Nuclear Physics A. – 1980. – Т. 339. – № 2. – С. 353-364.
- Zisman M. S. et al. Dominance of strong absorption in Be 9+ Si 28 elastic scattering // Physical Review C. – 1980. – Т. 21. – № 6. – С. 2398.
- Hugi M. et al. Fusion and direct reactions for strongly and weakly bound projectiles // Nuclear Physics A. – 1981. – Т. 368. – № 1. – С. 173-188.
- Glukhov Y. A. et al. Nuclear rainbow in elastic scattering of <sup>9</sup>Be nuclei // Physics of Atomic Nuclei. – 2010. – Т. 73. – № 1. – С. 14-23.
- Hodgson P. E. The nuclear optical model // Reports on Progress in Physics. – 1971. – Т. 34. – № 2. – С. 765.
- Thompson I. J. Getting started with FRESCO // Comput. Phys. Rep. – 1988. – Т. 7. – С. 167-212.

Г. Ергалиулы<sup>1</sup>, Н. Амангелды<sup>1,2</sup>, Б. Мауей<sup>2,3</sup>, Д. Солдатхан<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<sup>2</sup> Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

#### Анализ упругого рассеяния ядра <sup>9</sup>Ве на <sup>28</sup>Si в интервале энергий 12-30 МэВ в рамках оптической модели

**Аннотация.** В представленной работе был проанализирован процесс упругого рассеяния ядра <sup>9</sup>Ве на ядре <sup>28</sup>Si. Основным инструментом исследования была выбрана оптическая модель ядра. Для анализа подбирались экспериментальные данные в интервале энергий 12-30 МэВ. Анализ экспериментальных данных при энергиях, близких к кулоновскому барьеру, очень важен для уточнения параметров оптического потенциала. Произведен поиск параметров ввиду предположения, что реальные и мнимые составляющие радиуса и диффузности потенциала равны друг другу  $r_r = r_i$ ,  $a_r = a_i$ , а соотношение реальной части глубины потенциала к мнимой части  $V_0 / W_0 \approx 10$ . Данные анализировались с помощью кода FRESCO.

**Ключевые слова:** ядро <sup>9</sup>Ве, упругое рассеяние, оптическая модель ядра, соотношение  $V_0 / W_0$ , Fresco код.

G. Yergaliuly<sup>1</sup>, N. Amangeldi<sup>1,2</sup>, V. Mauey<sup>1,3</sup>, D. Soldatkhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>2</sup> The Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

**Analysis of elastic scattering of the <sup>9</sup>Be nucleus from <sup>28</sup>Si in the energy range of 12-30 MeV in the framework of an optical model**

**Abstract.** In the present work, we analyzed the process of elastic scattering of the <sup>9</sup>Be nucleus from <sup>28</sup>Si nucleus. The optical model of the nucleus was chosen as the basis for the study. For analysis, experimental data were collected in the energy range of 12-30 MeV. Analysis of experimental data of energies close to the Coulomb barrier is very important for clarifying the parameters of the optical potential. A search was made for the parameters, assuming that the real and imaginary components of the radius and diffuseness of the potential are equal to each other  $r_r = r_i$ ,  $a_r = a_i$ , and the ratio of the real part of the depth of the potential to the imaginary part is  $V_0 / W_0 \approx 10$ . Data was analyzed using the FRESKO code.

**Keywords:** <sup>9</sup>Be nuclei, optical model of the nucleus,  $V_0 / W_0$  relation, FRESKO code.

## References

- 1 Behairy K. O., Mahmoud Z. M. M., Anwar M.  $\alpha$ -particle elastic scattering from <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, <sup>24</sup>Mg, and <sup>28</sup>Si, Nuclear Physics A, 957, 332-346 (2017).
- 2 Burtebayev N. et al. Investigation of the elastic scattering of <sup>15</sup>N radiation by <sup>9</sup>Be nuclei at  $E_{lab} = 18,75$  MeV, (in russian) Recent Contributions to Physics, 4 (71), 4-9 (2019).
- 3 Rudchik A. A. et al. Li <sup>7+</sup> B <sup>11</sup> elastic and inelastic scattering in a coupled-reaction-channels approach, Physical Review C, 3(72), 034608 (2005).
- 4 Mezhevych S. Y. et al. The <sup>13</sup>C+<sup>11</sup>B elastic and inelastic scattering and isotopic effects in the <sup>12</sup>, <sup>13</sup>C+ <sup>11</sup>B scattering, Nuclear Physics A, 1-2 (724), 29-46 (2003).
- 5 Deshmukh N. N. et al. Elastic and inelastic scattering for the B <sup>11+</sup> Ni <sup>58</sup> system: Target and projectile reorientation effects, Physical Review C, 5 (92), 054615 (2015).
- 6 Balzer R. et al. Elastic scattering of <sup>9</sup>Be on heavy target nuclei, Nuclear Physics A, 3 (293), 518-530 (1977).
- 7 Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei A= 5–10, Nuclear Physics A, 1 (413), 1-168 (1984).
- 8 Tilley D. R. et al. Energy levels of light nuclei A= 8, 9, 10, Nuclear Physics A, 3-4 (745), 155-362 (2004).
- 9 Ajzenberg-Selove F., Wardaski R. D., Middleton R. States in <sup>9</sup>Be from <sup>10</sup>B ( $t$ ,  $\alpha$ ) <sup>9</sup>Be, Nuclear Physics A, 3 (116), 481-488 (1968).
- 10 Ungricht E. et al. Elastic scattering of <sup>9</sup>Be on light target nuclei, Nuclear Physics A, 3 (313), 376-384 (1979).
- 11 Jarczyk L. et al. Large angle elastic scattering of <sup>9</sup>Be ions on carbon isotopes, Nuclear Physics A, 1-2 (316), 139-145 (1979).
- 12 Mateja J. F. et al. C <sup>12</sup> (Be <sup>9</sup>, Be <sup>9</sup>) C <sup>12</sup> (gs, 4.43 MeV) reaction, Physical Review C, 1 (20), 176 (1979).
- 13 Bodek K. et al. The energy dependence of fusion in the <sup>9</sup>Be+ <sup>28</sup>Si system, Nuclear Physics A, 2 (339), 353-364 (1980).
- 14 Zisman M. S. et al. Dominance of strong absorption in Be <sup>9+</sup> Si <sup>28</sup> elastic scattering, Physical Review C, 6 (21), 2398 (1980).
- 15 Hugi M. et al. Fusion and direct reactions for strongly and weakly bound projectiles, Nuclear Physics A, № 1 (368), 173-188 (1981).
- 16 Glukhov Y. A. et al. Nuclear rainbow in elastic scattering of <sup>9</sup>Be nuclei, Physics of Atomic Nuclei, 1 (73), 14-23 (2010).
- 17 Hodgson P. E. The nuclear optical model, Reports on Progress in Physics, 2 (34), 765 (1971).
- 18 Thompson I. J. Getting started with FRESKO, Comput. Phys. Rep, 7, 167-212 (1988).

### Авторлар туралы мәлімет:

*Ергалиұлы Ғ.* - Халықаралық ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының 2 курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан.  
*Амангелді Н.* - PhD, Халықаралық ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының доценті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан.  
*Мауей В.* - PhD, Біріккен ядролық зерттеулер институтының ғылыми қызметкері, Дубна қ., Ресей Федерациясы.  
*Солдатхан Д.* - Халықаралық ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының 1 курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан.

*Yergaliuly G.* - 2<sup>nd</sup> year PhD student, International Department of "Nuclear Physics, New Materials and Technologies", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Amangeldi N.* - PhD, Associate Professor, International Department of "Nuclear Physics, New Materials and Technologies", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Mauey B.* - PhD, Scientific Researcher at the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation.

*Soldatkhan D.* - 1<sup>st</sup> year PhD student, International Department of "Nuclear Physics, New Materials and Technologies", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Nur-Sultan, Kazakhstan.