

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  $\eta$ -МЕЗОНОВ С ЯДРАМИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ**

Е.В. Адамов

Научный руководитель: д.ф.-м.н. А.И. Фикс

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [adamovegor@gmail.com](mailto:adamovegor@gmail.com)

**INVESTIGATION OF  $\eta$ -NUCLEAR INTERACTION USING NUCLEAR CLUSTER MODEL**

E.V. Adamov

Scientific Supervisor: Dr. A.I. Fiks

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [adamovegor@gmail.com](mailto:adamovegor@gmail.com)

***Abstract.** The problem of interaction in the  $\eta^6\text{Li}$  system is solved. The method of solution is based on a cluster model in which the  ${}^6\text{Li}$  nucleus is described as a bound state of a deuteron and an  $\alpha$ -particle. The cluster model approach allows one to reduce the many-body problem to the interaction between three particles  $\eta - d - \alpha$ . To solve the corresponding three-body equations, separable representation of the driving two-body potentials was used. The calculated values of the  $\eta^6\text{Li}$  scattering length are presented.*

Взаимодействие  $\eta$ -мезонов с атомными ядрами интенсивно исследовалось на протяжении последних 30 лет, начиная с работ [1, 2]. Несмотря на богатый экспериментальный материал, накопленный к сегодняшнему дню, а также множество теоретических результатов в этой области, наши знания о свойствах этого взаимодействия остаются пока недостаточными для понимания его механизма.

В области эксперимента основным препятствием для детального исследования  $\eta$ -ядерного взаимодействия остается невозможность непосредственной реализации процесса рассеяния  $\eta$ -мезона на ядре из-за его малого времени жизни. Как следствие, имеющаяся экспериментальная информация об этом явлении получена косвенным образом из процессов образования  $\eta$ -мезонов на ядрах. Что касается теории, то, как показывает анализ соответствующих работ, результаты расчетов сильно зависят как от самой модели, применяемой к описанию взаимодействия, так и от параметров, используемых в рамках конкретной модели. В частности, имеется сильная чувствительность результатов к параметрам затравочного  $\eta N$  взаимодействия.

Отмеченные выше проблемы, связанные с модельной зависимостью теоретических результатов, в значительной мере разрешаются путем использования аппарата квантовомеханической задачи рассеяния в системе малого числа частиц, который позволяет формально точно описывать взаимодействие  $\eta$ -мезонов с легчайшими ядрами. В настоящей работе представлены расчеты рассеяния  $\eta$ -мезонов на ядре  ${}^6\text{Li}$ . Их ключевым элементом, позволяющим применить малочастичный формализм, является используемый нами кластерный подход к описанию ядра  ${}^6\text{Li}$ , как системы  $d - \alpha$ , где через  $\alpha$

обозначено ядро  ${}^4\text{He}$ . В таком виде кластерный подход позволяет решать задачу о взаимодействии  $\eta$   ${}^6\text{Li}$ , как трехчастичную задачу  $\eta - d - \alpha$ .

Для каждой из трех подсистем  $d - \alpha$ ,  $\eta - d$  и  $\eta - \alpha$  использовался сепарабельный потенциал 1-го ранга  $V_i(p, p') = -f_i(p)f_i(p')$ , с функциями  $f_i(p)$  в дипольной форме  $f_i(p) = \frac{g_i}{p^2 + \beta_i^2}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Значения параметров  $g_1$  и  $\beta_1$  подгонялись под энергию  $E_b = 2,34$  МэВ, полученную из известной из опыта энергии разделения ядра  ${}^6\text{Li}$  на дейтрон и  $\alpha$ -частицу  $E_{ad} = 1,48$  МэВ, с учетом кулоновской поправки  $E_C = 0,86$  МэВ [3], а также измеренные в работе [4] фазы  $d - \alpha$  рассеяния. Для потенциала, описывающего взаимодействие в системе  $\eta - d$ , параметры  $g_2$  и  $\beta_2$  выбирались так, чтобы воспроизводилась длина рассеяния  $\eta$ -мезона на дейтроне  $a_{\eta d} = (2,16 + i 1,12)$  Фм, которая предсказывается расчетами в рамках теории Фаддеева для системы  $\eta - N - N$  [5]. Соответствующие параметры  $g_3$  и  $\beta_3$  для  $\eta - \alpha$  рассеяния, для которого пока не существует микроскопических расчетов, подбирались так, чтобы воспроизводился характерный рост полного сечения в области низких энергий, наблюдаемый в эксперименте  $dd \rightarrow \eta\alpha$  [6].

Использование сепарабельных потенциалов для затравочных двухчастичных взаимодействий позволяет свести трехтелную задачу к эффективной задаче рассеяния частиц на квазичастицах (см., например, [7]). Динамика системы определяется матрицами переходов  $X_{ij}$  между состояниями  $|i\rangle$  и  $|j\rangle$ . Каждое состояние  $|i\rangle$  содержит частицу с номером  $i$  и квазичастицу ( $jk$ ), состоящую из двух взаимодействующих частиц  $j$  и  $k$ , которую удобно обозначить тем же номером. Соответствующие динамические уравнения для матриц  $X_{ij}$  имеют форму уравнений Липпмана-Швингера для связанных каналов, число которых равно числу квазичастиц

$$X_{ij}(E; p, p') = Z_{ij}(E; p, p') + \sum_{k=1}^N \int Z_{ik}(E; p, q) \tau_{ik}(E - q^2 / 2m_k) X_{kj}(E; q, p') \frac{q^2 dq}{2\pi^2}, \quad i, j = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Матрицы  $X_{ij}$  зависят от кинетической энергии  $E$  в системе трех частиц, а также от относительных импульсов  $p$  и  $p'$  в системе частица-квазичастица в состояниях  $|i\rangle$  и  $|j\rangle$ , соответственно. Эффективные потенциалы  $Z_{ij}$  в уравнениях (1) имеют характер обмена частицей между двумя квазичастицами.

После решения системы (1) амплитуда  $F(p)$  упругого рассеяния  $\eta$ -мезона на ядре  ${}^6\text{Li}$  может быть получена из матрицы  $X_{11}$  согласно соотношению  $F(p) = -\frac{\mu}{2\pi} X_{11}(E; p, p')$ , при значениях импульсов  $p$  и  $p'$ , связанных условием массовости  $p = p' = \sqrt{2\mu\varepsilon}$ , где  $\mu$  – приведенная масса частиц  $\eta$  и  ${}^6\text{Li}$ , а кинетическая энергия их относительного движения  $\varepsilon$  связана с суммарной кинетической энергией  $E$  в системе  $\eta$   ${}^6\text{Li}$  равенством  $\varepsilon = E + |E_b|$ .

Решения системы интегральных уравнений (1) основывалось на сведении их к матричному уравнению путем замены интегралов конечными суммами. Последнее осуществлялось по схеме квадратур Гаусса в полубесконечном интервале  $[0, \infty)$ . Проблемы, связанные с наличием в ядрах уравнений (1) логарифмических сингулярностей, решались путем сдвига контура интегрирования в комплексную область с последующей повторной прогонкой для нахождения матрицы  $X_{11}$  при вещественных значениях импульсов.

В качестве основного результата нашего исследования мы приводим значение длины рассеяния  $\eta^6Li$

$$a_{\eta^6Li} = (-2, 20 + i 0, 87) \text{ Фм}, \quad (2)$$

которое предсказывается нашими расчетами. Мнимая часть обусловлена присутствием неупругого канала, связанного с переходом в  $\pi$ -мезоны [8]. Как можно было ожидать, теория предсказывает существование связанного состояния в системе  $\eta^6Li$  (вещественная часть длины рассеяния отрицательна). Вместе с тем, малое значение вещественной части  $\text{Re} a_{\eta^6Li}$  (2) свидетельствует о том, что соответствующий полюс в амплитуде расположен достаточно далеко от физической области. Это, в свою очередь, означает что в процессах, в которых образуется система  $\eta^6Li$  (например, упругое фоторождение  $\eta$ -мезона на ядре  ${}^6Li$ ) эффект взаимодействия в конечном состоянии будет незначительным. Этот вывод в целом согласуется с результатами эксперимента по фоторождению на более тяжелом ядре  ${}^7Li$  [9], где измеренное сечение хорошо описывается моделью с плоскими волнами без учета взаимодействия между  $\eta$ -мезоном и конечным ядром.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ВУЗам «Наука» (регистрационный номер 3.825.2014/К).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu L. C., Haider Q. Signature for the existence of  $\eta$ - mesic nuclei. Phys. Rev. C. – 1986. – V.34. – P. 1845-1854.
2. Haider Q., Liu L. C. Formation of an  $\eta$ - mesic nucleus. Phys. Lett. B. – 1986. – V.172. – P. 257-260.
3. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei A=5-10. Nucl. Phys. A. – 1984. – V. 413. – P. 1-214.
4. Schmelzbach P. A., Gruebler W., Koenig V., Marmier P. Phase-shift analysis of  $d - \alpha$  elastic scattering. Nucl. Phys. A. – 1972. – V.184. – P.193-213
5. Fix A., Arenhoevel H. The  $\eta NN$  system at low energy within a three-body formalism. Nucl. Phys. A. – 2002. – V.697. – P.277-302.
6. Wronska A., Hejny V., Wilkin C. *et al.* Near threshold  $\eta$  meson production in the  $dd \rightarrow \eta \alpha$  reaction. Eur. Phys. J. A. – 2005. – V.26. – P. 421-428.
7. Шмид Э., Цигельман Х. Проблема трех тел в квантовой механике. Москва: Наука, 1979. – 272 с.
8. Трясучев В. А. О существовании легких  $\eta$ - ядер. ЯФ. – 1997. – Т.60. – с. 245-247.
9. Maghrbi Y., Krusche B., Ahrens J. *et al.* Coherent photoproduction of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons off  ${}^7Li$ . Eur. Phys. J. A. – 2013. – V.49. – P. 38 (1-14).