

МРНТИ 29.15.19  
УДК 539.128.417

Е.Қ. Сайлаубеков<sup>1</sup>, А.К. Морзабаев<sup>1</sup>

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

## АЛЬФА-БӨЛШЕКТЕРДІ БЕРУ РЕАКЦИЯЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

*Аңдатпа*

Бұл мақала ядролық кластер физикасын дамыту үшін, ядролық физиканың мүмкіндіктерін ұсынады. Бірнеше нуклондардың топтары құрамдас кластерлер ретінде әрекет ететін еркіндік дәрежелері ядролық құрылымның негізгі аспектілерінің бірі, сол себепті де кластерлеудің негізі гелий ядролары ( $\alpha$ -бөлшектер) екені ескерілген. Бұл мақалада жаңа кванттық орталардың іргелі компоненттері ретінде кластерлік бірігулердің және жинақталмаған ядролардың әртүрлі типтерін зерттеу мәселесі қарастырылған. Кейбір кластерлі ядролардың толық синтез әсерінен  $\alpha$ -бөлшектерді беру реакцияларының эксперимент нәтижелері ұсыныла отырып, сол реакциялардың формуласы көрсетілген. Атап айтқанда, осы жұмыста «кластерлі ядро моделі»- деп аталатын моделіне үлкен көңіл бөлінеді, ол ядролардың қоздырылған күйлерін сипаттайды, яғни гелий ядролары. Бұл жұмыстың ең маңызды мақсаттарының бірі – басқа мақалалардың авторларына сүйеніп, альфа-бөлшектерді беру реакцияларын зерттеу жұмыстарындағы автордың қол жетімді деректерін мұқият өңдеу, және оларды ядролардың кластерлік модельдерін бүгінгі жаңа модельдермен салыстыру, жаңа үлгілерді анықтау, оларды түсіндіру. Мақала авторы журнал мақалаларында және «жеке байланыс» түрінде әр түрлі көздерден эксперименттік деректер алды. Мақалалық жұмыстың тиісті жерлерінде дереккөздерге сілтеме бар.

**Түйін сөздер:**  $\alpha$ -бөлшектер, нуклондарды беру реакциялары, кластерлі ядролар, реакция каналдары, ауыр иондар, ядролық байланыс күштері.

*Аннотация*

Е.Қ. Сайлаубеков<sup>1</sup>, А.К. Морзабаев<sup>1</sup>

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПЕРЕДАЧИ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

В статье представлены возможности ядерной физики для физики ядерных кластеров. Уровни свободы, когда множественные группы нуклонов действуют как кластеры, являются одним из ключевых аспектов ядерной структуры, поэтому ядра гелия ( $\alpha$ -частицы) являются основой для кластеризации. В этой статье рассматриваются исследования различных типов кластерных сборок и ядер как фундаментальных компонентов новых квантовых сред. Приведены формулы реакций переноса  $\alpha$ -частиц при полном синтеза некоторых кластеров. В частности, большое внимание уделяется так называемой «модели кластерного ядра», которая описывает возбужденные состояния ядер, то есть ядер гелия. Одна из важных целей этой статьи - тщательно уточнить имеющиеся у автора данные в исследованиях переноса альфа-частиц, опираясь на авторов других статей и сравнивая их кластерные модели ядра с современными моделями, выявляя и интерпретируя эти модели. Автор статьи получил экспериментальные данные из различных публикаций в рецензируемых журналах и через личные контакты. В статье есть ссылки на источники, где это уместно.

**Ключевые слова:**  $\alpha$ -частицы, реакции переноса нуклонов, кластерные ядра, каналы реакций, тяжелые ионы, силы ядерной связи.

*Abstract*

## RESEARCH OF ALPHA-PARTICLE TRANSFER REACTIONS

Sailaubekov E. K.<sup>1</sup>, Morzabayev A.K.<sup>1</sup>

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

This paper presents the capabilities of nuclear physics for the development of nuclear cluster physics. Frequencies of several nucleons, acting as component clusters, are one of the key aspects of the nuclear device. Therefore, the basis for the clustering was helium nuclei ( $\alpha$ -particles). This article explores the different types of cluster ensembles and different types of unmanaged nuclei as the fundamental components of new quantum environments.

The experimental results of the  $\alpha$ -particle transfer reactions under the complete synthesis of some of the cluster nuclei show the formula for those reactions. Specifically, this work focuses on the so-called "cluster nucleus model" - a model that describes the excited states of the nuclei, ie helium nuclei. One of the most important goals of this work is to carefully analyze the author's available data on research of alpha-particle reactions and to compare them with today's promising models of nuclei, to identify and explain new patterns. The author of the article received experimental data from various publications in journal articles and "personal contact". Relevant sources in the article have reference to sources.

**Keywords:**  $\alpha$ -particles, nucleon transfer reactions, cluster nuclei, reaction channels, heavy ions, nuclear forces.

Кластерлі ядролық модельдерде ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  және т.б.) протондар мен нейтрондардың тең саны бар жеңіл ядролардың бар екендігін көрсететін себептер бар болып шыққан. Ол  $\alpha$ -бөлшектің аномальды түрде үлкен тұрақтылығының болуымен түсіндіріледі. Мәселен,  $\alpha$ -бөлшекте, нуклонның байланыс энергиясы шамамен 20 МэВ деп алынды (мысалы, көптеген ядроларда шамамен 7 МэВ қана).

XXI-ші ғасыр басында нуклондардың кластерлі құбылысы эксперименталды түрде жақсы анықталған болатын. Соның ішінде ең жиі кездесетін  $\alpha$ -бөлшектер кластерлері. Олар төрт нуклонның бірігуін білдіреді (екі нейтрон, екі протон). Ядрода кластерлердің болуы тәжірибе жүзінде байқалатын құбылыстар: осы кластерлердің бөлінуімен ядроның ыдырау ықтималдығының артуы, осы кластерлердің берілуімен жүретін реакция қимасының жоғарылауы (мысалы,  $^{12}\text{C} + ^6\text{Li} \rightarrow ^{16}\text{O} + ^2\text{H}$  реакциясындағы  $\alpha$ -бөлшектерінің берілу реакциясы) және т.б.

Алғашқы болып,  $\alpha$ -бөлшектердің модельдеріне жақсы сәйкес келген,  $\alpha$ -кластерлік ядроның ең жарқын мысалы -  $^8\text{Be}$ . Оның төменгі энергетикалық деңгейлері, жалпы ауырлық центрі айналасында,  $\alpha$ -бөлшектерінің ығысуына сәйкес келеді. Бұл ядроның басқа күйлері жоқ (ал қозу энергиясы шамамен 17 МэВ дейін). Тағы бір қызық жайт – ауыр ядролық кластерлік бірігулер. Мысалы, ықтималдығы жоғары кейбір қозған күйлердегі  $^{24}\text{Mg}$ , ол ядро  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  жүйесі түрінде бірігуі мүмкін. Мұндай бірігулер ядролық квазимолекулалар деп аталады [1].

Әдетте, кластерлік күйлер ядролардың беткі қабатында пайда болады. Бұл ядроның барлық нуклондарынан түзілетін орташа ядролық өріс оның бетіндегі қабатында әлсіреуімен байланысты. Көптеген жағдайларда нуклондар арасындағы байланыс орташа ядролық өрістен күшті, ал бұл нуклондардың топтасуына әкеледі. Алайда, бұл әсерлердің нақты сипаттамасы ең жеңіл ядролар жағдайында ғана жүзеге асырылуы мүмкін. Жалпы алғанда, кластерлік ядро модельдері ең көп таралған негізгі қабықша моделі мен жалпыланған ядро моделіне қарағанда азырақ қатаңдық дәрежесіне ие. Сол себепті ондай ядроларды ыдырату жеңілірек көрінеді.

Зерттеулер нуклондардың өзара әрекеттесуі атом ядросының квазимолекулалық құрылымына әкелетіндігін көрсетеді. Атап айтқанда,  $\alpha$ -бөлшектер құрылымы көптеген ядроларда бар болып шыққан. Мұндай ядро гелий ( $^4\text{He}$ ) ядроларынан тұратын жүйе болып табылады. Кластерлік құбылыстың механизмі мен ерекшеліктерін анықтау ядролық құбылыстарды зерттеудегі маңызды мәселелердің бірі.

Мынандай ядролық реакцияны қарастырайық:

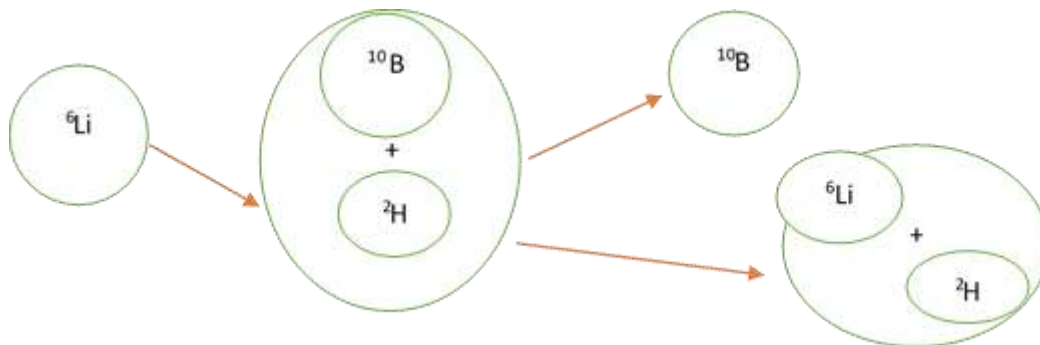


Бұл реакцияда  $^{12}\text{C}$  альфа-бөлшекті  $^6\text{Li}$ -дан қабылдап,  $^{16}\text{O}$ -ға түрленеді.



(2)-ші реакцияның шығу реакциясындағы элементтердің (1)-ші реакциядан мүлдем өзгеше болуының себебін анықтау үшін,  $^{12}\text{C}$  элементі тұтас тұрақты ядро болуы мүмкін деп қарастырамыз, сол себепті (1)-ші теңдеуде көміртек басқа бөлшектерге ыдырамаған. Қарсы жағдай, көміртек екі элементтен құралса, және олар әлсіз байланысқан болса, ыдырайды. Мысалы,  $^{12}\text{C}$  көміртек  $^{10}\text{B}$  мен  $^2\text{H}$  сутек изотопынан құралған жағдайда, атқылаушы бөлшек әсерінен, осы екі элементке бөлінеді, оны біз (2)-ші теңдеуде көреміз. Литий сутек изотопын қосып алып,  $^8\text{Be}$  – ге айналғаны көрініп тұр.

Келесі суретте (2)-ші теңдеу көрсетілген.



Сурет 1.  $^{12}\text{C} + ^6\text{Li} \rightarrow ^8\text{Be} + ^{10}\text{B}$  реакциясының сызбалық нұсқасы

Кластерлі ядролардың қасиеттерін нуклондық тұрақтылық шегіне жақынырақ зерттеу ядролық физиканың негізгі міндеттерінің бірі болып табылады, оның шешімі осындай ядролардың салыстырмалы жоғары қарқындылығы бар синтездеуге мүмкіндік беретін үдеткіштердің жаңа буыны

пайда болған кезде мүмкін болды. Заманауи үдеткіштер нуклондарды ғана емес, сонымен бірге ядролардың барлығын үдетуге мүмкіндік береді. Кейбір ядролардың әрекеттесуінен сол ядроны құрайтын  $\alpha$ -бөлшектерді беру реакциясының орын алуы мүмкін.  $\alpha$ -бөлшектерді беру реакцияларында  $\alpha$ -радиоактивті элементтердің белсенді қатысу ықтималдықтары басқа элементтерге қарағанда көп есе жоғары. Бәлкім  $\alpha$ -радиоактивті элементтерді кластерлі атомдарға жатқызуға болады. Келесі қадам  $^{12}\text{C}$  көміртектің  $^4\text{He}$  ядросын қосып алу реакциясы жайлы мағлұматтар алуға мүмкіндік беретін программаны қолдану болып табылады. Оның нәтижелері 1-ші кестеде келтірілген.

Кесте 1.  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}$  реакция нәтижесі

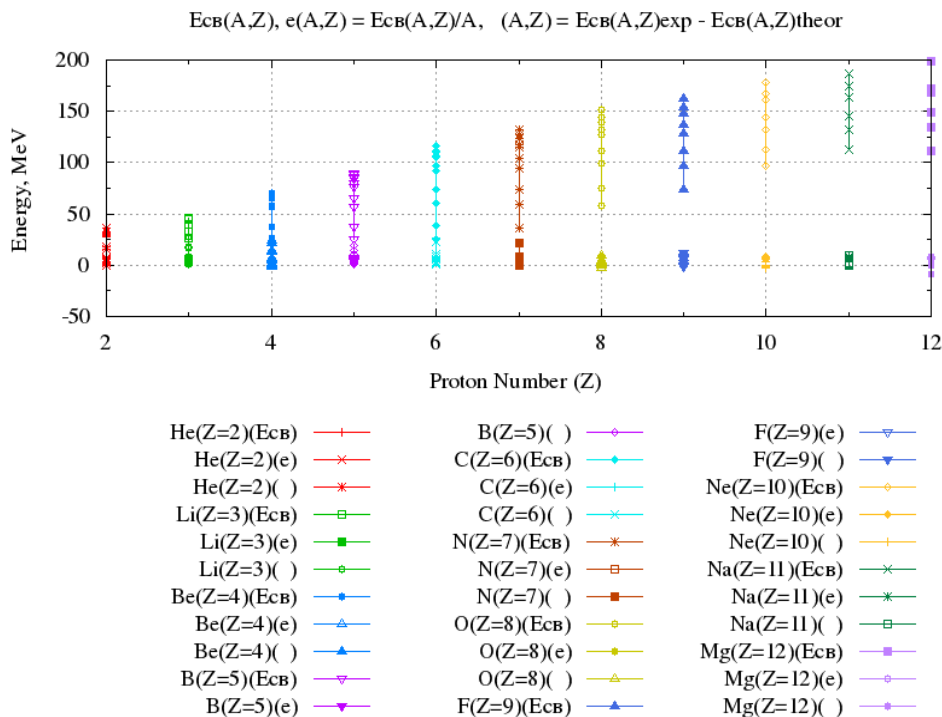
Реакция параметрлері	Бөлшек	Z	A	Масса, u А.е.м.
Ядро-нысан	C	6	12	12,0107
Атқылаушы бөлшек	He	2	4	4,002602
Реакция нәтижесі	O	8	16	15,999
Реакция табалдырығы	0, себебі атқылаушы бөлшектің кез-келген энергиясында бұл реакция мүмкін			
Реакция энергиясы	7.16191950503021(0) МэВ			

Негізі кластерлі құрылымдардың мүмкін болу ықтималдығы жоғары ядролар литий ден магний аралығында жатады, оған себеп осы ядролардың ерекше құрамдарында. Келесі сурет 2 "Nuclear Wallet Cards" программасы негізінде құрылған графика көрсетеді, және ол графикте литий ден магний ге дейінгі барлық изотоптардың байланыс энергиялары көрсетілген.

Кластерлі ядролардың байланыс энергиялары неғұрлым аз болса, соғұрлым беру реакцияларының ықтималдығы артады. Кластерлер, яғни гелий атомдары, өздерін жеке бір нуклондар іспеттес ұстайды, сондықтан байланыс энергия сол кластерлер арасында пайда болады.

Жалпы ауыр иондардың өзара әрекеттесу механизмін зерделей келе,  $\alpha$ -бөлшектермен алмасу реакцияларына көп жағдайларда тек кластерлі ядролар түсе алатындығына көз жеткізе аламыз.

Ауыр иондар үшін ( $Z > 2$ ) ұшатын бөлшектерге Кулон кедергісі  $\xi_0$  протондарға қарағанда  $Z$  есе көп, сондықтан ядроның бір нуклонына келетін ион энергиясы бірнеше Мэв-тан ( $Z$  нысанаға қарағанда неғұрлым көп) артық болуы қажет.



Сурет 2.  $^6\text{Li} - ^{24}\text{Mg}$  аралығындағы изотоптардың байланыс энергияларының тәуелділігі

$\xi > 1,2\xi_0$  энергиясына ие ауыр иондармен болған ядролық реакцияларда тиімді қимасы:

$$\sigma = \pi R^2 (1 - \xi_0 / \xi) \quad (3)$$

Мұндағы:  $R \approx 1,4(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$

Бұл R радиусымен екі зарядталған қара шарлардың соғылуы туралы классикалық ұғымдарға сәйкес келеді.  $\xi < \xi_0$  энергиялары кезінде потенциалдық тосқауыл арқылы туннельдік эффект есебінен жүзеге асырылады (туннель әсерін қараңыз).

Тағы шағын эксперимент жүргізіп көрсек, ол үшін арнайы программа арқылы серпімсіз әрекеттесу реакция мәндерін анықтап білуге болады. Ол программаның қысқаша аты NRV. 1-ші теңдеудегі реакцияға жалғастырып, теңдеуді жүргізе береміз. Келесі 3-суретке назар аударайық.

Entrance channel OMP							Reaction parameters		
Coulomb $r_0(R)$ , fm 1.20 (4.93)	Real part			Imaginary part			Entrance channel		Exit channel
	$V_o$ , MeV	$r_0(R)$ , fm	a, fm	$W_o$ , MeV	$r_0(R)$ , fm	a, fm	$E_{lab}$	$E_{cm}$	$E_{lab}$
Volume	-17.15	1.29 (5.31)	0.69	-12.97	1.33 (5.48)	0.43	$E_{lab} = 70.40$ MeV	$E_{cm} = 46.93$ MeV	$E_{lab} = 68.13$ MeV
Surface							$k = 2.997$ fm <sup>-1</sup>	$k = 2.948$ fm <sup>-1</sup>	$E_{cm} = 45.42$ MeV
Spin-Orbit							$\eta = 0.827$	$\eta = 0.841$	
Proximity									

Exit channel OMP							Integration parameters		
Coulomb $r_0(R)$ , fm 1.20 (4.93)	Real part			Imaginary part			Inelastic excitation of <sup>12</sup> C		$R_{max}$
	$V_o$ , MeV	$r_0(R)$ , fm	a, fm	$W_o$ , MeV	$r_0(R)$ , fm	a, fm	$J_{g.s.} \rightarrow J$	$dr$	$L_{max}$
Volume	-17.15	1.29 (5.31)	0.69	-12.97	1.33 (5.48)	0.43	$0+ \rightarrow 3-$	$R_{max} = 25.0$ fm	
Surface							$J_{tr}, J_{tr}, S_{tr}$	$dr = 0.07$ fm	
Spin-Orbit							$E_{exc} = 1.51$ MeV	$L_{max} = 59$ ħ	
Proximity							$\beta_i = 0.100$		
							$\beta_{Coul} = 0.115$		

**Transition Form Factor**

$$\left( -\beta_i R_V \left| \frac{dV}{dr} \right| - i\beta_i R_W \left| \frac{dW}{dr} \right| + \beta_{Coul} \frac{Z_1 Z_2 e^2 R_C^3}{(2l+1)r^{l+1}} \right) Y_{10}(\Omega_r)$$

$\beta_i R_V^{(vol)} = 1.292 \beta_i A_C^{1/3} = 0.29$  fm  
 $\beta_i R_W^{(vol)} = 1.334 \beta_i A_C^{1/3} = 0.3$  fm  
 $\beta_{Coul} R_{Coul} = 1.2 \beta_{Coul} A_C^{1/3} = 0.31$  fm

Сурет 3. <sup>6</sup>Li + <sup>12</sup>C реакциясындағы серпімсіз шашырауы (ұжымдық күйдің қозуы)

(1)-ші теңдеуге назар аударсақ, оның серпімсіз екенін байқаймыз, себебі альфа-бөлшегін беру орын алып тұр. Кіру каналы мен шығу каналындағы физикалық параметрлердің сан мәндері шығып тұр. Мысалы потенциал мәні 17, 15 мэв ке тең делінген.

Енді реакция энергиясы <sup>6</sup>Li + <sup>12</sup>C(3-, 1.51053 MeV) at  $E_{lab} = 70.4$  MeV тең. Жалпы 1-ші реакция серпімдіде болуы мүмкін. Ол 4-ші суретте көрініс табады.

Optical Model parameters							Other quantities		
Coulomb $r_0(R)$ , fm 0.65 (2.669)	Real part			Imaginary part			$E_{lab}$	$E_{cm}$	k
	$V_o$ , MeV	$r_0(R)$ , fm	a, fm	$W_o$ , MeV	$r_0(R)$ , fm	a, fm			
Volume	-150 -121.488	0.3 (1.232) 0.55 (2.259)	0.86	-3.8	1.66 (6.817)	0.469	$E_{lab} = 72$ MeV	$E_{cm} = 48$ MeV	$k = 3.03$ fm <sup>-1</sup>
Surface				-6.8	0.633 (2.599)	0.425	$\eta = 0.818$	$R_{max} = 19.72$ fm	$dr = 0.09$ fm
Spin-Orbit	0.9	0.96 (3.942)	0.444						
Proximity									
Folding									

	Before fitting	After fitting	Fitting process
$\sigma_R$ , mb	1331.27	1357.61	$N_{steps} = 50$
$\sigma_{tot}$ , mb	2155.44	2340.91	$\Delta\chi^2/\chi^2 = 0.001000$
$\chi^2 / N_{points}$	171.315	144.809	

Сурет 4. <sup>6</sup>Li + <sup>12</sup>C реакциясындағы серпімді шашырауы

Серпімді шашыраудағы бұл жері ядроның оптикалық моделіне негізделіп отыр. Шың тұс және жорамал бөліктегі потенциал мәндері сәйкесінше белгіленген.

Эрекеттесуге дейінгі қима, эрекеттесуден кейінгі қима сандары бар. (3)-ші теңдеуде мысалға қима формуласы тұр, алайда программа бізге қима санын бірден есептеп берді.

Ауыр иондардан (массасы мен заряды  $\alpha$ -бөлшектерден үлкенірек) туындаған реакциялар құрамдас ядро механизмі мен тікелей өзара эрекеттесуге тән ерекшеліктерін көрсетеді.

$T < V$  кезіндегі ауыр иондардағы реакциялардың негізгі үлесі тікелей беру реакцияларына келеді: ауыр ион және нысан-ядро соқтығысу кезінде әрең бір - біріне қатысты жақын эрекеттеседі, соның нәтижесінде бір немесе одан да көп нуклондардың ядроға немесе керісінше ионға берілуі болады. Берілу реакцияларының қималары берілетін нуклондар санының өсуімен азаяды. Берілу реакциялары әдісімен  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{20}\text{C}$ ,  ${}^{21}\text{N}$ ,  ${}^{24}\text{O}$  сияқты жеңіл ядролар алынды [2].

(1)-ші теңдеудегі реакцияның кіру каналы мен шығу каналындағы мәліметтерге келсек, оныда есептеп шығаруға болады. Кесте-2 ге назар аударсақ.

Кесте 2.  ${}^{12}\text{C} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^{16}\text{O} + {}^2\text{H}$  реакциясының элементтерінің кейбір физикалық параметрлерінің мәндері

Физикалық шамалар	Реакцияның кіру каналындағы элементтер		Реакцияның шығу каналындағы элементтер	
	${}^6\text{Li}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{16}\text{O}$	${}^2\text{H}$
Реакцияның элементтері	${}^6\text{Li}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{16}\text{O}$	${}^2\text{H}$
Энергия реакции, $E$ , Мэв	5,507		6,458	
Спин, $S$	1	5/2	3/2	0
$E/A$ , Мэв	1		3,32	
Элементар радиус, $r_0$ ФМ	1,22	1,16	1,16	1,22
Максималды радиус, $R_{\text{max}}$ , $R_{\text{max}} = r_0 A^{1/3}$ , ФМ	30			

Альфа-бөлшектердің берілу реакцияларының зерттелуіндегі маңыздылығын қарастырсақ.

Зерттеу әдістеріне келетін болсақ, ол беру реакцияларының жүру механизмдерін зерттеп, теориялық жағынан меңгеру. Қолымызда заманға сай құрылғылар болмағандықтан, басқа осы салада жұмыс істейтін ғалымдардың еңбектеріне негізделеміз.

Кластерлі ядролар не екендігіне тоқтала кеткен жөн. Атап айтқанда кластерлерді энергетикалық бөлу шектері мынандай ядроларда  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{12}\text{C}$  және  ${}^{16}\text{O}$  нуклондардың бөліну шектерінен мүлдем төмен. Айқын кластерлік табиғаты тоғыз тұрақты нуклоны бар  ${}^9\text{Be}$ , және байланыссыз ядро  ${}^8\text{Be}$  – де байқалады.

Беру реакциялары, оның ішінде  $\alpha$ -бөлшектерді, реакция каналдары арқылы жүреді. Мысалы, литий жеті басқа ядромен эрекеттескенде, қозған күйге түсу арқылы  ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$  осындай реакцияда ыдырап, келесі ядроға  $\alpha$ -бөлшектерді ( ${}^4\text{He}$ ) беруі мүмкін.

$\alpha$ -бөлшектерді беру реакциялары көп жағдайларда кластерлі бөлшектер арасында жүретін реакциялар. Гелий атомдары бүтіндей кластерлі элементтерді құраушы бөлшектер. Олар өзара ядролық күштерге қарағанда әлсіз күштермен байланысқан, сол себепті реакция каналдары арқылы гелий атомдарын беру реакциялары мүмкін болып табылады. Бұл мақала осындай реакцияларды түсінуге талпыныс болып табылады.

Альфа-бөлшектермен болатын реакциялар өте көп энергияны қажет етеді, себебі альфа-бөлшек оң зарядталған ион. Берілу реакциялары осы мәселенің шешімі болулары әбден мүмкін. Себебі альфа-бөлшектер туннельдік эффект әсерінен беріліп отыр.

Пайданылған әдебиеттер тізімі:

1 Оглоблин А.А. Кластерная модель ядра [Электрон.ресурс]. – 2016. –URL: [https:// bigenc.ru/ physics/text/ 2623111](https://bigenc.ru/physics/text/2623111) (Дата обращения: 13.01.2020)

2 Жеребчевский В.И. Тройной кластерный распад // Вест. Санкт-Петербургский государственный университет – 2007. № 4. – С. 16–33.