

Валиолда Д.С.¹, Жансейтов Д.М.^{1,2*}, Жаугашева С.А.¹, Жусупова Н.К.¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,

²Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.,

*e-mail: janseit.daniar@gmail.com

¹¹BE НЕЙТРОНДЫҚ ГАЛО ЯДРОСЫН ЗЕРТТЕУ

Қазіргі таңда экзотикалық ядролар интенсивті тәжірибелік зерттелуде. Гало ядролардың кулондық күйреуін теориялық зерттеу, жеңіл ядролардың радиоактивті шоғырлармен өткізілетін тәжірибелік зерттеулерді жоспарлауға және оларды түсіндіруге маңызды. Радиоактивті шоғырлармен өткізілетін зерттеулер атом ядросының құрылымын талдауды жаңа ақпараттармен толықтыра, физиканың басқа саласында кең қолданыс тапты, мысалға ядролық астрофизикада.

Заманауи азнулонды ядролық физика саласында, гало ядроларды зерттеу өзекті мәселе болып табылады. Осындай ядролар орбиталарының радиустары, басқа нуклондармен ядролық әрекеттесу диапазонынан әлдеқайда үлкен болуы мүмкін. Гало ядросы физикасының өзінділік ерекшелігі, оның ядролық реакциялар мен ядро құрылымы механизмімен тығыз байланысында.

Күйреу гало ядролардың қасиеттерін зерттеуде ең маңызды құралдардың бірі болып табылады. Осындай реакцияларда үдетілген бөлшектердің ұсақ құрамдарға бөлініп ыдырауынан алынатын ақпарат, толқындық функцияның гало бөлігінің қасиеттері жайлы білуге мүмкіндік береді. Гало ядролардың күйреуін кулондық өріс өзгеруімен, байланысқан екі (үш) бөлшектің континуумға өтуі ретінде қарастыруға болады.

Бұл жұмыс ядролардың кулондық күйреуін кванттық тәсілмен теориялық зерттеуге арналған. ¹¹Be гало ядросының энергетикалық деңгейлеріне сыртқы магнит өрісінің әсері зерттелді. Ядролық әсерлесу ретінде Вудс-Саксон және Гаусс түріндегі потенциалдарды қолдана отырып, энергетикалық деңгейлердің жіктелуі сандық және аналитикалық әдістермен есептелді. ¹¹Be ядросы, нейтрондық гало ретінде ¹⁰Be қабықшасынан және бір нейтроннан тұрады. Сондай-ақ ¹¹Be ядросының негізгі күйіндегі орташа квадраттық зарядтық радиусы сандық түрде есептелді.

Түйін сөздер: ядролық гало, кулондық күйреу, экзотикалық ядролық күйлер, энергетикалық спектр, Шредингер стационар теңдеуі.

Valiolda D.S.¹, Janseitov D.M.^{1,2*}, Zhaugasheva S.A.¹, Zhussupova N.K.¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

²Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty,

*e-mail: janseit.daniar@gmail.com

Investigation of the neutron halo of the ¹¹Be nucleus

Exotic nuclei are the subject of intensive experimental research. Coulomb breakup are relevant for interpretation and planning of experiments in radioactive beams. These investigations have opened new prospects in studying the structure of nucleus and have found applications in other areas of physics, including nuclear astrophysics.

The halo is one of the most intensively studied objects in modern low-nucleus physics. The mean radii of certain nucleons orbits may be larger than nuclear interaction range. A characteristic feature of halo nuclei physics is correlations between the mechanism of nuclear reaction and structure.

The breakup is one of the important tools for studying halo properties. In these reactions, the information from dissociation of projectile into fragments could be used to conclude about the properties of halo part wave function. With a good approximation, the breakup could be regarded as a transition from the bound state of two (three) particles to the continuum, due to the changing Coulomb field.

This paper is devoted to a theoretical study of the Coulomb breakup of halo nuclei in a quantum approach. The energy levels of the halo of the ¹¹Be nucleus are calculated, taking into account the influence of an external magnetic field, i.e. the splitting of energy levels by numerical and analytical methods using two different potentials is calculated: in the form of Woods-Saxon and Gauss. The ¹¹Be nucleus is regarded as a neutron halo consisting of ¹⁰Be core and one neutron. The root mean square charge radius of the ¹¹Be nucleus in the ground state is also calculated numerically. This work is the initial stage of the work on the investigation of the breakup of halo nuclei in the quantum-mechanical approach.

Key words: Halo nucleus, Coulomb breakup, breakup cross section, exotic states of the nuclei, stationary Schrödinger equation, energy spectrum.

Валиолда Д.С.¹, Джансейтов Д.М.^{1,2*}, Жаугашева С.А.¹, Жусупова Н.К.¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

²Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы,

*e-mail: janseit.daniar@gmail.com

Изучение нейтронного гало ядра ¹¹Be

Экзотические ядра являются предметом интенсивного экспериментального исследования. Теоретические исследования кулоновского развала гало ядер актуальны для интерпретации и планирования экспериментов по изучению легких ядер на радиоактивных пучках. Исследования с пучками радиоактивных ядер открыли новые перспективы в изучении структуры атомного ядра и нашли широкие приложения в других областях физики, включая ядерную астрофизику.

Гало ядра являются одним из наиболее интенсивно исследуемых объектов в современной малонуклонной ядерной физике. Средние радиусы орбит некоторых нуклонов этих ядер может быть больше, чем диапазон ядерного взаимодействия с другими нуклонами. Характерной особенностью физики ядер с гало является тесная взаимосвязь механизма ядерной реакции и структуры.

Развал является одним из важных инструментов для изучения свойств гало ядер. В этих реакциях, информация, поступающая от диссоциации снаряда на фрагменты может быть использована, чтобы сделать вывод о свойствах гало части волновой функции. С хорошим приближением, развал гало ядра можно рассматривать как переход от связанного состояния двух (трех) частиц к континууму, в связи с изменяющимся кулоновским полем.

Данная работа посвящена теоретическому исследованию кулоновского развала гало ядер в квантовом подходе. Расчитаны энергетические уровни гало ядра ¹¹Be, с учетом влияния внешнего магнитного поля, т.е. вычислено расщепление энергетических уровней численным и аналитическим методами с использованием двух разных потенциалов: в форме Вудс-Саксона и Гаусса. Ядро ¹¹Be, имеющее как нейтронное гало, состоящий из ядра ¹⁰Be и одного нейтрона. Также численно вычислен среднеквадратичный зарядовый радиус ядра ¹¹Be в основном состоянии. Эта работа является начальным этапом работы по исследованию развала гало ядер в кванто-механическом подходе.

Ключевые слова: гало ядро, кулоновский развал, экзотические состояния ядер, стационарное уравнение Шредингера, энергетический спектр.

Кіріспе

Нейтрондық гало ядроларды алғашқы рет 1985 жылы Танихато және т.б. [1,2] анықтаған, ол жерде мұндай экзотикалық жүйелер ядро қабықшаларымен тығыз байланысты және диффузиялық ядролық бұлтпен қоршалған. Бұл жүйелер нейтрондық тұрақтылық шекарасына жақын орналасқан кейбір жеңіл, нейтроны артық радиоактивті ядролардың негізгі күйлерінде анықталған [3]. Бұрында гало тек нуклондық тұрақтылық шекарасына жақын орналасқан радиоактивті ядроларда ғана пайда болуы мүмкін деп есептелген. Алайда өткен жүз жылдықтың 50-ші жылдарының аяғында, галоньң

ашылуынан бұрын, Базь оның нейтрон немесе протон эмиссияларының табалдырығына жақын тұрақты ядроларда да пайда болу мүмкіндігін болжаған болатын [4]. Сонымен қатар, [5-9] жұмыстарда тұрақты ¹³C ядросының 3.09 (1/2⁻) МэВ қозған күйі радиусы үлкейтілген гало құрылымына ие бола алатыны көрсетілген.

Нуклондар мен кластерлердің эмиссиясы арқылы ыдырайтын өмір сүру уақыты аз (10⁻¹² сек) ядролардың радиустарын өлшеу тек ядролық реакцияларда ғана мүмкін. Дәл осындай күйлер ядролар спектроскопиясында негізгі рөлді ойнайды.

Жақын уақыттан бері қозған күйлердегі ядролар радиусын тәжіриберлік анықтаудың

тура әдістері жетілдіріліп және ұсынылған болатын, олар – түрлендірілген дифракциялық модел [10], серпімсіз құбылмалы шашырау әдісі [11,12] және асимптотикалық нормалау коэффициенттер әдісі [13]. Осы әдістердің барлығы [10-13], орташа квадраттық ядролар радиусын анықтауға мүмкіндік береді.

Кулондық күйреу гало ядроны зерттеуге арналған негізгі құралдардың бірі болып табылады. Күйреу қимасы гало құрылымы туралы пайдалы ақпаратқа ие. Осылайша, бұл тақырып қарқынды эксперименталдық және теориялық зерттеулер пәні болып табылады. Гало ядроларының арасында, ^{11}Be ядросы ерекше мәнге ие, себебі оның құрылымының қарапайымдылығы нақты теориялық зерттеу жасауға мүмкіндік береді. Шындығында, ^{11}Be ядросының байланысқан күйлерін ^{10}Be ядро және әлсіз байланысқан нейтрон ретінде сипаттауға болады. Ыдырауды екібөлшекті байланысқан күйден ядроның нысанамен соқтығысу процесі кезінде өзгеретін кулондық өріс әсерінен болатын үздіксіздікке ауысу ретінде қарастыруға болады [14].

Жұмыста сыртқы магнит өрісінің ^{11}Be ядросының негізгі күйіне әсері зерттеледі, энергетикалық деңгейлердің жіктелуі сандық және аналитикалық түрде есептеледі. Аналитикалық әдіс ретінде бірінші ретті ауытқу теориясы таңдалған [15].

Ядро радиусы ең іргелі және маңызды сипаттамаларының бірі болып табылады. Нуклон-нуклондық әсерлесу және ядролық материя қасиеттерін қамту арқылы, ол ядролық физикада ғаламдық рөл атқарады, сондықтан стандарттық шамалардан ауытқудың өзі ядролық құрылымның кардиналды өзгеруімен байланысты болуы мүмкін [5]. Бұл жұмыста негізгі күйдегі ^{11}Be ядросының орташа квадраттық радиусы сандық түрде есептелді.

1. Шредингердің стационар теңдеуін шешудің сандық әдістері

Есеп Шредингердің стационар теңдеуін (ШТ) шешу арқылы шығады:

$$H\psi_{Nlm} = E_N\psi_{Nlm}. \quad (1)$$

Толқындық функцияны мына түрде радиалды және бұрыштық функциялар арқылы жіктесек:

$$\psi_{Nlm}(r) = R_{Nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi), \quad (2)$$

мұндағы $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ - сфералық функция. Әсерлесу гамильтонианы [16]:

$$H_0(r) = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\Delta + V_{cf}(r). \quad (3)$$

Сонда толқындық функцияның $R_{Nl}(r)$ радиалды бөлігі үшін келесі теңдеуді аламыз:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu}\Delta + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} + V_{cf}(r)\right]R_{Nl}(r) = ER_{Nl}(r), \quad (4)$$

мұндағы $\mu = \frac{m_n m_c}{M}$ – келтірілген масса, m_n , m_c және $M = m_n + m_c$ – сәйкес нейтрондар, қабықша және ^{11}Be ядросының массасы.

ШТ шешімін (4) шекаралық шарттар кезінде кері итерация [17], ақырғы-айырым [18] және өткізу [17] сандық әдістерін қолдана отырып табамыз.

$$\begin{cases} R_{Nl}(r) \rightarrow \text{const}, r \rightarrow 0 \\ R_{Nl}(r) \rightarrow 0, r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (5)$$

Кері итерация әдісі шешімге жеткілікті тез жинақталуымен сипатталады. Нәтиженің дәлдігін үйлеспеушілік бойынша тексеру қажет. Есептеу сызбасының дәлдігі $\Delta_i = |E^{(i)} - E^{(i-1)}| < 10^{-6}$ тең. Теңдеуде екінші ретті туындыны [15] жұмыста толығырақ сипатталған ақырғы-айырым аппроксимациясын қолданып, есептеу сызбасы үшін ықшамдауға болады. $r \in [0, r_m]$ интервалында r_j бойынша радиалды тор енгізіледі, ыңғайлы болу үшін $R(r_j) = R_j$ белгілеуін енгізді. Өткізу әдісі көмегімен бірінші итерация үшін толқындық функция анықталады, одан кейін нормалау тексеріледі. Осылайша, энергетикалық деңгей анықталады. Теріс энергетикалық күйлер нормаланған және ^{11}Be физикалық байланысқан күйлерді немесе Паули принципімен тыйым салынған күйлерді сипаттайды [16].

1.1 Нәтижелер: ^{11}Be энергетикалық спектрі

(4) теңдеуіндегі V_{cf} потенциалы ^{10}Be қабықшасы және нейтрон арасындағы ішкі әсерлесуді көрсетеді және орталық мүше мен спин-орбиталдық әсерлесу мүшесінен тұрады, ол нейтрон-қабықша салыстырмалы қозғалысының \mathbf{L}

бұрыштық моменті және I нейтрон спинін ескереді [14,16]

$$V_{cf}(r) = V_0(r) + \mathbf{LIV}_{LI}(r). \quad (6)$$

(6) теңдеуіндегі орталық потенциал:

$$V_0(r) = -V_l f(r, R_0, a), \quad (7)$$

мұндағы Вудс-Саксондық форм фактор:

$$f(r, R_0, a) = \left[1 + \exp\left(\frac{r-R_0}{a}\right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Спин-орбиталдық әсерлесу [14]:

$$V_{LI}(r) = V_{LS} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_0, a). \quad (9)$$

Потенциал параметрлерінің мәндері [16] жұмыстағыдай таңдалған:

$$V_{l=0}=59.5 \text{ МэВ}, V_{l>0} = 40.5 \text{ МэВ},$$

$$V_{LS} = 32.8 \text{ МэВ фм}^2, a=0.6 \text{ фм}, R_0=2.669 \text{ фм},$$

мұндағы V_l – Вудс-Саксон потенциалының тереңдігі, a – диффузділік, R_0 – ¹¹Be ядросының радиусы ($R_0= 1.2 A^{1/3}$ фм). V_{LS} стандартты мәні р-қабықша ядросы үшін l_s потенциалының тереңдігі үшін қолданылады [1].

Нәтижесінде ¹¹Be нейтрондық гало ядросының энергетикалық деңгейлері алынды: $l=0$ үшін негізгі күй энергиясы $E_0=-0.5013$ МэВ, $l=1$ қозған күй үшін $E_1=-0.1844$ МэВ. Алынған нәтижелер [16] жұмысының мәліметтерімен сәйкес келеді.

2. ¹¹Be энергия деңгейлерінің сыртқы магнит өрісінің әсерінен жіктелуі (Зеемандық жіктелу)

Сыртқы магнит өрісінің әсерінен ядролардың магнит моменттері белгілі бір амалмен қалыптасады және ядролық энергетикалық деңгейлер арасындағы ауысуларды бақылау мүмкіндігі пайда болады, осы әртүрлі бағыттармен байланысқан: белгілі бір жиілікпен сәулелену әсерінен болатын ауысулар. Ядроның энергетикалық деңгейлерін кванттау $2I + 1$ мәндерін қабылдайтын ядроның бұрыштық моменттерінің кванттық табиғатының салдары болып табылады. I спиндік кванттық сан (спин) $1/2$ еселік кез-келген мәнді қабылдай алады.

Энергия деңгейлерінің магнит өрісінде жіктелуін ядролық зеемандық жіктелу деп атауға болады, өйткені ол магнит өрісіндегі электрондық деңгейлердің жіктелуіне ұқсас (Зееман эффектісі) [19].

Радиалды Шредингер теңдеуін (4) ΔV_μ сыртқы өрісті қосу арқылы жазайық:

$$\left[\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2mr^2} + V(r) + \Delta V_\mu \right] R_l(r) = ER_l(r), \quad (10)$$

мұндағы ΔV_μ қосымша потенциал нейтрон спинінің сыртқы магнит өрісімен әсерлесуін сипаттайды, сондықтан, жоғарыда айтылғандай, ¹¹Be нейтрондық гало ядросы ¹⁰Be+n жүйесі ретінде қарастырылады және $\Delta V = \mathbf{B} \cdot \mu_n \cdot \hat{S}_n$ ретінде анықталады; \mathbf{B} – магниттік өрістің кернеулігі, μ_n – нейтронның магнит моменті, \hat{S}_n – спиннің оське проекциясы. Нейтронның спині $s=1/2$ болғандықтан, спиннің белгіленген бағытқа проекциясы екі мәнге ие болады: $+1/2$ және $-1/2$. ШТ-де $R_l(r)$ толқындық функциясын спиндік толқындық функцияға алмастыру қажет $R_l(r) \rightarrow R_l(r) \cdot \chi_m$, мұндағы χ_m екі компонентті спинор болып табылады, ал спиндік операторлар -2×2 өлшемдегі матрицалар. Өріс z осі бойынша бағытталған жағдай үшін: $\hat{S}_z = \pm \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ [20]

Спиндік толқындық функцияны енгізе отырып, ШТ екі теңдеуге жіктелетінін көруге болады, осылайша деңгей ығысулары мына түрде анықталады:

$$\begin{aligned} \Delta E_{m=\frac{1}{2}} &= \langle R_{lm}^{(r)} | \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mu_n | R_{lm}^{(r)} \rangle \\ \Delta E_{m=-\frac{1}{2}} &= \langle R_{lm}^{(r)} | -\frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mu_n | R_{lm}^{(r)} \rangle \end{aligned} \quad (11)$$

Дәл солай өріс x немесе y остері бойынша бағытталуы кезінде деңгей ығысуларын онай есептеуге болады.

Ары қарай спинор енгізу арқылы энергия ығысуларын есептеу үшін компьютерлік бағдарламаны түрлендіреміз, солай матрицалар және векторлар саны екі еселенеді. Бұрында бейнеленген сандық әдістер қолданылады.

Ядролық әсерлесуді бейнелеу үшін параметрлері бірінші бөлімде келтірілген Вудс-Саксон потенциалы қолданылды және әдіс-темені тексеру үшін Гаусс формасындағы потенциал қолданылды [21]:

$$V(r) = V_0 e^{-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2} = V_0 e^{-gr^2}. \quad (12)$$

$l=0$ үшін потенциал тереңдігі Вудс-Саксон потенциалындағыдай таңдалды $V_0 = 59.5$ МэВ, потенциал ені $g = \frac{1}{r_0^2} = 0.117$ фм⁻². 1-суретте негізгі күй үшін радиалды координатасына байланысты Вудс-Саксон және Гаусс потенциалдары көрсетілген.

Негізгі күй үшін нәтижелер 1- кестеде көрсетілген. Сандық нәтижелер аналитикалық шешімдермен салыстырылады, аналитикалық ретінде ауытқу теориясының бірінші реті таңдалды [15].

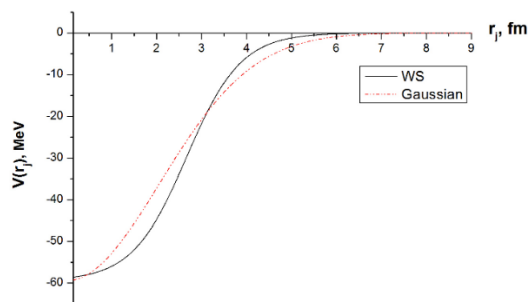
Ауытқу теориясы бойынша энергия ығысулары:

$$\Delta E_{\frac{1}{2}} = \int_0^\infty R_0(r) \Delta V_{\frac{1}{2}}(r) R_0(r) dr.$$

$$\Delta E_{-\frac{1}{2}} = \int_0^\infty R_0(r) \Delta V_{-\frac{1}{2}}(r) R_0(r) dr. \quad (13)$$

Өріс кернеулігі 0.1-ден 2000 Гауссқа дейін өзгертілді; нәтижелер аналитикалық шешімдермен жақсы сәйкес келетіні көрініп тұр.

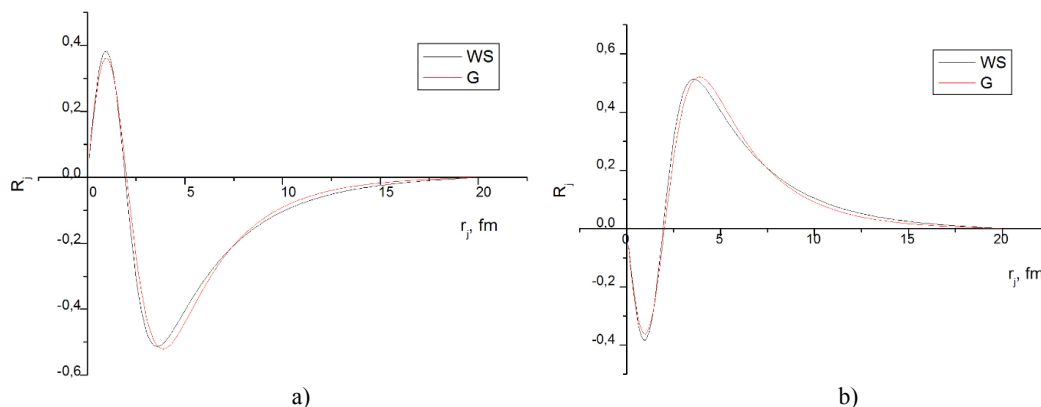
2-суретте +1/2 (а сурет) және -1/2 (b сурет) спин проекциялары үшін ¹¹Ве s-күйінің толқындық функциялары көрсетілген. Вудс-Саксон (WS) потенциалы үшін қарамен, Гаусс (G) потенциалы үшін қызылмен белгіленген. Магнит өрісі өзгерген кезде толқындық функциялар өзгермейді.



1-сурет – ¹¹Ве негізгі күйі үшін радиалды айнмалысына байланысты Вудс-Саксон және Гаусс потенциалдарының формасы

1-кесте – Сыртқы магнит өрісі әсерінен ¹¹Ве негізгі күйдегі энергия ығысуы

Rm=8 M=200	$\Delta E_{\text{аут.теор.}}(B_z)$	$\Delta E_{\text{сан.}}(B_z)$ Гаусс	$\Delta E_{\text{сан.}}(B_z)$ Вудс-Саксон	$\Delta E_{\text{аут.теор.}}(B_z)$	$\Delta E_{\text{сан.}}(B_z)$ Гаусс	$\Delta E_{\text{сан.}}(B_z)$ Вудс-Саксон
B (Gauss)	$m_s = +1/2$ спин проекциясы			$m_s = -1/2$ спин проекциясы		
0.1	0.0003	0.0003	0.0003	-0.0003	-0.0003	-0.0003
1	0.0030	0.0030	0.0030	-0.0030	-0.0030	-0.0030
10	0.0300	0.0301	0.0301	-0.0300	-0.0300	-0.0300
100	0.3008	0.3008	0.3008	-0.3008	-0.3008	-0.3008
200	0.6016	0.6016	0.6016	-0.6016	-0.6016	-0.6016
300	0.9024	0.9025	0.9025	-0.9024	-0.9025	-0.9025
400	1.2033	1.2033	1.2033	-1.2033	-1.2033	-1.2033
500	1.5041	1.5041	1.5041	-1.5041	-1.5041	-1.5041
1000	3.0082	3.0082	3.0082	-3.0082	-3.0082	-3.0082
2000	6.0165	6.0165	6.0165	-6.0165	-6.0165	-6.0165



2-сурет – а) спин жоғары бағытталған кездегі (+1/2) және б) спин төмен бағытталған кездегі (-1/2) радиалды толқындық функция

3. ¹¹Be гало ядросының радиусы

Ядро өлшемі іргелі қасиеттердің бірі болып табылады және оның қозу мен байланыс энергиясымен қатар ядролық потенциалдың диапазоны мен тереңдігін анықтау үшін қолданылады. Протондар мен нейтрондар үшін

$$\langle r^2 \rangle = \frac{\int \rho(r)r^2 d\vec{r}}{\int \rho(r)d\vec{r}} = \frac{\int \psi(r)^*\psi(r)r^4 dr}{\int \psi(r)^*\psi(r)dr} = \frac{\int_0^\infty \psi^2(r) r^4 dr}{\int_0^\infty \psi^2(r) dr} = \int_0^\infty \psi^2(r) r^4 dr. \quad (14)$$

¹¹Be гало ядросының негізгі күйі үшін 2s-күйінің толқындық функциясының кванттық сандары $N = 2, l = 0, m = 0$:

$$\Psi_{200}(r, \theta, \vartheta) = \frac{1}{r} R(r)Y_{00},$$

мұндағы $Y_{00} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}$ – $N = 2, l = 0, m = 0$ күйі үшін нормаланған сфералық функция [15]. Онда (14) теңдеуін толқындық функцияның радиалды бөлігі үшін қайта жазамыз:

$$\bar{r}^2 = \int_0^\infty r^2 R^2(r) dr. \quad (15)$$

Осылайша ядроның орташа квадраттық зарядтық (rms) радиусын анықтауға болады:

$$r_{rms} = \sqrt{\int_0^\infty r^2 R^2(r) dr}. \quad (16)$$

Нәтижесінде ¹¹Be ядросы үшін орташа квадраттық радиус мәнін алдық, $\langle r_{ch}^2 \rangle = 2.2268$ фм Вудс-Саксон потенциалы үшін және $\langle r_{ch}^2 \rangle = 2.1344$ фм Гаусс үшін.

2-кесте – ¹¹Be ядросының орташа квадраттық зарядтық (rms) радиусы

Жұмыстар:	$\langle r_{ch}^2 \rangle$, fm
Ядролық мәліметтер базасы [22]	(2.4630 ± 0.0150)
Лазерлік спектроскоп.[23]	2.466
Вудс-Саксон	2.227
Гаусс	2.134

кеңістіктік таралу әртүрлі бола алатындықтан, әсіресе бұл құбылыс гало ядроларда ерекше бақыланады, ядро өлшемдерін бейнелеудің бірнеше әдісі болады [22]. Мысалы, ядроның орташа квадраттық зарядтық радиусы (rms) мына түрде анықталады

2-кестеде алынған нәтижелер ядролық мәліметтер және эксперименталдық жұмыстар [22,23] базасы бойынша әдебиеттік мәндермен салыстырылады.

Қорытынды

Сандық әдісті қолдана отырып, бұл жұмыста тесттік бағдарлама ретінде [14,16] жұмыстарындағы сияқты ядролық әсерлесуді сипаттау үшін Вудс-Саксон потенциалын қолданып, ¹¹Be ядросының энергетикалық деңгейлері қайта жаңғыртылды. ¹¹Be ядросы ¹⁰Be қабықшасынан және бір нейтроннан тұратын нейтрондық гало ретінде қарастырылады [14,16].

Сондай-ақ Гаусс және Вудс-Саксон формасындағы екі әртүрлі потенциалдарды қолдана отырып, магнит өрісінің әсерінен энергия деңгейлерінің ығысуы есептелді. Сандық нәтижелер аналитикалық шешімдерге сәйкес келеді, аналитикалық ретінде ауытқу теориясының бірінші реті таңдалып алынды.

Жұмыста әртүрлі ядролық потенциалдар үшін ¹¹Be ядросының негізгі күйінің орташа квадраттық зарядтық радиусы сандық есептелді, ол жалпы эксперименттік нәтижелермен жақсы үйлесім табады.

Бұл жұмыс квант-механикалық әдісте гало ядролардың күйреуін зерттеуге арналған жұмыстардың бастапқы кезеңі болып табылады. Бейстационар ШТ шешудің сандық әдісін қолдана отырып, сыртқы өрістің гало ядросының күйреуіне әсерін толық зерттеу жоспарлануда.

Әдебиеттер

- 1 Tanihata I., Hamagaki H., Hashimoto O., Nagamiya S., Shida Y., Yoshikawa N., Yamakawa O., Sugimoto K., Kobayashi T., Greiner D.E., Takahashi N., Nojiri Y. Measurements of interaction cross sections and radii of He isotopes // *Physics Letters B.* – 1985. – Vol.160. –P. 380.
- 2 Tanihata I., Hamagaki H., Hashimoto O., Shida Y., Yoshikawa N., Sugimoto K., Yamakawa O., Kobayashi T., Takahashi N. Measurements of Interaction Cross Sections and Nuclear Radii in the Light p-Shell Region // *Physical Review Letters.* – 1985. – Vol. 55. –P. 2676.
- 3 Belyaeva T.L., Perez-Torres R., Ogloblin A.A., Demyanova A.S., Ershov S.N., Goncharov S.A. Determination of neutron halo radii in the first excited states of ^{13}C and ^{11}Be with the asymptotic normalization coefficients method // *Physical Review C.* - 2014. –Vol. 90. –P.064610.
- 4 Baz A. I. Threshold effects in nuclear reactions // *Advances in Physics.* – 1959. – Vol. 8. – P.349.
- 5 Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Danilov A.N., Goncharov S.A., Belyaeva T.L., Sobolev Yu.G., Khlebnikov S.V., Burtebaev N., Trzaska W., Heikkinen P., Tyurin G.P., Janseitov D. and Gurov Yu.B. States of ^{13}C with abnormal radii // *EPJ Web of Conferences.* – 2016. – Vol. 117. – P.0401.
- 6 Ogloblin A.A., Danilov A. N., Belyaeva T. L., Demyanova A. S., Goncharov S. A. Trzaska W. Effect of neutron halos on excited states of nuclei // *Physical Review C.* – 2011. – Vol. 84. – P.054601.
- 7 Ogloblin A.A., Danilov A.N., Belyaeva T.L., Demyanova A.S., Goncharov S.A. and Trzaska W. Observation of abnormally large radii of nuclei in excited states in the vicinity of neutron thresholds // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2011. – Vol.74, No.11. – P.1548-1561.
- 8 Kawabata T., Sasamoto Y., Maeda Y., Sakaguchi S., Shimizu Y., Suda K., Uesaka T., Fujiwara M., Hashimoto H., Hatanaka K., Kawase K., Matsubara H., Nakanishi K., Tameshige Y., Tamii A., Itoh K., Itoh M., Yoshida H. P., Kanada-en'yo Y., Uchida M. Cluster states in ^{13}C and ^{11}B // *International Journal of Modern Physics E.* – 2008. – Vol. 17. – P.2071.
- 9 Demyanova A.S., Danilov A.N., Dmitriev S.V., Ogloblin A.A., Belyaeva T.L., Burtebaev N., Drobyshev P., Goncharov S.A., Gurov Yu. B., Heikkinen P., Julin R., Khlebnikov S.V., Maslov V.A., Nassurlla N., Penionzhkevich Yu.E., Sobolev Yu.G., Trzaska W., Tyurin G., Zhrebchevskii V.I. Spectroscopy of exotic states of ^{13}C // *EPJ Web of Conferences.* – 2014. – Vol. 66. – P.02027.
- 10 Danilov A.N., Belyaeva T.L., Demyanova A.S., Goncharov S.A. and Ogloblin A.A. Determination of nuclear radii for unstable states in ^{12}C with diffraction inelastic scattering // *Physical Review C.* – 2009. – Vol. 80. – P.054603.
- 11 Ohkubo S. and Nirabayashi Y. Bose-Einstein condensation of α particles and Airy structure in nuclear rainbow scattering // *Physical Review C.* – 2004. – Vol. 70. –P.041602(R).
- 12 Demyanova A.S., Ogloblin A.A., Goncharov S.A. and Belyaeva T. L. Study of "condensate" states in ^{12}C and ^{16}O by inelastic scattering // *International Journal of Modern Physics E.* – 2008. –Vol. 17. – P.2118.
- 13 Liu Z.H., Lin C.J., Zhang H.Q., Li Z.C., Zhang J.S., Wu Y.W., Yang F., Ruan M., Liu J.C., Li S.Y., Peng Z. H. Asymptotic normalization coefficients and neutron halo of the excited states in ^{12}B and ^{13}C // *Physical Review C.* – 2001. –Vol. 64. – P.034312.
- 14 Melezhik V.S., Baye D.. Nonperturbative time-dependent approach to breakup of halo nuclei //
- 15 *Physical Review C.* -1999. –Vol. 59.-P.3232.
- 16 Landau L.D., Lifshitz E.M. *Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory*, Pergamon Press. – 1977. – Vol. 3.
- 17 Capel P., Baye D., Melezhik V.S. Time-dependent analysis of the breakup of halo nuclei // *Physical Review C.* 2003. – Vol. 68. –P. 014612.
- 18 Kalitkin N.N. *Numerical Methods.* – M.: Nauka, 1978.
- 19 Schneider B.I., Feist J., Nagele S., Pazourek R., Hu S., Collins L.A., Burgdörfer J. Recent Advances in Computational Methods for the Solution of the Time-Dependent Schrödinger Equation for the Interaction of Short, Intense Radiation with One and Two Electron Systems // *Quantum Dynamic Imaging.* -2011. – P.149.
- 20 Voronov V.K. Nuclear magnetic resonance // *Sorosovskii Educational Journal.* – 1996. – Vol. 10. – P. 70.
- 21 Balashev V.V., Dolinov V.K.. The course of quantum mechanics: Regular and chaotic dynamics.- Izhevsk, 2001.
- 22 Saikat Nandi. The quantum Gaussian well // *American Journal of Physics.* – 2010. – Vol. 78. – P. 1341.
- 23 Angeli I., Marinova K.P. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* -2013. –Vol. 99. – P.69.
- 24 Lu Z.T., Mueller P., Drake G.W. F. Colloquium: Laser probing of neutron-rich nuclei in light atoms // *Review of Modern Physics.* – 2013. –Vol. 85. –P.1383.

References

- 1 Tanihata et al., *Phys. Lett. B* 160, 380 (1985)
- 2 Tanihata et al., *Phys. Rev. Lett.* 55, 2676 (1985)
- 3 T.L. Belyaeva et al., *Phys. Rev. C* 90,064610 (2014)
- 4 A.I. Baz, *Advances in Physics*, 8, 349 (1959)
- 5 A.S. Demyanova et al., *EPJ Web of Conferences*, 117, 0401 (2016)
- 6 A.A. Ogloblin et al., *Phys. Rev. C* 84, 054601 (2011)
- 7 A.A. Ogloblin et al., *Phys. of Atom. Nucl.* 74 (11), 1548 (2011)
- 8 T. Kawabata et al., *Inter. Jour. M. Phys. E* 17, 2071 (2008)
- 9 A.S. Demyanova et.al., *EPJ Web of Conferences* 66, 02027 (2014)
- 10 A.N. Danilov et.al., *Phys. Rev. C* 80, 054603 (2009)

- 11 S. Ohkubo and Y. Nirabayashi, Phys. Rev. C 70, 041602(R) (2004)
- 12 A.S. Demyanova et.al., Inter. Jour. M. Phys. E 17, 2118 (2008)
- 13 Z.H. Liu et. al., Phys. Rev. C 64, 034312 (2001)
- 14 V.S. Melezhik, D. Baye, Phys. Rev. C 59, 3232 (1999)
- 15 L.D. Landau, E.M. Lifshitz Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory. Vol. 3 (3rd ed.) (Pergamon Press, 1977)
- 16 P.Capel, D.Baye, V.S. Melezhik, Phys. Rev. C 68, 014612 (2003)
- 17 N.N. Kalitkin, Numerical Methods (M. Nauka, 1978)
- 18 B.I. Schneider et al., Quantum Dynamic Imaging. 149, (2011)
- 19 V.K. Voronov, Sorosovskii Educational Journal, 10, 70 (1996)
- 20 V.V. Balashev, V.K. Dolinov. The course of quantum mechanics: Regular and chaotic dynamics (Izhevsk, 2001)
- 21 Saikat Nandi, Am. J. Phys. 78 (12), 1341 (2010)
- 22 Angeli, K.P. Marinova, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 99, 69 (2013)
- 23 Z.T. Lu, P. Mueller, G.W. F. Drake. Rev.of Mod. Phys, 85, 1383 (2013)