

# Проблемы небесной механики и динамики звездных систем

---

---

УДК 52-48, 524, 539.14, 539.17

С. Б. ДУБОВИЧЕНКО, Д. Н. АДильБЕКОВ, А. С. ТКАЧЕНКО

(Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова «НЦКИТ» НКА РК, г. Алматы)

## РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ПРОТОНА НА $^{10}\text{B}$ . I

**Аннотация.** Рассмотрена возможность описания полных сечений радиационного  $p^{10}\text{B}$ -захвата в модифицированной потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями при астрофизических энергиях. Для определения наличия и количества запрещенных состояний в каждой парциальной волне использовалась классификация орбитальных состояний кластеров по схемам Юнга. Потенциал связанного состояния строился на основе описания характеристик основного состояния ядра  $^{11}\text{C}$ . Потенциалы непрерывного спектра согласованы с фазами упругого  $p^{10}\text{B}$ -рассеяния при энергиях до 1 МэВ. Используемая модель и методы построения потенциалов позволяют в целом правильно передать общее поведение экспериментальных сечений радиационного  $p^{10}\text{B}$ -захвата.

**Ключевые слова:** ядерная физика, реакция радиационного захвата,  $p^{10}\text{B}$  система.

**Тірек сөздер:** ядролық физика, радиациялық қармау реакциясы,  $p^{10}\text{B}$  жүйесі.

**Keywords:** Nuclear physics, radiative capture reaction,  $p^{10}\text{B}$  system.

**Введение.** Одним из исключительно успешных направлений развития ядерной физики в последние 50 лет стала микроскопическая модель под названием "Метод Резонирующих Групп" (МРГ, см., например, [1,2], а также связанные с ней модели, например, метод генераторной координаты (МГК, см., в частности, [3] или алгебраическая версия МРГ [4]. Такой очевидный успех привел большинство физиков к представлению, что только в этом направлении будет возможно дальнейшее получение новых результатов в области ядерной физики низких энергий и ядерной астрофизики. В итоге сложилось довольно распространенное, но, по-видимому, ошибочное мнение, что только по этому пути возможно дальнейшее развитие наших представлений о структуре атомного ядра, ядерным и термоядерным реакциям при низких и астрофизических энергиях.

Однако до сих пор не полностью исследованы возможности простых потенциальных двухкластерных моделей (ПКМ), особенно, если они используют концепцию запрещенных состояний (ЗС) [5] и непосредственно учитывают резонансное поведение фаз упругого рассеяния взаимодействующих частиц при низких энергиях [6,7] – такую модель можно назвать модифицированной ПКМ с ЗС (МПКМ). Далеко не всегда для объяснения имеющихся экспериментальных фактов требуются сравнительно сложные МРГ вычисления. Для рассмотрения многих задач достаточно использовать сравнительно простую МПКМ, учитывающую классификацию орбитальных состояний по схемам Юнга и учитывающую резонансное поведение фаз упругого рассеяния. Такой подход во многих случаях позволяет получить вполне адекватные результаты при описании результатов многих экспериментальных исследований [6,7].

В частности, ранее нами была показана возможность описания [6,8,9] астрофизических S-факторов [10,11] реакций радиационного захвата заряженных частиц на некоторых легких и легчайших атомных ядрах в рамках МПКМ. Такая модель учитывает супермультиплетную симметрию волновой функции (ВФ) системы кластеров с разделением орбитальных состояний по схемам Юнга [8,9,12]. Используемая классификация орбитальных состояний позволяет анализировать структуру межкластерных взаимодействий, определять наличие и количество разрешенных

(РС) и ЗС в межкластерных потенциалах, а значит, дает возможность найти число узлов радиальной волновой функции относительного движения кластеров [13,14]. В используемом подходе потенциалы межкластерных взаимодействий для процессов рассеяния строятся на основе описания фаз упругого рассеяния, которые извлекаются из экспериментальных дифференциальных сечений при выполнении фазового анализа [6-9]. Для связанных состояний (СС) легких ядер в кластерных каналах для построения потенциалов, кроме фаз рассеяния, используются некоторые дополнительные критерии. Например, таким требованием является воспроизведение энергии связи и некоторых других характеристик основных состояний (ОС) ядер, причем, в некоторых случаях это требование является основным [6-9]. При этом предполагается, что СС обусловлено кластерным каналом, состоящем из начальных частиц, которые участвуют в реакции [15,16,17].

Выбор потенциальной кластерной модели для рассмотрения подобных кластерных систем в ядрах, ядерных и термоядерных процессов при астрофизических энергиях [10,18] обусловлен тем, что во многих легких атомных ядрах вероятность образования нуклонных ассоциаций, т.е. кластеров и степень их обособления друг от друга сравнительно высоки – это подтверждается многочисленными экспериментальными измерениями и различными теоретическими расчетами, полученными разными авторами за последние пятьдесят-шестьдесят лет [5,19,20]. Конечно, такое предположение является определенной идеализацией реально существующей в ядре ситуации, т.к. предполагает, что в СС имеется 100%-ая кластеризация ядра для частиц начального канала. Поэтому успех данной потенциальной модели при описании системы из  $A$  нуклонов в связанном состоянии определяется тем, насколько велика реальная кластеризация этого ядра в канале  $A_1 + A_2$  нуклонов. В тоже время, некоторые ядерные характеристики отдельных, даже не кластерных, ядер могут быть преимущественно обусловлены одним определенным кластерным каналом, т.е. иметь определенную кластерную структуру при малом вкладе других возможных кластерных конфигураций. В этом случае используемая одноканальная кластерная модель позволяет идентифицировать доминирующий кластерный канал, выделить и описать те свойства ядерной системы, которые им обусловлены [6-9,12]

Поэтому, продолжая рассмотрение термоядерных процессов, протекающих в различных объектах Вселенной на разных стадиях ее формирования и развития [6,7], здесь представлены новые результаты в области исследования термоядерной реакции  $p^{10}\text{В}$ -захвата при сверхнизких, т.е. астрофизических энергиях. В качестве ядерной модели используется МПКМ, которая позволяет рассматривать некоторые термоядерные процессы, а именно реакции радиационного захвата нейтронов, на основе единых представлений, критериев и методов.

### Структура уровней $p^{10}\text{В}$ системы

Вначале заметим, что поиск в литературе или базах данных фаз упругого  $p^{10}\text{В}$ -рассеяния результатов не дал, поэтому далее фазы будут строиться на основе спектров уровней ядра  $^{11}\text{С}$ , которое получается в результате термоядерной реакции радиационного  $p^{10}\text{В}$ -захвата. Причиной отсутствия фазового анализа в этой системе является, по-видимому, большой спин ядра  $^{10}\text{В}$ , равный  $3^+$  [21]. Спектр резонансных уровней ядра  $^{11}\text{С}$  в  $p^{10}\text{В}$ -канале при энергии ниже 1 МэВ имеет три состояния [22,23] (см., например, табл.11.41 в обзоре [23])

1. 0.010(2) МэВ в лаб. сис. (л.с.) с моментом  $J = 5/2^+$  при ширине 16(1) кэВ в лабораторной системе (л.с.), которое соответствует уровню 8.699(2) МэВ.

2. 0.56(6) МэВ в л.с. с моментом  $J = 5/2^+$  при ширине 550(100) кэВ в л.с. – уровень 9.200(50) МэВ.

3. 1.050(60) МэВ в л.с. с моментом  $J = 3/2^-$  при ширине 230(50) кэВ в л.с. – уровень 9.640(50) МэВ.

Первый и второй из этих резонансов могут являться  $^6S_{5/2}$ -состоянием  $p^{10}\text{В}$ -системы, а третье –  $^6P_{3/2}$ -резонансом в обозначениях  $^{2S+1}L_J$ . Поскольку момент  $^{10}\text{В}$  равен  $3^+$ , а протона  $1/2^+$ , то возможны два спиновых состояния с  $S = 5/2$  и  $7/2$ . Для  $S$ -волны при  $L = 0$  имеем состояния  $^6S_{5/2}$  и  $^8S_{7/2}$  с положительной четностью. Для  $P$ -волны при  $S = 5/2$  получаем состояния  $^6P_{3/2}$ ,  $^6P_{5/2}$  и  $^6P_{7/2}$ , а при  $S = 7/2$  находим  $^8P_{5/2}$ ,  $^8P_{7/2}$  и  $^8P_{9/2}$  с отрицательной четностью. Поэтому состояния с полным моментом  $J = 5/2^-$  и  $7/2^-$  могут быть смешаны по спину. Для  $D$ -волны при  $S = 5/2$  получаем  $^6D_{1/2}$ ,  $^6D_{3/2}$ ,  $^6D_{5/2}$ ,  $^6D_{7/2}$ , и  $^6D_{9/2}$ , а при  $S = 7/2$  имеем  $^8D_{3/2}$ ,  $^8D_{5/3}$ ,  $^8D_{7/2}$ ,  $^8D_{9/2}$ , и  $^8D_{11/2}$  состояния с положительной четностью. Поэтому состояния с  $J$  от  $3/2^+$  до  $9/2^+$  могут быть смешаны по спину. В соответствии с этим первый и второй из приведенных выше резонансов могут оказаться смешанным по спину  $^{6+8}D_{5/2}$ -уровнем.

Для связанных возбужденных состояний имеем довольно сложный спектр уровней, состоящий из 11 состояний при энергиях в центре масс (ц.м.):

0. Основное состояние находится при энергии связи -8.6894 МэВ [23] в  $p^{+10}$ В-канале и имеет момент  $3/2^-$ , являясь чистым по спине с  $S = 5/2$   ${}^6P_{3/2}$ -уровнем.

1. Первое возбужденное состояние (ПВС) имеет энергию 2.000 МэВ относительно ОС или -6.6894 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $1/2^-$ , являясь, по-видимому,  ${}^6F_{1/2}$ -уровнем, которое мы рассматривать не будем из-за большого центробежного барьера.

2. Второе ВС имеет энергию 4.3188 МэВ относительно ОС или -4.3706 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $5/2^-$ , и может являться смешанным  ${}^{6+8}P_{5/2}$ -уровнем.

3. Третье ВС имеет энергию 4.8042 МэВ относительно ОС или -3.8852 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $3/2^-$ , являясь чистым по спине  ${}^6P_{3/2}$ -уровнем.

4. Четвертое ВС имеет энергию 6.3392 МэВ относительно ОС или -2.3502 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $1/2^+$ , являясь чистым  ${}^6D_{1/2}$ -уровнем.

5. Пятое ВС имеет энергию 6.4782 МэВ относительно ОС или -2.2112 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $7/2^-$ , являясь смешанным  ${}^{6+8}P_{7/2}$ -уровнем.

6. Шестое ВС имеет энергию 6.9048 МэВ относительно ОС или -1.7846 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $5/2^+$ , являясь чистым  ${}^6S_{5/2}$  или смешанным  ${}^{6+8}D_{5/2}$ -уровнем.

7. Седьмое ВС имеет энергию 7.4997 МэВ относительно ОС или -1.1897 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $3/2^+$ , являясь смешанным  ${}^{6+8}D_{3/2}$ -уровнем.

8. Восьмое ВС имеет энергию 8.1045 МэВ относительно ОС или -0.5849 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $3/2^-$ , являясь  ${}^6P_{3/2}$ -уровнем.

9. Девятое ВС имеет энергию 8.420 МэВ относительно ОС или -0.2694 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $5/2^-$ , являясь  ${}^{6+8}P_{5/2}$ -уровнем.

10. Десятое ВС имеет энергию 8.655 МэВ относительно ОС или -0.0344 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $7/2^+$ , являясь чистым  ${}^8S_{7/2}$  или смешанным  ${}^{6+8}D_{7/2}$ -уровнем.

11. Одиннадцатое ВС имеет энергию 8.699 МэВ относительно ОС или -0.0096 МэВ относительно порога  $p^{10}$ В-канала и момент  $5/2^+$ , являясь чистым  ${}^6S_{5/2}$  или смешанным  ${}^{6+8}D_{5/2}$ -уровнем.

Будем учитывать далее только переходы на ВС, энергия связи которых в  $p^{10}$ В-канале более 1 МэВ, поскольку сечения захвата очень сильно уменьшаются с уменьшением этой энергии. Поэтому следует анализировать переходы на первые семь ВС. Переходы на  $D$ -состояния из  $S$ -волн имеют характер  $E2$ -процессов и рассматриваться не будут, поскольку известно, что их сечения на полтора-два порядка меньше. Переходы из  $P$ -волн рассеяния на такие  $D$ -связанные состояния будут подавлены из-за центробежного барьера, и также не будут рассматриваться.

Переходы из  ${}^6S$ -волны рассеяния на 6-е связанное  ${}^6S_{5/2}$ -состояние приводит к  $M1$ -переходам и рассматриваться не будут, а такой  $M1$ -переход на 10 и 11 ВС подавлен еще и по энергии связи. При низких энергиях переходы возможны в основном из  $S$ -волн рассеяния, поэтому при рассмотрении  $E1$ -переходов они возможны только на  $P$ -связанные состояния, например, такие переходы возможны на  ${}^6P_{3/2}$  ОС и 2, 3 и 5 ВС.

В частности, возможен  $E1$ -переход из  ${}^6S_{5/2}$ -волны рассеяния на  ${}^6P_{3/2}$  ОС и 3-е  ${}^6P_{3/2}$  ВС

$$1. {}^6S_{5/2} \rightarrow {}^6P_{3/2}^1 (GS).$$

Такой  $E1$ -переход возможен и из  ${}^6S_{5/2}$ -волны рассеяния на  ${}^6P_{3/2}$  третье ВС

$$2. {}^6S_{5/2} \rightarrow {}^6P_{3/2}^2 (3\_ES)$$

Можно рассматривать и  $E1$ -переход из  ${}^6S_{5/2}$ -волны рассеяния на 2-е ВС с  ${}^6P_{5/2}$

$$3. {}^6S_{5/2} \rightarrow {}^6P_{5/2} (2\_ES)$$

А также из  ${}^8S_{7/2}$ -волны на это же состояние  ${}^8P_{5/2}$

$$4. {}^8S_{7/2} \rightarrow {}^8P_{5/2} (2\_ES).$$

Поскольку в рамках используемой модели разделить по спицам 2-е ВС не представляется возможным, т.е. построить можно только потенциал  $P_{5/2}$ , то реально будет рассмотрен переход типа  ${}^8S_{7/2} + {}^6S_{5/2} \rightarrow P_{5/2} (2\_ES)$  и сечения этих двух переходов будут суммироваться, поскольку

в начальном состоянии имеется две разные волны рассеяния, т.е.  $\sigma = \sigma(^6S_{5/2} \rightarrow ^6P_{5/2}) + \sigma(^8S_{7/2} \rightarrow ^8P_{5/2})$ .

То же самое относится к  $E1$ -переходам на 5-е ВС, а именно будем рассматривать процессы

$$5. \ ^8S_{7/2} + ^6S_{5/2} \rightarrow ^{6+8}P_{7/2} (5\_ES)$$

– здесь сечения двух переходов также будут суммироваться.

Кроме того, возможны в принципе и  $E1$ -переходы из всех трех  $^6P$ -волн рассеяния на 6-е  $^6S_{5/2}$ -связанное состояние

$$6. \ ^6P_{3/2} + ^6P_{5/2} + ^6P_{7/2} \rightarrow ^6S_{5/2} (6\_ES).$$

Здесь может проявляться вклад  $^6P_{3/2}$ -резонанса при 1.05 МэВ, но как видно из результатов работы [24] этот вклад очень мал. Кроме того, исходя из формы  $S$ -фактора  $p^{10}$ В-захвата резонанс при 0.56 МэВ [24] в  $^6S_{5/2}$ -волне также практически не заметен из-за его большой ширины.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Вильдермут Л., Тан Я. Единая теория ядра. М.: Мир. 1980. 502 с.; Wildermuth K., Tang Y.C. A unified theory of the nucleus. Branschweig: Vieweg. – 1977. – 498 p.
- 2 Mertelmeir T., Hofmann H.M. Consistent cluster model description of the electromagnetic properties of lithium and beryllium nuclei // Nucl. Phys. – 1986. – V.A459. – P.387-416.
- 3 Descouvemont P., Dufour M. Microscopic cluster model // In: Clusters in Nuclei. V.2. Editor C. Beck. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. – 2012. – 353 p.
- 4 Нестеров А.В. и др. Трехкластерное описание свойств легких ядер // ЭЧАЯ – 2010. – Т.41. – С.1337-1424; Nesterov A.V. et al. Three clusters description of light nuclei properties // Phys. Part. Nucl.– 2010. – V.41. – № 5. – P.716-765.
- 5 Немец О.Ф. и др. Нуклонные ассоциации в атомных ядрах и ядерные реакции многонуклонных передач. Киев: Наукова Думка. 1988. 488 с.; Nemets O.F., Neudatchin V.G., Rudchik A.T., Smirnov Y.F., Tchuivil'sky Yu.M. Nucleon association in atomic nuclei and the nuclear reactions of the many nucleons transfers. Kiev: Naukova dumka. 1988. – 488 p.
- 6 Дубовиченко С.Б. Термоядерные процессы Вселенной. Изд. второе, исправленное и дополненное. Серия «Казахстанские космические исследования». – Т.7. Алматы: А-три, – 2011. – 402 с.; Dubovichenko S.B. Thermonuclear Processes of the Universe. The 1-st English edition. New-York: NOVA Sci. Publ. – 2012. – 194 p.; [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=31125](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=31125).
- 7 Дубовиченко С.Б. Избранные методы ядерной астрофизики. Изд. третье, исправленное и дополненное. Germany, Saarbrucken: Lambert Academy Publ. GmbH&Co. KG. 2013. 480 с.; <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-8465-8905-2/Избранные-методы-ядерной-астрофизики>.
- 8 Дубовиченко С.Б., Узиков Ю.Н. Астрофизические S-факторы реакций с легкими атомными ядрами // ЭЧАЯ. – 2011. – Т.42. – С.478.
- 9 Dubovichenko S.B. and Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Examination of astrophysical S-factors of  $p^2\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $p^{12}\text{C}$  and  $p^{13}\text{C}$  radiative capture reactions // Int. J. Mod. Phys. – 2012. – V.E 21. – P.1250039-1.
- 10 Ядерная астрофизика, под. ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрама. Мир, Москва. – 1986.
- 11 Капитонов И.М., Иуханов Б.С., Тутынь И.А. Нуклеосинтез во Вселенной. Либроком, Москва. – 2009.
- 12 Dubovichenko S.B. and Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factors of proton radiative capture in thermonuclear reactions in the Stars and the Universe // In The Big Bang: Theory, Assumptions and Problems. NOVA Sci. Publ., New-York 2012. P.1-60; [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=21109](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=21109).
- 13 Неудачин В.Г., Сахарук А.А., Смирнов Ю.Ф. Обобщенное потенциальное описание взаимодействия легчайших кластеров – рассеяние и фотоядерные реакции // ЭЧАЯ 1992. Т.23. С.480-541; Неудачин В. Г., Стружко Б. Г., Лебедев В. М. Супермультиплетная потенциальная модель взаимодействия легчайших кластеров и единое описание различных ядерных реакций // ЭЧАЯ 2005. – Т.36. – С.890-941.
- 14 Neudatchin V.G. et al. Generalized potential model description of mutual scattering of the lightest  $p^2\text{H}$ ,  $^2\text{H}^3\text{He}$  nuclei and the corresponding photonuclear reactions // Phys. Rev. 1992. V.C45. P.1512-1527.
- 15 Дубовиченко С.Б. Астрофизические S – факторы радиационного  $^3\text{He}^4\text{He}$ ,  $^3\text{H}^4\text{He}$  и  $^2\text{H}^4\text{He}$  захвата // ЯФ 2010. – Т.73. – С.1573.
- 16 Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. The  $^7\text{Li}(n,\gamma)^8\text{Li}$  radiative capture at astrophysical energies // Ann. der Phys. – 2012. – V.524. P.850-861.
- 17 Dubovichenko S.B. Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factor of the radiative  $p^2\text{H}$  capture // Euro. Phys. Jour. – 2009. – V.A39. P.139-143.
- 18 Adelberger E.G. et al. Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles // Rev. Mod. Phys. – 2011. – V.83. – P.195-245.
- 19 Дубовиченко С.Б. Легкие ядра и ядерная астрофизика. Изд. второе, исправленное и дополненное. Germany, Saarbrucken: Lambert Acad. Publ. GmbH&Co. KG. – 2013. – 316 с.
- 20 Kukulin V.I., Neudatchin V.G., Obukhovskiy I.T. and Smirnov Yu.F. Clusters as subsystems in light nuclei // In: Clustering Phenomena in Nuclei edited by K. Wildermuth and P. Kramer. Branschweig: Vieweg. – 1983. V.3. P.1.
- 21 Tilley D.R. et al. Energy Levels of Light Nuclei A = 10 // Nucl. Phys. 2004. V.A745. P.155.

- 22 Ajzenberg-Selove F. Energy Levels of Light Nuclei  $A = 11, 12$  // Nucl. Phys. 1990. – V.A506. P.1.  
 23 Kelley J.H. et al. Energy Levels of Light Nuclei  $A = 11$  // Nucl. Phys. – 2012. – V.A880. P.88.  
 24 Angulo C. et al. A compilation of charged-particle induced thermonuclear reaction rates // Nucl. Phys. 1999. V.A656. P.3-183.

## REFERENCES

- 1 Vil'dermut L., Tan Ja. *Edinaja teorija jadra*. M.: Mir. 1980. 502s.; (in Russ.) Wildermut K., Tang Y.C. *A unified theory of the nucleus*. Branschweig: Vieweg. – 1977. – 498 p.  
 2 Mertelmeir T., Hofmann H.M. *Consistent cluster model description of the elec-tromagnetic properties of lithium and beryllium nuclei*. Nucl. Phys. 1986. V.A459. P.387-416.  
 3 Descouvemont P., Dufour M. *Microscopic cluster model*. In: *Clusters in Nu-clei. V.2*. Editor C. Beck. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 2012. 353 p.  
 4 Nesterov A.V. i dr. *Trehklasternoe opisaniye svojstv legkih jader*. JeChAJa 2010. T.41. S.1337-1424; (in Russ.) Nesterov A.V. et al. *Three clusters description of light nuclei properties*. Phys. Part. Nucl. 2010. V.41. № 5. P.716-765.  
 5 Nemeč O.F. i dr. *Nuklonnyye asociacii v atomnyh jadrach i jadernyye reak-cii mnogonuklonnyh peredach*. Kiev: Naukova Dumka. 1988. 488 s.; (in Russ.) Nemets O.F., Neudatchin V.G., Rudchik A.T., Smirnov Y.F., Tchuviľsky Yu.M. *Nucleon associa-tion in atomic nuclei and the nuclear reactions of the many nucleons transfers*. Kiev: Naukova dumka. 1988. 488 p.  
 6 Dubovichenko S.B. *Termojadernyye processy Vseľennoj*. Izd. vtoroe, isprav-lennoe i dopolnennoe. Seriya «Kazahstanskije kosmicheskie issledovaniya». T.7. Almaty: A-tri, 2011. 402 s.; (in Russ.) Dubovichenko S.B. *Thermonuclear Processes of the Universe. The 1-st English edition*. New-York: NOVA Sci. Publ. 2012. 194 p.; [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=31125](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=31125).  
 7 Dubovichenko S.B. *Izbrannyye metody jadernoj astrofiziki*. Izd. tret'e, ispravlennoe i dopolnennoe. Germany, Saarbrücken: Lambert Academy Publ. GmbH&Co. KG. 2013. 480 s.; <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-8465-8905-2/Izbrannyye-metody-jadernoj-astrofiziki>. (in Russ.)  
 8 Dubovichenko S.B., Uzikov Ju.N. *Astrofizicheskie S-factory reakcij s legkimi atomnymi jadrami*. JeChAJa 2011. T.42. S.478. (in Russ.)  
 9 Dubovichenko S.B. and Dzhazairov-Kakhramanov A.V. *Examination of astro-physical S-factors of  $\nu^2\text{H}$ ,  $p^6\text{Li}$ ,  $p^7\text{Li}$ ,  $p^{12}\text{C}$  radiative capture reactions*. Int. J. Mod. Phys. 2012. V.E 21. P.1250039-1.  
 10 *Jadernaja astrofizika*, pod. red. Ch. Barnsa, D. Klejtona, D. Shrama. Mir, Moskva, 1986. (in Russ.).  
 11 Kapitonov I.M., Ishhanov B.S., Tutyn' I.A. *Nukleosintez vo Vseľennoj*. Librokom, Moskva, 2009. (in Russ.).  
 12 Dubovichenko S.B. and Dzhazairov-Kakhramanov A.V. *Astrophysical S-factors of proton radiative capture in thermonuclear reactions in the Stars and the Universe*. In *The Big Bang: Theory, Assumptions and Problems*. NOVA Sci. Publ., New-York 2012. R.1-60; [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=21109](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=21109).  
 13 Neudachin V.G., Saharuk A.A., Smirnov Ju.F. *Obobshhennoe potencial'noe opisaniye vzaimodejstvija legchajshih klasterov - rassejaniye i fotojadernyye reak-cii*. JeChAJa 1992. T.23. S.480-541; Neudachin V. G., Struzhko B. G., Lebedev V. M. *Supermul'tipletnaja potencial'naja model' vzaimodejstvija legchajshih klasterov i edinoe opisaniye razlichnyh jadernyh reakcij*. JeChAJa 2005. T.36. S.890-941. (in Russ.).  
 14 Neudatchin V.G. et al. *Generalized potential model description of mutual scattering of the lightest  $p^2\text{H}$ ,  $^2\text{H}^3\text{He}$  nuclei and the corresponding photonuclear reactions*. Phys. Rev. 1992. V.C45. P.1512-1527.  
 15 Dubovichenko S.B. *Astrofizicheskie S - factory radiacionnogo  $^3\text{Ne}^4\text{Ne}$ ,  $^3\text{N}^4\text{Ne}$  i  $^2\text{N}^4\text{Ne}$  zahvata*. JaF. 2010. T.73. S.1573. (in Russ.).  
 16 Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. *The  $^7\text{Li}(n,\gamma)^8\text{Li}$  radiative capture at astrophysical energies*. Ann. der Phys. 2012. V.524. P.850-861.  
 17 Dubovichenko S.B. Dzhazairov-Kakhramanov A.V. *Astrophysical S-factor of the radiative  $p^2\text{H}$  capture*. Euro. Phys. Jour. 2009. V.A39. P.139-143.  
 18 Adelberger E.G. et al. *Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles*. Rev. Mod. Phys. 2011. V.83. P.195-245.  
 19 Dubovichenko S.B. *Legkie jadra i jadernaja astrofizika*. Izd. vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe. Germany, Saarbrücken: Lambert Acad. Publ. GmbH&Co. KG. 2013. 316c. (in Russ.).  
 20 Kukulín V.I., Neudatchin V.G., Obukhovskiy I.T. and Smirnov Yu.F. *Clusters as subsystems in light nuclei*. In: *Clustering Phenomena in Nuclei* edited by K. Wildermuth and P. Kramer. Branschweig: Vieweg. 1983. V.3. R.1.  
 21 Tilley D.R. et al. *Energy Levels of Light Nuclei  $A = 10$* . Nucl. Phys. 2004. V.A745. P.155.  
 22 Ajzenberg-Selove F. *Energy Levels of Light Nuclei  $A = 11, 12$* . Nucl. Phys. 1990. V.A506. P.1.  
 23 Kelley J.H. et al. *Energy Levels of Light Nuclei  $A = 11$* . Nucl. Phys. 2012. V.A880. P.88.  
 24 Angulo S. et al. *A compilation of charged-particle induced thermonuclear re-action rates*. Nucl. Phys. 1999. V.A656. P.3-183.

### Резюме

*С. Б. Дубовиченко, Д. Н. Адильбеков, А. С. Ткаченко*

(Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НЦКИТ НКА РК, г. Алматы)

#### РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ПРОТОНА НА $^{10}\text{B}$ . I

Рассмотрена возможность описания полных сечений радиационного  $p^{10}\text{B}$ -захвата в модифицированной потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями при астрофизических энергиях. Для определения наличия и количества запрещенных состояний в каждой парциальной волне использовалась классификация орбитальных состояний кластеров по схемам Юнга. Потенциал связанного состояния строился на основе описания характеристик основного состояния ядра  $^{11}\text{C}$ . Потенциалы непрерывного спектра согласованы с фазами упругого  $p^{10}\text{B}$ -рассеяния при энергиях до 1 МэВ. Используемая модель и методы построения потенциалов позволяют в целом правильно передать общее поведение экспериментальных сечений радиационного  $p^{10}\text{B}$ -захвата.

### Резюме

*С. Б. Дубовиченко, Д. Н. Әділбеков, А. С. Ткаченко*

(ҚР Ұлттық ғарыштық агенттігі «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы»  
В.Г.Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы)

#### $^{10}\text{B}$ -ДАҒЫ РАДИАЦИЯЛЫҚ ПРОТОН ҚАРМАУЫ. I

Астрофизикалық энергиялардағы модификацияланған потенциалдық кластерлік модельдің тыйым салынған күйлері бар радиациялық  $p^{10}\text{B}$ -қармауының толық қималарын сипаттау мүмкіндігі қарастырылған. Әрбір парциалды толқынның рұқсат етілмеген күйлерінде бар болуы және оның санын анықтау үшін Юнг схемалары бойынша орбиталық күйлері кластерлерінің классификациясы пайдаланылған. Байланған күйдің потенциалы  $^{11}\text{C}$  ядросының негізгі күйінің қасиеттерін сипаттау негізінде құрастырылған. 1 МэВ-ге дейін энергияларда үздіксіз спектр потенциалдары  $p^{10}\text{B}$  серпімді шашырау фазаларымен сәйкестендірілген. Қолданған модель және потенциал құру әдістері радиациялық  $p^{10}\text{B}$ -қармауының эксперименталды қимасының жалпы сипатын негізінен дұрыс көрсетуге мүмкіндік береді.

**Тірек сөздер:** ядралық физика, радиациялық қармау реакциясы,  $p^{10}\text{B}$ жүйесі.

### Summary

*S. B. Dubovichenko, D. N. Adilbekov, A. S. Tkachenko*

(V.G.Fessenkov Astrophysical institute «NCSRT» NSA RK, Almaty)

#### RADIATIVE PROTON CAPTURE ON $^{10}\text{B}$ . I

The possibility of description of radiative  $p^{10}\text{B}$  capture total cross sections within the modified potential cluster model with forbidden states at astrophysical energies was considered. To determine the availability and a number of forbidden states in every partial wave the classification of the orbital states of clusters according to the Young diagrams was used. The potential of bound state was constructed based on description of the characteristics of the ground state of  $^{11}\text{C}$  nucleus. The potentials of continuous spectrum are fitted to the phases of  $p^{10}\text{B}$  elastic scattering with the energies up to 1 MeV. Within the used model and the methods of constructing the potentials allow to convey the general behavior of the experimental cross sections of radiative  $p^{10}\text{B}$  capture.

*Поступила 04.2014 г.*