

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ α -ЧАСТИЦ НА ИЗОТОПАХ ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

Н.А. Буркова, М.А. Жусупов, Р.С. Кабатаева

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, НИИЭТФ, Алматы

Рассчитаны фазы упругого рассеяния α -частиц на изотопах лития ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Оценены эффекты потенциального взаимодействия в фотоядерных каналах.

1. Исследование реакций радиационного захвата α -частиц изотопами лития ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ имеет существенное практическое и теоретическое значение. В практическом смысле эти низкоэнергетичные реакции важны при изучении задач астрофизики и, в частности, физики солнца, а также при исследовании проблем управляемого термоядерного синтеза.

Реакции ${}^6\text{Li}(\alpha, \gamma){}^{10}\text{B}$ и ${}^7\text{Li}(\alpha, \gamma){}^{11}\text{B}$ имеют резонансную структуру [1] и сопровождаются вылетом монохроматических γ -квантов определенной энергии (то есть являются экзотермическими с $Q=4,459$ и $8,665$ МэВ соответственно [2]) при распаде целой серии квазистационарных состояний изотопов ${}^{10}\text{B}^*$ и ${}^{11}\text{B}^*$ [3], что очень удобно для ядерно-физической (а именно, γ -лучевой) диагностики ионного компонента горячей плазмы.

Величина сечения образования монохроматических γ -квантов может дать сведения о термализации и энергетических потерях быстрых α -частиц, образующихся в термоядерной плазме. По распределению интенсивностей разных γ -линий можно судить об энергетических и пространственных распределениях α -частиц в термоядерном реакторе [4]. Исследование спектра γ -квантов, которые и представляют особый интерес для ядерной физики, требует теоретического изучения данных реакций, а именно знания потенциалов взаимодействия в системах $\alpha{}^6\text{Li}$ и $\alpha{}^7\text{Li}$ в подбарьерной области энергий, низкоэнергетичных сечений реакций в глубоко подбарьерной области, что является сложной экспериментальной и теоретической задачей.

Отметим, что ядра-мишени проявляют ярко выраженную αd - и αt -кластерную структуру, то есть ${}^6\text{Li} = \{\alpha d\}$ и ${}^7\text{Li} = \{\alpha t\}$, на что указывает аномальная малость порога развала этих ядер по данным каналам $\varepsilon_{\alpha d} = 1,475$ МэВ и $\varepsilon_{\alpha t} = 2,467$ МэВ, в то время как следующие пороги развала в каналы ${}^5\text{Li} - n$ и ${}^6\text{Li} - n$ равны $5,39$ и $7,25$ МэВ соответственно [2]. Таким образом, существенно учесть доминирующую кластерную конфигурацию при анализе механизмов рассеяния α -частиц на изотопах лития.

Далее будем иметь в виду, что реакции радиационного захвата и фоторасщепления связаны теоремой о детальном равновесии, что позволяет классифицировать эти процессы в рамках единого формализма.

2. Классификация мультипольных переходов в фотопроцессах на ядрах ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ с излучением α -частиц

Рассмотрим реакцию фоторасщепления

$${}^{10}\text{B}(3^+, 0) + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li}(1^+, 0) + \alpha(0^+, 0), \quad (1)$$

где J^π, T – спин, четность и изоспин соответствующих частиц. Изоспины входного и выходного каналов равны нулю. Таким образом, отличны от нуля только *изоскалярные* электромагнитные мультиполи.

В основном состоянии ядро ^{10}B имеет оболочечную конфигурацию $|s^4 p^6\rangle$. Ядро $^6\text{Li} = \{\alpha d\}$ имеет конфигурацию $|s^4 p^2\rangle\{1^+, 0\} \rightarrow |s^4\rangle\{0^+, 0\} + |s^2\rangle\{1^+, 0\}$. Число квантов в случае фрагментации ^{10}B по координате относительного движения ядер ^6Li и α равно 4 и орбитальный момент относительного движения принимает значения $L = 0, 2, 4$. Очевидно, что только значения $L = 2$ и 4 приводят к суммарному полному моменту $J = 3$, который соответствует основному состоянию ядра ^{10}B .

Формально волновую функцию ядра ^{10}B в канале фрагментации $^6\text{Li} + \alpha$ можно представить в виде суперпозиции D- и G-компонент:

$$|^{10}\text{B}, 3^+ 0\rangle = \alpha_D |D\rangle + \alpha_G |G\rangle. \quad (2)$$

Далее будем иметь в виду, что в настоящей работе целенаправленно рассматриваются низкоэнергетические процессы. В рамках классификации электромагнитных переходов самым “сильным” (максимально вероятным) является дипольный электрический переход изовекторного типа. Переходы высшей мультипольности, как правило, являются поправкой к E1-переходу. Однако, в случае запрета дипольного перехода, который связан в первую очередь с изоспиновыми правилами отбора, *основным* становится квадрупольный E2-переход.

Случай реакции (1) относится именно к изоскалярным процессам. Ранее мы детально исследовали процесс $^6\text{Li}(\gamma, \alpha)d$ (см. обзор [5] – ретроспектива и современное состояние вопроса), в котором также имеется запрет по изотопическому спину для изовекторного E1-перехода. Был предложен вариант построения изоскалярного дипольного электрического оператора, основанный на том, что центр масс составной системы не совпадает с центром масс распределения зарядов.

Для предварительной оценки интенсивности дипольного E1 изоскалярного перехода используем следующие определения.

Пусть ядро A состоит из кластеров a и b : $A = \{ab\}$, тогда дипольный момент этого ядра есть

$$\vec{d} = \sum_i^Z \hat{e}_i (\vec{r}_i - \vec{R}_{cm}) \quad (3)$$

$$\vec{d} = \vec{d}_a + \vec{d}_b + \vec{d}_\rho, \quad (4)$$

где \vec{d}_ρ – относительный дипольный момент, $\vec{\rho} = \vec{r}_a - \vec{r}_b$ – относительная координата частиц a и b . Тогда

$$\vec{d}_\rho = e\vec{\rho} \frac{m_a m_b}{m_a + m_b} \left[\frac{z_a}{m_a} - \frac{z_b}{m_b} \right] \quad (5)$$

Оценка интенсивности фрагментации ядра $^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$ определяется следующим образом:

$$d_\rho = e\rho \frac{m_\alpha m_d}{m_\alpha + m_d} \left[\frac{z_\alpha}{m_\alpha} - \frac{z_d}{m_d} \right] = e\rho \frac{2m_d - m_\alpha}{m_\alpha + m_d} \approx 4,256 \cdot 10^{-3} e\rho. \quad (6)$$

Для канала фотофрагментации $^{10}\text{B} + \gamma \rightarrow ^6\text{Li} + \alpha$ аналогичный оператор имеет вид:

$$d_\rho = e\rho \frac{3m_\alpha - 2m_{^6\text{Li}}}{m_\alpha + m_{^6\text{Li}}} \approx -2,24 \cdot 10^{-3} e\rho. \quad (7)$$

Сравнение формул (6) и (7) позволяет сделать вывод, что вклад изоскалярных E1-переходов в обсуждаемых процессах имеет один и тот же порядок. Особенности этих реакций могут проявиться в динамической части соответствующих матричных элементов.

Рассмотрим теперь возможные состояния непрерывного спектра в рамках определённых нами доминирующих переходов:

$$D \xrightarrow{E1} p + f \quad (8a)$$

$$G \xrightarrow{E1} f + h \quad (8б)$$

$$D \xrightarrow{E2} s + d + g \quad (8в)$$

$$G \xrightarrow{E2} d + g + i \quad (8г)$$

Для другой реакции запишем $^{11}\text{B} \left(\frac{3^-}{2}, \frac{1}{2} \right) + \gamma \rightarrow ^7\text{Li} \left(\frac{3^-}{2}, \frac{1}{2} \right) + \alpha(0^+, 0)$. Здесь изоспины

во входном и выходном каналах не равны нулю. В основном состоянии ядро ^{11}B имеет конфигурацию $|s^4 p^7\rangle$. Ядро $^7\text{Li} = \{\alpha t\}$ имеет конфигурацию

$|s^4 p^3\rangle \left\{ \frac{3^-}{2}, \frac{1}{2} \right\} \rightarrow |s^4\rangle \{0^+, 0\} + |s^3\rangle \left\{ \frac{3^-}{2}, \frac{1}{2} \right\}$. Относительное число квантов в этом случае равно

4, то есть орбитальный момент может иметь значения $L=0, 2$ и 4 . Согласно классификации оболочечной структуры ядра ^{11}B доминирует в этом канале D-компонента. Таким образом, для E1 и E2-переходов правомерна классификация (8a) и (8б).

3. Фазовый анализ упругого рассеяния α -частиц на ядрах ^6Li и ^7Li

Для предварительной оценки особенностей энергетической зависимости сечений прямого фото-излучения α -частиц в рассматриваемых процессах необходима информация по фазам упругого рассеяния на ядрах ^6Li и ^7Li . Экспериментальных данных по фазовому анализу в этих каналах нет. В этой связи мы использовали параметры оптических потенциалов, полученные на основе фолдинг-процедуры (потенциалы свёртки) [6, 7], и феноменологические потенциалы, параметризованные в соответствии с экспериментальными данными по угловым распределениям с учетом обменных эффектов [8]

Для рассматриваемых процессов рассчитаны фазы рассеяния α -частиц на ядрах ^6Li и ^7Li в интервале энергий от 0 до 20 МэВ без учета расщепления по спин-орбитальному взаимодействию для потенциала с центральной частью в форме Вудса-Саксона:

$$V_c = \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right)}. \quad (9)$$

Для расчетов фаз $\alpha^6\text{Li}$ рассеяния были использованы следующие параметры, взятые из [6]:

$$R = 2,1 \text{ фм}, V_0 = 116,86 \text{ МэВ}, a = 0,815 \text{ фм.}$$

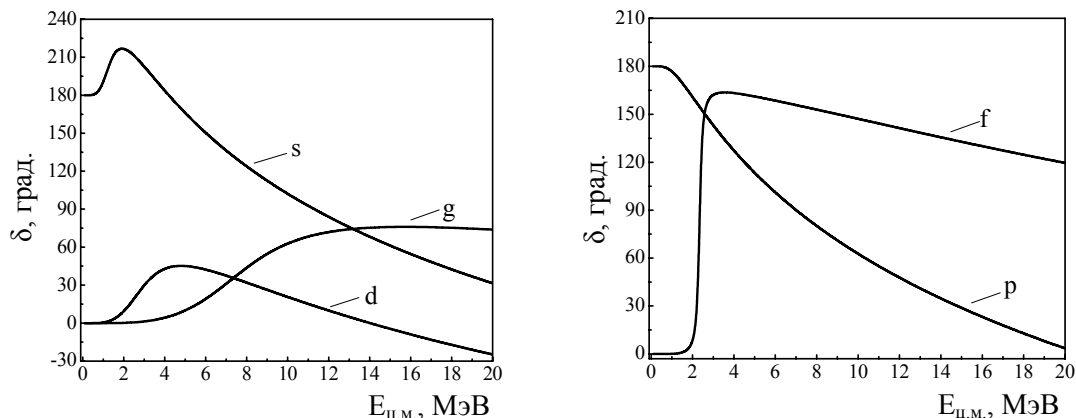


Рис. 1. Фазы рассеяния $\alpha^6\text{Li}$ в фолдинг-модели

Из рис. 1 видно, что f -фазы претерпевают резкий скачок при переходе через значение $\pi/2$ при энергии $E = 2,34\text{-}2,35$ МэВ, то есть при этой энергии в системе $\alpha^6\text{Li}$ имеется ярко выраженный резонанс. f -фаза рассеяния резонирует. Таким образом, $E1$ –амплитуда может проявиться *нетривиально* именно за счет того, что изоскалярный $E1$ -переход в рамках правил отбора приводит к резонирующему состоянию в непрерывном спектре. Отметим, что другие фазы имеют плавную энергетическую зависимость и не дают вклада в формирование резонансной структуры по нашим оценкам.

Для канала рассеяния $\alpha^7\text{Li}$ были использованы следующие параметры, также взятые из [7]:

$$R = 1,983 \text{ фм}, V_0 = 119,205 \text{ МэВ}, a = 0,878 \text{ фм.}$$

Из рис. 2 следует, что f -фазы также резонируют при энергии $E = 1,5\text{-}1,51$ МэВ в $\alpha + ^7\text{Li}$ канале.

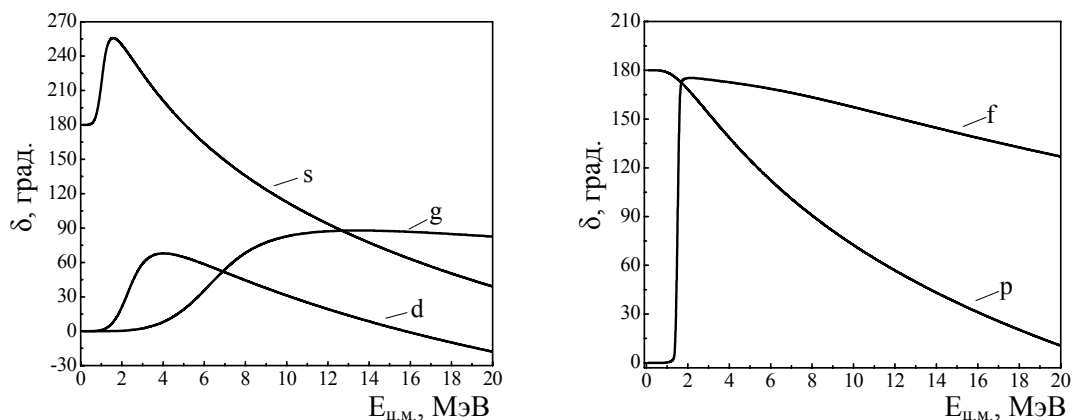


Рис. 2. Фазы рассеяния $\alpha^7\text{Li}$ в фолдинг-модели

Далее представим аналогичные расчёты фаз упругого рассеяния в каналах $\alpha^6\text{Li}$ и $\alpha^7\text{Li}$, полученные с параметрами потенциала (9) работы [8], суммированные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры оптических потенциалов [8]

канал	модель	V_0 , МэВ	r_0 , фМ	a_0 , фМ
$\alpha + {}^6\text{Li}$	A1	168,1	1,28	0,57
	A2	149,5	1,37	0,64
	A3	194,0	1,65	0,60
$\alpha + {}^7\text{Li}$	B1	183,3	1,30	0,630
	B2	185,1	1,30	0,640
	B3	194,9	1,32	0,604

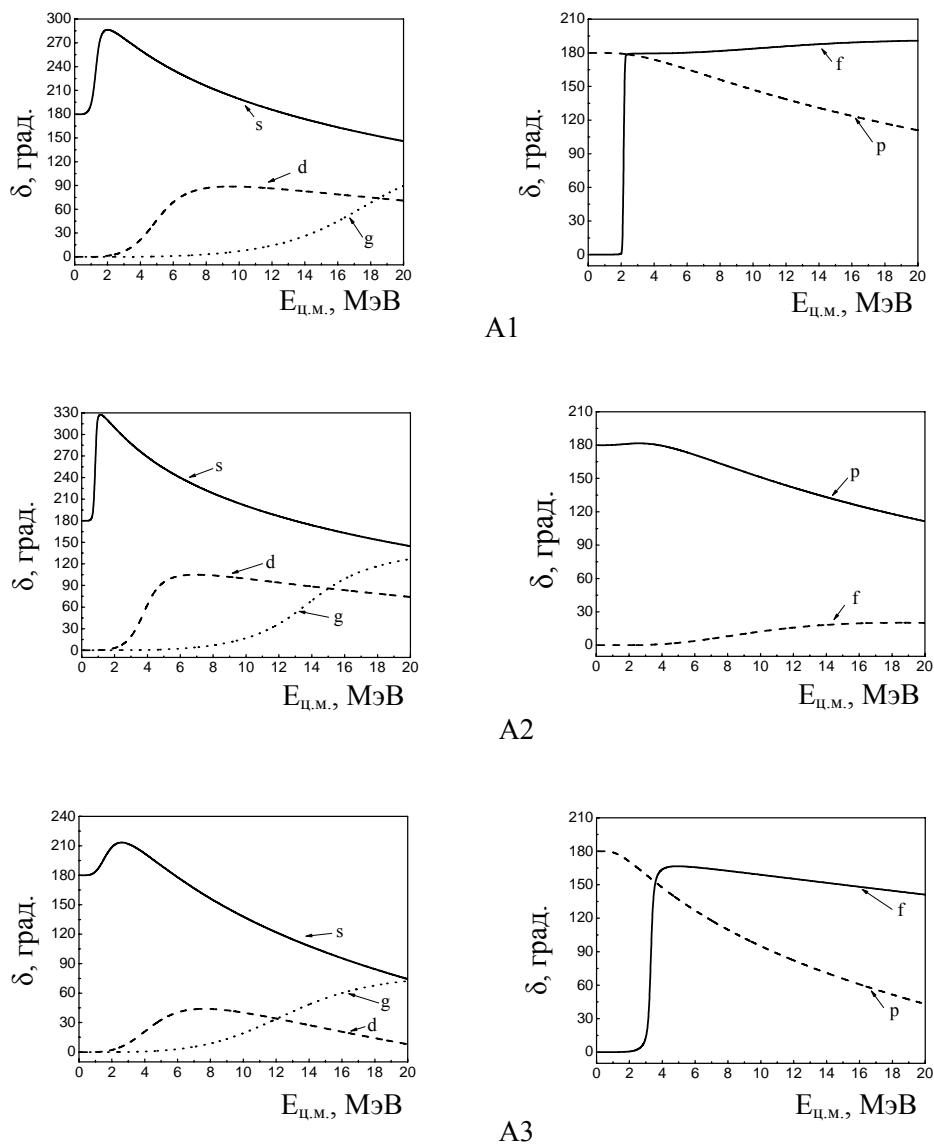
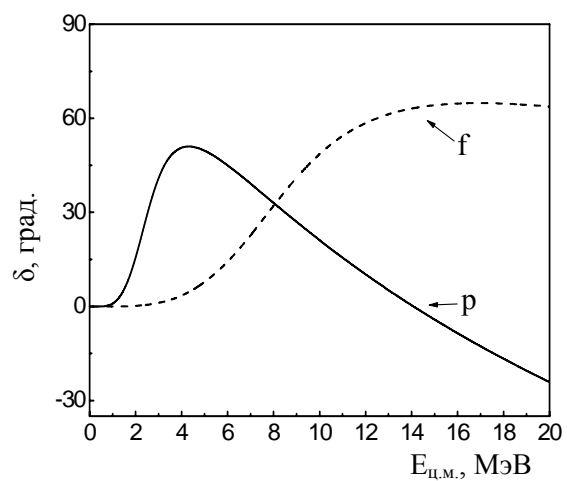
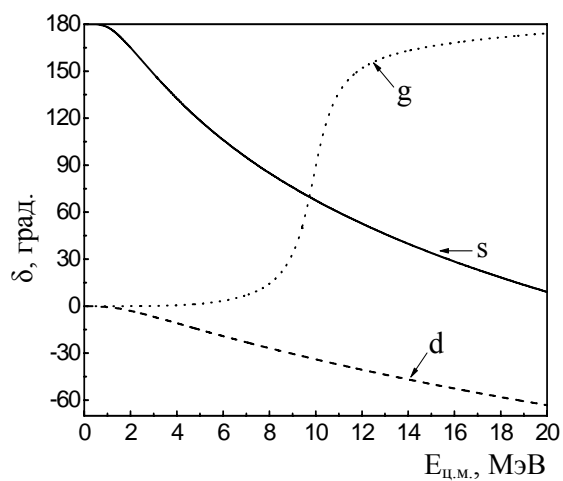
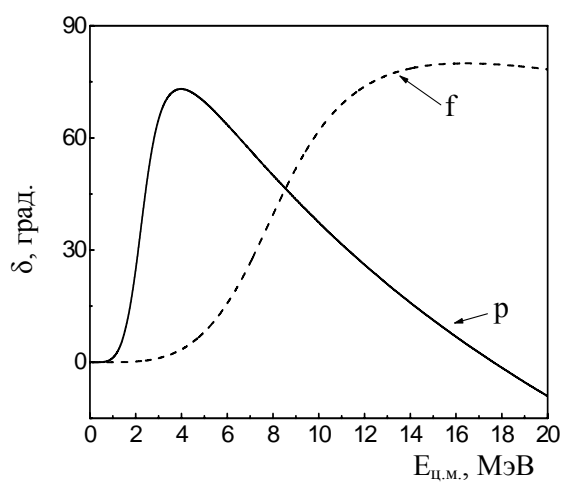
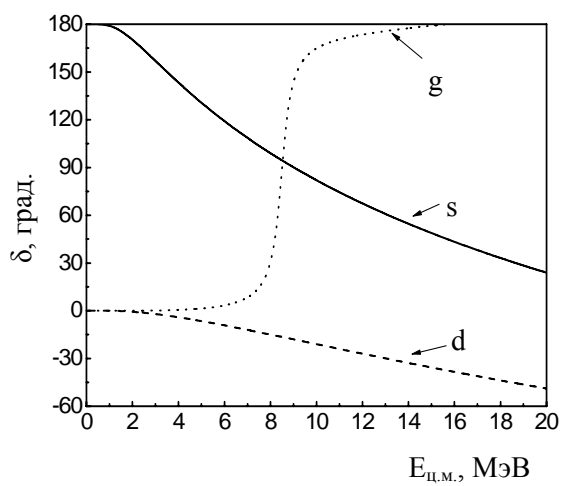


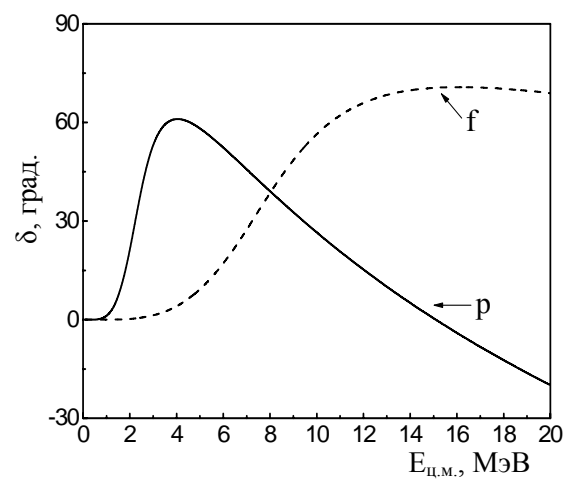
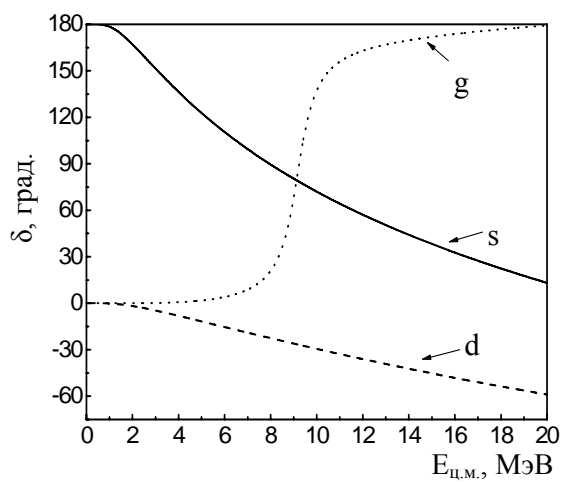
Рис. 3. Фазы рассеяния $\alpha^6\text{Li}$. Параметры – таб. 1



Б1



Б2



Б3

Рис. 4. Фазы рассеяния $\alpha^7\text{Li}$. Параметры – таб. 1

Рисунки 1 – 4 прозрачно иллюстрируют особенности взаимодействия в каналах рассеяния α -частиц на изотопах лития, которые формируют структуру сечений прямого фоторасщепления ядер ^{10}B и ^{11}B , а также их фотосинтеза (обратные процессы).

Как видно, непрерывный спектр, в случае *изоскалярных* E1-переходов в процессах типа $^{10}\text{B} \rangle D \xrightarrow{E1} p + f$, может проявиться по нашим оценкам в виде интенсивного резонанса в f -волне рассеяния. Таким образом, актуально продолжить расчеты фотоядерных характеристик данных процессов в области низких энергий с целью выяснить относительный вклад резонансных и прямых механизмов фотореакций.

Литература

1. Жусупов М.А., Шестаков В.П. Выход гамма квантов высокой энергии в реакции радиационного захвата альфа частиц ядром ^7Li // Вестник КазНУ. Серия физическая. 2002. № 1(12).
2. Tilley D.R. et al. Energy Levels of Light Nuclei, $A = 6,7$ // Nucl. Phys. A708 (2002) 3.
3. Cecil F.E., Zweben S.J. and Medley S.S. // Nucl.Instrum.Methods A 245. 1986. P. 547-552.
4. Кукулин В.И. Какие ядерные реакции являются перспективными в проблеме управляемого термоядерного синтеза? // Изв.Акад.Наук СССР. Сер.физ. Т. 52. № 11. 1988. С. 2088-2094.
5. Буркова Н.А., Жаксыбекова К.А., Жусупов М.А. Потенциальная теория кластерного фоторасщепления легких ядер // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36, вып. 4. С. 801-868.
6. Kamal M., Voronchev V.T., Kukulin V.I., Krasnopolsky V.M., Nakao Y. and Kudo K. Self-consistent calculation of the interactions of lightest nuclei with ^6Li // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 18 (1992) P. 379-392.
7. Сахиев С.К. Расчет потенциала α - ^7Li -взаимодействия в кластерной фолдинг-модели // Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. 2005. №4(44). С. 117-121.
8. Зеленская Н.С., Теплов Б.И. Обменные процессы в ядерных реакциях. – М.: МГУ, 1985 – 167 с.

^6Li ЖӘНЕ ^7Li ИЗОТОПТАРЫНДА α -БӨЛШЕКТЕРДІҢ ШАШЫРАУЫН ПОТЕНЦИАЛДЫ СИПАТТАУ

Н.А. Буркова, М.Ә. Жүсіпов, Р.С. Қабатаева

^6Li және ^7Li литий изотоптарында α -бөлшектердің серпімді шашырау фазалары есептелді. Фотоядролық каналдардағы потенциалды әрекеттесу эффектілері зерттелді.

POTENTIAL DESCRIPTION OF α -PARTICLES SCATTERING ON ^6Li AND ^7Li ISOTOPES

N.A. Burkova, M.A. Zhusupov, R.S. Kabatayeva

Phases of α -particles elastic scattering on ^6Li and ^7Li lithium isotopes are calculated. Potential interaction effects in the photonuclear channels are estimated.