

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 307 (2016), 36 – 41

INTERACTIONS OF ALPHA PARTICLES FROM ^{13}C NUCLEI AT ENERGIES 6.65-16.25 MEV/NUCLEON

N. Burtebayev¹, A.S. Demyanova², D.M. Janseitov³, Zh.K. Kerimkulov¹,
M. Nassurla⁴, D.K. Alimov⁴, A.K. Shakirov⁴

¹Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; ²NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia;
³ENU, Astana, Kazakhstan; ⁴KazNU, Almaty, Kazakhstan
e-mail: janseit.daniar@gmail.com

Keywords: optic model, elastic scattering, folding potential, alpha particle, FRESCO.

Abstract. Processes of elastic scattering of alpha particles from ^{13}C nuclei at energies 6.65-16.25 MeV/nucleon were studied in this paper. The differential cross sections were measured at laboratory system in the range 10^0 - 80^0 . Analysis of elastic scattering was made within optical model. Both microscopic double folding potentials and phenomenological potentials were used for real part of complex nuclear potential. Imaginary part had the shape of phenomenological surface Woods-Saxon potential. The calculated theoretical cross sections are in good agreement with experimental data.

УДК 539.171

АЛЬФА БӨЛШЕКТЕРДІҢ ^{13}C ЯДРОЛАРЫМЕН 6.65-16.25 МЭВ/НУКЛОН ЭНЕРГИЯЛАРДА ӘСЕРЛЕСУІН ҚАРАСТЫРУ

Н. Буртебаев¹, А.С. Демьянова², Д.М. Джансейтов³, Ж.К. Керимкулов¹,
М. Насурлла⁴, Д.К. Алимов⁴, А.К. Шакиров⁴

¹ЯФИ, Алматы, Қазақстан; ²«Курчатов институты» ҰЗО, Мәскеу, Ресей;
³Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; ⁴эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Түйін сөздер: оптикалық модель, серпімді шашырау, фолдинг потенциал, альфа-бөлшек, FRESCO.

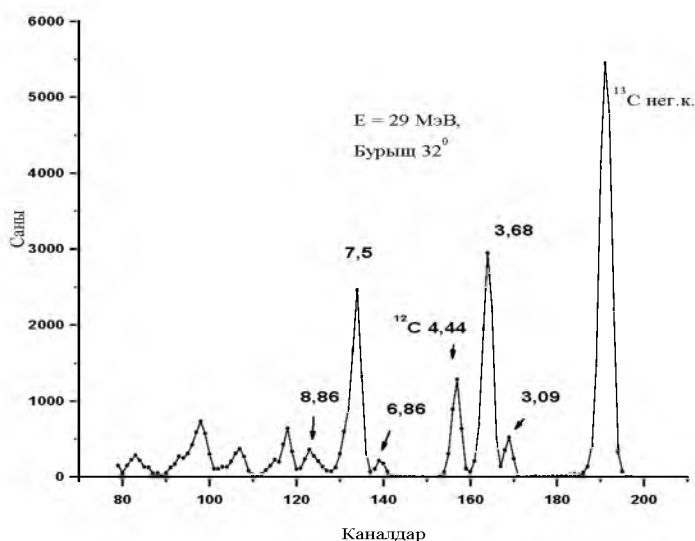
Аннотация. Осы жұмыста 6.65-16.25 МэВ/нуклон энергия аралығында альфа-бөлшектердің ^{13}C ядроларында серпімді шашырау процесстері зерттелген. Дифференциалды кималар 10^0 - 80^0 арасында зертханалары координаттар жүйесінде өлшенді. Серпімді шашырау оптикалық модель аясында талданды.

Есептеулерде комплексті ядролық потенциалдың нақты бөлігі үшін микроскопиялық потенциалмен (фолдинг потенциал) қоса, феноменологиялық потенциалдар да қолданылды. Потенциалдың жорамал бөлігі үшін Вудс-Саксон потенциалының беттік феноменологиялық түрі қолданылды. Теориялық есептелген кималар, тәжірибелік мәліметтермен жақсы үйлеседі.

Кіріспе. ^{13}C ядросын қабықша моделін айқын сипаттайтын "қалыпты" ядролардың біріне жатқызуға болады. Осы модель шеңберінде оның деңгейлік сызбасы ~ 10 МэВ [1] қозу энергиясына дейін айқын анықталады. Дегенмен, α - бөлшектік конденсациясының гипотезасы [2] бойынша, біраз ^{13}C ядросының кластерлі қозған күйлері [3] радиустың жоғары шамаларына ие болуы мүмкін. ^{12}C ядросының белгілі Хойл күйі 7.65 МэВ (0^+_2) – осындай құрылымның айқын мысалы. Хойл күйіне ұқсас күйлерді басқа көршілес ядролардан болу мүмкіндігі ықтималдылығы жоғары. Мысалға ^{13}C ядросының 8.86 МэВ ($1/2^-$) қозған күйін алуға болады. Жақында алынған 388 МэВ энергиядағы α –бөлшектердің ^{13}C ядросынан шашырауынан пайда болған қозған күйлерінің деректерінен [4], расында, жоғары мәндер алынған еді. ^{13}C ядросының осы энергиядағы күйлерін

зерттеу барысында, $3.09 \text{ МэВ}(1/2^+)$ бірінші қозған күйі үшін нейтронды гало құбылысы байқалған болатын. Демек, төменірек энергияда жаңа өлшеулер болғаны дұрыс.

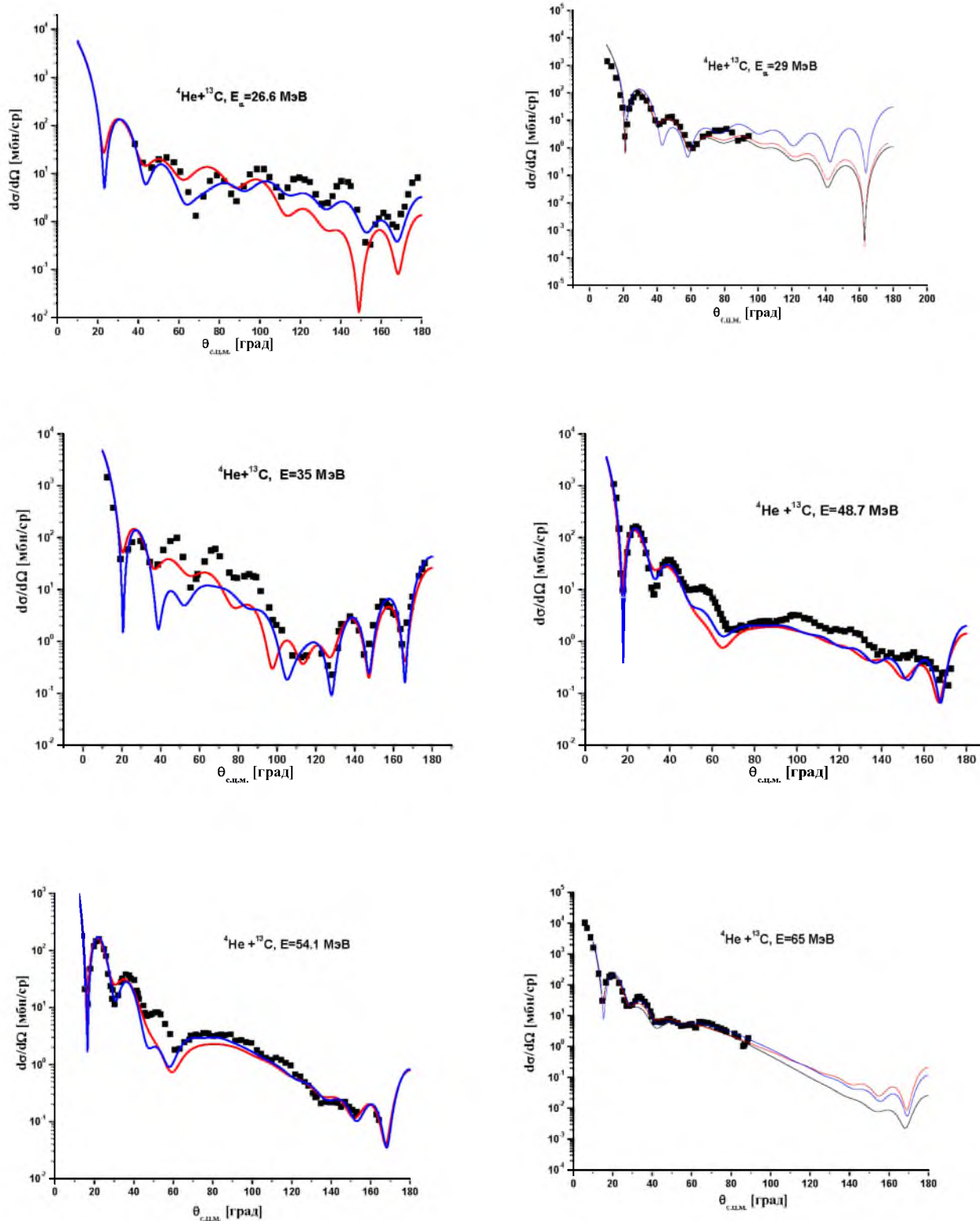
Альфа-бөлшектердің ^{13}C ядроларынан бұрыштық шашырауының кең диапазонында дифференциалды қимасын өлшеу. Жоғары энергетикалық анықтылықпен, тәжірибелер JYFL K-130 циклотронында (Ювяскюля, Финляндия) $E_\alpha=65 \text{ МэВ}[5]$ энергияда және Ядролық физика институтының У-150М изохронды циклотронында (Алматы, Қазақстан) $E_\alpha=29 \text{ МэВ}$ энергияда жүргізілген болатын. Зерттеу барысында JYFL K-130 циклотронында шашыраған альфа-бөлшектердің энергетикалық спектрін тіркеу үшін ΔE -Е телескоптары қолданылды. Тәжірибеде 98%-ға дейін байытылған ^{13}C нысынасы (қалыңдығы $\sim 0.3 \text{ мг/см}^2$) пайдаланылды. Нысанада ^{12}C и ^{16}O ядроларының қоспалары кездеседі. У-150М циклотронында өткен тәжірибеде де ΔE -Е телескоптары және 84%-ға дейін байытылған, қалыңдығы 0.4 мг/см^2 болатын ^{13}C ядроларынан тұратын нысана қолданылған болатын.



1-сурет – альфа-бөлшектердің ^{13}C ядроларында $E=29 \text{ МэВ}$ энергияда шашырауының энергетикалық спектрі (32°)

^{13}C ядросында α -бөлшектердің серпімді және $3.09 \text{ МэВ}(1/2^+)$, $8.86 \text{ МэВ}(1/2^-)$ қозған күйлерінің серпімсіз шашырауларының дифференциалды қималары $\theta_{\text{лаб}}=10^\circ - 80^\circ$ бұрыштар аралығында $1^\circ-2^\circ$ қадаммен алынды. Детектордың энергетикалық анықтылығы аз бұрыштарда (290) кэВ шамасында және үлкендер бұрыштар үшін (350) кэВ шамасында болды. Барлық алынған тәжірибелік бұрыштық таралуларда α -бөлшектердің дифракциялық құрылым байқалады. 29 МэВ энергияда үдетілген альфа-бөлшектердің шашырауының энергетикалық спектрі 1-ші суретте көрсетілген.

2-ші суретте $26.6 [6]$, 29 , $35 [7]$, $48.7 [8]$, $54.1 [8]$ және 65 МэВ энергияларда альфа-бөлшектердің ^{13}C ядроларынан серпімді шашырауының дифференциалды қималары көрсетілген. Есептеулер оптикалық және фолдинг моделдер шеңберінде жүргізілді. Барлық бұрыштарда дифракциялық құрылымның байқалуы олар үшін қалыпты болып табылады.



2 сурет – 26.6 және 65 МэВ аралығында альфа-бөлшектердің ${}^{13}\text{C}$ ядроларынан серпімді нашыруының дифференциалдық қималары. Көк түспен көрсетілген қисық сызықтар оптикалық модель нәтижесінің А жинағы, 29 және 65 МэВ энергиялар үшін В жинағы қара түсті қисық сызықтармен көрсетілген. Қызыл түсті қисық сызықтар фолдинг моделі бойынша есептеу нәтижелері

Феноменологиялық оптикалық потенциалдар параметрі теориялық және тәжірибелік бұрыштық таралулар сәйкес келетіндей етіп таңдалған болатын. Теориялық есептеулер FRESKO [9] программасымен жүргізілді. Оптикалық параметрлерді χ^2/N шамасының минимизациясы арқылы табылды. Оптикалық потенциалдардың глобалды тәуелдігінен, әрекеттесу потенциалының радиалды шамасы $r_v = 1.245$ фм и $r_w = 1.57$ фм болып бекітілін, теория мен тәжірибелі барынша сәйкестендіру үшін, қалған 4 параметрлерді (V_r , W_v , a_r және a_w) таңдау арқылы жүзеге асырылды. Фолдинг потенциалы үшін N_r – нормалау коэффициенттері тиесілі энергияларда анықталған. Табылған потенциалдар жинағы мен нормалау коэффициенттері 1-ші кестеде келтірілген.

1-ші кесте - ^{13}C ядроларында α -бөлшектік шашыраудың оптикалық потенциал параметрлері

E, МэВ	Жинағы	V_r , МэВ	r_r , фм	a_r , фм	N_r	W_v , МэВ	r_w , м	r_w , фм	r_o , фм
26.6	A	147.32	1.112	0.736		12.844	1.6	0.267	1.28
	B	142.23	1.245	0.762		16.75	1.57	0.731	1.28
	DF (A)				0.97	18.635	1.6	0.267	1.28
29	A	147.22	1.112	0.736		12.844	1.6	0.731	1.28
	B	142.23	1.245	0.762		15.77	1.57	0.731	1.28
	DF (A)				0.98	12.844	1.6	0.731	1.28
35	OM	138.95	1.112	0.799		14.125	1.6	0.15	1.28
	B	134.11	1.245	0.747		10.52	1.57	617	1.28
	DF (A)				0.99	14.125	1.6	0.15	1.28
48.7	A	134.49	1.112	0.79		14.79	1.6	0.639	1.28
	B	120.38	1.245	0.730		15.81	1.57	0.639	1.28
	DF (A)				0.97	14.79	1.6	0.639	1.28
54.1	A	135.48	1.112	0.795		14.21	1.6	0.8	1.28
	B	117.57	1.245	0.753		15.91	1.57	0.801	1.28
	DF (A)				0.96	14.21	1.6	0.8	1.28
65	A	123.07	1.112	0.8		14.97	1.6	0.76	1.28
	B	119.49	1.245	0.784		20.02	1.57	0.728	1.28
	DF (A)				0.98	14.97	1.6	0.76	1.28

Альфа-бөлшектердің ^{13}C ядроларынан серпімді шашырауының дифференциалды қимасының анализі. Альфа-бөлшектердің ядролармен әрекеттесу потенциалдары жайында ақпарат алу тәсілінің бірі – ядроның оптикалық моделіне негізделген серпімді шашыраудың тәжірибелік деректерінің феноменологиялық анализі. $^{13}\text{C}+\alpha$ серпімді шашырауының дифференциалды қимасы осы модель шеңберінде зерттелген еді. Бұл тәсіл бойынша көп бөлшекті ядро жүйесін есептеуін жеңілдету мақсатымен, шашырау комплексті оптикалық потенциал $V(r)$ өрісінде деп қарастырылады. Төмен энергетикалық аймақта бұл потенциалдың шамасы келесі түрде беріледі:

$$V(r) = V_C(r) - V_R f(x_R) + V_{SO} a_{SO} f(x_{SO}) l * \sigma + i4W_D a_{WD} \frac{df}{dr}(x_D) \quad (1)$$

мұнда $V_C(r)$ – біркелкі зарядталған, радиусы $R = 1.28A^{1/3}$ (фм) сфераның кулондық потенциалы (бұл потенциал тек салыстырмалы арақашықтыққа ғана тәуелді және ядро-нысанадағы нуклондардың орналасуына тәуелді емес); V_R и W_D - потенциалдың нақты және жорамал бөлігінің тереңдігі; V_{SO} - потенциалдың спин-орбиталды бөлігінің тереңдігі (нақты бөлігі үшін); l – бұрыштық момент операторы; σ – Паули спиндік операторы. Осы жұмыста потенциалдың радиалды бөлігі Вудс-Саксон түрінде алынды:

$$f(x_i) = (1 + \exp(x_i))^{-1}, \quad x_i = (r - r_i) / a_i, \quad (2)$$

мұнда $r_i = r_r, r_w$ және r_{so} - потенциалдың нақты, жорамал және спин-орбиталды радиустары, $a_i = a_r, a_w$ және a_{so} потенциалдың сәйкес бөлігінің диффуздығы.

Серпимді шашыраудың тәжірибелік мәліметтері оптикалық модель шеңберінде FRESKO программасымен есептелген. Тәжірибелік және есептелген дифференциалды қиманың ең қолайлы сәйкестіктері үшін потенциал параметрінің минимизациясы:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_T(\theta_i) - \sigma_{\Theta}(\theta_i)}{\delta\sigma_{\Theta}(\theta_i)} \right)^2, \quad (3)$$

мұндағы N – бұрыштық таралудағы тәжірибелік нүкте саны, $\sigma_T(\theta_i)$ және $\sigma_{\Theta}(\theta_i) - \theta_i$ бұрышының шашырауының дифференциалды қимасының есептелген және өлшенген шамалары, $\delta\sigma_{\Theta}(\theta_i) - \sigma_{\Theta}(\theta_i)$ шамасының анықталмағандығы.

Сонымен қатар, альфа-бөлшектерінің ^{13}C ядроларында серпимді шашырауының есептеулері фолдинг модель шеңберінде де жүргізілді. Альфа-бөлшектің ядроларымен әрекеттесуінің потенциалын анықтауға арналған жартылай микроскопиялық фолдинг-моделі нуклон-нуклондық күштері мен ядролық материя тығыздығын үлестірілуінен тұрады. Феноменологиялық потенциалға қарағанда фолдинг-моделі бос параметрлерді қамтымайды, сол себепті ядроның оптикалық моделіне негізделген деректерден табылатын параметрлердің анықталмағандығын азайтады. Сонымен қатар, анық параметрлердің шамаларын толық бұрыш бойынша төмен энергиялардағы тәжірибелік нәтижелерді жақсы сипаттауға жол ашылады. Дегенмен, біз тек потенциалдың тек нақты шамаларын таба аламыз, ал жорамал бөлігін алу мүмкін емес. Сондықтан бұл тәсіл әлі де феноменологиялық болып табылады.

$^{13}\text{C}(\alpha, \alpha)^{13}\text{C}$ жүйесі үшін фолдинг-моделі шеңберінде жартылай микроскопиялық потенциалды қарастырайық.

Нуклон-ядролық шашырау үшін бірінші ретті фолдинг-моделінің оптикалық потенциалдың нақты бөлігін есептеу, келесі түрде жазылады:

$$U_r(R) = \int dr_1 \rho_1(r_1) V(r), \quad (4)$$

мұндағы $r = R - r_1$, $\rho_1(r_1)$ – ^{13}C ядро тығыздығының үлестірімділігі, $V(r)$ – эффективті нуклон-ядролық әрекеттесу. Есептеу барысында эффективті нуклон-ядролық әрекеттесу МЗҮ-әрекеттесу ретінде алынған.

$$V(R) = 2999 \frac{\exp(-4R)}{4R} - 2134 \frac{\exp(-2.5R)}{2.5R} - 276 \left(1 - \frac{0.005E}{A} \right) \delta(R). \quad (5)$$

^{13}C ядросының тығыздығы келесі формуламен анықталады:

$$\rho(R) = \rho_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{R}{a} \right)^2 \right) \exp \left(- \left(\frac{R}{a} \right)^2 \right), \quad (6)$$

мұндағы a и α – тұрақты параметрлер.

Қорытынды. Альфа-бөлшектерінің ^{13}C ядроларында 29 және 65 МэВ энергияларда серпимді шашырауы, сонымен қатар 54.1, 48.7, 35 және 26.6 МэВ секілді тәжірибелік мәліметтерді қолданып, оптикалық модел шеңберінде феноменологиялық оптикалық потенциал параметрі және екінші ретті фолдинг моделі шеңберінде жартылай микроскопиялық потенциал параметрлерінің оптималды мәндері қарастырылады. Есептелген серпимді шашыраудың дифференциалды қималары мен тәжірибелік мәліметтерді сәйкестіндіру үшін, соқтығысу бөлшектерінің кең ауқымды энергия бөлігі үшін әрекеттесу потенциалдарының параметрлері табылды. Сонымен қатар, потенциалдың нақты бөлігінің тереңдігінің энергетикалық тәуелділігі құрылды.

Табылған оптикалық потенциалдың параметрлері серпимсіз шашырауды (мысалға, қозған 3,09, 3,68, 6,68, 7,5 және 8,86 МэВ күйлері үшін) зерттеуде, болашақ есептеулерде қолданылатын болады.

Осы жұмыс ҚР БҒМ №1460 ГФ4 грантымен қаржыландырылды.

ӘДЕБИЕТ

- [1] W. von Oertzen, M. Freer, Y. Kanada-En'yo. Nuclear clusters and nuclear molecules // Physical Reports 432, 43 (2006)
- [2] A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, G. Röpke. Alpha cluster condensation in ^{12}C and ^{16}O // Physical Review Letters 87, 192501 (2001)
- [3] M. Milin and W. von Oertzen. Search for molecular bands in // European Physical Journal A 14, 295 (2002)
- [4] T. Kawabata et al., Journal of Physics: Conference Series, 111 (2008) 012013; Journal of Modern Physics E vol. 17 (2008) 2071
- [5] Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Danilov A.N. et al. // **International Nuclear Physics Conference INPC2013: 2-7 June 2013, Firenze, Italy, NS 051**
- [6] Б.И. Кузнецов, И.П. Чернов // Ядерная физика, т.20, вып.4, 1974
- [7] С.В. Артемов, Г.Ким, Г.А. Радюк // Известия РАН, серия физическая, т.65, № 11, 2001
- [8] H. Abele, H.J. Hauser, A. Korber, W. Leitner, R. Neu, H. Plappert, T. Rohwer, G. Staudt, M. Straber, S. Welte, and M. Walz, P.D. Eversheim and F. Hinterberger. Measurement and folding-potential analysis of the elastic alpha-scattering on light nuclei // Zeitschrift für Physik, Atomic nuclei, V.326, 1987
- [9] I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comput. Phys. Rep. 7 (1988)

REFERENCES

- [1] W. von Oertzen, M. Freer, Y. Kanada-En'yo. Nuclear clusters and nuclear molecules // Physical Reports 432, 43 (2006)
- [2] A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, G. Röpke. Alpha cluster condensation in ^{12}C and ^{16}O // Physical Review Letters 87, 192501 (2001)
- [3] M. Milin and W. von Oertzen. Search for molecular bands in // European Physical Journal A 14, 295 (2002)
- [4] T. Kawabata et al., Journal of Physics: Conference Series, 111 (2008) 012013; Journal of Modern Physics E vol. 17 (2008) 2071
- [5] Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Danilov A.N. et al. // **International Nuclear Physics Conference INPC2013: 2-7 June 2013, Firenze, Italy, NS 051**
- [6] B.I. Kuznechov, I.P. Chernov // Yadernayafizika, V20, №4, 1974
- [7] S.V. Artemov, G. Kim, G.A. Radyuk // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, ser. fiz., V65, № 11, 2001
- [8] H. Abele, H.J. Hauser, A. Korber, W. Leitner, R. Neu, H. Plappert, T. Rohwer, G. Staudt, M. Straber, S. Welte, M. Walz, P.D. Eversheim and F. Hinterberger. Measurement and folding-potential analysis of the elastic alpha-scattering on light nuclei // Zeitschrift für Physik, Atomic nuclei, V.326, 1987
- [9] I.J. Thompson. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comput. Phys. Rep. 7 (1988)

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ С ЯДРАМИ ^{13}C ПРИ ЭНЕРГИЯХ 6.65-16.25 МЭВ/НУКЛОН

**Н.Буртебаев¹, А.С. Демьянова², Д.М. Джансейтов³, Ж.К. Керимкулов¹, М. Насурлла⁴, Д.К. Алимов⁴,
А.К. Шакиров⁴**

¹ИЯФ, Алматы, Казахстан; ²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия;

³ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; ⁴КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: оптическая модель, упругое рассеяние, фолдинг потенциал, альфа частица, FRESCO.

Аннотация. В данной работе исследованы процессы упругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{13}C при энергиях 6.65-16.25 МэВ/нуклон. Дифференциальные сечения измерены в диапазоне углов 10^0 - 80^0 в лабораторной системе координат. Анализ упругого рассеяния был проведен в рамках оптической модели. В расчетах для действительной части комплексного ядерного потенциала были использованы как микроскопические потенциалы двойной свертки, так и феноменологические потенциалы. Мнимая часть имела форму феноменологического поверхностного Вудс-Саксонского потенциала. Теоретически рассчитанные сечения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Поступила 04.04.2016 г.