

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
СЕРИЯСЫ**



СЕРИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ



**PHYSICO-MATHEMATICAL
SERIES**

1 (305)

**ҚАҢТАР – АҚПАҢ 2016 ж.
ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ 2016 г.
JANUARY – FEBRUARY 2016**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

Мұтанов Г. М.

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчечков Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

Г. М. Мутанов

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

G. M. Mutanov,
academician of NAS RK

Editorial board:

A.A. Ashimov, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

I.N. Vishnievski, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.
ISSN 1991-346X

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 1, Number 305 (2016), 91 – 97

**RADIATIVE CAPTURE OF PROTON BY ^{16}O NUCLEUS
AT ASTROPHYSICAL ENERGIES****S. B. Dubovichenko^{1,2}, N. Burtebayev^{2,3}, A. V. Dzhazairov-Kakhramanov^{1,2},
A. S. Tkachenko^{1,3}, Zh. K. Kerimkulov², D. K. Alimov^{2,3}, M. Nasurrla^{2,3}**¹Fesenkov astrophysical institute JSC "NCSRT", Almaty, Kazakhstan,²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,³al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: nburtebayev@yandex.ru

Key words: astrophysical S factor, spectroscopic factor, orbital angular momentum, radiative capture, asymptotic normalization coefficient, cluster model, wave function.

Abstract. The possibility of describing the astrophysical S-factor of radiative $p^{16}\text{O}$ -capture to the ground state of ^{17}F nucleus was discussed within potential cluster model with forbidden states. It is shown that on the basis of the E1 transition from $^2P_{3/2}$ state of $p^{16}\text{O}$ -scattering on $^2D^{5/2}$ - ground state of ^{17}F the magnitude of the measured cross sections at astrophysical energies can be explained. The $^{16}\text{O}(p, g)^{17}\text{F}$ process considered in this article is included in CNO-cycle and is of considerable interest because it is a reaction with the latest 1p-shell nucleus to form ^{17}F , which is beyond this shell. Realistic and relatively simple in practical application models were used in current work, such as a potential cluster model, which is well proven in earlier studies of processes of radiative capture of protons by light nuclei starting from hydrogen. The calculations were carried out in comparison with the existing low-energy

experimental data, and as a result methods of constructing the interaction potentials between clusters were selected, which allow correctly reproduce experimental data for the total cross sections of radiative capture at energies from 0.5 to 2.5 MeV. These results may be useful for the calculations in region of astrophysics energies. For example, the results of astrophysical S-factor can be viewed as an assessment of their values, which is more realistic than extrapolation of experimental data because the theoretical model has a reasonable microscopic ground.

УДК 539.143/.144; 539.17

РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ПРОТОНА ЯДРОМ ^{16}O ПРИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЭНЕРГИЯХ

С. Б. Дубовиченко^{1,2}, Н. Т. Буртебаев^{2,3}, А. В. Джазаиров-Кахраманов^{1,2},
А. С. Ткаченко^{1,3}, Ж. К. Керимкулов², Д. К. Алимов², М. Насурлла^{2,3}

¹Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова "НЦКИТ" АКК МИиР, Алматы, Казахстан,

²РГП Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан,

³КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: астрофизический S фактор, спектроскопический фактор, орбитальный момент, радиационный захват, асимптотический нормировочный коэффициент, кластерная модель, волновая функция.

Аннотация. В рамках потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями рассмотрена возможность описания астрофизического S-фактора радиационного $p^{16}\text{O}$ -захвата на основное состояние ядра ^{17}F . Показано, что на основе E1-перехода из $^2P_{3/2}$ -состояния $p^{16}\text{O}$ -рассеяния на $^2D^{5/2}$ -основное состояние ^{17}F удастся объяснить величину измеренных сечений при астрофизических энергиях. Рассмотренный в статье процесс $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ входит в CNO-цикл и представляет значительный интерес, поскольку является реакцией на последнем ядре 1p-оболочки с образованием ^{17}F , выходящим за ее пределы. В работе были использованы реалистичные и сравнительно простые в практическом применении модели, такие, как потенциальная кластерная модель, которая неплохо зарекомендовала себя при более ранних исследованиях процессов радиационного захвата протонов на легких ядрах, начиная от водорода. Расчеты проводились в сравнении с имеющимися низкоэнергетическими экспериментальными данными, и в результате были отобраны методы построения потенциалов взаимодействия кластеров, которые позволяют в целом правильно воспроизвести экспериментальные данные для полных сечений радиационного захвата при энергиях от 0.5 до 2.5 МэВ. Эти результаты могут быть полезны для расчетов и в области астрофизических энергий. Например, результаты по астрофизическим S-факторам могут рассматриваться как оценка их значений, которая более реалистична, чем экстраполяция экспериментальных данных, поскольку использованная теоретическая модель, имеет вполне разумное микроскопическое обоснование.

Введение. Ранее в работах [1-8] на основе МПКМ нами была показана возможность описания астрофизических S-факторов или полных сечений радиационного захвата для 27-ми процессов, а именно, $p^2\text{H}$, $n^2\text{H}$, $p^3\text{H}$, $p^6\text{Li}$, $n^6\text{Li}$, $p^7\text{Li}$, $n^7\text{Li}$, $p^9\text{Be}$, $n^9\text{Be}$, $p^{10}\text{B}$, $n^{10}\text{B}$, $p^{11}\text{B}$, $n^{11}\text{B}$, $p^{12}\text{C}$, $n^{12}\text{C}$, $p^{13}\text{C}$, $n^{13}\text{C}$, $p^{14}\text{C}$, $n^{14}\text{C}$, $n^{14}\text{N}$, $p^{15}\text{N}$, $n^{15}\text{N}$, $n^{16}\text{O}$ и $^2\text{H}^4\text{He}$, $^3\text{He}^4\text{He}$, $^3\text{H}^4\text{He}$, $^4\text{He}^{12}\text{C}$ при тепловых для нейтронов и астрофизических энергиях для заряженных частиц. Продолжая дальнейший анализ термоядерных реакций в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели с запрещенными состояниями [7, 8] рассмотрим процесс $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$, который входит в CNO-цикл [7] и представляет дополнительный интерес, поскольку является реакцией на последнем ядре 1p-оболочки с образованием ^{17}F , выходящим за ее пределы. Как обычно [7, 8], предполагаем, что связанное состояние (СС) ядра ^{17}F обусловлено кластерным каналом начальных частиц, которые участвуют в реакции.

1. Классификация состояний кластеров. Переходя к анализу полных сечений $p^{16}\text{O}$ -захвата, заметим, что классификация орбитальных состояний для $p^{16}\text{O}$ -системы по схемам Юнга была выполнена нами в работе [8]. Поэтому в потенциале $^2S_{1/2}$ -волны, которая соответствует первому возбужденному состоянию (ПВС) ядра ^{17}F при 0.4953 МэВ с $J^\pi = 1/2^+$ относительно основного состояния (ОС) или -0.1052 МэВ относительно порога $p^{16}\text{O}$ -канала и состояниям рассеяния этих частиц, имеется запрещенное связанное состояние (ЗС). 2P -волны рассеяния связанных ЗС не содержат, а разрешенное состояние (РС) с {44441} может находиться в непрерывном спектре.

Основное состояние ядра ^{17}F с $J^\pi, T = 5/2^+, 1/2$ в $p^{16}\text{O}$ -канале, которое находится при энергии -0.6005 МэВ [9] относительно порога $p^{16}\text{O}$ -канала, является $^2D_{5/2}$ -волной и также не содержит запрещенных СС. В результате на основе данных о спектрах ^{17}F [9] можно считать, что $E1$ -захват возможен из 2P -волны рассеяния с потенциалом без ЗС на $^2D_{5/2}$ ОС без ЗС $^2P_{3/2} \rightarrow ^2D_{5/2}$.

2. Асимптотические константы $p^{16}\text{O}$ -канала. Данные по асимптотическим нормировочным коэффициентам A_{NC} (АНК) приведены, например, в работе [10]. Здесь мы также будем использовать известное соотношение

$$A_{NC}^2 = S \times C^2, \quad (1)$$

где S – спектроскопический фактор, C – асимптотическая константа в $\text{Фм}^{-1/2}$, которая связана с безразмерной АК [11] C_w , используемой нами далее, следующим образом: $C = \sqrt{2k_0} C_w$, а безразмерная величина C_w определяется выражением [11]

$$\chi_L(r) = \sqrt{2k_0} C_w W_{-\eta L+1/2}(2k_0 r), \quad (2)$$

где $\chi_L(r)$ – численная волновая функция связанного состояния, получаемая из решения радиального уравнения Шредингера и нормированная на единицу, $W_{-\eta L+1/2}$ – функция Уиттекера связанного состояния, определяющая асимптотическое поведение волновой функции и являющаяся решением того же уравнения без ядерного потенциала, k_0 – волновое число, обусловленное канальной энергией E связи $k_0 = \sqrt{2\mu \frac{m_0}{\hbar^2} E}$, η – кулоновский параметр и L – орбитальный момент связанного состояния. Здесь μ – приведенная масса частиц входного канала, а константа \hbar^2 / m_0 принималась равной 41.4686 МэВ Фм^2 , где m_0 – атомная единица массы (а.е.м.).

В дальнейших расчетах использовался радиус ОС ^{16}O равный $2.710(15)$ Фм из работы [9]. Для ОС ядра ^{17}F данные по радиусам отсутствуют [9,12], но они, по-видимому, должны не сильно отличаться от соответствующих данных для ^{16}O . Зарядовый радиус протона и его массовый радиус принимались равными $0.8775(51)$ Фм [13]. Во всех расчетах для масс ядра и протона использовались точные значения: $m(^{16}\text{O}) = 15.994915$ а.е.м. [12] и $m(p) = 1.007276466812$ а.е.м. [13].

Далее мы будем рассматривать радиационный $p^{16}\text{O}$ -захват на ОС ядра ^{17}F , которое, как уже говорилось, является $^2D_{5/2}$ -уровнем и его потенциал должен правильно описывать АК. Для того чтобы извлечь эту константу из имеющихся экспериментальных данных, рассмотрим сведения о спектроскопических факторах S и асимптотических нормировочных коэффициентах (АНК) A_{NC} . Найденные нами результаты для A_{NC} представлены в таблице 1. Кроме того, удалось найти сравнительно много данных для спектроскопических факторов $p^{16}\text{O}$ -канала ядра ^{17}F , поэтому приведем их значения в виде отдельной таблицы 2.

Таблица 1 – Данные по A_{NC} ядра ^{17}F в $p^{16}\text{O}$ -канале и астрофизическим S -факторам $p^{16}\text{O}$ -захвата

Значение A_{NC} в $\text{Фм}^{-1/2}$ для ОС	$S(0)$ кэВ б для ОС	Литература
1.59	–	[10]
1.04(5)	0.40(4)	[14]
1.04(5)	0.40(4)	[15]
1.04(5)	0.317(25)	[16]
0.97-1.09	–	[17]
0.97-1.59	0.29-0.44	Интервал значений
1.28(31)	0.37(7)	Средняя A_{NC} по интервалу

Таблица 2 – Данные по спектроскопическим факторам S ядра ^{17}F в $p^{16}\text{O}$ -канале

S для ОС	Литература
0.878	[10]
0.90(15)	Результаты работы [18]
0.88	Приведено в [18] со ссылкой на другие работы
0.94	[9]
0.88-1.05	Интервал значений
0.97(9)	Средний \bar{S} по интервалу

Как видно из таблицы 2, средние величины спектрофакторов близки к единице, поэтому для простоты будем считать их равными 1. Далее на основе выражения (1) для ОС находим $\bar{A}_{\text{NC}} / \sqrt{\bar{S}} = \bar{C} = 1.28 \text{ Фм}^{-1/2}$, а поскольку $\sqrt{2k_0} = 0.57$, то безразмерная АК, определяемая как $\bar{C}_w = \bar{C} / \sqrt{2k_0}$, оказывается равна $\bar{C}_w = 2.25$. Однако интервал значений A_{NC} настолько велик (см. таблицу 1), что C_w может находиться в пределах 1.7–2.8.

3. Потенциалы взаимодействия. Для выполнения расчетов радиационного захвата в рамках МПКМ требуется знать потенциалы упругого $p^{16}\text{O}$ -рассеяния в 2P -волне, а также взаимодействие $^2D_{5/2}$ -основного состояния ядра ^{17}F . Именно для перехода на это СС имеются экспериментальные данные для полных сечений радиационного захвата, измеренные в работах [19,20] – рассмотрим далее $E1$ -переход только на ОС. Для $^2D_{5/2}$ -потенциала ОС ядра ^{17}F в $p^{16}\text{O}$ -канале без ЗС найдены параметры

$$V_D = -85.632465 \text{ МэВ}, \gamma_D = 0.12 \text{ Фм}^{-2}, \quad (3)$$

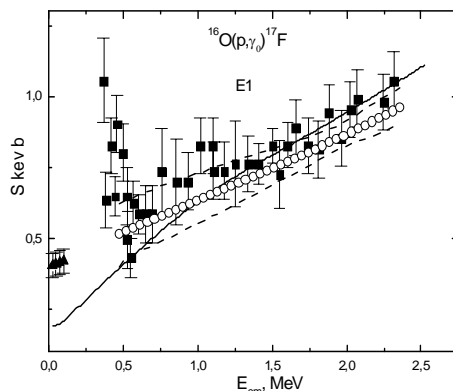
которые позволяют получить энергию связи -0.600500 МэВ при точности 10^{-6} МэВ , зарядовый радиус 2.82 Фм , массовый радиус 2.77 Фм , а АК на интервале расстояний $7\text{--}28 \text{ Фм}$ оказалась равна $C_w = 1.68(1)$, что находится на нижнем пределе приведенного выше интервала для АК. Фаза рассеяния такого потенциала плавно спадает от нуля и при 2.5 МэВ достигает величины примерно -2° .

Поскольку в спектрах ядра ^{17}F при энергии ниже 2.5 МэВ нет резонансов отрицательной четности, будем считать, что 2P -потенциалы должны приводить в этой области энергий практически к нулевым фазам рассеяния, а поскольку они не содержат связанных ЗС, их глубина может просто иметь нулевое значение.

4. Полные сечения захвата. Далее на основе МПКМ [7, 8] и учетом экспериментальных данных [19, 20] были рассмотрены полные сечения $p^{16}\text{O}$ -захвата в области энергий до 2.5 МэВ . Результаты наших расчетов для $E1$ -переходов на ОС с потенциалом (3) из 2P -волн рассеяния с потенциалами нулевой глубины в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке непрерывной кривой. Черными квадратами показаны результаты измерений полных сечений в области от 0.4 до 2.5 МэВ из работы [19], а кружками данные [20] при $0.5\text{--}2.5 \text{ МэВ}$. Двумя штриховыми линиями на рисунке показан коридор ошибок экспериментальных данных из работы [20]. Треугольниками показаны результаты работы [14], которые приводят к S -фактору при нулевой энергии 0.4 кэВ б .

В наших расчетах получено 0.19 кэВ б при энергии 30 кэВ , которую можно считать нулевой энергией, поскольку величина S -фактора при энергиях $30\text{--}100 \text{ кэВ}$ изменяется от 0.19 до 0.21 кэВ б . Расчетная кривая при энергиях $0.5\text{--}2.5 \text{ МэВ}$ находится в пределах имеющихся экспериментальных ошибок работ [19, 20]. Однако при энергии ниже $0.5\text{--}1.0 \text{ МэВ}$ она спадает несколько быстрее имеющейся тенденции, которая определяется экспериментальными данными [20]. Тем не менее, из рисунка видно, что проведенные расчеты $E1$ -перехода вполне приемлемо передают результаты экспериментальных измерений астрофизического S -фактора из работ [19, 20] на ОС ядра ^{17}F ,

находясь в области экспериментальных ошибок. Причем потенциалы 2P -волн рассеяния, которые не содержат ЗС, строились на основе простых предположений о согласованности таких потенциалов с фазами рассеяния, равными, в данном случае, нулю. Потенциал ${}^2D_{5/2}$ -основного состояния ${}^{17}\text{F}$ в $p^{16}\text{O}$ -канале был предварительно согласован с основными характеристиками этого ядра, а именно, энергией связи и АК в $p^{16}\text{O}$ -канале.



Полные сечения $p^{16}\text{O}$ -захвата на ОС ядра ${}^{17}\text{F}$. Экспериментальные данные: квадраты – [19], кружки – [20]. Кривые описаны в тексте, треугольники – результаты работы [14]

Заключение. Таким образом, рассмотренные выше методы построения потенциалов взаимодействия кластеров позволяют в целом правильно воспроизвести экспериментальные данные для полных сечений радиационного захвата при энергиях от 0.5 МэВ до 2.5 МэВ. Получен потенциал ${}^2D_{5/2}$ -волны рассеяния без ЗС с близкой к нулю фазой рассеяния, который используется для ОС и описывает его основные характеристики.

В заключение автор выражает благодарность проф. Ярмухамедову Р. за исключительно полезное обсуждение отдельных частей данной работы.

Работа выполнена в рамках гранта 0047/ГФЗ "Исследование некоторых основных и дополнительных термоядерных процессов CNO цикла на Солнце и звездах" Министерства образования и науки РК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Examination of astrophysical S-factors of $p^2\text{H}$, $p^6\text{Li}$, $p^7\text{Li}$, $p^{12}\text{C}$ and $p^{13}\text{C}$ radiative capture reactions // *Int. Jour. Mod. Phys.* 2012. V.E21. №3. P.1250039(1-44); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Afanasyeva N.V. Radiative neutron capture on ${}^9\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{15}\text{N}$ and ${}^{16}\text{O}$ at thermal and astrophysical energies // *Int. Jour. Mod. Phys.* 2013. V.E22. №10. P.1350075(1-53); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Burkova N.A. The radiative neutron capture on ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ and ${}^{13}\text{C}$ at Astrophysical energies // *Int. Jour. Mod. Phys.* 2013. V.E22. №5. P.1350028 (1-52); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Neutron radiative capture by ${}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}$ and proton radiative capture by ${}^{11}\text{B}$, ${}^{14}\text{C}$ and ${}^{15}\text{N}$ at thermal and astrophysical energies // *Int. Jour. Mod. Phys.* 2014. V.E23. №8. P.1430012(1-55)
- [2] Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factor of the radiative $p^2\text{H}$ capture // *Euro. Phys. Jour.* 2009. V.A39. №2. P.139-143; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Radiative $n^7\text{Li}$ capture at Astrophysical Energies // *Annalen der Physik* 2012. V.524. №12. P.850-861; Dubovichenko S.B., Burkova N.A. Radiative $n^{11}\text{B}$ capture at astrophysical energies // *Mod. Phys. Lett.* 2014. V.A29. №7. P.1450036(1-14); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Burtebaev N., Alimov D. Radiative $p^{14}\text{C}$ capture at astrophysical energies // *Mod. Phys. Lett.* 2014. V.A29. №24. P.1450125(1-16)
- [3] 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, №9, С. 1573 – 1584; Дубовиченко С.Б. Астрофизический S - фактор радиационного захвата протонов на ядрах ${}^3\text{H}$ и ${}^7\text{Li}$ // *ЯФ* 2011, Т.74, №3, С.378-390; Дубовиченко С.Б. Астрофизический S-фактор радиационного $p^{12}\text{C}$ захвата // *ЯФ* 2012, Т.75, №2, С.196-203; Дубовиченко С.Б. Радиационный захват нейтронов на ядрах ${}^2\text{H}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{14}\text{C}$ и ${}^{14}\text{N}$ при астрофизических энергиях // *ЯФ* 2013, Т.76, №7, С.894-913; Дубовиченко С.Б. Захват нейтрона на возбужденные состояния ядра ${}^9\text{Be}$ с учетом резонанса при 622 кэВ // *ЖЭТФ* 2013, Т.144, №4(10), С.748-755.
- [4] Дубовиченко С.Б. Радиационный $p^2\text{H}$ захвата при низких энергиях // *Изв. ВУЗов Физика* 2012, Т.55, №2, С.13-19; Дубовиченко С.Б. Астрофизический S - фактор реакции $p^2\text{H}$ захвата и вклад M1 перехода // *Изв. ВУЗов Физика* 2011, №2, С.28-34; Дубовиченко С.Б., Джазаиров-кахраманов А.В. Астрофизический S - фактор радиационного $p^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N}\gamma$ захвата // *Изв. ВУЗов Физика* 2009, №8, С.58-64.

- [5] Дубовиченко С.Б., Узиков Ю.Н. Астрофизические S - факторы легких атомных ядер // ЭЧАЯ 2011.Т.42. №2. С.478-577; Дубовиченко С.Б. Захват нейтронов легкими ядрами при астрофизических энергиях // ЭЧАЯ 2013. Т.44. №5. С.1353-1624.
- [6] Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Neutron radiative capture by ^2H , ^6Li , ^7Li , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C and ^{14}N at astrophysical energies // The Universe Evolution. Astrophysical and Nuclear Aspects. New-York, NOVA Sci. Publ. 2013. P.49-108; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factors of proton radiative capture in thermonuclear reactions in the Stars and the Universe // The Big Bang: Theory, Assumptions and Problems. New-York, NOVA Sci. Publ. 2012. P.1-60.
- [7] Dubovichenko S.B. Thermonuclear processes of the Universe. New-York, NOVA Sci. Publ., 2012. 194p.; https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=31125.
- [8] Dubovichenko S.B. Primordial nucleosynthesis of the Universe. Fourth Edit., revised and expanded. Germany. Lambert Academy Publ. 2014. 668p. (Russian).
- [9] Tilley D.R., Weller H.R. and Cheves C.M. Energy Levels of Light Nuclei A = 16,17 // Nucl. Phys. 1993. V.A564. P.1-183.
- [10] Barbieri C., Jennings B.K. Study of the $^{16}\text{O}(p,\gamma)$ Reaction at Astrophysical Energies // Nucl. Phys. 2005. V.A758. P.395c-398c.
- [11] Plattner G.R., Viollier R.D. Coupling constants of commonly used nuclear probes // Nucl. Phys. 1981. V.A365. P.8-12.
- [12] <http://cdfc.sinp.msu.ru/cgi-bin/muh/radcard.cgi?z=9&a=17&td=123456>
- [13] http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mud|search_for=atomnuc!
- [14] Артемов С.В. и др. Определение ядерных вершинных констант для распадов $^3\text{He} \rightarrow d + p$ и $^{17}\text{F} \rightarrow ^{16}\text{O} + p$ // Изв. РАН Сер. Физ. 2009. Т. 73. С.176-181.
- [15] Gagliardi C.A. et al. Tests of transfer reaction determinations of astrophysical S-factors // Phys. Rev. 1999. V.C59. P.1149-1153.
- [16] Iliadis C. et al. New reaction rate for $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ and its influence on the oxygen isotopic ratios in massive AGB stars // Phys. Rev. 2008. V.C77. P.045802.
- [17] Baye D., Descouvemont P., and Hesse M. Microscopic analysis of extranuclear capture on the $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ reaction // Phys. Rev. 1998. V.C58. P.545-553.
- [18] Rolfs C. Spectroscopic factors from radiative capture reactions // Nucl. Phys. 1973. V.A217. P.29-70.
- [19] Morlock R. et al. Halo Properties of the First $1/2^+$ State in ^{17}F from the $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ Reaction // Phys. Rev.Lett. 1997. V.79. P.3837-3840.
- [20] Mohr P., Iliadis C. Recommended cross – section of the $^{16}\text{O}(p,\square)^{17}\text{F}$ reaction below 2.5 MeV: A potential tool for quantitative analysis and depth profiling of oxygen // NIM 2012. V.A688. P.62-65.

REFERENCES

- [1] Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Examination of astrophysical S-factors of $p^2\text{H}$, $p^6\text{Li}$, $p^7\text{Li}$, $p^{12}\text{C}$ and $p^{13}\text{C}$ radiative capture reactions // Int. Jour. Mod. Phys. 2012. V.E21. №3. P.1250039(1-44); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Afanasyeva N.V. Radiative neutron capture on ^9Be , ^{14}C , ^{14}N , ^{15}N and ^{16}O at thermal and astrophysical energies // Int. Jour. Mod. Phys. 2013. V.E22. №10. P.1350075(1-53); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Burkova N.A. The radiative neutron capture on ^2H , ^6Li , ^7Li , ^{12}C and ^{13}C at Astrophysical energies // Int. Jour. Mod. Phys. 2013. V.E22. №5. P.1350028 (1-52); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Neutron radiative capture by ^{10}B , ^{11}B and proton radiative capture by ^{11}B , ^{14}C and ^{15}N at thermal and astrophysical energies // Int. Jour. Mod. Phys. 2014. V.E23. №8. P.1430012(1-55)
- [2] Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factor of the radiative $p^2\text{H}$ capture // Euro. Phys. Jour. 2009. V.A39. №2. P.139-143; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Radiative $n^7\text{Li}$ capture at Astrophysical Energies // Annalen der Physik 2012. V.524. №12. P.850-861; Dubovichenko S.B., Burkova N.A. Radiative $n^{11}\text{B}$ capture at astrophysical energies // Mod. Phys. Lett. 2014. V.A29. №7. P.1450036(1-14); Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Burtebaev N., Alimov D. Radiative $p^{14}\text{C}$ capture at astrophysical energies // Mod. Phys. Lett. 2014. V.A29. №24. P.1450125(1-16)
- [3] Dubovichenko S.B. The astrophysical S - factors $3\text{Ne}4\text{Ne}$ radiation, and $3\text{N}4\text{Ne}$ $2\text{N}4\text{Ne}$ capture // NF 2010 V.73, №9, p. 1573 - 1584; Dubovichenko S.B. The astrophysical S - factor of the radiative capture of protons by nuclei 3H , and 7Li // NF 2011. V.74. №3, p.378-390; Dubovichenko S.B. Astrophysical S-factor of radiative capture $p^{12}\text{C}$ // NF 2012. V.75. №2. p.196-203; Dubovichenko S.B. Radiative capture of neutrons in nuclei 2H , 7Li , ^{14}C and ^{14}N at astrophysical energies // NF 2013. V.76. №7. p.894-913; Dubovichenko S.B. Neutron capture to the excited state of the nucleus 9Be given resonance at 622 keV // Zh 2013 V.144. №4 (10). p.748-755.
- [4] Dubovichenko S.B. Radiation $n^2\text{H}$ capture at low energies // Math. Universities Physics 2012. V.55. №2. p.13-19; Dubovichenko S.B. The astrophysical S - factor $r^{2\text{N}}$ capture reaction and the contribution of M1 transition // Math. Universities Physics 2011. №2. p.28-34; Dubovichenko S.B., Zhazairov-Kahramanov A.V. The astrophysical S - factor of radiative capture $r^{12\text{S}}\square^{13\text{N}}\square$ // Math. Universities Physics 2009. №8. p.58-64.
- [5] Dubovichenko S.B., Uzikov Y.N. The astrophysical S - factors of light atomic nuclei Nuclei // 2011.V.42. №2. p.478-577; Dubovichenko S.B. Neutron capture by light nuclei at energies of astrophysical // Nuclei 2013. V.44. №5. p.1353-1624.
- [6] Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Neutron radiative capture by ^2H , ^6Li , ^7Li , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C and ^{14}N at astrophysical energies // The Universe Evolution. Astrophysical and Nuclear Aspects. New-York, NOVA Sci. Publ. 2013. P.49-108; Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V. Astrophysical S-factors of proton radiative capture in thermonuclear

reactions in the Stars and the Universe // The Big Bang: Theory, Assumptions and Problems. New-York, NOVA Sci. Publ. 2012. P.1-60.

[7] Dubovichenko S.B. Thermonuclear processes of the Universe. New-York, NOVA Sci. Publ., 2012. 194p.; https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=31125.

[8] Dubovichenko S.B. Primordial nucleosynthesis of the Universe. Fourth Edit., revised and expanded. Germany. Lambert Academy Publ. 2014. 668p. (Russian).

[9] Tilley D.R., Weller H.R. and Cheves C.M. Energy Levels of Light Nuclei $A = 16, 17$ // Nucl. Phys. 1993. V.A564. P.1-183.

[10] Barbieri C., Jennings B.K. Study of the $^{16}\text{O}(p,\gamma)$ Reaction at Astrophysical Energies // Nucl. Phys. 2005. V.A758. P.395c-398c.

[11] Plattner G.R., Viollier R.D. Coupling constants of commonly used nuclear probes // Nucl. Phys. 1981. V.A365. P.8-12.

[12] <http://cdfc.sinp.msu.ru/cgi-bin/muh/radcard.cgi?z=9&a=17&td=123456>

[13] http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mud|search_for=atomnuc!

[14] Artemov S.V., et al. Determination of the nuclear vertex constants for the decays of $3\text{He} \rightarrow d + p$ and $^{17}\text{F} \rightarrow ^{16}\text{O} + p$ // Math. RAS Ser. Def. 2009. V. 73. p.176-181.

[15] Gagliardi C.A. et al. Tests of transfer reaction determinations of astrophysical S-factors // Phys. Rev. 1999. V.C59. P.1149-1153.

[16] Iliadis C. et al. New reaction rate for $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ and its influence on the oxygen isotopic ratios in massive AGB stars // Phys. Rev. 2008. V.C77. P.045802.

[17] Baye D., Descouvemont P., and Hesse M. Microscopic analysis of extranuclear capture on the $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ reaction // Phys. Rev. 1998. V.C58. P.545-553.

[18] Rolfs C. Spectroscopic factors from radiative capture reactions // Nucl. Phys. 1973. V.A217. P.29-70.

[19] Morlock R. et al. Halo Properties of the First $1/2^+$ State in ^{17}F from the $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ Reaction // Phys. Rev.Lett. 1997. V.79. P.3837-3840.

[20] Mohr P., Iliadis C. Recommended cross – section of the $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ reaction below 2.5 MeV: A potential tool for quantitative analysis and depth profiling of oxygen // NIM 2012. V.A688. P.62-65.

АСТРОФИЗИКАЛЫҚ ЭНЕРГИЯЛАРДА ^{16}O ЯДРОЛАРЫНА ПРОТОНДАРДЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ҚАРПЫЛУЫ

С. Б. Дубовиченко^{1,2}, Н. Т. Буртебаев^{2,3}, А. В. Джазайров-Кахраманов^{1,2},
А. С. Ткаченко^{1,3}, Ж. К. Керимкулов², Д. К. Алимов², М. Насурлла^{2,3}

¹"НЦКИТ" АКК МИиР В.Г. Фесенкова атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,

²РМК, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан,

³эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: астрофизикалық S фактор, спектроскопиялық фактор, орбиталық момент, радиациялық қарпу, асимптотикалық нормалау коэффициенті, кластерлік үлгі, толқындық функция.

Аннотация. ^{17}F ядросының негізгі күйіне $p^{16}\text{O}$ радиациялық протон қарпуының астрофизикалық S-факторының тыйым салынған күйлерін потенциалдық кластерлік үлгісімен қарастыру мүмкіндігі анықталды. Астрофизикалық энергияларда $^2P_{3/2}$ күйінен $p^{16}\text{O}$ шашырауын E1 ауысуының негізінде ^{17}F $^2D^{5/2}$ негізгі күйіне өтуі өлшенген қималардың мәндерін түсіндіруге мүмкіндік беретінін көрсетті. Мақалада қарастырылған $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}$ процесі CNO-циклына кіретіндіктен айтарлықтай қызығушылық тудырады, себебі 1р-қабықшасының соңғы ядросында ^{17}F ядросының құрылу реакциясы өтеді. Бұл жұмыста протонның жеңіл ядроларда, сутегіден бастап радиациялық қарпуының алғашқы зерттеулерінде өзін жақсы көрсеткен, тәжірибелік қолданыста реалистік және біршама қарапайым үлгілер, соның ішінде потенциалды кластерлік үлгі қолданылды. 0.5 МэВ-тан 2.5 МэВ-қа – дейінгі аралықта тәжірибелік мәліметтердің радиациялық қарпуының толық қималарын дұрыс өндіруде кластер потенциалдарының әрекеттесу әдістер құрылымының есептеулері, қолда бар төмен энергетикалық мәліметтерімен салыстыра жүргізілді. Бұл нәтижелер астрофизикалық энергия төңірегінде өткізілетін есептеулерге пайдалы болуы мүмкін. Мысалы, тәжірибелік мәліметтердің экстрополяциясына қарағанда, астрофизикалық S-фактор есептеулерін олардың мәні ретінде қарастыруға болады, себебі қолданылған теориялық үлгінің орынды микроскопиялық негіздемесі бар.

Поступила 13.01.2016 г.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 16.01.2016.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
10,7 п.л. Тираж 300. Заказ 1.