

Н. Амангелді^{1,2}, Д. Солдатхан¹, Д. Шәудірбаева¹,
А. Әнуар¹, Л. Қасымханова¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

***a*- бөлшектердің ⁹Be ядросымен соқтығысу кезіндегі серпімді шашырауының жаһандық заңдылықтары**

Аңдатпа. Мақалада $a+^9\text{Be}$ ядролық жүйенің төмен энергия диапазонында серпімді шашырау қимасының эксперименталдық деректерінің сипаттамасына зерттеу жүргізілді. Алынған қималар параметрлерінің үдетілген ион энергиясының өзгеруімен тәуелді жалпы заңдылықтары белгіленген. Оптикалық модель (ОМ) шеңберінде талдау негізінде энергиялардың кең диапазонында өзара әрекеттесудің энергетикалық тәуелді оптикалық потенциалдары табылған. Жүйелі талдаудың нәтижесінде анықталған потенциалдардың энергетикалық заңдылығы эксперименттік өлшеулер жүргізілмеген энергия кезіндегі процестердің қимасын жеткілікті дәлдігімен болжауға мүмкіндік береді. Ядролар арасындағы әсерлесудің кешендік функциясы болып табылатын потенциал, шашырау процесінде өзара әрекеттесуді сипаттайтын эмпирикалық өлшем болып табылады. Потенциалдың сыртқы факторларымен тәуелділігін құру зерттеулерін әрбір ядролық жүйесі үшін жеке жүргізу қажет. Феноменологиялық теориялардың дәлдігін арттыру мақсатында жасалатын мұндай талдаулар эксперименталды деректердің үлкен массивіне сүйенуі тиіс. Феноменологиялық тәсілдердің нәтижелерінің шынайлығын нақтылау үшін теориялық тұрғыдан потенциалдардың және толық реакция қиманың энергетикалық тәуелділіктерінің жаһандық заңдылықтарын анықтау дұрыс болады. Мақалада $\alpha+^9\text{Be}$ процесі үшін зертханалық $E_{\text{lab}}=30 - 60 \text{ MeV}$ энергия аралығындағы эксперименттік деректер жиынтығын жүйелі талдау негізінде потенциалдардың және толық реакция қимасының энергетикалық тәуелділігі анықталды. Қима параметрлерінің үдетуші шоғыр энергиясына тәуелді жаһандық заңдылықтарын қанағаттандыратын параметрлерінің оңтайлы мәндері табылды.

Түйін сөздер: серпімді шашырау, нақты және жорамал потенциал, Вудс-Саксон, феноменологиялық талдау.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2023-143-2-24-35

Кіріспе

Астрофизикада, ядролық энергетикада термосинтез процестері кезінде бериллий, литий, бор, көміртегі ядроларының көп түзілетіндігі жеңіл ядролардың нуклеосинтезімен тікелей байланысты [1, 2].

Ұсынылған жұмыста ⁹Be ядросынан *a* - бөлшектің серпімді шашырауын зерттеу үшін төмен энергиядағы эксперименттік деректерге теориялық талдаулар жүргізілді. ⁹Be(³He,³He)⁹Be, ⁹Be(⁴He,⁴He)⁹Be процестері үшін М.К. Бақтыбаев т.б. [3], Д.М. Жансейтов т.б. [4], С.М. Лукьянов т.б. [5], А.С. Демьянова т.б. [6] және А.С. Дэникин т.б. [7] авторлардың $E_{\text{lab}}=30 - 60 \text{ MeV}$ энергия аралығындағы эксперименттік деректеріне ОМ шеңберінде

жүйелі талдау жасалды. Талдау негізінде потенциалдардың және толық реакция қимасының энергетикалық тәуелділігінің жаһандық заңдылығы анықталды. Ион ядролық өзара әрекеттесу процесінде энергияның өзгеруімен потенциалдар параметрлерінің эволюциясы көрсетіледі[8].

Феноменологиялық тәсілдердің нәтижелерінің шынайлығын нақтылау үшін теориялық тұрғыдан потенциалдардың және толық реакция қиманың энергетикалық тәуелділіктерінің жаһандық заңдылықтарын анықтау дұрыс болады[9]. Мақалада зертханалық $E_{lab}=30 - 60$ MeV энергия аралығында $\alpha+{}^9\text{Be}$ ядролық процесін жүйелі талдау нәтижесінде ортақ заңдылықты қанағаттыратын оңтайлы жаңа параметрлер тобы анықталды.

Теориялық бөлім

Соқтығысқан ядролар үшін ОМ бойынша әсерлесу $U(R)$ - потенциалы Шредингер теңдеуі негізінде есептелетін потенциал болады[10]:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu_\alpha}\nabla^2 + U(R)\right]\chi(R) = E(R) \quad (1)$$

мұнда μ_α - α ұптың азайтылған массасы, R - олардың масса орталықтары арасындағы арақашықтық, ал E - салыстырмалы қозғалыстың CMS энергиясы.

Оптикалық потенциал [11]:

$$U(r) = V_C(r) - V(r) - i(W_V(r) + W_S(r)) \quad (2)$$

мұнда V_C - кулондық потенциал.

Нақты потенциал[12]:

$$V(r) = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r-R_V}{a_V}\right)\right]^{-1} \quad (3)$$

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (4)$$

Көлемдік жорамал потенциал:

$$W_V(r) = W_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r-R_W}{a_W}\right)\right]^{-1} \quad (5)$$

мұнда R_i -радиусы, a_i - диффуздігі.

Серпімді шашыраудың дифференциалдық қимасы[13]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |A(\theta)|^2 \quad (6)$$

Оптикалық параметрлердің салыстырмалы қателігі:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\sigma_i)_T - (\sigma_i)_\Theta}{(\Delta\sigma_i)_\Theta} \right]^2 \quad (7)$$

мұнда $(\sigma_i)_T$, $(\sigma_i)_\Theta$ – теориялық және эксперименттік қималар, $(\Delta\sigma_i)_\Theta$ – қимақателігі, N – нүктелер саны.

Талдаудың дәлдігін анықтау үшін реакцияларының σ_R - толық қимасының энергетикалық тәуелділігінің заңдылығын тексеру қажет. Толық реакция қимасының энергияға тәуелділігі әдебиеттердегі жаһандық заңдылықпен үйлесе анықталған параметрлерді қабылдауға болады [14].

Талдау бөлім

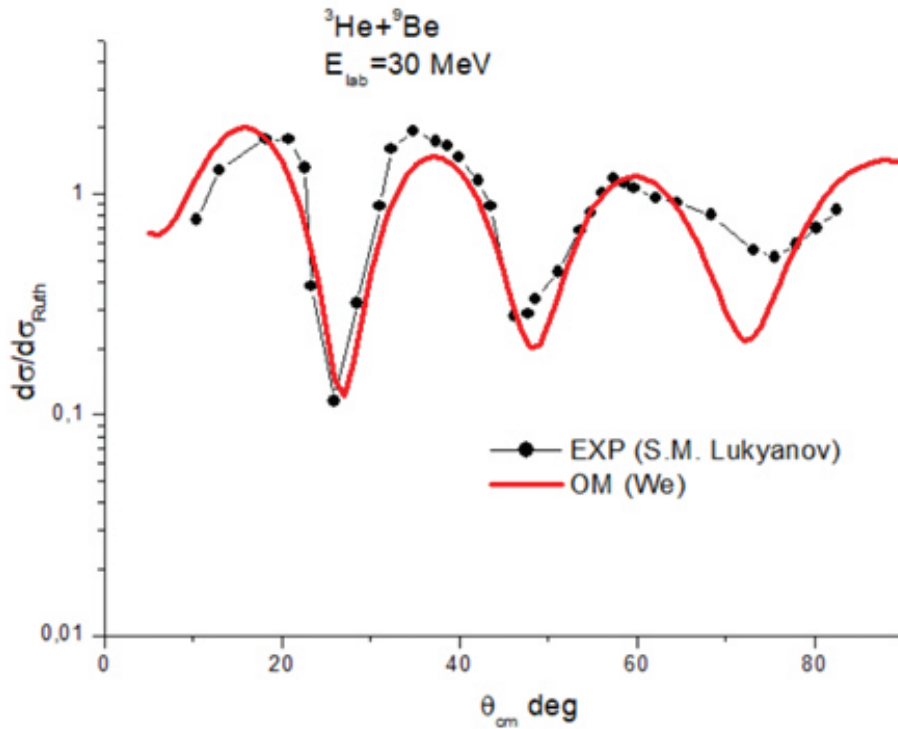
$E_{\text{lab}}=30 - 60$ MeV энергия диапазонында $a+{}^9\text{Be}$ ядролық процесіне ОМ негізінде талдау жасалды. Оптикалық потенциалдың параметрлерін іздеу үшін күй теңдеулері FRESKO коды бағдарламасында есептелді [15].

$a+{}^9\text{Be}$ ядролық жүйе үшін эксперименттік деректер қорынан $E_{\text{lab}}=30$ MeV [5-7], $E_{\text{lab}}=40, 47$ MeV [4] және $E_{\text{lab}}=50, 60$ MeV [3] авторлардың энергияларындағы деректер таңдалып алынды. Келесі кестеде талдаудан анықталған оңтайлы параметрлері жиынтығын көрсетілген.

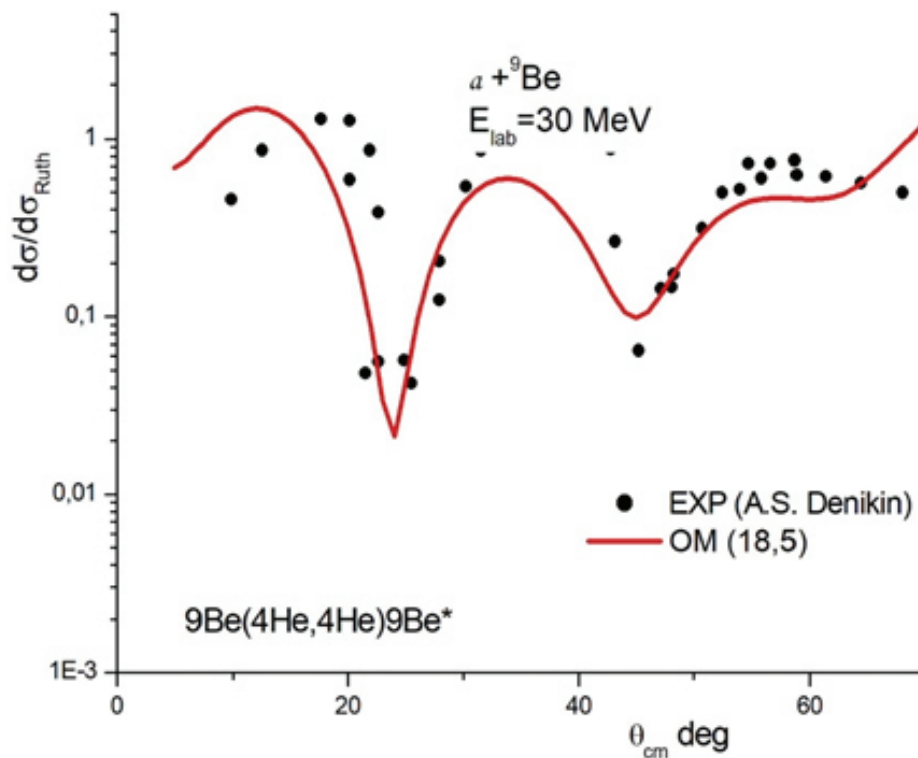
Кесте 1. ОМ негізінде біздің анықтаған $E_{\text{lab}}=30-60$ MeV энергия аралықтағы параметрлердің энергетикалық тәуелділігі

E_{lab} MeV	Модель	V_0 MeV	r_r fm	a_r fm	W_0 MeV	r_w fm	a_w fm	χ^2 / N	σ_R mb	Эксперимент авторлары
30	ОМ	220.0	0.487	0.65	8.93	1.25	0.63	8.4	978	С.М. Лукьянов т.б.
30	ОМ	130.0	0.773	0.622	19.55	0.34	1.9	18.8	1970	А.С. Деникин т.б.
30	ОМ	158.3	0.779	0.605	9.04	1.141	0.872	15.9	1143	А.С. Демьянова т.б.
40	ОМ	113.9	0.91	0.61	19.6	0.91	1.19	19	1396	Д.М. Джансейтов т.б.
47	ОМ	115.4	0.691	0.2	25.1	0.76	0.48	19,5	1420	Д.М. Джансейтов т.б.
50	ОМ	114.0	1.15	0.87	13.7	1.6	0.8	13.7	1970	М.К. Бақтыбаев т.б.
60	ОМ	85.0	1.05	0.41	16.4	1.65	1.16	6.8	1924	М.К. Бақтыбаев т.б.

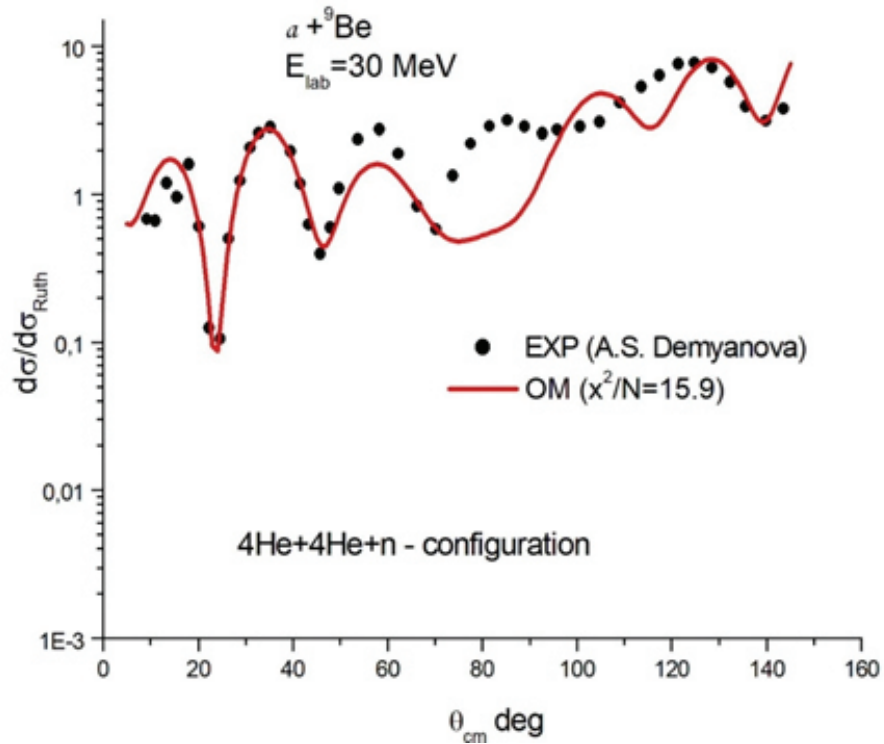
Кестеден χ^2 / N – параметрінің мәні 6,8 – 19,5 аралықта анықталды. Талдау бойынша анықталған кестедегі параметрлер негізінде салынған теориялық қималарының эксперименттік деректерін сипаттауы келесі 1-7-суреттерде көрсетілген.



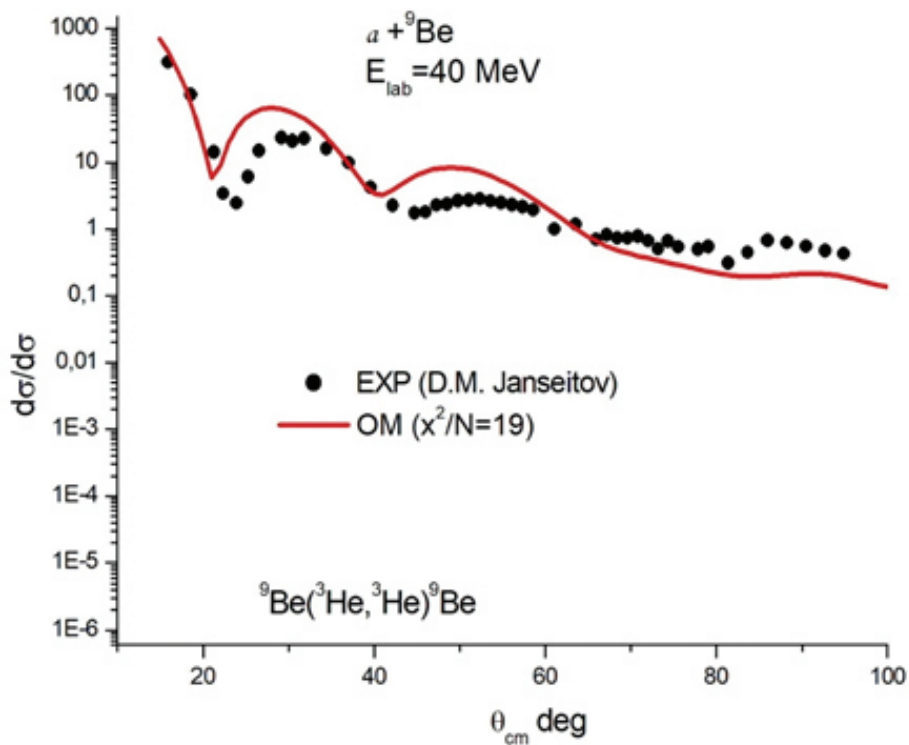
Сурет 1. С.М. Лукьянов т.б. авторлардың $E_{lab}=30\text{MeV}$ энергиядағы эксперименттік деректерін талдау



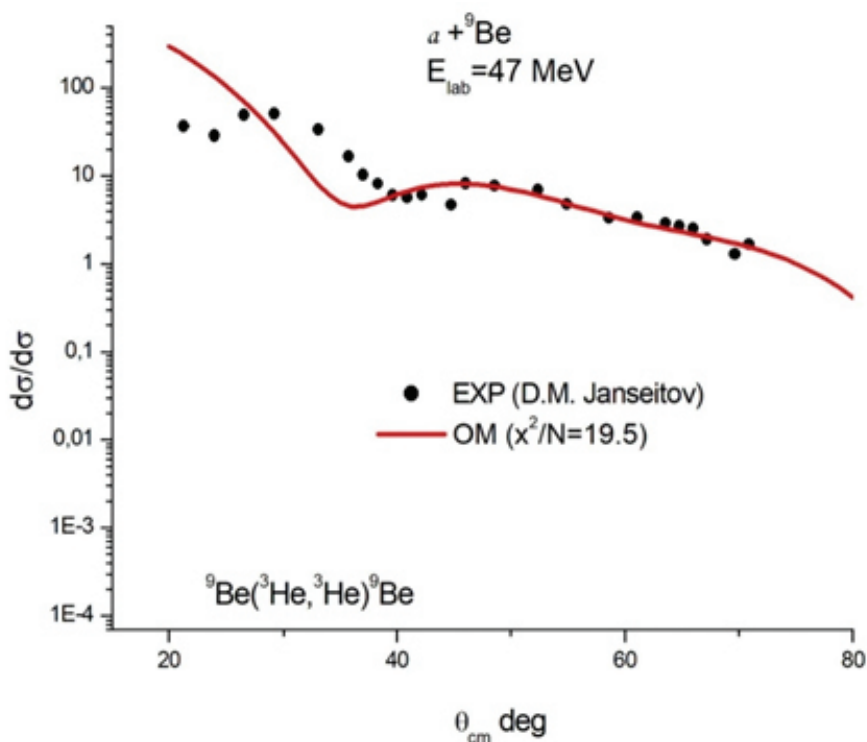
Сурет 2. А.С. Деникин т.б. авторлардың $E_{lab}=30 \text{ MeV}$ энергиядағы эксперименттік деректерін талдау



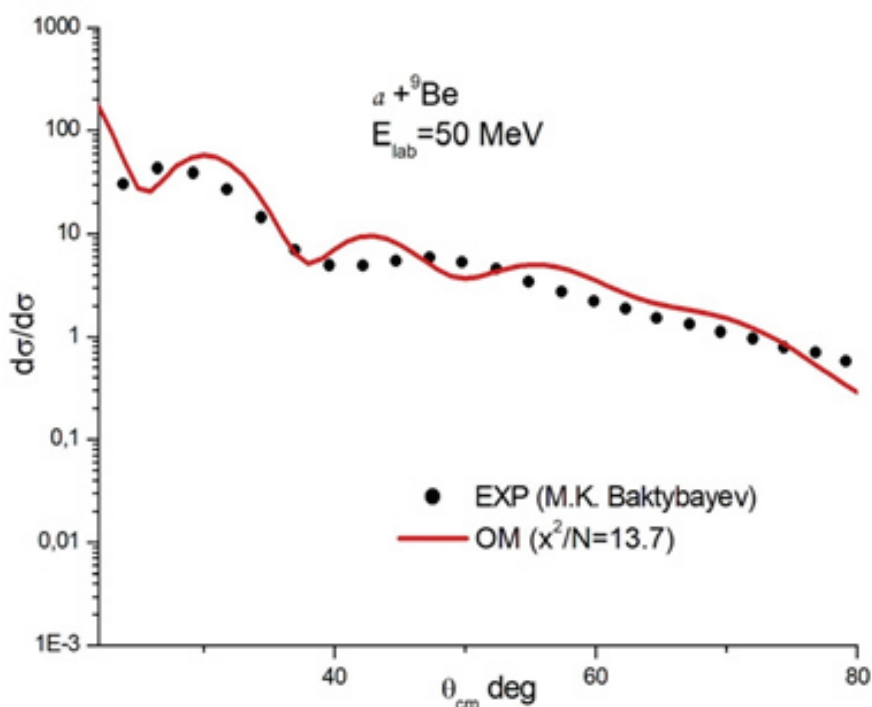
Сурет 3. А.С. Демьянова т.б. авторлардың $E_{\text{lab}}=30 \text{ MeV}$ энергиядағы эксперименттік деректерін талдау



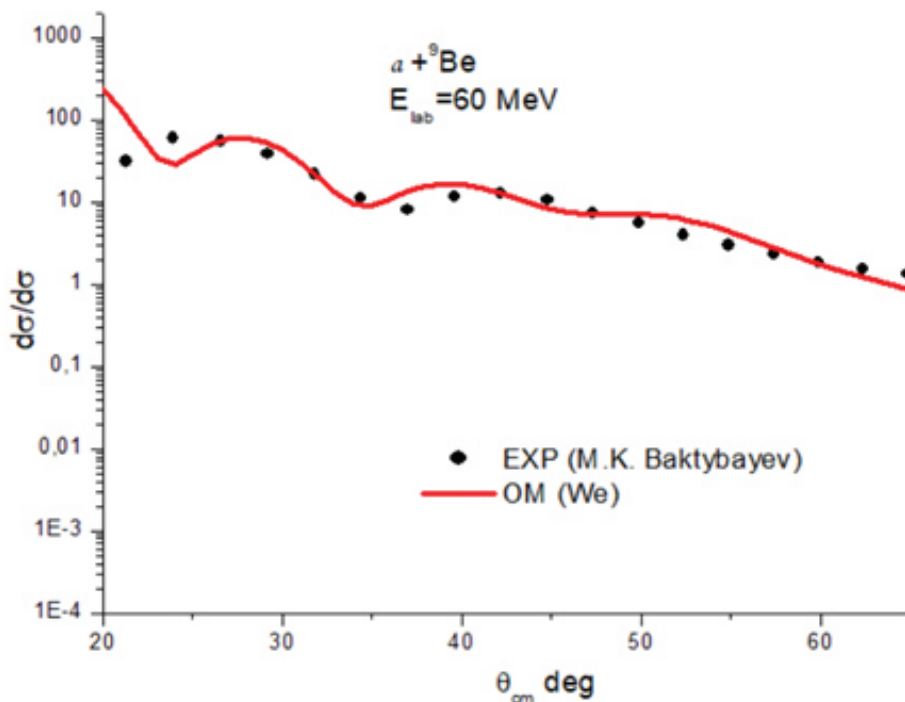
Сурет 4. Д.М. Жансейтов т.б. авторлардың $E_{\text{lab}}=40 \text{ MeV}$ энергиядағы эксперименттік деректерін талдау



Сурет 5. Д.М. Жансейтов т.б. авторлардың $E_{\text{lab}}=47 \text{ MeV}$ энергиядағы эксперименттік деректерін талдау

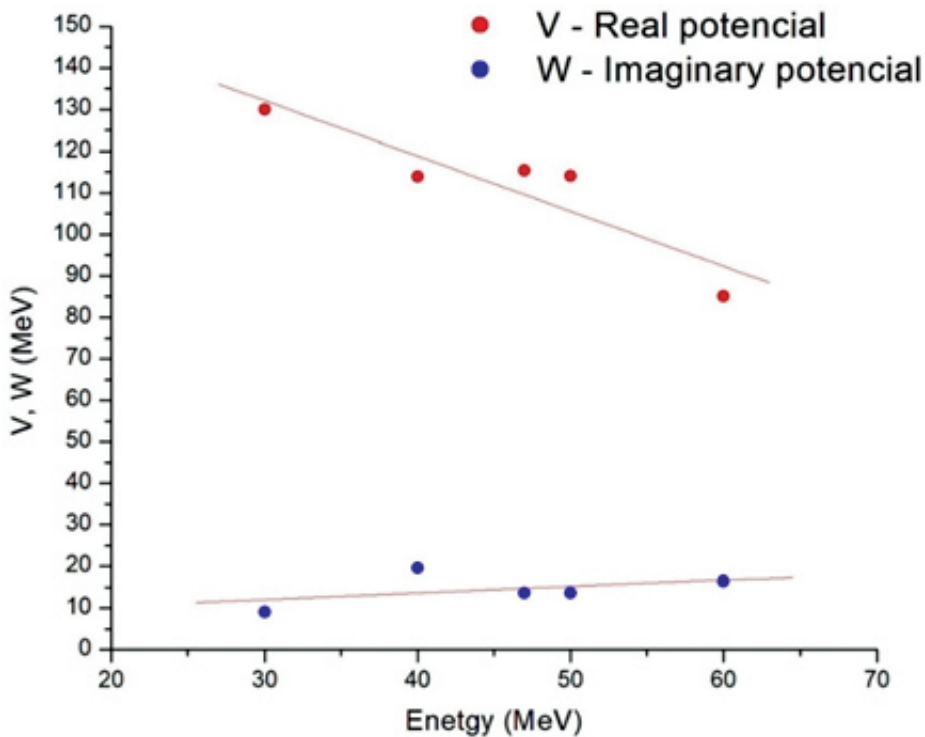


Сурет 6. М.К. Бақтыбаев т.б. авторлардың $E_{\text{lab}}=50 \text{ MeV}$ энергиядағы эксперименттік деректерін талдау



Сурет 7. М.К. Бақтыбаев т.б. авторлардың $E_{\text{lab}}=60$ MeV энергиядағы эксперименттік деректерін талдау

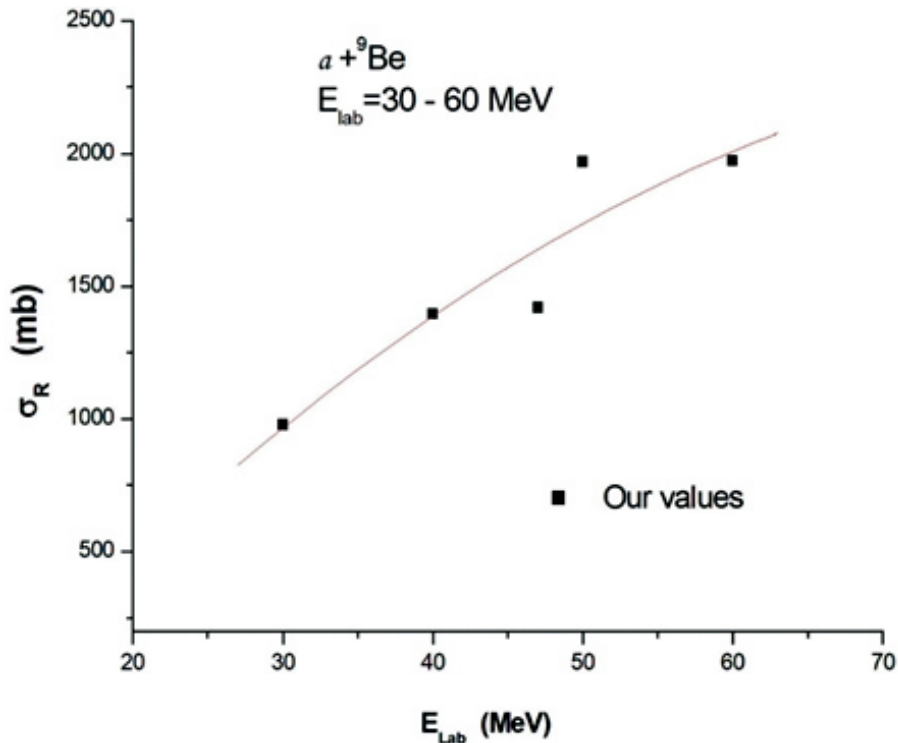
Талдаудың келесі сатысында оптикалық потенциалдың нақты және жорамал бөліктерінің үдеуші шоғыр ионының энергиясына тәуелділігі зерттелді. Зерттеу нәтижесі келесі 8-суретте көрсетілген.



Сурет 8. V - нақты және W - жорамал потенциалдарының энергетикалық тәуелділігі

V – нақты және W – жорамал потенциалдарың энергетикалық тәуелділігі әдебиеттердегі жаһандық заңдылықпен үйлеседі.

Талдаудың соңғы кезеңінде σ_R – реакцияның толық қиманың энергетикалық тәуелділігі анықталды. Талдау нәтижелері бойынша $E_{lab}=30-60$ MeV энергиялардағы алынған толық қиманың үдетуші шоғыр энергиясына тәуелділігі жаһандық заңдылықтармен сәйкес анықталды.



Сурет 9. σ - толық реакция қимасының үдетуші шоғыр энергиясына тәуелділігі

Анықталған толық қиманың энергетикалық тәуелділігі [8, 9] әдебиеттердегі заңдылықтармен үйлеседі.

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі (Грант № AP14871692 «10В+12С және 15Н+11В жүйелері үшін серпімді шашырау және алмасу механизмдерін эксперименттік және теориялық зерттеу») қаржыландырады.

Қорытынды

$E_{lab}=30-60$ MeV энергия аралығында α – бөлшектер шоғырының ${}^9\text{Be}$ ядросынан шашырауын ОМ негізінде жүйелі талдау жасалды. Талдау нәтижесінде ортақ энергетикалық заңдылықты қанағаттандыратын оптикалық параметрлерінің оңтайлы мәндері табылды.

Екінші кезеңде $\alpha+{}^9\text{Be}$ процесі үшін нақты және жорамал потенциалдардың үдетуші шоғыр энергиясына тәуелділігі анықталды.

Соңғы кезеңде $\alpha+{}^9\text{Be}$ процесі үшін толық реакция қимасының энергетикалық тәуелділігі зерттелді. Төмен энергия аймағында анықталған заңдылықтар әдебиеттік заңдылықтарға сәйкес келеді, яғни жаһандық тәуелділікті қолдауға үлес қосады. Суық ядролық ${}^9\text{Be}(\alpha,\alpha){}^9\text{Be}$ жүйесі үшін біздің анықтаған параметрлердің жоғары дәлдік мәндері ядролық астрофизикада жұлдыздардағы жеңіл ядролар реакциясының қимасын зерттеу кезінде қолданыс табады.

Әдебиеттер тізімі

1. Hodgson P.E. The Nuclear optical model // Reports on Progress in Physics. – 1971. – Vol. 34. – P.765-819.
2. Perey C. M., Perey F. G. Compilation of phenomenological optical-model parameters 1954–1975 // Atomic data and nuclear data tables. – 1976. – Т. 17. – №. 1. – С. 1-101.
3. Baktybayev M.K., Burtebayev N., Duysabayev A., Duysabayev B.A., Zhuryrbayeva G.S., Sakuta S. B., Peterson R.J. (2000). An analysis of elastic and inelastic channels of ^3He ions and α -particles scatterings on ^7Li , ^9Be and ^{11}B nuclei at the energies of (10-20) MeV/nuc.
4. Janseitov D.M., Lukyanov S.M., Mendibayev K., Penionzhkevich Y.E., Skobelev N.K., Sobolev Y.G., Glagolev V. (2018). Investigation of the elastic and inelastic scattering of ^3He from ^9Be in the energy range 30–60 MeV. International Journal of Modern Physics E, 27(10), 1850089.
5. Lukyanov S.M., Harakeh M.N., Naumenko M.A., Xu Y., Trzaska W.H., Burjan V., Tuleushev Y. (2015). Some Insights into Cluster Structure of ^9Be from $^3\text{He}+^9\text{Be}$ Reaction. World Journal of Nuclear Science and Technology, 5(4), 265-273.
6. Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Danilov A.N., Dmitriev S.V., Goncharov S.A., Burtebaev N., Kubono S. (2014). Spectroscopy of ^9Be and observation of neutron halo structure in the states of positive parity rotational band. In EPJ Web of Conferences (Vol. 66, p. 02026). EDP Sciences.
7. Denikin A.S., Lukyanov S.M., Skobelev N.K., Sobolev Y.G., Voskoboynik E.I., Penionzhkevich Y.E., Tuleushev Y. (2015). Inelastic scattering and clusters transfer in $^3\text{He}+^9\text{Be}$ reactions. Physics of Particles and Nuclei Letters, 12, 703-712.
8. Понкратенко О.А., Рудчик А.А., Рудчик А.Т., Степаненко Ю.М., Улещенко В.В., Ширма Ю.О. (2014). Глобальні потенціал і взаємодії для дифракційного розсіяння $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ та $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ у широкому діапазоні енергій. Ядерна фізика та енергетика, (15, № 3), 222-230.
- Soldatkhan D., Yergaliuly G., Amangeldi N., Mauyey B., Odsuren M., Ibraheem A.A., Hamada S. New Measurements and Theoretical Analysis for the $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$. Nuclear System // Brazilian Journal of Physics. – 2022. – Т. 52. – №. 5. – С. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13538-022-01153-0>
9. Satchler G.R. Folding models for elastic and inelastic scattering // In book: Heavy-Ion Collisions. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1982. – P. 25-43.
10. Ходгсон П.Е., Оптическая модель упругого рассеяния / пер. с англ.– М.:Атомиздат, 1966. –232 с.
11. Амангелді Н., Солдатхан Д., Ергалиұлы Ф. Determination of elastic scattering potential parameter at energies of 20, 24 MeV for the nuclear system $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия Физика. Астрономия. – 2020. – №. 1. – С. 78-83.
12. Солдатхан, Д., Амангелды, Н., Балтабеков, А. С., Ергалиұлы, Ф. (2022). Investigation of the energy dependence of the interaction potentials of the $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ nuclear system with a semi-microscopic method. Eurasian Physical Technical Journal, 19(3 (41)), 39-44.
13. Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Алимов Д.К., Зазулин Д.М., Джансейтов Д.М., Мухамеджанов Е.С. Измерение дифференциальных сечений процессов $^{14}\text{N}(^3\text{He}, ^3\text{He})^{14}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(^3\text{He}, d)^{15}\text{O}$ при энергии 50 и 60 MeV // Использование ядерно-физических методов в науке и технике. 66-я международная научная конференция «Ядро-2016». - Саратов, 2016. - С.56.
14. Thompson I.J., Nunes F.M. Nuclear Reactions for AstroPhysics: Principles, Calculation, and Applications of Low-Energy Reactions. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. – 466 p.

Н. Амангелды^{1,2}, Д. Солдатхан¹, Д. Шаудирбаева¹, А. Ануар¹, Л. Касымханова¹

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Глобальные закономерности упругого рассеяния при столкновении α -частиц с ядром ${}^9\text{Be}$

Аннотация. В статье проведено исследование характеристики экспериментальных данных сечения упругого рассеяния в низкоэнергетическом диапазоне ядерной системы $\alpha+{}^9\text{Be}$. Установлены общие закономерности, зависящие от изменения энергии ускоренных ионов параметров полученных сечений. На основе анализа в рамках оптической модели (ОМ) обнаружены энергетически зависимые оптические потенциалы взаимодействия в широком диапазоне энергий. Энергетическая закономерность потенциалов, выявленная в результате систематического анализа, позволяет с достаточной точностью прогнозировать сечение процессов при энергиях, при которых экспериментальные измерения не проводились. Потенциал, который является комплексной функцией взаимодействия между ядрами, является эмпирическим измерением, которое описывает взаимодействие в процессе рассеяния. Исследования построения зависимости потенциала от внешних факторов необходимо проводить индивидуально для каждой ядерной системы. Такие анализы, проводимые с целью повышения точности феноменологических теорий, должны опираться на большой массив экспериментальных данных. Для уточнения правдивости результатов феноменологических подходов теоретически правильнее будет определить глобальные закономерности потенциалов и энергетических зависимостей полного реакционного сечения. В статье определена энергетическая зависимость потенциалов и полного сечения реакции на основе систематического анализа экспериментального набора данных в интервале энергии лабораторного $E_{\text{lab}}=30 - 60$ МэВ для процесса $\alpha+{}^9\text{Be}$. Найденные оптимальные значения параметров сечения, удовлетворяющие глобальным закономерностям, зависящим от энергии ускоряющего пучка.

Ключевые слова: упругое рассеяние, реальный и мнимый потенциал, Вудс-Саксон, феноменологический анализ.

N. Amangeldi^{1,2}, D. Soldatkhan¹, D. Shaudirbayeva¹, A. Anuar¹, L. Kasymkhanova¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

Global patterns of elastic scattering in the collision of α - particles with a ${}^9\text{Be}$ nucleus

Abstract. The article investigates the characteristics of the experimental data of the elastic scattering cross section in the low-energy range of the $\alpha+{}^9\text{Be}$ nuclear system. General regularities depending on the change in the energy of accelerated ions of the parameters of the obtained cross sections are established. Based on the analysis in the framework of the optical model (OM), energy-dependent optical interaction potentials in a wide range of energies were found. The energy regularity of potentials, revealed as a result of systematic analysis, makes it possible to predict with sufficient accuracy the cross-section of processes at energies at which experimental measurements were not carried out. The potential, which is a complex function of the interaction between nuclei, is an empirical measurement that describes the interaction in the scattering process. Studies of the dependence of the potential on external factors should be carried out individually for each nuclear system. Such analyses carried out in order to improve the accuracy of phenomenological theories should be based on a large array of experimental data. To clarify the truthfulness of the results of phenomenological approaches, it would be theoretically more correct to determine the global patterns of potentials and energy dependences of the full reaction cross-section. The article defines the energy dependence of the potentials and the total cross-section of the reaction based on a systematic analysis of the experimental data set in the energy range of laboratory $E_{\text{lab}}=30 - 60$ MeV for the $\alpha+{}^9\text{Be}$ process. Optimal values of the cross-section parameters satisfying global laws depending on the energy of the accelerating beam are found.

Keywords: Elastic scattering, real and imaginary potential, Woods-Saxon, phenomenological analysis

References

1. Hodgson P.E. The Nuclear optical model // Reports on Progress in Physics. – 1971. – Vol. 34. – P.765-819.
2. Perey C. M., Perey F. G. Compilation of phenomenological optical-model parameters 1954–1975 // Atomic data and nuclear data tables. – 1976. – T. 17. – №. 1. – C. 1-101.
3. Baktybayev M.K., Burtebayev N., Duysebayev A., Duysebayev B.A., Zhuryrbayeva G.S., Sakuta S. B., Peterson R.J. (2000). An analysis of elastic and inelastic channels of ³He ions and α -particles scatterings on ⁷Li, ⁹Be and ¹¹B nuclei at the energies of (10-20) MeV/nuc.
4. Janseitov D.M., Lukyanov S.M., Mendibayev K., Penionzhkevich Y.E., Skobelev N.K., Sobolev Y.G., Glagolev V. (2018). Investigation of the elastic and inelastic scattering of ³He from ⁹Be in the energy range 30–60 MeV. International Journal of Modern Physics E, 27(10), 1850089.
5. Lukyanov S.M., Harakeh M.N., Naumenko M.A., Xu Y., Trzaska W.H., Burjan V., Tuleushev Y. (2015). Some Insights into Cluster Structure of ⁹Be from ³He+⁹Be Reaction. World Journal of Nuclear Science and Technology, 5(4), 265-273.
6. Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Danilov A.N., Dmitriev S.V., Goncharov S.A., Burtebaev N., Kubono S. (2014). Spectroscopy of ⁹Be and observation of neutron halo structure in the states of positive parity rotational band. In EPJ Web of Conferences (Vol. 66, p. 02026). EDP Sciences.
7. Denikin A.S., Lukyanov S.M., Skobelev N.K., Sobolev Y.G., Voskoboynik E.I., Penionzhkevich Y.E., Tuleushev Y. (2015). Inelastic scattering and clusters transfer in ³⁴He+⁹Be reactions. Physics of Particles and Nuclei Letters, 12, 703-712.
8. Ponkratenko O. A., Rudyk A. A., Rudchik A. T., Stepanenko Yu. m., Aleshchenko V. V., shirma Yu. O. (2014). Global potential for using ¹⁶O+¹²C and ¹²s+¹² Cu diffraction modes in a wide energy range. Nuclear physics and energy, (15, № 3), 222-230. Soldatkhan D., Yergaliuly G., Amangeldi N., Mauvey B., Odsuren M., Ibraheem A.A., Hamada S. New Measurements and Theoretical Analysis for the ¹⁶O+¹²C. Nuclear System // Brazilian Journal of Physics. – 2022. – T. 52. – №. 5. – C. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13538-022-01153-0>
9. Satchler G.R. Folding models for elastic and inelastic scattering // In book: Heavy-Ion Collisions. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1982. – P. 25-43.
10. Hodgson P.E. Optical model of elastic scattering / trans. from English– M.: Atomizdat, 1966. – 232 p.
11. Amangeldi N., Soldatkhan D., Ergaliuly G. Determination of elastic scattering potential parameter at energies of 20, 24 MeV for the nuclear system ¹⁶O+¹²S // Vestnik L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics Series. Astronomiya. – 2020. – №. 1. – S. 78-83.
12. Amangeldi N., Soldatkhan D., Baltabekov A., Ergaliuly G. (2022). Investigation of the energy dependence of the interaction potentials of the ¹⁶O+¹²C nuclear system with a semi-microscopic method. Eurasian Physical Technical Journal, 19(3 (41)), 39-44.
13. Burtebaev N., Kerimkulov Zh.K., Alimov D.K., Zazulin D.M., Dzhansaytov D.M., Mukhamedzhanov E.S.. Measurement of differential cross sections of processes ¹⁴N(³Ne,³Ne)¹⁴N and ¹⁴N(³Ne,d)¹⁵O at energies of 50 and 60 MeV // “Use of nuclear physics methods in power engineering”. Science and Technology” 66th International Scientific Conference “Core-2016”. - Sarov, 2016. - p.56.
14. Thompson I.J., Nunes F.M. Nuclear Reactions for Astrophysics: Principles, Calculation, and Applications of Low-Energy Reactions. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. – 466 p.

Авторлар туралы ақпарат:

Н. Амангелді – PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көш., 2, Астана, Қазақстан.

Д. Солдатхан – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көш., 2, Астана, Қазақстан.

Д.С. Шәудірбаева – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көш., 2, Астана, Қазақстан.

А.О. Әнуар – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көш., 2, Астана, Қазақстан.

Л.Б. Қасымханова – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көш., 2, Астана, Қазақстан.

Н. Амангельды – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Д. Солдатхан – PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Д.С. Шәудирбаева – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

А.О. Ануар – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Л.Б. Қасымханова – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

N. Amangeldy – PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.

D. Soldatkhan – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.

D. Shaudirbayeva – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.

A. Anuar – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.

L. Kassymkhanova – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.