

УДК 539.17

Н.В. Афанасьева*, Н.А. Буркова, К.А. Жаксыбекова, И.А. Косанов

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

*E-mail: n.v.afanasyeva@gmail.com

**Волновые функции относительного движения и
спектроскопические факторы в канале ${}^5\text{He}\{dt\} + d$**

В рамках двухтельной αt -модели ядра ${}^7\text{Li}$ методом проектирования в динамической потенциальной кластерной модели построены волновые функции относительного движения в канале ${}^5\text{He} + d$. При этом в расчетах учитывалась $\{dt\}$ -конфигурация ядра ${}^5\text{He}$. Приведены графики полученных функций относительного движения при различных значениях осцилляторного параметра α -частицы. Функции относительного $d^5\text{He}$ -движения в S -волне, полученные в настоящей работе в рамках $\{dt\}$ -конфигурации ядра ${}^5\text{He}$, являются безузловыми, в отличие от функций, полученных ранее в рамках $\{\alpha n\}$ -представления ядра ${}^5\text{He}$. С полученными волновыми функциями проведен аналитический расчет спектроскопических S_d -факторов отделения дейтронов из ядра ${}^7\text{Li}$. Проведен сравнительный анализ спектроскопических S_d -факторов, полученных в настоящей работе в рамках $\{dt\}$ -конфигурации ядра ${}^5\text{He}$, с соответствующими спектроскопическими факторами, рассчитанными ранее в рамках $\{\alpha n\}$ -конфигурации этого ядра.

Ключевые слова: метод проектирования, волновая функция относительного движения, кластер, спектроскопический S -фактор, кластерная модель

N.V. Afanasyeva, N.A. Burkova, K.A. Zhaksybekova, I.A. Kosanov

Relative motion wave functions and spectroscopic factors in ${}^5\text{He}\{dt\} + d$ channel

Within the two-body αt -model for ${}^7\text{Li}$ nucleus the relative motion wave functions in ${}^5\text{He} + d$ channel have been built by using the projecting method in the dynamic potential cluster model. It is necessary to note, that in this calculations the $\{dt\}$ configuration of ${}^5\text{He}$ nucleus has been taken into account. The graphs of obtained ${}^5\text{He} + d$ relative motion wave functions at the various values of the oscillatory parameter of α -particle are presented. S -wave of the relative $d^5\text{He}$ motion wave function, obtained in this work within the $\{dt\}$ configuration of ${}^5\text{He}$ nucleus, doesn't have a node in contrast to the corresponding one obtained earlier within the $\{\alpha n\}$ configuration of ${}^5\text{He}$ nucleus. Obtained functions have been used for calculation of the spectroscopic S_d -factors of the deuteron separation from ${}^7\text{Li}$ nucleus. Also the comparative analysis of the obtained spectroscopic S_d -factors with corresponding ones calculated earlier within the $\{\alpha n\}$ configuration of this nucleus has been performed.

Key words: projecting method, relative motion wave function, cluster, spectroscopic S -factor, cluster model.

Н.В. Афанасьева, Н.А. Буркова, К.А. Жақсыбекова, І.Ә. Қосанов

⁵He{dt} + d каналдағы толқындық функциялар және спектроскопиялық факторлар

⁷Li ядросының екібөлшектік αt -моделі шеңберінде проектилеу әдісімен динамикалық потенциалдық кластерлік моделінде d^5 He каналының салыстырмалы қозғалысының толқындық функциялары құрылды. Есептеулер кезінде ⁵He ядросының {dt}-конфигурациясы есепке алынды. A-бөлшектің осцилляторлық параметрінің әртүрлі мәндері үшін алынған салыстырмалы қозғалыс функцияларының графиктері келтірілген. Осы жұмыста ⁵He ядросының {dt}-конфигурация шеңберінде S-толқынында салыстырмалы d^5 He-қозғалысының функциялары түйінсіз болып табылады, ⁵He ядросының { αn }-көрінісі шеңберінде бұрында алынған функцияларымен салыстырғанда. Осы алынған толқындық функцияларын қолданып ⁷Li ядросынан дейтрондарды бөліп алу спектроскопиялық S_d -факторларының аналитикалық есептеулері өткізілді. ⁵He ядросының {dt}-конфигурациясы шеңберінде спектроскопиялық S_d -факторларының осы ядроның { αn }-конфигурациясы шеңберінде бұрында есептелген сәйкесті спектроскопиялық факторларымен салыстырмалы талдауы өткізілді.

Түйін сөздер: проектилеу тәсілі, салыстырмалы қозғалысының толқындық функция, кластер, спектроскопиялық S-фактор, кластерлі тәсілі.

Введение

В настоящей работе на основе использования техники проектирования [1] проводится построение волновых функций относительного

движения в канале ⁵He+d с учетом dt-конфигурации ядра ⁵He.

Набор относительных координат Якоби для данного случая представлен на рисунке 1.

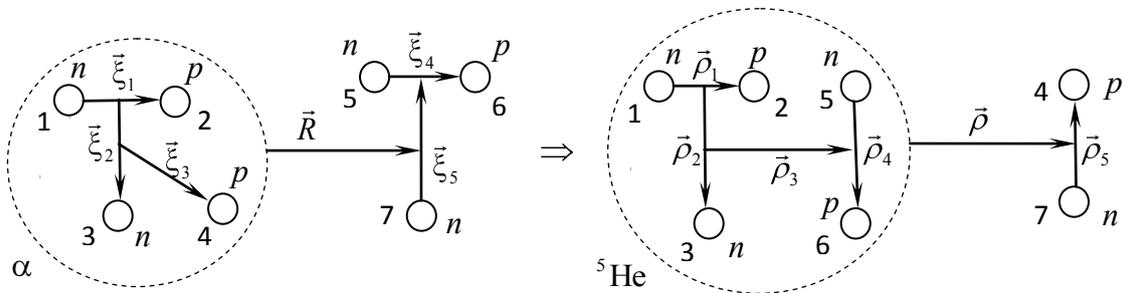


Рисунок 1 – Относительные координаты Якоби для канала ⁷Li → ⁵He {dt} + d

Чтобы построить волновые функции относительного d^5 He{dt} движения, необходимо вычислить интеграл перекрытия волновых

функций ядра ⁵He и d с волновой функцией ядра ⁷Li{ αt }, т.е. интеграл вида:

$$\Phi_{\vec{\rho}} = \langle \Phi_{5\text{He}} \vec{\rho}_3, \Phi_d \vec{\rho}_5 | \Phi_{7\text{Li}} \vec{R} \rangle. \tag{1}$$

Волновые функции ядер ${}^7\text{Li } \alpha t$, ${}^5\text{He } dt$

Рассмотрим волновые функции ядер более подробно. Для описания ядра ${}^7\text{Li } \alpha t$ используется волновая функция вида:

$$\begin{aligned} \Phi_{7\text{Li}} = & \Phi_{000}^{\alpha} 1,2,3,4 \sum_{m_{S_t}, m_p} C_{1/2 m_{S_t} 1/2 m_p}^{00} C_{1/2 -1/2, 1/2 1/2}^{00} \chi_{1/2 m_{S_t}}^{\sigma} \chi_{1/2 m_p}^{\sigma} \chi_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\tau} 1,2,3 \chi_{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}^{\tau} 4 \times \\ & \times \Phi_{000}^t 5,6,7 \times \sum_{M, m_t} \chi_{\frac{1}{2} m_t}^{\sigma} 5,6,7 \chi_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\tau} 5,6,7 \cdot C_{1M 1/2 m_t}^{3/2 M_i} Y_{1M}(\vec{R}) \sum_k A_k e^{-\gamma_k \vec{R}^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$\Phi_{000}^{\alpha} 1,2,3,4$, $\Phi_{000}^t 5,6,7$ – внутренние волновые функции α -частицы и трития соответственно,

$\chi_{1/2 m_p}^{\sigma}$, $\chi_{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}^{\tau} 4$ – спиновая и изоспиновая функции протона,

$\chi_{\frac{1}{2} m_t}^{\sigma} 5,6,7$, $\chi_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\tau} 5,6,7$ – спиновая и изоспиновая функции трития,

$C_{a\alpha b\beta}^{c\gamma}$ – коэффициенты Клебша-Гордана,

$Y_{1M}(\vec{R})$ – угловая сферическая функция.

Очевидно, что в данном случае при расчетах потребуется также функция проектирования затрагивается внутренняя структура α -частицы, в связи с чем для α -частицы $\Phi_{000}^{\alpha} 1,2,3,4$:

$$\Phi_{000}^{\alpha} 1,2,3,4 = \Phi_{000} \vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2 \sum_n D_n e^{-\omega_n \vec{\xi}_3^2} Y_{00} \Omega_{\xi_3}, \quad (3)$$

где $\Phi_{000} \vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2$ – внутренняя функция трития в составе α -частицы, которая имеет вид:

$$\Phi_{000} \vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2 = \sum_m B_m e^{-\frac{1}{4} \delta_m \vec{\xi}_1^2} e^{-\frac{1}{3} \delta_m \vec{\xi}_2^2} Y_{00} \Omega_{\xi_1} Y_{00} \Omega_{\xi_2}. \quad (4)$$

Отметим, что функция (4) была получена в МРГ [2,3].

Для описания трития в составе ${}^7\text{Li } \alpha t$ используется волновая функция, аналогичная (4):

$$\Phi_t \vec{\xi}_4, \vec{\xi}_5 = \sum_{m_2} B_{m_2} e^{-\frac{1}{4}\delta_{m_2}\xi_4^2} e^{-\frac{1}{3}\delta_{m_2}\xi_5^2} Y_{00} \Omega_4 Y_{00} \Omega_5 . \quad (5)$$

Волновую функцию ядра ${}^5\text{He}$ dt с полным моментом j и проекцией m_j формально можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Phi_{{}^5\text{He}} = & \Phi_{000}^{t \ 1,2,3} \Phi_{000}^{d \ 5,6} \sum_{\substack{S_d, M_{S_d}, m'_t, \\ M_L, S_d, M_S}} C_{S_d M_{S_d} 1/2 m'_t}^{S M_S} C_{1 M_L S M_S}^{j m_j} \chi_{S_d M_{S_d}}^{\sigma \ 5,6} \times \\ & \times \chi_{\frac{1}{2} m'_t}^{\sigma \ 1,2,3} \chi_{T_d M_{T_d}}^{\tau \ 5,6} \chi_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\tau \ 1,2,3} Y_{1 M_L}(\vec{\rho}_3) \sum_j C_j e^{-\alpha_j \vec{\rho}_3^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где внутренние волновые функции трития и дейтрона в составе ядра ${}^5\text{He}$ dt имеют вид

$$\Phi_{000}^{t \ 1,2,3} = \Phi_t \vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2 = \sum_{m_1} B_{m_1} e^{-\frac{1}{4}\delta_{m_1}\rho_1^2} e^{-\frac{1}{3}\delta_{m_1}\rho_2^2} Y_{00} \Omega_{\rho_1} Y_{00} \Omega_{\rho_2}, \quad (7)$$

$$\Phi_{000}^{d \ 5,6} = \sum_i G_i e^{-\beta_i \vec{\rho}_4^2} Y_{00} \Omega_{\rho_4} \quad (8)$$

соответственно. Вариационные параметры C_j, α_j волновой функции (6) взяты из работы

[4]. Состояние дейтрона описывается следующей функцией:

$$\Phi_{J_d M_d} = \sum_{S'_d, M'_{S_d}} C_{S'_d M'_{S_d} 00}^{J_d M_d} \cdot \chi_{S'_d M'_{S_d}}^{\sigma \ 4,7} \chi_{T'_d M'_{T_d}}^{\tau \ 4,7} \cdot \sum_{i_1} G_{i_1} e^{-\beta_{i_1} \vec{\rho}_5^2} Y_{00} \Omega_{\rho_5}, \quad (9)$$

где J_d, M_d – полный угловой момент дейтрона и его проекция.

Для вычисления интеграла $\langle \Phi_{{}^5\text{He}} \vec{\rho}_3, \Phi_d \vec{\rho}_5 | \Phi_{7\text{Li}} \vec{R} \rangle$ также необходимо провести прямые $\vec{R}, \vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, \vec{\xi}_3, \vec{\xi}_4, \vec{\xi}_5 \Rightarrow \vec{\rho}, \vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4, \vec{\rho}_5$ и обратные $\vec{\rho}, \vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4, \vec{\rho}_5 \Rightarrow \vec{R}, \vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, \vec{\xi}_3, \vec{\xi}_4, \vec{\xi}_5$ преобразования координат, которые в итоге имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{\rho} = \frac{1}{10} \vec{R} + \frac{21}{40} \vec{\xi}_3 - \frac{7}{15} \vec{\xi}_5, & \vec{\rho}_1 = \vec{\xi}_1, \vec{\rho}_2 = \vec{\xi}_2, \\ \vec{\rho}_3 = \vec{R} + \frac{1}{4} \vec{\xi}_3 + \frac{1}{3} \vec{\xi}_5, & \vec{\rho}_4 = \vec{\xi}_4, \\ \vec{\rho}_5 = -\vec{R} + \frac{3}{4} \vec{\xi}_3 + \frac{2}{3} \vec{\xi}_5 \end{cases} \quad (10)$$

и

$$\begin{cases} \vec{R} = \frac{1}{12} \vec{\rho} + \frac{7}{10} \vec{\rho}_3 - \frac{7}{24} \vec{\rho}_5, \\ \vec{\xi}_1 = \vec{\rho}_1, \vec{\xi}_2 = \vec{\rho}_2, \\ \vec{\xi}_3 = \vec{\rho} + \frac{2}{5} \vec{\rho}_3 + \frac{1}{2} \vec{\rho}_5, & \vec{\xi}_4 = \vec{\rho}_4, \\ \vec{\xi}_5 = -\vec{\rho} + \frac{3}{5} \vec{\rho}_3 + \frac{1}{2} \vec{\rho}_5. \end{cases} \quad (11)$$

соответственно. Здесь $\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, \vec{\xi}_3$ -относительные координаты α -частицы, $\vec{\xi}_4, \vec{\xi}_5$ -относительные координаты трития, \vec{R} -координата относительного движения α и t кластеров, $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4$ -относительные координаты ${}^5\text{He}$, $\vec{\rho}_5$ -координата относительного движения np -пары, $\vec{\rho}$ -координата относительного движения ядер ${}^5\text{He}$ и d .

Таким образом, для получения волновых функций относительного движения в канале ${}^5\text{He}\{dt\} + d$ по переменной $\vec{\rho}$, необходимо переписать выражение (1) с учетом явного вида функций частиц (2)-(9) и провести интегрирование по переменным $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4, \vec{\rho}_5$. Поскольку согласно (10) $\vec{\xi}_1 = \vec{\rho}_1, \vec{\xi}_2 = \vec{\rho}_2, \vec{\xi}_4 = \vec{\rho}_4$, то интегрирование по переменным $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{\rho}_4$ снимается сразу, в результате получаем:

$$\int \Phi_{000}^* \vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2 \cdot \Phi'_{000} \vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2 d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 = 1, \quad (12)$$

$$\int e^{-\beta_i \vec{\rho}_4^2} e^{-\frac{1}{4} \delta_{m_2} \vec{\rho}_4^2} \rho_4^2 d\rho_4 \int Y_{00}^* \Omega_{\rho_4} Y_{00} \Omega_{\rho_4} d\Omega_{\rho_4} = \frac{\sqrt{\pi}}{4 \beta_i + \delta_{m_2} / 4}^{3/2}. \quad (13)$$

В итоге, проводя несложные преобразования и принимая во внимание интегралы (12) и (13), получаем окончательное выражение для

волновой функции относительного движения кластеров в канале ${}^5\text{He}\{dt\} + d$:

$$\Psi_{\kappa} \vec{\rho} = \sum_{\substack{s_c m_c, \\ \kappa m_{\kappa}}} Y_{\kappa m_{\kappa}}^* \Omega_{\rho} \cdot C_{3/2 M_i \kappa m_{\kappa}}^{s_c m_c} C_{S_d M_{S_d} j m_j}^{s_c m_c} R_{d^5\text{He}} \rho, \quad (14)$$

где k , m_k -орбитальный момент относительного $d^5\text{He}$ -движения и его проекция, s_c , m_c -спин канала ${}^5\text{He}\{dt\} + d$ и его проекция, $R_{d^5\text{He}} \rho$ -

радиальная часть функции относительного движения, которая имеет вид

$$R_{d^5\text{He}} \rho = \sum_{i,i_1,j,k,m_2,n} G_i G_{i_1} C_j A_k B_{m_2} D_n^{-1} 2^{s_c} \frac{3}{4} \cdot \frac{\sqrt{2j+1} \cdot I_\kappa \rho}{\beta_i + \delta_{m_2} / 4} C_{1010}^{\kappa 0} \times$$

$$\times \begin{Bmatrix} S & S_d & 1/2 \\ s_c & 1 & j \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 1/2 & 3/2 \\ s_c & \kappa & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & S & 1/2 \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

В выражении (15) интеграл $I_\kappa \rho$ при $\kappa = 0$ (S -компонента) имеет следующий вид:

$$I_S \rho = \frac{3\pi^{3/2} e^{-d_1 \bar{\rho}^2}}{16 d_2 d_3^{3/2}} \left[\frac{f_1}{d_2} + \frac{\alpha f_2}{d_3} \right] + \frac{\sqrt{3} \pi^{3/2} \xi f_3}{8 d_2 d_3^{3/2}} \cdot e^{-d_1 \bar{\rho}^2} \cdot \rho^2, \quad (16)$$

а при значении $\kappa = 2$ (D -компонента):

$$I_D \rho = \frac{\sqrt{3} \pi^{3/2} \xi f_3}{8 d_2 d_3^{3/2}} \cdot e^{-d_1 \bar{\rho}^2} \cdot \rho^2. \quad (17)$$

В (16) и (17) коэффициенты α , ξ , f_i , d_i определены следующим образом:

$$f_1 = \frac{7}{10}, \quad f_2 = \frac{7}{10} \alpha - \frac{7}{24}, \quad f_3 = \frac{7}{10} \xi - \frac{7}{24} \gamma + \frac{1}{12};$$

$$d_1 = a_1 + a_2 \xi^2 + a_3 \gamma^2 + a_4 \xi + a_5 \gamma + a_6 \xi \gamma; \quad d_2 = a_2; \quad d_3 = a_3 + a_2 \alpha^2 + a_6 \alpha;$$

$$\alpha = -a_6 / 2a_2; \quad \gamma = 2a_2 a_5 - a_4 a_6 / a_6^2 - 4a_3 a_2; \quad \xi = 2a_3 a_4 - a_5 a_6 / a_6^2 - 4a_3 a_2;$$

$$a_1 = \frac{1}{144} \gamma_\kappa + \omega_n + \frac{1}{3} \delta_{m_2}; \quad a_2 = \frac{49}{100} \gamma_\kappa + \frac{4}{25} \omega_n + \frac{3}{25} \delta_{m_2} + \alpha_j;$$

$$a_3 = \frac{49}{576} \gamma_\kappa + \frac{1}{4} \omega_n + \frac{1}{12} \delta_{m_2}; \quad a_4 = \frac{7}{60} \gamma_\kappa + \frac{4}{5} \omega_n - \frac{2}{5} \delta_{m_2};$$

$$a_5 = -\frac{7}{144} \gamma_\kappa + \omega_n - \frac{1}{3} \delta_{m_2}; \quad a_6 = -\frac{49}{120} \gamma_\kappa + \frac{2}{5} \omega_n + \frac{1}{5} \delta_{m_2}.$$

На рисунках 2 и 3 приведены графики полученных функций относительного движения в канале ${}^5\text{He}\{dt\}+d$ при разных значениях осцилляционного параметра α -частицы. Как видно из рисунка 2, функции относительного движения в S -волне, полученные в рамках

$\{dt\}$ -конфигурации ядра ${}^5\text{He}$, являются безузловыми, в отличие от соответствующих функций, полученных ранее в рамках $\{\alpha n\}$ -представления ядра ${}^5\text{He}$ [4].

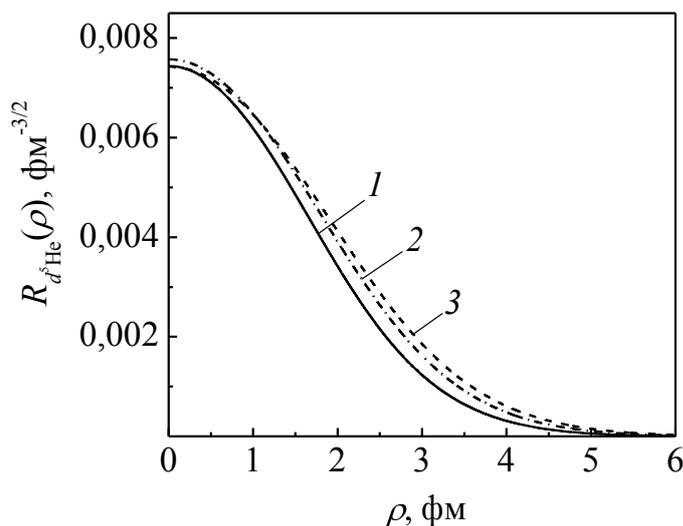


Рисунок 2 – Волновые функции относительного движения в канале ${}^5\text{He}\{dt\}+d$ (S -волна), полученные при различных значениях осцилляционного параметра r_0 α -частицы:

$$1 - r_0 = 1,7 \text{ фМ}; \quad 2 - r_0 = 2 \text{ фМ}; \quad 3 - r_0 = 2,2 \text{ фМ}$$

В целом, функции относительного движения в канале ${}^5\text{He}+d$, полученные с учетом $\{dt\}$ -конфигурации ядра ${}^5\text{He}$, по величине примерно на два порядка меньше тех, что были получены ранее в рамках $\{\alpha n\}$ -представления ядра ${}^5\text{He}$ в работе [4].

Таким образом, в настоящей работе методом проектирования в динамической потенциальной кластерной модели были построены волновые функции относительного движения в канале ${}^5\text{He}\{dt\}+d$.

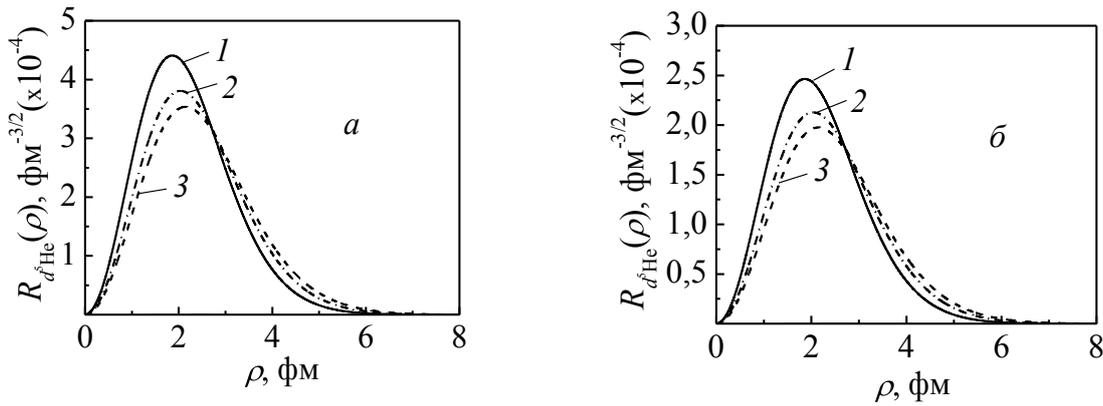


Рисунок 3 – Волновые функции относительного движения в канале ${}^5\text{He}\{dt\}+d$: $D_{1/2}$ -волна (а) и $D_{3/2}$ -волна (б). Обозначения кривых те же, что и на рисунке 2

На основании выражения (14) можно легко получить формулу для вычисления спектроско-

пических S_d -факторов отделения дейтронов из ядра ${}^7\text{Li}$:

$$S = \int |\Psi(\vec{\rho})|^2 d\vec{\rho} = 2s_c + 1 \int \sum_{i,i_1,j,k,m_2,n} G_i G_{i_1} C_j A_k B_{m_2} D_n \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{\sqrt{2j+1}}{\beta_i + \delta_{m_2}/4} \times \times I_{\kappa} \rho \begin{Bmatrix} S & S_d & 1/2 \\ s_c & 1 & j \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 1/2 & 3/2 \\ s_c & \kappa & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & S & 1/2 \end{Bmatrix} C_{1010}^{\kappa 0} \rho^2 d\rho. \quad (18)$$

Результаты расчетов спектроскопических S -факторов в канале ${}^5\text{He}\{dt\}+d$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов спектроскопических S_d -факторов для канала ${}^5\text{He}\{dt\}+d$ в зависимости от осцилляторного параметра r_0 α -частицы

r_0 , фм	S_0	S_2	P_S , %	P_D , %
1,7	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$4,84 \cdot 10^{-6}$	98,8	1,2
2,0	$5,23 \cdot 10^{-4}$	$4,70 \cdot 10^{-6}$	99,1	0,9
2,2	$5,89 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-6}$	99,2	0,8

Заключение

Следует отметить, что приведенные в таблице 1 значения спектроскопических факторов в канале ${}^5\text{He}+d$, полученных с учетом dt -

конфигурации ${}^5\text{He}$, очень малы по сравнению с теми, что были получены ранее для канала ${}^5\text{He}\{\alpha n\}+d$ [5,6]. Причем, как видно, в данных расчетах доминирующей является S -волна,

вес D -волны составляет всего $\sim 1\%$. Такая ситуация, по-видимому, связана с тем, что ядро ${}^5\text{He}$ в основном состоянии существует только в αn -конфигурации, $\{dt\}$ -конфигурация данного ядра более вероятна только в первом возбужденном состоянии ядра ${}^5\text{He}$ ($j^\pi, T=3/2^+, 1/2$) [7].

В связи с этим в дальнейшем было бы актуальным провести расчеты спектроскопических S_d -факторов для канала ${}^5\text{He}_{exc}^* \{dt\} + d$, когда ядро ${}^5\text{He} \{dt\}$ находится в первом возбужденном состоянии.

References

- 1 Afanasyeva N.V., Burkova N.A., Zhaksybekova K.A. Proektirovanie volnovej funkicii ${}^7\text{Li}\{\alpha t\}$ na ${}^5\text{He}\{\alpha n\}+d$ klasternyj kanal. I Jelementy formalizma [Tekst] // Vestnik KazNU. Ser. fiz. 2011. – №3(38). – P. 26-31.
- 2 Vildermut K., Tan Ja. Edinaja teorija jadra [Tekst]. – M.: Mir, 1980. – 502 p.
- 3 Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kahramanov A.V. Potencial'noe opisanie processov uprugogo Nd-, dd-, $N\alpha$ - i dt -rassejaniya [Tekst] // Jad. Fiz. – 1990. – T. 51. – P. 1541-1550.
- 4 Afanasyeva N.V., Burkova N.A., Zhaksybekova K.A., Urazalin A.A. Virtual'nyj kanal raspada ${}^7\text{Li}\{\alpha t\} \rightarrow {}^5\text{He} + d$ [Tekst] // Vestnik KazNU. Ser. fiz. – 2010. – №4(35). – P. 3-8.
- 5 Afanasyeva N.V. Proektirovanie volnovej funkicii ${}^7\text{Li}\{\alpha t\}$ na ${}^5\text{He}\{\alpha n\}+d$ klasternyj kanal. II Rezul'taty raschetov [Tekst] // Vestnik KazNU. Ser. fiz. – 2011. – №3(38). – P. 32-35.
- 6 Burkova N.A., Zhaksybekova K.A., Urazalin A.A. Proektirovanie volnovej funkicii ${}^7\text{Li}$ v $\{(dn)\alpha\}$ - i $\{(\alpha d)n\}$ - modeljah na klasternyj kanal ${}^5\text{He}\{\alpha n\} + d$ [Tekst] // Vestnik KazNU. Ser. fiz. – 2011. – №4(39). – С. 27-34.
- 7 Tilley D.R., Cheves C.M., Godwin J.L. et al. Energy levels of light nuclei $A = 5, 6, 7$ // Nucl. Phys. A. – 2002. – Vol. 708. – P. 3-163.