

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 135, №2, 24-30 беттер  
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest\_phys@enu.kz

МРНТИ: 29.15.03; 29.15.17; 29.15.19

Ғ. Ергалиұлы, А.К. Морзабаев, Н. Амангелді, Д. Солдатхан, А.Г. Балабай, И.А. Жаксат,  
Н.Н. Сабырбеков, А.С. Сагадиев

*Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан  
(E-mail: yergaliuly.gani@gmail.com)*

**Исследование вклада протонного обмена в сечение упругого рассеяния  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$**

**Аннотация:** несмотря на то что оптическая модель (ОМ) хорошо описывает экспериментальные данные углов передней полусферы, во многих случаях она не способна воспроизвести обратные максимумы сечения (ОМС) наблюдаемые под большими углами ( $<90^\circ$ ). Включение обменных механизмов в расчеты позволяет описать экспериментальные данные в полном угловом диапазоне. В представленной работе приведены теоретические анализы экспериментальных сечений  $^{11}\text{B}$  на ядрах  $^{12}\text{C}$  при  $E_{c.m.}=14.6$  МэВ в рамках оптической модели (ОМ), метода двойной свертки (double folding-DF) и метода искаженных волн с конечным радиусом взаимодействия (МИВОКОР) с использованием кодов FRESKO и DFROT. Амплитуда спектроскопии, извлеченная для  $^{12}\text{C} \rightarrow (^{11}\text{B}+p)$  хорошо согласуется с литературными данными.

**Ключевые слова:** оптическая модель, метод двойной свертки, метод искаженных волн, обменный механизм, спектроскопическая амплитуда, Fresco и DFROT коды.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-135-2-24-30>

Поступила: 19.02.2021/ Допущена к опубликованию: 15.05.2021

**Введение.** Рассеяния тяжелых ионов широко используются для изучения структуры ядра, а также взаимодействия ядра с ядром. Свойства межъядерного взаимодействия обычно изучаются методами квантовой теории рассеяния. Феноменологическая оптическая модель (ОМ) является одним из таких методов, который можно эффективно использовать для определения различных параметров, подбирая их для описания экспериментальных данных упругого рассеяния. Но во многих экспериментах наблюдаются обратные максимумы сечений (ОМС) [1,2]. Такой подъем угловых распределений упругого рассеяния называется «упругим переносом». Такие процессы являются наилучшими кинематически согласованными реакциями переноса, и поэтому ожидается, что они будут протекать с большой вероятностью.

Для полного анализа экспериментальных данных широко используется метод искаженных волн с конечным радиусом взаимодействия (МИВОКОР) [3,4]. До сегодняшнего дня были проведены обширные исследования однопротонного переноса при упругом рассеянии тяжелых ионов при энергиях около и/или выше кулоновского барьера [5-8]. В большинстве случаев метод искаженных волн (МИВ) хорошо воспроизводит экспериментальные данные рассеяния под обратными углами с нуклонными спектроскопическими факторами, близкими к известным из теории или других экспериментов с тяжелыми ионами. Однако при рассеянии  $^{11}\text{B}$  на ядрах  $^{12}\text{C}$  обнаружилось заметное расхождение с теоретическими расчетами [9]. Следует подчеркнуть, что в этой работе значение спектроскопического фактора при  $E_{cm}=14,6$  МэВ было равным  $SF=5.5$ , что не только превышает предсказание ( $SF=2.85$ ) Коэна-Курата [10] примерно в 2 раза, но даже лежит на 40% выше самого высокого, по теоретическим соображениям, допустимого значения. Аналогично, из данных, измеренных при энергиях несколько меньших - 14,6 МэВ (в системе центра масс) и проанализированных в рамках МИВ без отдачи [11] или с помощью метода молекулярных волновых функций [12], были также найдены большие значения протонного спектроскопического фактора, опять же значительно превышающие теоретический расчет. А вот в работе [13] при энергиях 5.4, 6.5 и 7.6 МэВ в системе ц.м., используя геометрию для потенциала связывания протонов, согласующуюся с

распределением заряда, полученным при рассеянии электронов при высоких энергиях, авторы получили для спектроскопического коэффициента протонов  $1p_{3/2}$  значение  $SF = 2.75 \pm 0.4$ , что очень близко к теоретическому анализу Коэна-Курата.

Исходя из вышеуказанных данных, целью настоящей работы было определение оптимальных оптических параметров в рамках ОМ и вывод спектроскопической амплитуды, согласующийся с теоретическими значениями для системы  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  при энергии 14.6 МэВ в системе центра масс.

**Анализ в рамках оптической модели ядра и двойной свертки.** Данные по упругому рассеянию  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  при энергии  $E_{cm} = 14.6$  МэВ [9,14,15] были проанализированы в рамках ОМ с использованием потенциала типа Вудса – Саксона объемного характера. Форм-фактор Вудса-Саксона для реального и мнимого потенциала можно записать как:

$$U = V + iW, V = V_0[1 + \exp(r - R_r)/a_r]^1, W = W_0[1 + \exp(r - R_i)/a_i]^1, \quad (1)$$

$V_0$  и  $W_0$ ,  $a_r$  и  $a_i$ ,  $R_r$  и  $R_i$  - глубина, диффузность и радиусы реального и мнимого потенциалов соответственно. Радиусы выражаются через массовые числа  $A_1$  и  $A_2$  участвующих ядер, определяемые как:

$$R = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \quad (2)$$

Такая же зависимость имеет место для кулоновского радиуса  $R_C$ . Для расчетов было выбрано фиксированное значение  $r_{0C} = 1,25$  Ферми.

Подбирались такие параметры оптических потенциалов, которые достигали оптимального согласия между расчетными и экспериментальными сечениями. Теоретические анализные расчеты извлекались с помощью программы FRESCO code [16].

Для ограничения дискретной неоднозначности в параметрах ОП был проведен анализ данных в рамках метода двойного фолдинга (свертка) [17]. Потенциал двойной свертки можно записать как:

$$V_{DF}(r) = \int dr_1 \int dr_2 \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) v_{NN}(r_{12}) \quad (3)$$

Здесь  $\rho_i$  - это распределение плотности нуклонов в системе центра масс в основном состоянии  $i$ -го ядра. Действительный потенциал двойной свертки (DF)  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$   $V_{DF}(r)$  рассчитывался с помощью кода DFROT [18] с использованием  $v_{NN}$  нуклон-нуклонного потенциала МЗУ (Reid) и распределений плотности заряда, взятых из [19], откуда и были получены значения среднеквадратичных радиусов  $\langle r^2 \rangle_{1/2}$  для  $^{11}\text{B} = 2,406$  и  $^{12}\text{C} = 2,47$ . На рисунке 1 приведено сравнение действительного  $V - WS_{real}$  и мнимого  $W - WS_{im}$  потенциалов  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  с потенциалом DF рассчитанным с использованием DFROT кода. Результаты показывают что параметры оптического потенциала хорошо согласуются с данными потенциала двойной свертки.

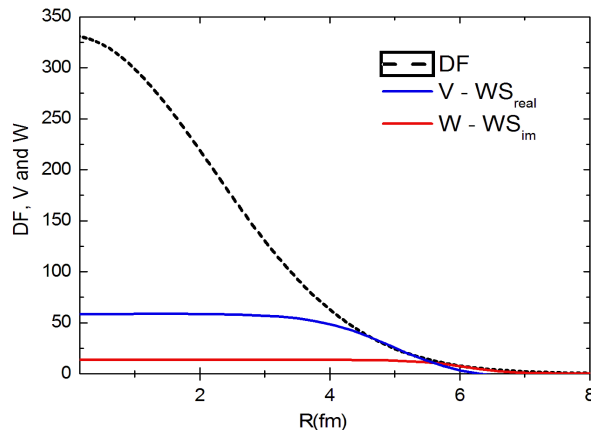


Рисунок 1 – Сравнение действительного  $V_{WS}$  и мнимого  $W_{WS}$  потенциалов  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  с потенциалом DF

**Анализ МИВОКОР.** Колебания в сечениях являются интерференционным явлением между упругим рассеянием и переносом при упругом рассеянии. Чтобы включить последний процесс в теоретические расчеты, амплитуда упругого рассеяния  $f_{el}(\theta)$  была дополнена амплитудой упругого переноса  $f_{tr}(\pi - \theta)$ :

$$d\sigma/d\Omega = |f_{el}(\theta) + SAf_{tr}(\pi - \theta)|^2 \quad (4)$$

здесь SA – спектроскопическая амплитуда.

Предполагалось, что потенциал, связывающий протон с ядром  $^{11}\text{B}$  в  $^{12}\text{C}$ , имеет форму Вудса-Саксона с геометрическими параметрами  $r=1.25$  Фм,  $a=0.65$  Фм [13] и глубиной, скорректированной для получения соответствующей  $\epsilon$  энергии связи (см. таблица 1). Соответствующий потенциал и волновая функция связанного  $1p_{3/2}$  состояния протона в ядре  $^{12}\text{C}$  приведены на рисунке 2.

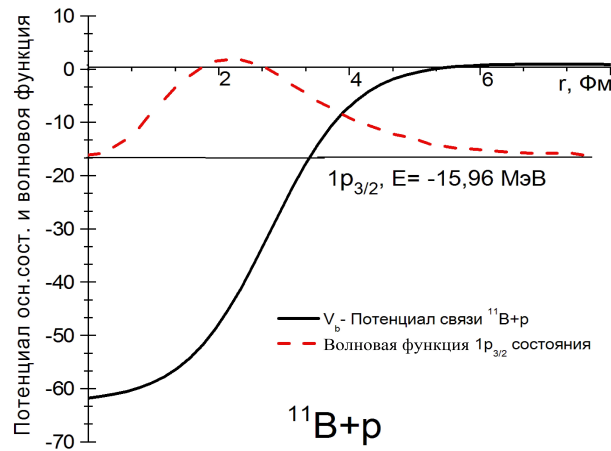


Рисунок 2 – Потенциал и волновая функция  $^{11}\text{B}+p$  состояния.

Таблица 1 – Параметры потенциала, связывающие протон с ядром  $^{11}\text{B}$ , и значения квантовых чисел для overlap (перекрытий), используемые в настоящей статье (также приведена амплитуда спектроскопии SA для сост.  $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}+p$ . L, S, J – квантовые числа)

L	S	J=L+S	Число узлов N	Энергия связи $\epsilon$ (МэВ)	$V_b$ , МэВ	$r_b$ , Фм	$a_b$ , Фм	SA
1.0	0.5	1.5	1.0	15.96	66.6	1.25	0.65	1.25

**Основные результаты и обсуждения.** Для анализа была выбрана система  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  при энергии 14.6 МэВ в с.д.м. При такой энергии были найдены следующие работы [9,14,15]. Расчеты ОМ и МИВОКОР проводились с использованием программного кода FRESKO. Для расчета DF потенциала использовалась вышеупомянутая программа DFROT. В таблице 2 приведены оптимальные параметры потенциалов, найденные при описании данных в рамках этих моделей. Следует отметить, что для наших оптических параметров коэффициент нормализации был равен  $N_r = 1,0$ .

Таблица 2 – Оптимальные параметры для системы  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  при  $E_{cm} = 14.6$  МэВ

$E_{cm}=14.6\text{МэВ}$	$V_0$ (МэВ)	$r_r$ (Фм)	$a_r$ (Фм)	$W_0$ (МэВ)	$r_i$ (Фм)	$a_i$ (Фм)	$N_r$	$\chi^2/N$	Источник
ОМ	53.5	1.108	0.545	23.3	1.108	0.545			[9]
ОМ	100	1.11	0.545	23.3	1.11	0.545			[14]
ОМ	70	1.1	0.6	13.526	1.35	0.3595		5.83	Наши
DF				13.526	1.35	0.3595	1.0	6.75	Наши
ОМ+МИВ	70.0	1.1	0.6	13.526	1.35	0.3595		9.28	Наши

Сопоставление вычисленных сечений с экспериментальными данными показано на рисунке 3 (черные круги- из[9], квадраты из [14], и оранжевые треугольники из [15]). Из рисунка видно, что если в передних углах наблюдается ритмичный осцилляционный спад, то на обратных углах ( $>90^\circ$ ) структура дифракции усиливается и рост сечения возрастает с дальнейшим увеличением угла. ОМ ядра (кривая-зеленая) не может объяснить таких феноменов.

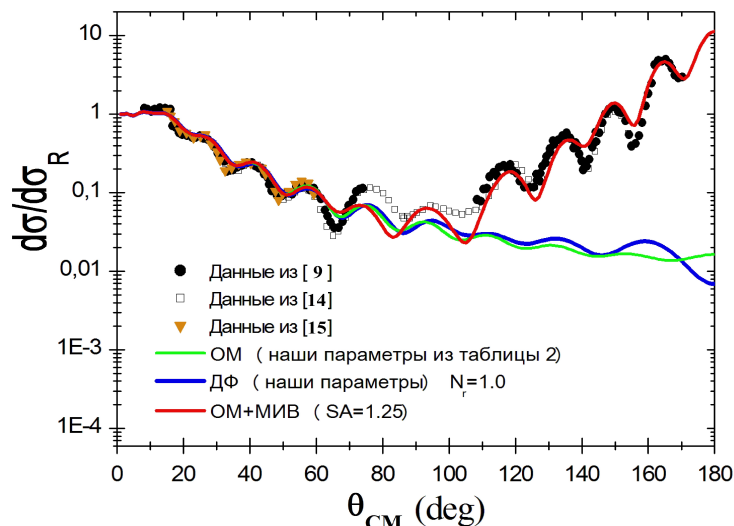


Рисунок 3 – Сечение упругого рассеяния  $^{11}\text{В}$  на ядрах  $^{12}\text{С}$  при  $E_{cm} = 14.6$  МэВ

Только при учетывании механизма обмена с передачей протона удается достичь согласия с экспериментом. В этом случае при расчете сечений значение амплитуды спектроскопии - SA для  $p + ^{11}\text{В}$  было свободным параметром и извлекалось из сравнения анализных сечений с лабораторными. Наилучшее описание данных из эксперимента равняется на  $SA = 1.25$  (рисунок 4). Полученное нами значение согласуется с теоретическим значением  $SA = 1.7$ , вычисленным в рамках модели оболочек трансляционно-инвариантного типа [20].

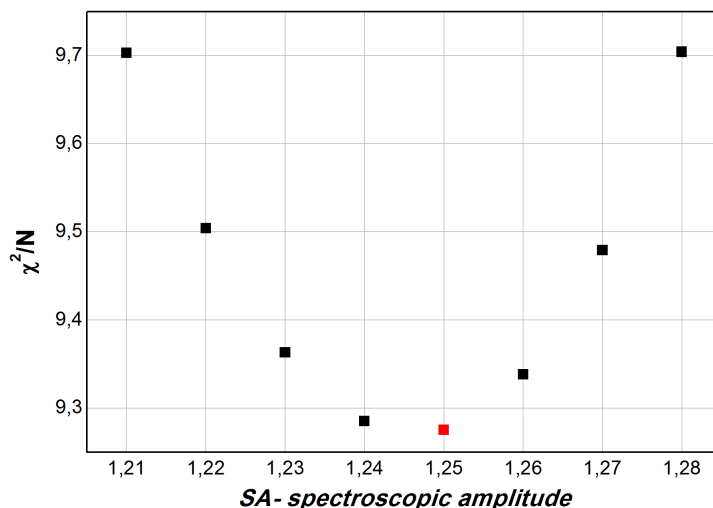


Рисунок 4 – Вариация  $\chi^2/N$  для достижения наилучшего значения SA

**Заклучение.** Анализ данных упругого сечения ядер  $^{11}\text{В}$  на  $^{12}\text{С}$  при  $E_{cm} = 14.6$  МэВ проводился с использованием программных кодов FRESKO code и DFPOТ. В программах учитывались упругое рассеяние ядер и упругая передача протона, рассчитываемая в рамках МИВОКОР. Было показано, что ОМ ядра не в состоянии объяснить ОМС. Согласия с

экспериментальными данными удастся достичь, только учитывая обменный механизм с передачей протона. В анализе для упругого и неупругого трансфера использовались одни и те же параметры. В результате теоретических расчетов было получено значение амплитуды  $SA = 1.25$  для состояния  $^{12} \text{C} \rightarrow ^{11} \text{B} + p$ , что находится в хорошем согласии с расчетами в рамках трансляционно-инвариантной модели оболочек.

### Список литературы

- 1 Chua L.T. et al.  $6\text{Li}$  elastic scattering ON  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{74}\text{Ge}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ,  $^{166}\text{Er}$  and  $^{208}\text{Pb}$  at  $E(6\text{Li}) = 50.6$  MeV // Nuclear Physics A. – 1976. – Т. 273. – № 1. – С. 243-252.
- 2 Gutbrod H. H. et al. Elastic and inelastic scattering of  $^{16}\text{O}$  by  $^{12}\text{C}$  at forward and backward angles // Zeitschrift für Physik. – 1973. – Т. 262. – № 5. – С. 377-392.
- 3 Austern N. et al. Theory of finite-range distorted-waves calculations // Physical Review. – 1964. – Т. 133. – №. 1B. – С. B3.
- 4 Zelenskaya N.S. et al. Program OLYMP for the analysis of direct nuclear reactions with semi heavy particles: The problem of automatic determination of integration range // INT. J. MOD. PHYS. C. – 1991. – Т. 2. – № 1. – С. 552-556.
- 5 Korner H.J. et al. O  $^{16}$ -Induced Transfer Reactions on fp-Shell Target Nuclei. I. The (O  $^{16}$ , N  $^{15}$ ) One-Proton Transfer Reaction // Physical Review C. – 1973. – Т. 7. – № 1. – С. 107.
- 6 Peng J.C. et al. One-proton transfer reactions induced by O  $^{16}$  and C  $^{12}$  on Ni  $^{62}$  target isotope // Physical Review C. – 1977. – Т. 15. – № 4. – С. 1331.
- 7 Barioni A. et al. Elastic scattering and total reaction cross sections for the Li  $^{8+}$  C  $^{12}$  system // Physical Review C. – 2009. – Т. 80. – № 3. – С. 034617.
- 8 Sinclair D. Heavy ion one-and two-photon transfer reactions // Physics Letters B. – 1974. – Т. 53. – № 1. – С. 54-56.
- 9 Albergo S. et al. Elastic transfer in the B  $^{11+}$   $^{12}\text{C}$  system in the cm energy range 5–40 MeV // Physical Review C. – 1991. – Т. 43. – № 6. – С. 2704.
- 10 Cohen S., Kurath D. Spectroscopic factors for the  $1p$  shell // Nuclear Physics A. – 1967. – Т. 101. – № 1. – С. 1-16.
- 11 Bohne W. et al. Elastic transfer of a  $1p_{3/2}$  hole in the scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{11}\text{B}$  // Nuclear Physics A. – 1974. – Т. 222. – № 1. – С. 117-124.
- 12 Duck P. et al. Analysis of the elastic scattering of  $^{12}\text{C}$  on  $^{11}\text{B}$  in the framework of the molecular wave function method // Nuclear Physics A. – 1975. – Т. 251. – № 2. – С. 344-352.
- 13 Jarczyk L. et al.  $p$ -  $^{11}\text{B}$  spectroscopic factor from the interference of potential scattering and elastic transfer at low energies // Physical Review C. – 1985. – Т. 31. – № 1. – С. 12.
- 14 Sromicki J. et al. The role of particle transfer in large-angle scattering of  $1p$ -shell nuclei // Nuclear Physics A. – 1983. – Т. 406. – № 2. – С. 390-412.
- 15 Voos U.C., Von Oertzen W., Bock R. Optical-model analysis of the elastic scattering of complex nuclei at low energies // Nuclear Physics A. – 1969. – Т. 135. – № 1. – С. 207-224.
- 16 Thompson I.J. Getting started with FRESKO // Comput. Phys. Rep. – 1988. – Т. 7. – С. 167-212.
- 17 Satchler G.R., Love W.G. Folding model potentials from realistic interactions for heavy-ion scattering // Physics Reports. – 1979. – Т. 55. – № 3. – С. 183-254.
- 18 Cook J. DFPOТ-a program for the calculation of double folded potentials // Computer Physics Communications. – 1982. – Т. 25. – № 2. – С. 125-139.
- 19 Angeli I., Marinova K.P. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 2013. – Т. 99. – № 1. – С. 69-95.
- 20 Rudchik A.T. et al. The  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  elastic and inelastic scattering at  $E_{\text{lab}}(^{11}\text{B}) = 49$  MeV and energy dependence of the  $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$  interaction // Nuclear Physics A. – 2001. – Т. 695. – № 1-4. – С. 51-68.

**Ғ. Ергалиұлы, А.К. Морзабаев, Н. Амангелді, Д. Солдатхан, А.Г. Балабай, І.А. Жақсат, Н.Н. Сабырбеков, А.С. Сагадиев**

*Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан*

**$^{11}\text{B}$  ядросының  $^{12}\text{C}$  ядросынан серпімді шашырауына протондық ауысым әсерін зерттеу**

**Аннотация.** Алдыңғы бұрыштардағы эксперименттік мәліметтерді оптикалық модель (ОМ) жақсы сипаттағанына қарамастан, көп жағдайда жоғары бұрыштардағы ( $< 90^\circ$ ) қиманың максимумдарын сипаттай алмайды. Көп жағдайда, толық бұрыштық диапазонда эксперименттік мәліметтерді тек ауысым механизмін қосу арқылы ғана сипаттай аламыз. Ұсынылып отырған жұмыста  $^{11}\text{B}$  ядросының  $^{12}\text{C}$  ядросынан  $E_{\text{cm}} = 14.6$  МэВ шамасында шашырауының эксперименттік мағлұматтарының DFPOТ және Fresco программалары арқылы оптикалық модель, фолдинг модель, және шекті радиусқа ие бұрмаланған толқындар әдісі аясындағы териялық талдаулары көрсетілген. Алынған спектроскопиялық амплитуда  $^{12}\text{C} - ^{11}\text{B} + p$  әдебиеттік мәндермен жақсы үйлеседі.

**Түйін сөздер:** оптикалық модель, фолдинг әдісі, бұрмаланған толқындар, ауысым механизмі, спектроскопиялық амплитуда, Fresco мен DFPOТ кодтары.

G. Yergaliuly, A.K. Morzabayev, N. Amangeldi, D. Soldatkhan, A.G. Balabay, I.A. Zhaksat, N.N. Sabyrbekov, A.S. Sagadiyev

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

### Contribution of proton exchange to the elastic scattering cross section of $^{11}\text{B}$ on $^{12}\text{C}$

**Abstract.** Despite the fact that the optical model (OM) well explain the experimental data of the angular distributions of the front angles, in many cases it cannot explain the inverse maximum values observed at angles ( $<90^\circ$ ). In many ways, the inclusion of exchange mechanisms in the calculations allows us to describe experimental data in the full angular range. This paper presents theoretical analyses of experimental cross sections  $^{11}\text{B}$  on  $^{12}\text{C}$  at  $E_{cm}=14.6$  MeV in the framework of the optical model (OM), the double folding method (DF) and the method of distorted waves with a finite interaction radius (EFR DWBA) using the codes FRESCO and DFPOТ. As a result, optimal potential parameters were obtained and the spectroscopic amplitude (SA) for the state  $^{12}\text{C} - ^{11}\text{B}+p$  was extracted.

**Keywords:** optical model, double folding, distorted wave method, exchange mechanism, spectroscopic amplitude, Fresco and DFPOТ codes.

## References

- 1 Chua L.T. et al. 6Li elastic scattering ON 12C, 16O, 40Ca, 58Ni, 74Ge, 124Sn, 166Er and 208Pb at  $E(6\text{Li})=50.6$  MeV, Nuclear Physics A., 1(273), 243-252 (1976).
- 2 Gutbrod H.H. et al. Elastic and inelastic scattering of 16 O by 12 C at forward and backward angles, Zeitschrift fur Physik., 5(262), 377-392 (1973).
- 3 Austern N. et al. Theory of finite-range distorted-waves calculations, Physical Review C, 1(133), 3 (1964).
- 4 Zelenskaya N.S. et al. Program OLYMP for the analysis of direct nuclear reactions with semi heavy particles: The problem of automatic determination of integration range, INT. J. MOD. PHYS. C., 1(2), 552-556 (1991).
- 5 Korner H.J. et al. O 16-Induced Transfer Reactions on fp-Shell Target Nuclei. I. The (O 16, N 15) One-Proton Transfer Reaction, Physical Review C., 1(7), 107 (1973).
- 6 Peng J.C. et al. One-proton transfer reactions induced by O 16 and C 12 on Ni 62 target isotope, Physical Review C., 4(15), 1331 (1977).
- 7 Barioni A. et al. Elastic scattering and total reaction cross sections for the Li 8+ C 12 system, Physical Review C., 3(80), 034617 (2009).
- 8 Sinclair D. Heavy ion one-and two-photon transfer reactions, Physics Letters B., 53(1), 54-56 (1974).
- 9 Albergo S. et al. Elastic transfer in the B 11+ 12 C system in the cm energy range 5–40 MeV, Physical Review C., 6(43), 2704 (1991).
- 10 Cohen S., Kurath D. Spectroscopic factors for the 1p shell, Nuclear Physics A., 101(1), 1-16 (1967).
- 11 Bohne W. et al. Elastic transfer of a 1p32 hole in the scattering of 12C on 11B, Nuclear Physics A., 1(222), 117-124 (1974).
- 12 Duck P. et al. Analysis of the elastic scattering of 12C on 11B in the framework of the molecular wave function method, Nuclear Physics A., 2(251), 344-352 (1975).
- 13 Jarczyk L. et al. p- 11 B spectroscopic factor from the interference of potential scattering and elastic transfer at low energies, Physical Review C., 1(31), 12 (1985).
- 14 Sromicki J. et al. The role of particle transfer in large-angle scattering of 1p-shell nuclei, Nuclear Physics A., 2(406), 390-412 (1983).
- 15 Voos U. C., Von Oertzen W., Bock R. Optical-model analysis of the elastic scattering of complex nuclei at low energies, Nuclear Physics A., 1(135), 207-224 (1969).
- 16 Thompson I.J. Getting started with FRESCO, Comput. Phys. Rep., 7, 167-212 (1988).
- 17 Satchler G.R., Love W.G. Folding model potentials from realistic interactions for heavy-ion scattering, Physics Reports., 3(55), 183-254 (1979).
- 18 Cook J. DFPOТ-a program for the calculation of double folded potentials, Computer Physics Communications, 2(25), 125-139 (1982).
- 19 Angeli I., Marinova K. P. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update, Atomic Data and Nuclear Data Tables., 1(99), 69-95 (2013).
- 20 Rudchik A.T. et al. The 11B+ 12C elastic and inelastic scattering at Elab (11B)= 49 MeV and energy dependence of the 11B+ 12C interaction, Nuclear Physics A., 695, 51-68 (2001).

#### Сведения об авторах:

*Ергалиұлы Ғ.* - **основной автор**, докторант 3-го курса Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Морзабаев А.К.* - кандидат физико-математических наук, профессор Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Амангелді Н.* - PhD, доцент Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Солдатхан Д.* - докторант 2-го курса Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Балабай А.Г.* - магистрант 1-го курса Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Жаксат I.A.* - магистрант 1-го курса Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Сабьрбеков Н.Н.* - магистрант 1-го курса Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Сагадиев А.С.* - магистрант 1-го курса Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Нур-Султан, Казахстан.

*Yergaliuly G.* - **The main author**, 3<sup>rd</sup> year doctoral student of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Morzabayev A.K.* - Professor of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan. E-mail:

*Amangeldi N.* - PhD, Associate Professor of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Soldatkhan D.* - 2<sup>nd</sup> year doctoral student of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Balabay A.G.* - 1<sup>st</sup> year masters of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Zhaksat I.A.* - 1<sup>st</sup> year masters of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan. E-mail: turarrauan@gmail.com

*Sabyrbekov N.N.* - 1<sup>st</sup> year masters of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Sagadiyev A.S.* - 2<sup>nd</sup> year master student of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Satpayev str., 2, Nur-Sultan, Kazakhstan.