

МРНТИ 29.15.03; 29.15.19  
УДК 539.141

<https://doi.org/10.51889/2020-4.1728-7901.18>

В.О. Курмангалиева<sup>1</sup>, А.Д. Дүйсенбай<sup>1</sup>, Н.С. Асқар<sup>1</sup>, С.А. Жарилкасимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

## КЛАСТЕРЛІК ЖУЫҚТАУДА <sup>7</sup>ВЕ ЯДРОСЫНЫҢ ҚҰРЫЛУЫМЕН ЖҮРЕТІН ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКЦИЯЛАРДЫ ЗЕРТТЕУ

*Аңдатпа*

Термоядролық реакцияларды зерттеу заманауи ядролық физика үшін үлкен қызығушылықты тудырады. Осыған орай, бұл жұмыста кластерлік үлгі шеңберінде pp-циклінің негізгі реакцияларының бірі зерттелген. Есептеулер үшін біз, кластерлік үлгі әдістерінің бірін, яғни резонирлеу тобы әдісінің алгебралық нұсқасын қолдандық, бұл әдіс бойынша зерттелетін альфа бөлшек пен <sup>3</sup>He шашырау реакциясы қарастырылған және өзара әсерлесуші екі кластер түрінде келтірілген. Сонымен қатар, өзгертілген Хасегава-Нагата потенциалы қолданылған, бұл потенциал нуклон-нуклондық өзара әрекеттесуді сипаттайды. Жасалған зерттеулердің мақсаты байланыс және резонансты күйлердің жалпы заңдылығының көрінісі болып табылады. Зерттеліп отырған байланыс және резонансты күйлердің негізгі теориялық есептеулері «2cl\_SpectrPhases.exe» арнайы бағдарламасының қолданылуымен жүзеге асқан. Бұдан алынған теориялық нәтижелер тәжірибелік деректермен салыстырылды.

**Түйін сөздер:** кластерлер, термоядролық реакциялар, байланысқан және резонансты күйлер.

*Аннотация*

В.О. Курмангалиева<sup>1</sup>, А.Д. Дүйсенбай<sup>1</sup>, Н.С. Асқар<sup>1</sup>, С.А. Жарилкасимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казакский Национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЯДРА <sup>7</sup>Be В КЛАСТЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Исследования термонуклеарных реакций представляют огромный интерес для современной ядерной физики. В связи с чем в данной работе нами была исследована одна из основных реакций pp-цикла в рамках кластерной модели. Для расчетов мы использовали один из методов кластерной модели а именно, алгебраическую версию метода резонирующих групп в которой, исследуемая реакция рассеяния альфа-частицы с <sup>3</sup>He была разобрана и представлена в виде двух взаимодействующих между собой кластеров. Также был использован модифицированный потенциал Хасегава-Нагаты, описывающий поведение нуклон-нуклонного взаимодействия. Целью проводимых исследований является выявление общих закономерностей у связанных и резонансных состояний. Основной теоретический расчет исследуемых резонансных и связанных состояний проводился с использованием специальной программы «2cl\_SpectrPhases.exe». Полученные теоретические результаты сравнивались с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** кластеры, термонуклеарные реакции, связанные и резонансные состояния.

*Abstract*

## RESEARCH OF THE THERMONUCLEAR REACTIONS WITH THE FORMATION OF <sup>7</sup>Be NUCLEUS IN THE CLUSTER APPROXIMATION

Kurmangaliyeva V.O.<sup>1</sup>, Duisenbay A.D.<sup>1</sup>, Askar N.S.<sup>1</sup>, Zharilkassimova S.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

Research of thermonuclear reactions is a great interest to modern nuclear physics. In this connection, in this work, we investigated one of the main reactions of the pp-cycle within the framework of the cluster model. For calculations, we used one of the methods of the cluster model, namely, the algebraic version of the method of resonating groups in which the studied reaction of scattering of an alpha particle with <sup>3</sup>He was disassembled and presented in the form of two interacting clusters. The modified Hasegawa-Nagata potential was also used, which describes the behavior of the nucleon-nucleon interaction. The aim of the research is to identify common patterns in coupled and resonant states. The main theoretical calculation of the studied resonance and coupled states was carried out using a special program "2cl\_SpectrPhases.exe". The obtained theoretical results were compared with experimental data.

**Keywords:** clusters, thermonuclear reactions, bound and resonance states.

Галамда жеңіл атом ядроларының таралуы туралы астрофизикалық деректердің талдауы жеңіл ядролар қасиеттері мен олардың қатысуымен жүретін реакцияларының жаңа, әрі одан да нақты тәжірибелік және теориялық зерттеулеріне себепші болады [1,2]. Ядролық деректердің астрофизикалық қосымшалары төменгі энергия аймағында ядролық реакциялардың қималарын нақтырақ әрі дәлірек анықтауды талап етеді [3].

Арнайы ядро үшін (айналық ядро үшін де) ұсынылған үлгілерде, әдетте, оның негізгі сипаттамаларының кейбірі ғана ескеріледі. Кластерлердің құрылуы нуклондар мен аз нуклонды қосалқы жүйелердің қасиеттері арасындағы өзара байланыстылықтан өте тәуелді болып келеді, ядролық өзара әсерлесулердің ерекшеліктері өте өзгеше және ядролық кластерлік құбылыстарды зерттеуде өте маңызды. Кластерлік үлгілердің эффективтілігі мен беріктілігі көптеген тәжірибелік деректермен, ядролардың кластерлік радиоактивтілігі құбылысымен,  $\alpha$ -кластерлердің ықшамдылығымен және ядролар мен олардың изотоптарындағы квазимолекулалық күйлердің құрылуымен дәлелденген [4].

Сонымен қатар, кластерлік үлгілерді қолдану теориялық есептеулерді әлдеқайда жеңілдетеді, яғни, егер екі кластерлік жүйе туралы айтатын болсақ, онда көп бөлшекті есепті эффективті екі дене есебіне алып келеді. Әрбір кластер басқа нысандармен өзара әрекеттесетін бірнеше нуклоннан тұратын тұрақты топ ретінде қарастырылады. Кластерлік үлгінің алғашқы және қатаңдау құрылымы Дж.А. Уилермен мына жұмыстарда жасалған болатын [5,6]. Ол “резонирлеу тобы” ұғымын енгізді және кластерлердің қатыстық қозғалысын сипаттайтын толқындық функция үшін динамикалық теңдеуін шығарды. Ядролық құрылым ұғымына қосылған үлкен үлес Вильдермут пен Тан [7] еңбегінде берілген. Олар кластерлер үшін кластерлік жуықтау мен Паули принципін ескеретін әдісті қарастырып ойлап тапты. Кластерлік үлгіге [8] негізделген стационарлық Шредингер теңдеуін шешудің бірнеше микроскопиялық әдістерін құрастырды, сонымен қатар, Паули принципін жүзеге асыру үшін антисимметризация операторы енгізілді. Бұл тәсілдің негізгі қиыншылығы нуклондар антисимметризациясының шарттарындағы есептеулерге байланысты. Паули принципін ескеретін есепті жеңілдету үшін кластер үлгісінің құрылымы микроскопиялық әдістер арқылы жүзеге асты. Мұндай әдістердің бірі Г.Ф. Филиппов ұсынған резонирлеу тобы әдістерінің алгебралық түрі болып табылады [9]. Алгебралық түрінің [10] негізгі идеялары бұл жұмыста қолданылатын "2cl SpectrPhases.exe" есептеу бағдарламасына енгізілген.

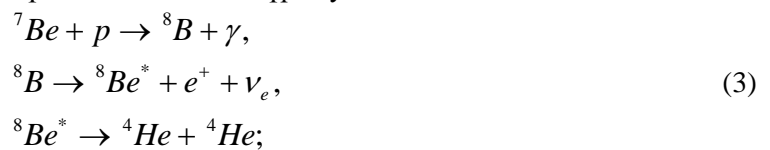
Протон-протондық цикл (pp-цикл)реакциялары [11] жұлдызды ортада және Күнде өтетін алғашқы термоядролық реакциялардың бірі болып табылады, өйткені термоядролық реакцияның дәл осы тармағында сутегінің жеңілірек ядросы гелий атомының ядросына айналады. Берілген реакциялар жұлдызды орта үшін салыстырмалы түрде жоғары емес энергия кезінде өте алады, нәтижесінде нақ осылар массасы біздің Күн шамасындай жұлдыздарда басым болады. Берілген тізбек үшін гелий ядросын құратын алғашқы үш реакция негізі болып табылады:



Берілген реакция тізбегі біткеннен кейін циклдің мүмкін болатын үш оқиға нұсқасы болады, олар сәйкесінше  $pp1$ ,  $pp2$  және  $pp3$  білдіреді. Бірінші нұсқасында, (1)-дегі екі бастапқы реакция кемінде тағы бір рет қайталануы тиіс, себебі үшінші реакцияның жүзеге асуы үшін тізбекке екі  ${}^3\text{He}$  ядросы қажет, бұдан  ${}^4\text{He}$  ядросы құрылады. Берілген реакция тізбегі  $pp1$  тармағы ретінде көрсетіледі және барлық жағдайлардың 69%-ында болу ықтималдылығы жоғары болып табылады. Екінші тізбек  $pp2$  жағдайдың қалған 31%-ында ықтималдықпен өтеді, мұнда  ${}^3\text{He}$  ядросы  ${}^4\text{He}$  ядросымен әрекеттесе бастайды, салдарында термоядролық реакцияның балама тізбегі құрылады:



Біткеннен кейін, берілген реакция тізбегі екі гелий ядросының құрылуына алып келеді және сонымен қатар, жоғары емес температура кезінде гелийдің жұлдызды ортада және Күнде пайда болуының балама жолы ретінде қызығушылығын көрсетеді. Берілген тізбектің бастапқы реакциясы өз кезегінде  $pp3$  термоядролық реакцияның үшінші тізбегінің құрылуына алып келе алады.

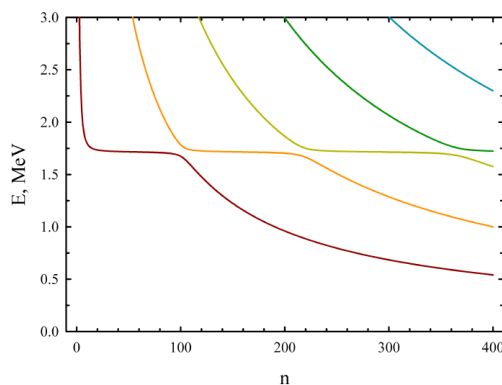


Берілген тізбекте  ${}^8\text{B}$  ядросының ыдырауы мен бірден екі гелий ядросына ыдырайтын аса тұрақты емес  ${}^8\text{Be}$  ядросының құрылуы жүреді.  $pp3$  реакция тізбегінде пайда болудың 0.3%-ға тең ең азықтималдылығы бар, осыған байланысты жұлдызды материяда  $pp$ -циклдің алғашқы екі тізбегі басым болады. Берілген тізбектер ядролық физика саласында үлкен қызығушылықты тудырады, себебі оларды құратын термоядролық реакциялар жаңа технологияларды пайдалана отырып, әлдеқайда арзан жаңа энергияны алу үшін болашақта қолданылуы мүмкін. ИТЭР құрылысы әлемнің ең дамыған мемлекеттерінің осы аса ірі жобасына қатысуымен де, заманауи ғылымның термоядролық реакцияларды толық жете зерттеуіне деген қызығушылығы мен сенімін дәлелдейді. Зерттеудің негізіне берілген реакциялардың алғашқы көздерін бақылау жатады, бұл алыс жұлдыздардан және біздің Күннен келетін сәулелену тәрізді. Алайда, осы саладағы орасан зор ақпараттық деректерге қарамастан, ядролық күштер табиғаты туралы, тікелей реакциялардағы және олардың жүзеге асуына әр түрлі нуклондық параметрлердің, сонымен қатар ядроның ішінде пайда болатын нуклондық ассоциация әсері туралы сұрақтар әлі де жауапсыз.

Ядролық физикада ядроның барлық қасиеттері мен күйін сипаттайтын жалғыз және нақты үлгі әлі жоқ. Теориялық сипаттауды талап ететін және әлі белгісіз сұрақтар: нуклон-нуклондық өзара әрекеттесулер мен үш, төрт және одан да көп денелер арасындағы әрекеттесулер. Ядроны сипаттау үшін арналған әдістерді тандауда осыған ұқсас қиындықтар бар, себебі: ядроның бөлшегі оны статистикалық әдістермен нақты сипаттау үшін өте аз және ядроның бөлшегі оны кванттық механика әдістерімен сипаттау үшін өте көп. Осыған орай, ішкі ядролық үрдістерді сипаттаумен байланысты есептерді зерттеу үшін көптеген зерттеу топтары орасан зор есептеуіш қуатынсыз Шредингер теңдеуін шығаруға мүмкіндік беретін есептеудің балама әдістерін қолдануды жөн санайды.

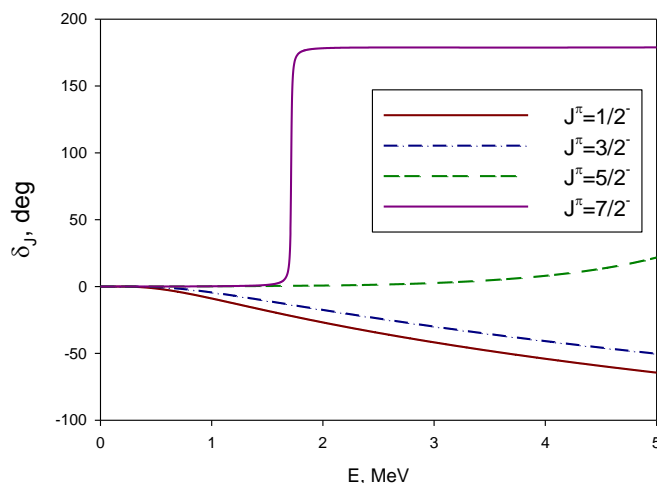
Бұл жұмыста ядро мен оның нуклондық жүйелерін сипаттайтын кластерлік үлгі алынған. Сонымен қатар, ядро ішіндегі нуклондық қауымдастықты сипаттау үшін пайдаланылатын резонирлеу тобы әдісінің алгебралық нұсқасының микроскопиялық әдісі қолданылған [12]. Бұл ядролардың тек бір-бірімен әрекеттесуін ғана емес, сонымен қатар олардың ішкі құрылыстарын да ескеруге мүмкіндік берді. Барлық есептеулер кластерлік үлгі шеңберінде қарастырылатын  $pp$ -циклдің термоядролық реакцияларының біріне –  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$  жүргізілген. Нуклон-нуклондық өзара әрекеттесуді зерттеу үшін Хасегава-Нагатаңың өзгертілген потенциалы [13] таңдалған.

Үздіксіз спектр күйлерін ескере отырып, фазалық ығысулар мен кластерлердің серпімді шашырауының ішінара және толық қималары келтірілген. Резонанс күйлерінің параметрлеріне ерекше назар аударылды. Кулондық күштің резонансты күйлердегі осы параметрлерге әсері де қарастырылды [14]. Сурет 1-де  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  серпімді шашыраудың фазалық ауысымын көрсетеміз. Кулондық әсерлесуге орай, энергияның жеткілікті үлкен аралығында  $0 < E < 0,5$  МэВ фазалық ауысым өте аз. Жұптылығы теріс және толық бұрыштық момент  $J=7/2$  және  $J=5/2$  күйлері үшін фазалық ауысымдар резонансты көрсетеді. Көріп отырғанымыздай,  $7/2$  резонансты күйі,  $5/2$  резонансты күйіне қарағанда қысаң болып келеді.



Сурет 1. Осцилляторлық функциялар санына тәуелді  ${}^7\text{Be}$  ядросының  $7/2^-$  күйінің спектрі

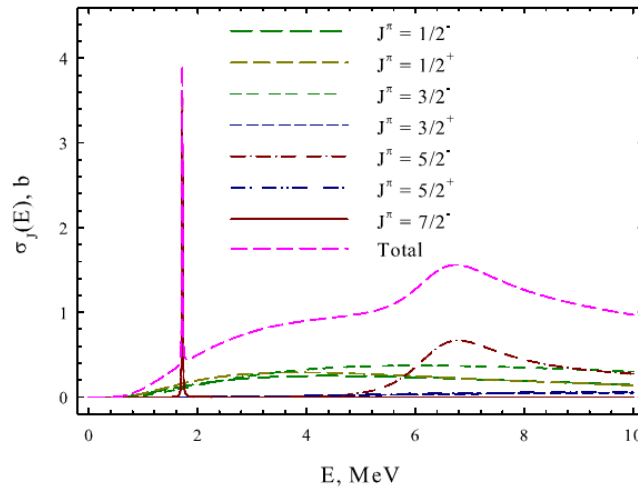
Сурет 2-де  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  серпімді шашыраудың теориялық фазалық ауысымдары көрсетілген. Кулондық өзара әрекеттесу салдарынан энергияның  $0 < E < 0.5$  МэВ жеткілікті жоғары аралығында фазалық ауысымдар өте аз.



Сурет 2. Екі кластерлік үлгі бойынша есептелген  ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  шашырау реакциясының фазалық ауысымы

Теріс жұптылығы бар фазалық ауысымдардан толық бұрыштық моменті  $J = 7/2^-$  мен  $J = 5/2^-$  үшін резонансты күйлері байқалады. Бұл графиктен  $7/2^-$  резонансты күйі  $5/2^-$  резонансты күйіне карағанда қысаң болып келетіндігін көреміз.

${}^7\text{Be}$  ядросының  $7/2^-$  резонансты күйі  $\alpha + {}^3\text{He}$  серпімді шашырауының ішінара және толық қимасына орасан зор әсер етеді (Сурет 3). Кванттық сандары  $J^\pi = 1/2^+$  арналар  $0 \leq E \leq 3$  МэВ төменгі энергия маңайында басым болады. Бұл арна екі кластердің беттік соқтығысуына, яғни толық орбиталық моменті  $L = 0$  екі кластердің өзара әрекеттесуіне алып келеді. Төменгі энергия маңайындағы ( ${}^7\text{Be}$  үшін  $0 \leq E \leq 0.8$  МэВ)  $\alpha + {}^3\text{He}$  серпімді шашыраудың толық қимасы кулондық әсерлесу салдарынан өте аз.



Сурет 3.  $\alpha + {}^3\text{He}$  серпімді шашырауының ішінара және толық қимасы

Кесте 1-де берілген нәтижелер, осы жұмыста алынған қарапайым екі кластерлік үлгінің  ${}^7\text{Be}$  ядросындағы негізгі байланыс және резонанс күйлерін дұрыс сипаттайтындығын көрсетеді. Сонымен қатар, теориялық нәтижелеріміздің бұдан бұрын алынған тәжірибелік деректермен жақсы сәйкестігі алынады.

Кесте 1.  ${}^7\text{Be}$  ядросының байланыс және резонанс күйлерінің параметрлері

$J^\pi$	Теориялық деректер		Тәжірибелік деректер[15]	
	$E, \text{MэВ}$	$\Gamma$	$E$	$\Gamma$
1/2-	-0.310	-	-0.4291	-
3/2-	-1.588	-	-1.5866	-
5/2-	6.398	2.025	$5.143 \pm 0.100$	1.2
7/2-	1.716	0.012	$2.98 \pm 50$	$0.175 \pm 7$

Екі кластерлік микроскопиялық үлгіні пайдалана отырып, р қаббатағы ең жеңіл ядролардың резонанс пен байланыс күйлерінің басты ерекшеліктері зерттелді. Бұл үлгі Паули принципін толығымен қанағаттандырады. Кластерлердің өзара әрекеттесулері нуклон-нуклондық потенциалдың суперпозициясы арқылы анықталған. Резонирлеу тобы әдісінің алгебралық нұсқасын қолдана отырып, есептеулердің алынған теориялық нәтижелері тәжірибелік деректермен салыстырылып, нәтижелердің жақсы сәйкестігі алынды.

Фазалық ауысым мен серпімді шашырау қимасы толық зерттелген. Сонымен қатар, Хасегава-Нагатаның өзгертілген потенциалын қолдана отырып және  ${}^7\text{Be}$  құрама ядросының ерекшеліктеріне қарай, байланыс күйі мен резонанс күйінің спектрлері есептелген. Резонанс күйлерінің негізгі сипаттамалары клесі түрде есептелді:  $\Gamma$  – резонанс ені және  $E$  – резонанс энергиясы. Алынған нәтижелер бойынша «Sigmaplot 11» бағдарламасы арқылы график тұрғызылды.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

- 1 Freer M., Horiuchi H., Kanada-En'yo Y., Lee D., and. Meibner U.-G. Microscopic Clustering in Nuclei//ArXiv e-prints, May 2017.
- 2 Beck C. Recent Experimental Results on Nuclear Cluster Physics//ArXiv e-prints, Aug. 2016.
- 3 Bertulani C. A. and Kajino T. Frontiers in nuclear astrophysics//Progr. Part. Nucl. Phys., vol. 89, pp. 56-100, July 2016.
- 4 Kimura M. and Horiuchi H. 16O + 16O molecular nature of the superdeformed band of 32S and the evolution of the molecular structure//Phys. Rev. C, vol. 69, pp. 051304+, May. 2004.
- 5 Wheeler J. A. Molecular Viewpoints in Nuclear Structure//Phys. Rev., vol. 52, pp. 1083-1106, Dec. 1937.
- 6 Wheeler J. A. On the Mathematical Description of Light Nuclei by the Method of Resonating Group Structure//Phys. Rev., vol. 52, pp. 1107-1122, Dec. 1937.
- 7 Wildermuth K. and Tang Y. A united theory of the nucleus//Braunschweig: Vieweg Verlag, 1977.

- 8 Fujiwara Y., Horiuchi H., Ikeda K., Kamimura M., Kato K., Suzuki Y. and Uegaki E. Chapter II. *Comprehensive Study of Alpha-Nuclei*//Prog. Theor. Phys. Suppl., vol. 68, pp. 29-192, 1980.
- 9 Fliessbach T. and Walliser H. *The structure of the resonating group equation* Nucl. Phys.A, vol. 377, pp. 84-104, Mar. 1982.
- 10 Lashko Y., Filippov G. and Vasilevsky V. *Dynamics of two-cluster systems in phase space*//Nucl. Phys. A, vol. 941, pp. 121-144, 2015.
- 11 Burbidge, E.; Burbidge, G.; Fowler, William; Hoyle, F. *Synthesis of the Elements in Stars*//Reviews of Modern Physics. – 1957. - 29 (4). – P. 547–650.
- 12 Vasilevsky, V. S. and Kato, K. and Kurmangaliyeva, V. and Duisenbay, A.D. and Kalzhigitov, N. and Takibayev, N. *Investigation of discrete and continuous spectrum states in two-cluster system.*//Sapporo, Japan: Hokkaido University, 2017.
- 13 Hasegawa A. and Nagata S. *Ground state of  ${}^6\text{Li}$* //Prog. Theor. Phys., vol. 45, pp. 1786-1807, 1971.
- 14 Duisenbay A.D., Kalzhigitov N., Katō K., Kurmangaliyeva V.O., Takibayev N., Vasilevsky V.S. *Effects of the Coulomb interaction on parameters of resonance states in mirror three-cluster nuclei*//Nucl.Phys.A 996, 121692, 2020. Q2, IF-1.63, SJR 0.926; doi: 10.1016/j.nuclphysa.2020.121692.
- 15 15D. R. Tilley, C. M. Cheves, J. L. Godwin, G. M. Hale, H. M. Hofmann, J. H. Kelley, C. G. Sheu, H. R. Weller. *Energy levels of light nuclei A=5, 6, 7*//Nuclear Physics A, vol. 708, pp. 3-163, 2002.

#### References

- 1 Freer M., Horiuchi H., Kanada-En'yo Y., Lee D., and Meibner U. (2017). *G.Microscopic Clustering in Nuclei*. ArXiv e-prints, May. (In English)
- 2 Beck C. (2016) *Recent Experimental Results on Nuclear Cluster Physics*. ArXiv e-prints, Aug. 2016. (In English)
- 3 Bertulani C. A. and Kajino T. (2016) *Frontiers in nuclear astrophysics*. Progr. Part. Nucl. Phys., vol. 89, 56-100. (In English)
- 4 Kimura M. and Horiuchi H. (2004)  *$16\text{O} + 16\text{O}$  molecular nature of the superdeformed band of  $32\text{S}$  and the evolution of the molecular structure*. Phys. Rev. C, vol. 69, 051304, May. (In English)
- 5 Wheeler J. A. (1937) *Molecular Viewpoints in Nuclear Structure*. Phys. Rev., vol. 52, 1083-1106, Dec. (In English)
- 6 Wheeler J. A. (1937) *On the Mathematical Description of Light Nuclei by the Method of Resonating Group Structure*//Phys. Rev., vol. 52, 1107-1122, Dec. (In English)
- 7 Wildermuth K. and Tang Y. (1977) *A united theory of the nucleus*. Braunschweig, Vieweg Verlag. (In English)
- 8 Fujiwara Y., Horiuchi H., Ikeda K., Kamimura M., Kato K., Suzuki Y. and Uegaki E. (1980) *Chapter II. Comprehensive Study of Alpha-Nuclei*. Prog. Theor. Phys. Suppl., vol. 68, 29-192. (In English)
- 9 Fliessbach T. and Walliser H. (1982) *The structure of the resonating group equation* Nucl. Phys.A, vol. 377, 84-104, Mar. (In English)
- 10 Lashko Y., Filippov G. and Vasilevsky V. (2015) *Dynamics of two-cluster systems in phase space*. Nucl. Phys. A, vol. 941, 121-144. (In English)
- 11 Burbidge, E., Burbidge, G., Fowler, William Hoyle F. (1957) *Synthesis of the Elements in Stars*. Reviews of Modern Physics. 29 (4), 547–650. (In English)
- 12 Vasilevsky, V. S. and Kato, K. and Kurmangaliyeva, V. and Duisenbay, A.D. and Kalzhigitov, N. and Takibayev, N. (2017) *Investigation of discrete and continuous spectrum states in two-cluster system*. Sapporo, Japan: Hokkaido University. (In English)
- 13 Hasegawa A. and Nagata S. (1971) *Ground state of  ${}^6\text{Li}$* . Prog. Theor. Phys., vol. 45, 1786-1807. (In English)
- 14 Duisenbay A.D., Kalzhigitov N., Katō K., Kurmangaliyeva V.O., Takibayev N., Vasilevsky V.S. (2020) *Effects of the Coulomb interaction on parameters of resonance states in mirror three-cluster nuclei*. Nucl.Phys.A 996, 121692, Q2, IF-1.63, SJR 0.926, doi: 10.1016/j.nuclphysa. (In English)
- 15 D. R. Tilley, C. M. Cheves, J. L. Godwin, G. M. Hale, H. M. Hofmann, J. H. Kelley, C. G. Sheu, H. R. Weller. (2002) *Energy levels of light nuclei A=5, 6, 7*, Nuclear Physics A, vol. 708, 3-163. (In English)