

(ДТОО «Астрофизический институт им. Фесенкова», Алматы, Республика Казахстан)

РАДИАЦИОННЫЙ $n^{15}\text{N}$ ЗАХВАТ. II

Аннотация. В потенциальной кластерной модели с разделением орбитальных состояний по схемам Юнга и запрещенными состояниями рассмотрена возможность описания экспериментальных данных для полных сечений радиационного $n^{15}\text{N}$ захвата при астрофизических и низких энергиях.

Ключевые слова: ядерная физика, легкие атомные ядра, низкие и астрофизические энергии, упругое рассеяние, $n^{15}\text{N}$ -система, потенциальное описание, радиационный захват, полные сечения, термоядерные реакции, первичный нуклеосинтез, потенциальная кластерная модель, запрещенные состояния, классификация орбитальных состояний по схемам Юнга.

Тірек сөздер: ядролық физика, жеңіл атом ядролары, төмен және астрофизикалық энергиялар, серпімді шашы-раулар, $n^{15}\text{N}$ -жүйесі, ықтимал сипаттама, радиациялық қармау, тұтас кима, термоядролық реакциялар, бастапқы нуклео-синтез, ықтимал кластерлік үлгі, тыйым салынған жағдай, Юнг сызбасы орбиталық жағдайларды жіктеу.

Keywords: nuclear physics, light atomic nuclei, low and astrophysical energies, elastic scattering of the nuclear particles $n^{15}\text{N}$ -system, potential description, radiative capture, total cross section, thermonuclear processes, primordial nucleosynthesis, potential cluster model, forbidden states, classification orbital states on Young's schemes.

Введение. Продолжая изучение процесса радиационного захвата $n^{14}\text{N} \rightarrow {}^{15}\text{N}\gamma$ при низких энергиях, рассмотрим первый вариант расчетов полных сечений. Напомним, что для анализа данного процесса, как обычно, будут использоваться методы расчетов, основанные на потенциальной кластерной модели (ПКМ) легких атомных ядер с запрещенными состояниями (ЗС). Наличие ЗС определяется на основе классификации орбитальных состояний кластеров по схемам Юнга [1]. В используемом нами подходе потенциалы межкластерных взаимодействий для процессов рассеяния строятся на основе воспроизведения фаз упругого рассеяния рассматриваемых частиц с учетом их резонансного поведения или исходя из структуры спектров резонансных состояний конечного ядра. Для связанных состояний (СС) или основных состояний (ОС) ядер, образующихся в результате реакции захвата, в кластерном канале, который совпадает с начальными частицами, межкластерные потенциалы строятся исходя из описания энергии связи этих частиц в конечном ядре и некоторых основных характеристик таких состояний [2]. В этой части статьи будет рассмотрен первый вариант расчетов полных сечений рассматриваемой реакции.

Полные сечения радиационного захвата. Начиная непосредственное рассмотрение

результатов для указанных выше $E1$ переходов на ОС и три первые возбужденные состояния (BC) ядра, ^{16}N заметим, что нам удалось найти [3-6] экспериментальные данные для полных сечений процесса $n^{15}\text{N}$ захвата только при трех энергиях 25, 152 и 370 кэВ [7] – эти результаты представлены на рисунке 1 черными точками. Вначале рассмотрим вариант расчетов, когда сечение переходов на ОС с потенциалами (1) и (3), полученными в предыдущей статье, аналогично $n^7\text{Li}$ системе, представляется в виде простой суммы сечений

$$\sigma(E1, {}^3P_1 \rightarrow {}^3D_2) + \sigma(E1, {}^1P_1 \rightarrow {}^1D_2). \quad (1)$$

Результат расчета этого сечения представляется на рисунке 1 штриховой кривой, точечная по-казывает сечение ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_2$ перехода для гауссовых потенциалов (2) и (3) из первой части данной

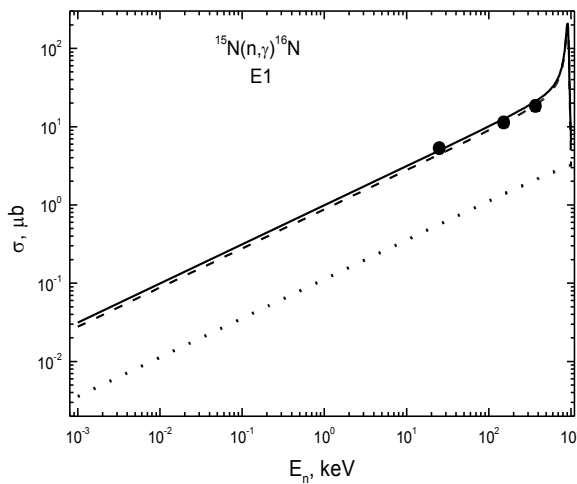


Рисунок 1, а – Полные сечения $n^{15}\text{N}$ захвата на ОС при энергии до 1 эВ.

Экспериментальные точки: • – [7].

Кривые – расчет полных сечений

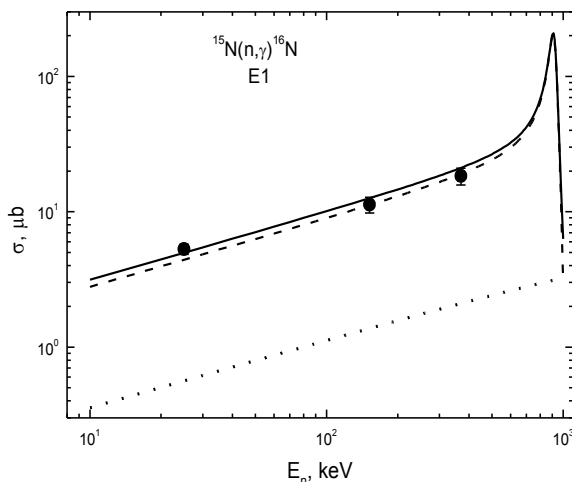


Рисунок 1, б – Полные сечения $n^{15}\text{N}$ захвата на ОС при энергии до 10 кэВ.

Экспериментальные точки: • – [7].

Кривые – расчет полных сечений

статьи, а непрерывная – их сумма. Из этих результатов видно, что достаточно

рассматривать только указанные три перехода на ОС, чтобы правильно описать полные сечения радиационного захвата, измеренные в работе [7]. Здесь не нужно учитывать переходы на возбужденные состояния, а измеренное сечение полностью определяется простой суммой сечений трех переходов. Обратим внимание, что из-за большой ширины резонанса фазы, которую дает P_1 потенциал (1) из предыдущей части статьи, ширина резонанса полных сечений в данных расчетах получается немного завышенной, что приводит к несколько завышенной величине сечения при энергии 370 кэВ [7], находящейся близко к резонансу, как это хорошо видно на приведенном рисунке 1, б.

Теперь отметим, что если параметры резонансного P_1 потенциала фиксированы по резонансу фазы сравнительно однозначно, а для связанного состояния они вполне определенно выбираются на основе описания его характеристик, то для 3P_2 потенциала с ЗС (2) из предыдущей статьи, приводящего к нулевым фазам, возможны и другие значения параметров.

Однако, если использовать, например, более узкий потенциал с ЗС и параметрами 1000 МэВ и 2.0 Фм^2 , который также приводит к фазам близким к нулю, результаты расчета сечений для перехода на ОС отличаются на величину около 1%. Этот результат демонстрирует слабое влияние геометрии такого потенциала рассеяния на полные сечения захвата – здесь важна лишь близкая к нулю величина соответствующей фазы рассеяния. Кроме того, если использовать P_1 потенциал без ЗС с глубиной -5302.745 МэВ и $\gamma = 20.0 \text{ Фм}^2$, который приводит почти к такой же ширине резонанса при 921 кэВ, но не согласуется с приведенной выше классификацией ЗС, то результаты расчета полных сечений захвата на ОС рассматриваемой реакции практически не отличаются от штриховой линии на рисунке 1, полученной для P_1 потенциала рассеяния (1) из предыдущей статьи.

Такой вывод в целом противоположен наблюдениям, сделанным ранее при анализе многих других легких атомных ядер в кластерных каналах и реакций захвата с ними [1, 2]. Рассматриваемая здесь система и процесс захвата являются определенным исключением из наблюдаемой прежде сильной зависимости полных сечений от числа ЗС в определенном парциальном потенциале, т.е. межкластерном взаимодействии для заданного орбитального момента [1, 2]. Обычно потенциалы с «неправильным» числом ЗС приводили к намного большему отличию в полных сечениях, а в данном случае число ЗС практически не влияет на результаты расчета, которые зависят теперь только от ширины резонансного уровня, получаемой на основе используемого потенциала упругого P_1 рассеяния.

Обратим теперь внимание, что поскольку при самых низких энергиях, а именно от 1 до 10 кэВ расчетное сечение является практически прямой линией (см. непрерывную кривую на рис. 1а), его можно аппроксимировать простой функцией вида

$$\sigma_{\text{ap}}(\text{мкб}) = 0.9907 \sqrt{E_n(\text{кэВ})}. \quad (2)$$

Величина приведенной константы $0.9907 \text{ мкб} \cdot \text{кэВ}^{-1/2}$ определялась по одной точке в сечениях при минимальной энергии, равной 1 эВ. Далее оказалось, что модуль

$$M(E) = \left| [\sigma_{\text{ap}}(E) - \sigma_{\text{theor}}(E)] / \sigma_{\text{theor}}(E) \right| \quad (3)$$

относительного отклонения расчетного теоретического сечения и аппроксимации этого сечения приведенной выше функцией при энергиях менее 10 кэВ находится на уровне 0.1%. Если предположить, что эта форма зависимости полного сечения от энергии будет сохраняться и при более низких энергиях, можно выполнить оценку величины сечения, которая, например, при энергии 1 мэВ (10^{-3} эВ = 10^{-6} кэВ), дает величину порядка $9.9 \cdot 10^{-4}$ мкб.

В третьей части данной статьи мы будем рассматривать второй вариант расчетов полных сечений, в котором учитываются переходы на ВС. Поэтому заметим, что для первых трех возбужденных состояний с моментами $J^\pi = 0^-, 3^-$ и 1^- ядра ^{16}N , связанных в $n^{15}\text{N}$ канале, в работе [8] были получены АК, значения которых равны 1.10, 0.29 и 1.08 $\text{Фм}^{-1/2}$, что после перерасчета к безразмерному виду дает 1.36 при $\sqrt{2k_1} = 0.811$, 0.36 при $\sqrt{2k_2} = 0.795$ и 1.37 при $\sqrt{2k_3} = 0.786$. Полученные далее потенциалы этих трех связанных ВС строились так чтобы примерно воспроизводить полученные в обзоре [8] и приведенные выше значения АК.

Таким образом, кроме взаимодействия ОС, были найдены потенциалы трех первых возбужденных состояний при энергиях 0.12042 МэВ с $J^\pi = 0^-$, 0.29822 МэВ с $J^\pi = 3^-$ и 0.39727 МэВ с $J^\pi = 1^-$ [9] относительно ОС ядра ^{16}N или -2.37058, -2.19278 и -2.09373 МэВ относительно порога $n^{15}\text{N}$ канала. Этим связанным состояниям можно сопоставить 1S_0 , 3D_3 и 3S_1 уровни ядра ^{16}N при рассмотрении его в $n^{15}\text{N}$ кластерном канале.

В результате учета этих возбужденных состояний вместе с ОС ядра ^{16}N дополнительно можно рассматривать следующие пять $E1$ переходов из нерезонансных 3P_2 и 3P_0 волн и резонансного, смешанного по спину $^{1+3}P_1$, состояний рассеяния

$$\sigma_{ex}(E1) = \sigma(E1, ^3P_0 \rightarrow ^3S_1) + \sigma(E1, ^3P_2 \rightarrow ^3S_1) + \sigma(E1, ^3P_1 \rightarrow ^3S_1) + \\ + \sigma(E1, ^1P_1 \rightarrow ^1S_0) + \sigma(E1, ^3P_2 \rightarrow ^3D_3).$$

Для первого из этих ВС были получены параметры 1S_0 потенциала без ЗС в $n^{15}\text{N}$ канале

$$V_{S_0} = -54.454312 \text{ МэВ}, \quad \gamma_{S_0} = 0.6 \text{ Фм}^{-2}. \quad (4)$$

Потенциал приводит к энергии связи -2.370580 МэВ при точности КРМ 10^{-6} МэВ, средне-квадратичному зарядовому радиусу 2.62 Фм и массовому радиусу 2.63 Фм, а для АК на интервале $3 \div 22$ Фм получено значение 1.35(1), что хорошо согласуется с результатами [8].

Для второго ВС, связанного в $n^{15}\text{N}$ канале, получен 3D_3 потенциал без ЗС и параметрами

$$V_{D_3} = -126.14123 \text{ МэВ}, \quad \gamma_{D_3} = 0.2 \text{ Фм}^{-2}. \quad (5)$$

Потенциал дает энергию связи -2.192780 МэВ при точности КРМ 10^{-6} МэВ, среднеквадратичный зарядовый радиус 2.62 Фм и массовый радиус 2.64 Фм. Для АК на интервале $5 \div 22$ Фм получена величина 0.32(1), которая отличается от приведенной выше и в работе [8] примерно на 10%.

Для потенциала третьего ВС без ЗС, которое соответствует 3S_1 уровню, получены параметры

$$V_{s1} = -53.170538 \text{ МэВ}, \gamma_{s1} = 0.6 \text{ Фм}^{-2}. \quad (6)$$

Потенциал приводит к энергии связи -2.093730 МэВ при точности КРМ 10^{-6} MeV , средне-квадратичному зарядовому радиусу 2.62 Фм и массовому радиусу 2.64 Фм , а для АК на интервале $3 \div 23 \text{ Фм}$ получено значение $1.33(1)$, которое мало отличается от результатов работы [8].

Еще раз обратим внимание, что все полученные здесь и в предыдущей части статьи потенциалы не только согласуются с энергиями уровней, в целом правильно описывают значения радиусов ядра, но и воспроизводят АК, полученные независимыми методами.

Работа частично поддерживалась грантом № 0151/ГФ2 МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

1 Дубовиченко С.Б. Термоядерные процессы Вселенной. Изд. второе, исправленное и дополненное. Серия «Казах-станские космические исследования». – Т. 7. – Алматы: А-три, 2011. – 402 с.

2 Дубовиченко С.Б. Избранные методы ядерной астрофизики. Изд. второе, исправленное и дополненное. – Germany: Lambert Academy Publ., 2013. – 472 с.

3 <http://cdfc.sinp.msu.ru/exfor/index.php> .

4 <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm>.

5 <http://xxx.lanl.gov/find/nucl-ex> .

6 Herndl H. et al. Reaction rates for Neutron Capture Reactions to C-, N- and O-isotopes to the neutron rich side of stability // Phys. Rev. – 1999. – Vol. C60. – P. 064614-1–064614-12.

7 Meissner J. et al. Neutron capture cross section of ^{15}N at stellar energies // Phys. Rev. – 1996. – Vol. C53. – P. 977-981.

8 Huang J.T., Bertulani C.A., Guimaraes V. Radiative capture of protons and neutrons at astrophysical energies and potential models // Atom. Data and Nucl. Data Tabl. – 2010. – Vol. 96. – P. 824-847.

9 Tilley D.R., Weller H.R., Cheves C.M. Energy levels of light nuclei $A = 16, 17$ // Nucl. Phys. – 1993. – Vol. A564. – P. 1-183.

REFERENCES

1 Dubovichenko S.B. Termojadernye processy Vselennoj. Izd. vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe. Serija «Kazahstanskie kosmicheskie issledovanija». T.7. Almaty: A-tri, 2011. 402

p. (in Russ.).

2 Dubovichenko S.B. *Izbrannye metody jadernoj astrofiziki. Izd. vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe.* Germany: Lambert Academy Publ. 2012. 361p. (in Russ.).

3 <http://cdfesinp.msu.ru/exfor/index.php> .

4 <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm>.

5 <http://xxx.lanl.gov/find/nucl-ex> .

6 Herndl H. et al. *Phys. Rev. C*, **1999**, V. 60, p. 064614-1–064614-12.

7 Meissner J. et al. *Phys. Rev. C*, **1996**, V. 53, p. 4.977-981.

8 Huang J.T., Bertulani C.A., Guimaraes V. *Atom. Data and Nucl. Data Tabl.* **2010**, V.96, p. 824-847.

9 Tilley D. R., Weller H. R., Cheves C. M. *Nucl. Phys. A*, **1993**, V. 564, p. 1-183.

Резюме

Н. В. Афанасьева, С. Б. Дубовиченко

(«Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЕЖШС, Алматы, Қазақстан Республикасы)

РАДИАЦИЯЛЫҚ $n^{15}\text{N}$ ҚАРМАУЫ. II

Орбиталық күйлер Юнг сұлбалары бойынша бөлінетін потенциалды кластерлік үлгіде, төмен энергия-лардағы радиациялық $n^{15}\text{N}$ қармауының толық қималары үшін эксперименталды деректерді суреттеу мүмкіндігі қарастырылған.

Тірек сөздер: ядролық физика, жеңіл атом ядролары, төмен және астрофизикалық энергиялар, серпімді шашы-раулар, $n^{15}\text{N}$ -жүйесі, ықтимал сипаттама, радиациялық қармау, тұтас кима, термоядролық реакциялар, бастапқы нуклео-синтез, ықтимал кластерлік үлгі, тыйым салынған жағдай, Юнг сызбасы орбиталық жағдайларды жіктеу.

Summary

N. V. Afanasyeva, S. B. Dubovichenko

(D TOO «Fesenkov Astrophysical Institute», Almaty, Republic of Kazakhstan)

RADIATIVE $n^{15}\text{N}$ CAPTURE. II

Within the potential cluster model with an orbital states separation according to the Young diagrams and forbidden states the possibility of description of experimental data for the total cross-sections of radiative $n^{15}\text{N}$ capture at astrophysical and low energies was considered.

Keywords: nuclear physics, light atomic nuclei, low and astrophysical energies, elastic scattering of the nuclear particles $n^{15}\text{N}$ -system, potential description, radiative capture, total cross section, thermonuclear processes, primordial nucleosynthesis, potential cluster model, forbidden states, classification orbital states on Young's schemes.

Поступила 2.09.2013г.