

**ПРИБЛИЖЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И МЯГКАЯ ДИПОЛЬНАЯ МОДА ЛЕГКИХ ЯДЕР С ИЗБЫТКОМ НЕЙТРОНОВ**

**Г.Ф. Филиппов, Ю.А. Лашко, Л.П. Шведов**

*Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины, Киев*

В приближении асимптотического потенциала построены полностью антисимметричные волновые функции  $1^-$  состояний непрерывного спектра и основного состояния ядра  ${}^6\text{He}$ . Поведение матричных элементов двухканальной  $S$ -матрицы указывает на существование  $1^-$  резонанса непосредственно над порогом трехчастичного развала  ${}^6\text{He}$ . Получено сечение фоторасщепления ядра  ${}^{11}\text{Li}$ , хорошо согласующееся с экспериментальными данными.

Вопрос о мягкой дипольной моде легких атомных ядер с избытком нейтронов и нижайшим трехчастичным порогом развала возник в связи с обсуждением природы интенсивного  $E1$  (дипольного электрического) перехода в ядре  ${}^{11}\text{Li}$  (см., например, [1]). Он сводится к дилемме: или характер этого перехода обусловлен существованием резонанса в непрерывном спектре  ${}^{11}\text{Li}$  непосредственно над порогом развала  ${}^{11}\text{Li}$  на  ${}^9\text{Li}$  и два нейтрона, или же свойства этого перехода определяются лишь близостью основного состояния  ${}^{11}\text{Li}$  к порогу его трехчастичного развала. Аналогичная ситуация имеет место и для ядра  ${}^6\text{He}$ .  $E1$ -переход в этой второй, более простой, чем  ${}^{11}\text{Li}$ , системе и является предметом исследования в данной работе. Для решения поставленной задачи мы следовали алгебраической версии метода резонирующих групп и рассматривали  ${}^6\text{He}$  как систему трех слабозаимодействующих кластеров ( $\alpha$ -частица и два нейтрона), приняв во внимание ограничения на волновые функции дискретного и непрерывного спектров, обусловленные действием принципа Паули. В качестве волновых функций, описывающих внутреннюю структуру кластеров, выбраны функции трансляционно-инвариантной модели оболочек. Волновую функцию относительного движения кластеров мы искали в виде разложения по базису разрешенных принципом Паули состояний  $\Psi_\nu(J^\pi)$  гармонического осциллятора

$$\Psi(J^\pi) = \sum_\nu C_\nu(J^\pi) \Psi_\nu(J^\pi), \quad (1)$$

где  $\nu$  — число гиперрадиальных квантов. Как это не парадоксально, разложение волновой функции по базису гармонического осциллятора можно использовать не только при изучении связанных состояний, но также для непрерывного спектра. Базисные функции  $\Psi_\nu$  имеют дельтаобразное поведение, поэтому каждое слагаемое разложения (1) воспроизводит волновую функцию непрерывного спектра при определенном значении гиперрадиуса. Чем больше интервал, на котором мы хотим воспроизвести волновую функцию, тем больше базисных функций мы должны привлечь. В асимптотической области, где  $\nu \gg 1$ , справедливо известное предельное выражение для коэффициентов

$$C_\nu = \sqrt{2k} (\cos(\delta) J_\mu(k\rho) - \sin(\delta) N_\mu(k\rho)), \quad (2)$$

где  $k^2 = 2mr_0^2 E/\hbar^2$ ,  $E$  — энергия над порогом трехчастичного развала  ${}^6\text{He}$ ;  $\rho = \sqrt{4\nu + 12}$  — гиперрадиус;  $J_\mu(k\rho)$ ,  $N_\mu(k\rho)$  — функции Бесселя и Неймана;  $r_0 = 1.37$  фм

– осцилляторная длина. Коэффициенты  $C_\nu(J^\pi)$  удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{\tilde{\nu}=0}^{\infty} \langle \nu, J^\pi | \hat{H} - E | \tilde{\nu}, J^\pi \rangle C_{\tilde{\nu}}(J^\pi) = 0, \quad \hat{H} = \hat{T} + \hat{U}. \quad (3)$$

Мягкой дипольной моде соответствует переход из основного состояния  ${}^6\text{He}$   $J^\pi = 0^+$  ( $L = 0, S = 0$ ) в состояния непрерывного спектра  $J^\pi = 1^-$  ( $L = 1, S = 0$ ) близко над порогом развала  ${}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n + n$ . В минимальном приближении метода трехчастичных гиперсферических функций базисная волновая функция основного состояния является суперпозицией гипергармоник с  $K = 0$  и  $K = 2$ :

$$\Psi_\nu(0^+, L=0) = \sqrt{\frac{25(\nu+4)}{29\nu+104}} |\nu, K=2, L=0\rangle + \sqrt{\frac{4(\nu+1)}{29\nu+104}} |\nu+1, K=0, L=0\rangle,$$

а волновые функции  $1^-$  состояний – суперпозицией состояний с  $K = 1$  и  $K = 3$ , причем вес гипергармоники с  $K = 3$  составляет 17 % даже в пределе  $\nu \rightarrow \infty$ . Необходимость рассматривать смесь гипергармоник обусловлена влиянием принципа Паули, действие которого проявляется даже при больших значениях гиперрадиуса, поскольку нужно исключить такие конфигурации, в которых один из нейтронов находится в  $s$ -оболочке. Так как основное состояние ядра лишь на 0.96 МэВ ниже порога трехчастичного развала, а его среднеквадратичный радиус более чем в 1.5 раза превышает радиус альфа-частицы, можно ожидать, что основные особенности мягкой дипольной моды можно заметить в приближении асимптотического потенциала, справедливого на больших расстояниях между кластерами. Это приближение является обобщением приближения нулевого радиуса ядерных сил, успешно применявшегося в теории фоторасщепления дейтрона. Но трехкластерным системам присущи некоторые особенности, усложняющие прямое обобщение. Во-первых, потенциал взаимодействия кластеров с увеличением гиперрадиуса  $\rho$  убывает по степенному закону (как  $1/\rho^3$ ), в то время как нейтрон-протонный потенциал убывает экспоненциально. Во-вторых, приходится учитывать влияние принципа Паули на структуру волновых функций, что значительно усложняет задачу. В приближении асимптотического потенциала уравнения (3) для основного состояния примут вид

$$\sum_{\tilde{\nu}} \langle \nu, 0^+ | \hat{T} + \hat{U} - E | \tilde{\nu}, 0^+ \rangle C_{\tilde{\nu}}(0^+) = 0, \quad \nu = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

В свое время было показано (см. [2]), что матрица потенциальной энергии при больших значениях  $\nu$ ,  $\tilde{\nu}$  эквивалентна диагональной матрице

$$\sum_{\tilde{\nu}=0}^{\infty} \langle \nu, 0^+ | \hat{U}^{asmp} | \tilde{\nu}, 0^+ \rangle C_{\tilde{\nu}}(0^+) \cong \left( \frac{A}{(4\nu+10)^{3/2}} - \frac{B}{(4\nu+10)^{5/2}} \right) C_{\tilde{\nu}}(0^+). \quad (5)$$

Значение и знак константы  $A$  определяется параметрами потенциала нуклон-нуклонного взаимодействия, а убывание с ростом  $\nu$  правой части асимптотического равенства отражает свойства эффективного трехчастичного потенциала, полученного в результате усреднения

оператора  $\hat{U}$  потенциальной энергии на гиперсферических функциях. Константа  $B$  выбирается так, чтобы правильно воспроизвести энергию и среднеквадратичный радиус  ${}^6\text{He}$ .

### Результаты

В работе построены полностью антисимметричные волновые функции основного состояния и  $1^-$ -состояний непрерывного спектра. Исследовано поведение элементов двухканальной  $S$ -матрицы в зависимости от параметров потенциала. Использование потенциала, наиболее близкого к тому, который хорошо воспроизводит энергию и радиус основного состояния  ${}^6\text{He}$ , немедленно приводит к возникновению узкого резонанса  $\Gamma = 26$  кэВ при энергии  $E_r = 0.53$  МэВ выше порога развала ядра. Поведение фазовых сдвигов  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в собственном представлении  $S$ -матрицы представлено на рис. 1(а). Также были получены квадраты матричных элементов оператора  $EI$ -перехода. Результаты расчетов в разных предположениях о параметрах потенциала представлены на рис. 1(б).

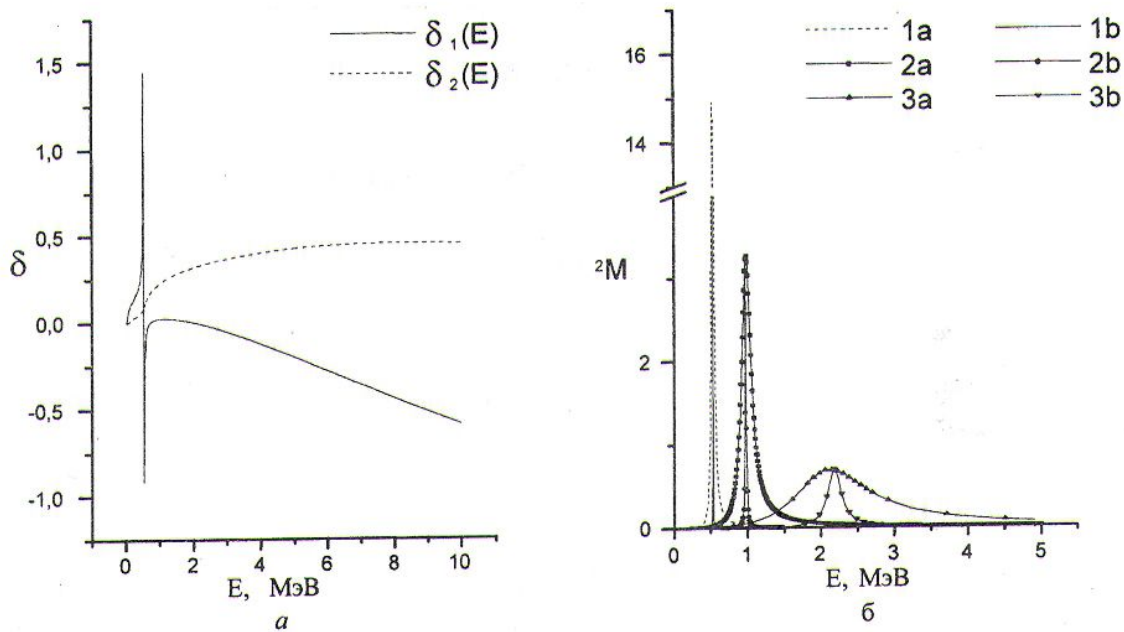


Рис. 1. (а): Фазы в собственном представлении  $S$ -матрицы при варианте потенциала, наиболее близком к потенциалу, хорошо воспроизводящему энергию и радиус основного состояния  ${}^6\text{He}$ . ( $\delta_1(E)$ ,  $\delta_2(E)$  – фаза в первом и втором канале, соответственно). (б): Квадрат матричного элемента в различных предположениях о параметрах потенциала. (1 – потенциал, наиболее близкий к тому, который хорошо воспроизводит энергию и радиус основного состояния  ${}^6\text{He}$ ; 2 – все константы  $B$  уменьшены на 5%; 3 – все константы  $B$  уменьшены на 20%; а и б – матричные элементы, связанные с первым и вторым каналами).

Недавно в рамках того же приближения нами был исследован  $EI$ -переход в ядре  ${}^{11}\text{Li}$ . В результате получены эффективные сечения фоторасщепления, соответствующие переходам из основного состояния ядра  $L^\pi = 1^-$  в три состояния непрерывного спектра положительной четности с орбитальными моментами  $L = 0, 1$  и  $2$ . На рис. 2 представлено полное сечение фоторасщепления  ${}^{11}\text{Li}$  как функция энергии над порогом развала  ${}^{11}\text{Li} \rightarrow {}^9\text{Li} + n + n$ . Основной вклад в полное сечение вносят переходы  $1^- \rightarrow 1^+$  и  $1^- \rightarrow 2^+$ .

Положение максимума сечения  $E = 0.55$  МэВ и ширина на полувывсоте  $\Gamma = 0.9$  МэВ хорошо согласуются с экспериментальными данными  $E = 0.7$  МэВ,  $\Gamma = 0.8$  МэВ [3]. В максимуме сечение достигает 4.2 мбн, что также совпадает с экспериментом.

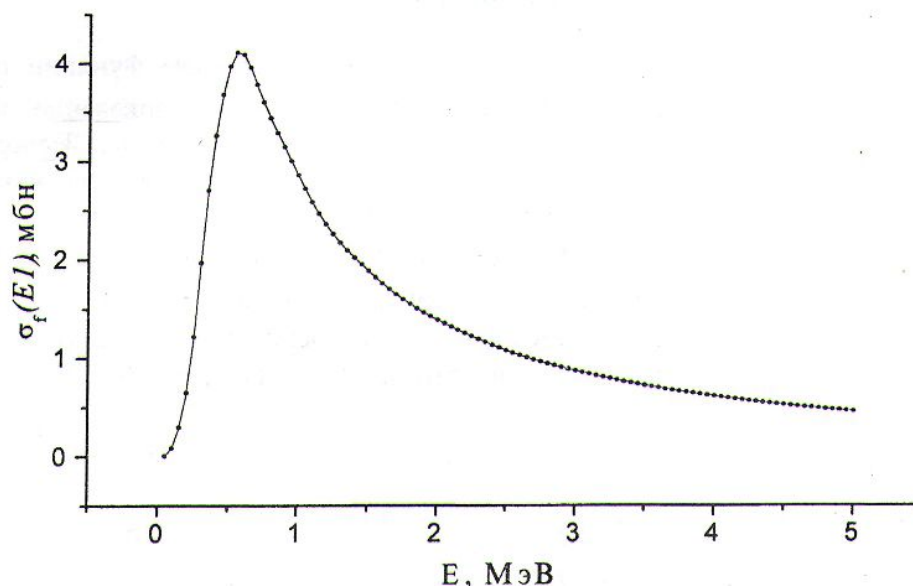


Рис. 2. Полное сечение фоторасщепления  $^{11}\text{Li}$  как функция энергии выше порога трехчастичного развала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhukov M.V., Chulkov L.V., Fedorov D.V. et al. Fingerprints of a possible low-lying resonance in  $^{11}\text{Li}$ . // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. - 1994. - Vol. 20. - P. 201.
2. Филиппов Г.Ф., Базавов А.Д., Като К., Кореннов С.В. Об асимптотических уравнениях представления гармонического осциллятора // ЯФ. - 1997. - Т. 60, №: 4. - С. 635.
3. Sackett D., Ieki K., Galonski A., Bertulani C.A. et al. Electromagnetic excitation of  $^{11}\text{Li}$ . // Phys. Rev. - 1993.  $^{11}\text{Li}$  - Vol. C 48. - P. 118.

#### НАБЛИЖЕННЯ АСИМПТОТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА М'ЯКА ДИПОЛЬНА МОДА ЛЕГКИХ ЯДЕР З НАДЛИШКОМ НЕЙТРОНІВ

Г.Ф. Філіппов, Ю.А. Лашко, Л.П. Шведов

У наближенні асимптотичного потенціалу побудовано повністю антисиметричні хвильові функції  $1^-$  станів неперервного спектра і основного стану ядра  $^6\text{He}$ . Поведінка матричних елементів двоканальної S-матриці вказує на існування  $1^-$  резонансу безпосередньо над порогом тричастинкового розвалу  $^6\text{He}$ . Отримано переріз фоторозщеплення ядра  $^{11}\text{Li}$ , що добре узгоджується з експериментальними даними.

#### SOFT DIPOLE MODE OF NEUTRON-RICH LIGHT NUCLEI IN ASYMPTOTIC POTENTIAL APPROXIMATION

G.F. Filippov, Yu.A. Lashko, L.P. Shvedov

Completely antisymmetrized  $1^-$  continuum wave functions as well as the ground state wave function for  $^6\text{He}$  have been constructed in asymptotic potential approximation. The behavior of two-channel S-matrix elements shows on the existence of  $1^-$  resonant state just above the three-body decay threshold of  $^6\text{He}$ .