

Секция 2

***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ
РЕАКЦИЙ***

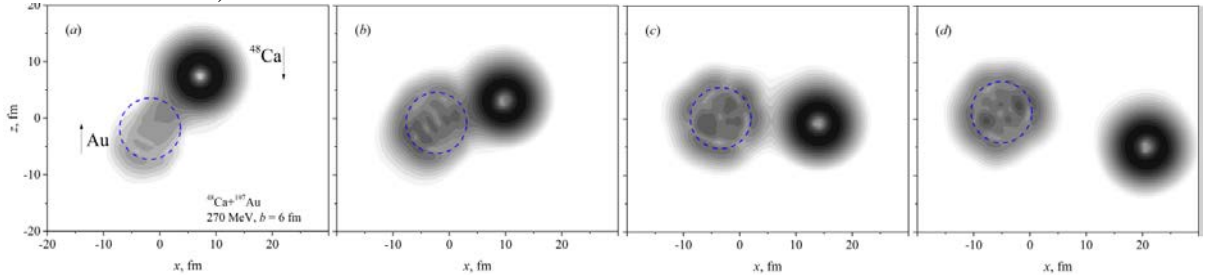
ОПИСАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ПЕРЕДАЧ В РЕАКЦИИ $^{48}\text{Ca}+^{197}\text{Au}$ ПРИ ЭНЕРГИИ 270 МэВ В РАМКАХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОДХОДА

А. К. Ажибеков

141980 Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6
E-mail: azhibekoaidos@gmail.com

Реакции нуклонных передач являются важной областью физики тяжелых ионов, поскольку открывают возможности для синтеза новых ядер. Реакции передачи нейтронов являются одним из методов получения нейтронно-избыточных изотопов [1].

В данной работе представлен теоретический анализ механизма передачи нейтронов для реакции $^{48}\text{Ca}+^{197}\text{Au}$ при энергии 270 МэВ. Для описания процессов передачи нейтронов использовалось численное решение нестационарного уравнения Шредингера [2]. Вычислена эволюция волновых функций нейтронов верхних занятых одночастичных уровней ($1f_{7/2}$ (см. рисунок), $1d_{3/2+}$, $2s_{1/2+}$) ядра ^{48}Ca и ($3p_{3/2}$, $1i_{13/2+}$) уровней ядра ^{197}Au . Определены вероятности заселения изначально незанятых одночастичных нейтронных уровней ядра ^{197}Au (с образованием изотопов $^{198-205}\text{Au}$) и вероятности потери нейтронов ядром ^{197}Au (с образованием изотопов $^{192-196}\text{Au}$).



Эволюция плотности вероятности нейтрона $1f_{7/2}$ -ядра ^{48}Ca при касательном столкновении ядер $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$. Энергия 270 МэВ, прицельный параметр $b = 6$ фм. Ход времени соответствует направлению слева направо

Список литературы

[1] Nucleosynthesis in multinucleon transfer reactions / S. Heinz, H. M. Devaraja // Eur. Phys. J. A, Vol. 58. – 2022. – Art. 114.

[2] Time-Dependent Description of Reactions with Weakly Bound ^{11}Li and ^{11}Be Nuclei // Azhibekov, A.K., Samarin // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 86. – 2022. – P. 1092-1098.

TIME-DEPENDENT DESCRIPTION OF NEUTRON TRANSFERS IN THE $^{48}\text{Ca}+^{197}\text{Au}$ REACTION AT ENERGY OF 270 MeV

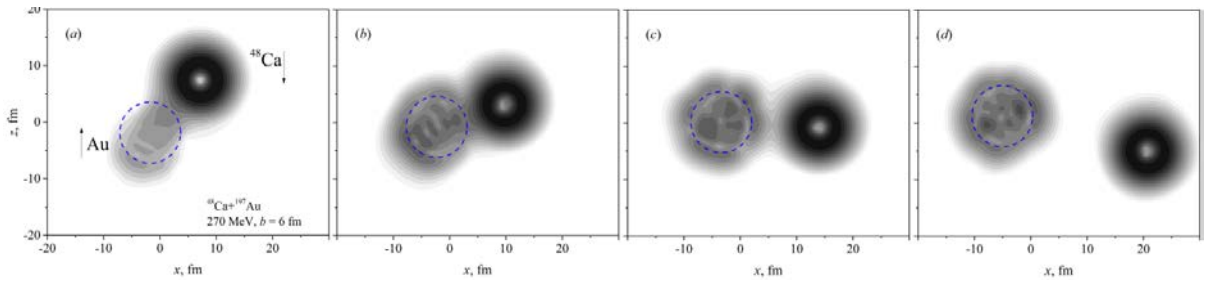
А. К. Azhibekov

Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
E-mail: azhibekoaidos@gmail.com

The study of nucleon transfer reactions is an important area of heavy ion physics because these reactions provide the possibilities for the synthesis of new nuclei. Multi-neutron transfer reactions are one of the tools to access neutron-rich isotopes [1]. Its advantage is the low excitation energy of the formed reaction products leading to their higher survival probability.

This work presents the theoretical analysis of neutron transfer mechanism for the $^{48}\text{Ca}+^{197}\text{Au}$ reaction at energy of 270 MeV. Numerical solution of the time-dependent Schrödinger equation is used for studying neutron transfer processes [2]. The evolution of the wave function for the neutrons from the upper occupied ($1f_{7/2}$ (see Figure), $1d_{3/2+}$, $2s_{1/2+}$) single-particle levels of the ^{48}Ca and ($3p_{3/2}$, $1i_{13/2+}$)

levels of the ^{197}Au is determined. The dynamics of neutron transfer process is described and the probabilities of occupation of initially unoccupied single-particle neutron levels of the ^{197}Au nucleus (with formation of $^{198-205}\text{Au}$) and the probabilities of the formation of $^{192-196}\text{Au}$ are determined.



Evolution of the probability density of a neutron from the outer single-particle neutron level $1f_{7/2}$ of the ^{48}Ca nucleus in the grazing collision $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ at energy 270 MeV and impact parameter $b = 6$ fm. The course of time corresponds to the direction from left to right

References

[1] Nucleosynthesis in multinucleon transfer reactions / S. Heinz, H. M. Devaraja // Eur. Phys. J. A, Vol. 58. – 2022. – Art. 114.

[2] Time-Dependent Description of Reactions with Weakly Bound ^{11}Li and ^{11}Be Nuclei // Azhibekov, A.K., Samarin // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 86. – 2022. – P. 1092–1098.

ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНАЯ СИСТЕМА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ NDX2

А. В. Алексеев, Н. А. Крутько

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
пр. Мира, д. 37, г. Саров, Нижегородская обл., 607188.

Факс: 83130 29494 E-mail: staff@vniief.ru

Представлено описание информационно-справочной системы ядерно-физических данных NDX2 в составе программного комплекса константного обеспечения GROUND2. Программа NDX2 представляет собой оболочку-клиент БД CPND, обеспечивающую обзор всех содержащихся в ней данных как единой древовидной логической структуры, объединяющей все классы ядерно-физических данных.

В состав БД CPND включены:

- скалярные интегральные характеристики ядер (массы и энергии реакций) AME2016;
- данные по уровням возбуждения и переходам ядер ENSDF;
- оценённые данные из библиотек в формате ENDF/B;
- экспериментальные данные EXFOR.

Программа NDX2 обладает развитым аппаратом табличного и графического представления всех имеющихся классов ядерно-физических данных, интерпретирующим опубликованные форматы их источников. В программу NDX2 включена также базовая функциональность вычислительной обработки оценённых ядерных данных, наиболее востребованная на практике для экспертного анализа и выработки рекомендаций по их использованию в расчетах ядерно-физических характеристик.

A. V. Alekseev, N. A. Krutko

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics»
37 Mir Ave., Sarov, Nizhny Novgorod reg., 607188.
Fax: 83130 29494 E-mail: staff@vniief.ru

The report describes the NDX2 information and reference (I&R) system of nuclear physics data within the GROUND2 software system of constants. The NDX2 program is the SSH client of the CPND database (DB) providing the representation of the data contained in it as a single tree-like structure uniting all classes of nuclear physics data.

CPND DB includes:

- scalar integral characteristics of nuclei (masses and reaction energies), AME2016;
- data on the excitation levels and transitions of nuclei, ENSDF;
- evaluated library data in ENDF/B format; and
- experimental data, EXFOR.

The NDX2 program has a well-developed mechanism of representing all available classes of nuclear physics data in tabular and graphical forms, which interprets the published formats of the data sources. The NDX2 program also includes the basic functionality for computationally processing the evaluated nuclear data, which is commonly used in practice for the expert analysis of such data and making recommendations on how to use this data to calculate the physical parameters of atomic nuclei.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИХ НОРМИРОВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПУТЕМ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДОЛЖЕНИЯ R -МАТРИЦЫ

Л. Д. Блохинцев, Д. А. Савин

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
e-mail: blokh@srd.sinp.msu.ru

Асимптотические нормировочные коэффициенты (АНК) определяют асимптотическое поведение ядерных волновых функций в бинарных каналах на расстояниях между фрагментами, превышающих радиус ядерного взаимодействия [1]. В терминах АНК параметризуются сечения периферических ядерных реакций. АНК особенно важны для ядерной астрофизики. Они определяют общую нормировку сечений радиационного захвата при астрофизических энергиях [2]. В отличие от энергий связи АНК не могут быть непосредственно измерены. Для их определения на основе экспериментальных данных требуется проводить определенный теоретический анализ. В частности, значения АНК можно извлечь путем сравнения абсолютных значений экспериментальных сечений ядерных реакций передачи с теоретическими, рассчитанными в рамках метода искаженных волн. Некоторые другие методы определения АНК из экспериментальных данных по рассеянию и реакциям описаны в [3].

В настоящей работе предлагается метод нахождения значений АНК путем аналитического продолжения R -матрицы, описывающей упругое ядерное рассеяние, в нефизическую область отрицательной энергии соударения ($E < 0$). Выведена формула, выражающая парциальную амплитуду рассеяния через R -матрицу и модифицированные кулоновские функции. Эта формула позволяет при продолжении амплитуды в область $E < 0$ преодолеть трудности, связанные с нерегулярным поведением амплитуды рассеяния вблизи $E = 0$ при наличии кулоновского взаимодействия. Предложенный метод применен для определения АНК в канале $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha + ^{12}\text{C}$.

Список литературы

1. A. M. Mukhamedzhanov and L. D. Blokhintsev, Eur. Phys. J. A **58**, 29 (2022).
2. A. M. Mukhamedzhanov and N. K. Timofeyuk, Sov. J. Nucl. Phys. **51**, 679 (1990).
3. L. D. Blokhintsev and D. A. Savin, Phys. At. Nucl., **85**, 842 (2022).

DETERMINATION OF ASYMPTOTIC NORMALIZATION COEFFICIENTS BY ANALYTIC CONTINUATION OF THE R-MATRIX

L. D. Blokhintsev, D. A. Savin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,
119991, GSP-1, Moscow, Leninskie gory 1, building 2
E-mail: blokh@srd.sinp.msu.ru

Asymptotic normalization coefficients (ANC) determine the asymptotic behavior of nuclear wave functions in binary channels at distances between fragments exceeding the radius of nuclear interaction [1]. In terms of ANCs, the cross sections of peripheral nuclear transfer reactions are parameterized. ANCs are of particular importance for nuclear astrophysics. They determine the overall normalization of cross sections of radiative capture reactions at astrophysical energies [2]. Unlike binding energies, ANCs cannot be directly measured. To determine them on the basis of experimental data, a certain theoretical analysis is required. In particular, the values of ANCs can be extracted by comparing the absolute values of experimental cross sections of nuclear transfer reactions with theoretical ones, calculated within the framework of the distorted wave Born approximation. Some other methods for determining ANCs from experimental data and reactions are described in [3].

In the present work, the method of finding the values of ANCs is proposed based on the analytic continuation of the R -matrix that describes the elastic nuclear scattering into the unphysical region of the negative energy of collision ($E < 0$). The formula is derived, expressing the partial-wave scattering amplitude through the R -matrix and modified Coulomb functions. This formula allows, when continuing the amplitude to the region $E < 0$, to overcome difficulties associated with irregular behavior of the scattering amplitude near $E = 0$ if the Coulomb interaction is present. The proposed method is used to determine the ANC for the channel $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha + ^{12}\text{C}$.

References

1. A. M. Mukhamedzhanov and L. D. Blokhintsev, Eur. Phys. J. A **58**, 29 (2022).
2. A. M. Mukhamedzhanov and N. K. Timofeyuk, Sov. J. Nucl. Phys. **51**, 679 (1990).
3. L. D. Blokhintsev and D. A. Savin, Phys. At. Nucl., **85**, 842 (2022).

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ $^9\text{Be}(d,xt)$ МЕТОДОМ ВТОРИЧНОЙ АКТИВАЦИИ

Л. Н. Генералов, И. А. Карпов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

В интервале энергии дейтронов 2.5–12 МэВ с погрешностью 12 % на электростатическом тандемном ускорителе ЭГП-10 (РФЯЦ-ВНИИЭФ) [1] на основании активационной реакции $^9\text{Be}+t \rightarrow \alpha + ^8\text{Li} + 2.927 \text{ МэВ}$ [2] ($T_{8\text{Li}} = 0.84 \text{ с}$, $E_{\beta \text{ max}} = 13 \text{ МэВ}$) измерены полные сечения $\sigma_{d,xt}$ реакции

${}^9\text{Be}(d,xt)$, где $T_{8\text{Li}}$, $E_{\beta \text{ max}}$ – периоды полураспада и максимальные энергии β -частиц распада ядра ${}^8\text{Li}$. Необходимые данные по этой активационной реакции экспериментально получены в настоящей работе в виде выхода ядер ${}^8\text{Li}$ при облучении толстой бериллиевой мишени тритонами различной энергии. Метод предложен Гужовским Б. Я.

Для измерения сечений $\sigma_{d,xt}$ реализовано совмещение функций первичной мишени и конвертора тритонов в ядра ${}^8\text{Li}$ в одном и том же слое бериллия, что возможно при условии $h > R(E_d) + R(E_t)$ – толщина слоя h больше суммы пробегов налетающих дейтронов и образующихся тритонов.

Измерения сечений при $E_d = 2.5\text{--}12$ МэВ методом вторичной активации проведены на ЭГП-10. Для этого создавался импульсный режим облучения длительностью 1 с. После облучения в течение 6 с проводилась регистрация β -частиц. Мишенью служила пластина толщиной 1 мм из особо чистого металлического бериллия. В качестве детектора β -частиц использовался пластиковый сцинтиллятор (диаметром 40 и высотой 50 мм), совмещенный с ФЭУ-93. Для получения абсолютных значений сечений $\sigma_{d,xt}$ необходимо иметь зависимость средней энергии образующихся в изучаемой реакции ${}^9\text{Be}(d,xt)$ тритонов от энергии дейтронов, вызывающих эту реакцию. Она была получена нами по энергетическим спектрам тритонов из этой реакции, что были измерены при различных углах регистрации и приведены в докладе на конференции [3].

Список литературы

- [1] Абрамович С. Н. // ВАИТ. Сер. Физ. Яд. Реак. Спец. Вып. ТИЯС-XI. 1997. С. 4.
- [2] Ajzenberg-Selove F. // Nucl. Phys. A. 1985. V. 433. №1. P. 1.
- [3] Generalov L. N., Vikhlyantsev O. P., Karpov I. A. et al. // Book of abstracts. Intern. Conf. "Nucleus-2019". Dubna. 2019. P. 116.

MEASUREMENT OF ${}^9\text{Be}(d,xt)$ REACTION TOTAL CROSS SECTIONS BY SECONDARY ACTIVATION METHOD

L. N. Generalov, I. A. Karpov

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics»
Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave, 37
otd4@expd.vniief.ru

In the range of deuteron energies 2.5-12 MeV with error 12 % on charge-exchange electrostatic accelerator EGP-10 (RFNC-VNIIEF) [1] based on activation reaction ${}^9\text{Be}+t\rightarrow\alpha+{}^8\text{Li}+2.927$ MeV [2] ($T_{8\text{Li}} = 0.84$ s, $E_{\beta \text{ max}} = 13$ MeV) total cross sections $\sigma_{d,xt}$ of reaction ${}^9\text{Be}(d,xt)$ were measured, where $T_{8\text{Li}}$, $E_{\beta \text{ max}}$ – half-lives and maximum energies of nucleus ${}^8\text{Li}$ decay β -particles. In the present paper the necessary data on this activation reaction were obtained experimentally as nuclei ${}^8\text{Li}$ yield when irradiating a thick beryllium target by various energy tritons. The method was proposed by Guzhovskii B. Ya.

To measure cross-sections $\sigma_{d,xt}$, combined were functions of primary target and triton converter into nuclei ${}^8\text{Li}$ in one and the same beryllium layer, what was possible provided $h > R(E_d) + R(E_t)$ – layer h thickness is larger than path sums of incident deuterons and forming tritons.

Cross sections at $E_d = 2.5\text{--}12$ MeV were measured by the secondary activation method on EGP-10. For this purpose a pulse irradiation mode was developed with 1s duration. After a 6s irradiation, β -particles were registered. A 1 mm thick plate made of superpurity beryllium metal served as a target. As a β -particle detector a plastic scintillator was used (diameter 40 and height 50 mm), combined with FEM-93. To obtain absolute values of cross-sections $\sigma_{d,xt}$, one should have a relation between average energy of tritons being formed in studied reaction ${}^9\text{Be}(d,xt)$ and energy of deuterons, causing this reaction. We received it by energy triton spectra in this reaction, which were measured at different acceptance angles and presented in the conference report [3].

References

- [1] Abramovich S. N. // VANT. Ser. Nucl. React. Phys. // Special issue TTYaS-XI. 1997. P. 4.
[2] Ajzenberg-Selove F. // Nucl. Phys. A. 1985. V. 433. № 1. P. 1.
[3] Generalov L. N., Vikhlyantsev O. P., Karpov I. A. et al. // Book of abstracts. Intern. Conf. "Nucleus-2019". Dubna. 2019. P. 116.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14,1 МэВ, РАССЕЯННЫХ НА ЯДРАХ УГЛЕРОДА

Д. Н. Грозданов*, **Н. А. Федоров**, **Ю. Н. Копач**, **В. Р. Ской**, **Т. Ю. Третьякова**, **К. Храмо**,
И. Н. Русков, **Г. Ахмедов**, **Д. Бериков**, **А. В. Андреев**, **В. К. Ионкин**, **П. Г. Филончик**
и коллаборация TANGRA

141980 Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6
Тел. +7 (496) 216-50-59, факс. +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru
*dimitar@nf.jinr.ru

Исследования нейтрон-индуцированных ядерных реакций на углероде представляет интерес как с точки зрения уточнения данных по свойствам уровней возбуждения углерода, так и для уточнения параметров моделей для описания механизма взаимодействия нейтронов с ядрами углерода. Углерод играет важную роль в процессе нуклеосинтеза, в частности, по утверждению Ф. Хойла, существование жизни обязано уровню углерода с энергией 7,65 МэВ [1].

В рамках проекта TANGRA [2] нами были измерены угловые распределения нейтронов, рассеянных на ядрах углерода, с использованием меченых нейтронов. В качестве источника нейтронов использовался нейтронный генератор ИНГ-27 с встроенным 256-пиксельным детектором альфа-частиц. Графитовая пластина размером 44x44x2 см³ использовалась в качестве мишени и располагалась на расстоянии 27 см от источника нейтронов. Поток нейтронов на мишень определялся по счету встроенного в ИНГ-27 альфа-детектора. Нейтроны регистрировались с помощью 20 пластиковых детекторов, расположенных вокруг мишени на расстоянии ~2м. Энергия рассеянных нейтронов определялась по времени пролета. Были измерены угловые распределения для упруго рассеянных нейтронов, а также для неупруго рассеянных на уровнях 4.44 МэВ, 7.65 МэВ и 9.64 МэВ. Полученные данные сравниваются с результатами предыдущих экспериментов по рассеянию нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ¹²C.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-12-00239).

Список литературы

1. Hoyle F. On nuclear reactions occurring with very hot stars. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1:121, September 1954.
2. Ruskov I. N., Kopatch, Y. N., Bystritsky, V. M. *et al.*, TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission induced by 14.1 MeV neutrons // *Physics procedia.* – 2015. – Т. 64. – С. 163-170.

MEASURING THE ANGULAR DISTRIBUTIONS OF 14.1 MeV NEUTRONS SCATTERING ON CARBON NUCLEI

D. N. Grozdanov*, N. A. Fedorov, Yu. N. Kopatch, V. R. Skoy, T. Yu. Tretyakova, C. Hramco, I. N. Ruskov, G. Akhmedov, D. Berikov, A. V. Andreev, V. K. Ionkin, P. G. Filonchik, and TANGRA collaboration

Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
tel. +7 (496) 216-50-59, fax. +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru
*dimitar@nf.jinr.ru

The study of neutron-induced nuclear reactions on carbon is of interest both from the point of view of improving data on the properties of carbon excitation levels and for refining model parameters for describing the mechanism of interaction of neutrons with carbon nuclei. Carbon plays an important role in the process of nucleosynthesis, in particular, according to F. Hoyle, the existence of life on Earth is due to the level of carbon with an energy of 7.65 MeV [1].

In the framework of the TANGRA project [2], we measured the angular distributions of neutrons scattered on carbon nuclei using the tagged neutron method. An ING-27 neutron generator with a built-in 256-pixel alpha-particle detector was used as a neutron source. A graphite plate with dimensions 44x44x2 cm³ was used as a target and was located at a distance of 27 cm from the neutron source. The neutron flux on the target was determined from the alpha detector built into the ING-27. Scattered neutrons were measured using 20 plastic detectors located around the target at a distance of ~2 m. The energy of scattered neutrons was determined from the time of flight. Angular distributions were measured for elastically scattered neutrons, as well as for inelastically scattered neutrons at levels of 4.44 MeV, 7.65 MeV, and 9.64 MeV. The data obtained are compared with the results of previous experiments on the scattering of neutrons with an energy of 14.1 MeV on ¹²C.

This work was supported by the RSCF grant 23-12-00239.

References

1. Hoyle F. On nuclear reactions occurring with very hot stars. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1:121, September 1954.
2. Ruskov I. N., Kopatch Y. N., Bystritsky V. M. et al. TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission induced by 14.1 MeV neutrons // *Physics procedia.* – 2015. – Т. 64. – С. 163–170.

ОБРАЗОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПИОНОВ В «ЖИВОЙ» КРЕМНИЕВОЙ МИШЕНИ

Ю. Б. Гуров^{1,2}, С. А. Евсеев¹, С. В. Розов¹, В. Г. Сандуковский¹, Б. А. Чернышев²

¹141980 Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва

Анализируются результаты измерения энергетических спектров заряженных частиц (d, t, ³He, ⁴He), образованных в реакции поглощения остановившихся π⁻-мезонов ядрами «живой» мишени – аналога мишени ²⁸Si. Использование в эксперименте «живой» мишени, позволяет одновременно с регистрацией частицы измерять энерговыделение в самой мишени. Энерговыделение в толщине «живой» мишени складывается из потерь энергии налетающего пиона и заряженных частиц, образующихся в процессе поглощения, в том числе и ядра отдачи.

В спектрах энерговыделений в мишени проявляется максимум вблизи нулевых значений, что указывает на существование «прямых» механизмов образования сложных частиц (оценка их доли в выходе на уровне 30 %). Вместе с тем к «прямым» механизмам можно отнести как многонуклонное (A ≥ 3) поглощение с образованием первичных сложных частиц, так и прямые ядерные реакции типа подхвата при парном механизме поглощения.

PRODUCTION OF COMPLICATED PARTICLES DURING THE ABSORPTION OF NEGATIVE PIONS IN A “LIVE” SILICON TARGET

Yu. B. Gurov ^{1,2}, S. A. Evseev ¹, S. V. Rozov ¹, V. G. Sandukovsky ¹, B. A. Chernyshev ²

¹ Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

² National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

The results of measuring the energy spectra of charged particles (d, t, ³He, 4He) formed in the absorption reaction of stopped π^- -mesons by the nuclei of a “live” target – analog of the ²⁸Si target are analyzed. The use of a “live” target in the experiment makes it possible to measure the energy release in the target itself simultaneously with the registration of the particle. The energy release in the thickness of the “live” target consists of energy losses of the incoming pion and charged particles formed during absorption, including the recoil core.

In the spectra of energy releases in the target, a maximum appears near zero values, which indicates the existence of “direct” mechanisms for the formation of complicated particles (their share in the output is estimated at 30%). At the same time, the “direct” mechanisms include both multi-nucleon ($A \geq 3$) absorption with the formation of primary complicated particles, and direct nuclear reactions of the pick-up type with a paired absorption mechanism.

НОВЫЕ СЕЧЕНИЯ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ, ОЦЕНЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДОСТОВЕРНОСТИ

А. И. Давыдов, В. В. Варламов

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, (495)9393483, (495)9390896,
alexdavdovmet@gmail.com

Рассматриваются проблемы достоверности сечений парциальных фотонейтронных реакций ($\gamma, 1n$), ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$), существо которых представляют значительные систематические расхождения данных разных экспериментов. Выполненные исследования посвящены ответам на вопросы о том, какие именно результаты являются достоверными, являются ли результаты экспериментов достоверными в целом и какие данные могут быть достоверными, т. е. соответствующими физическим критериям. Для решения проблем расхождений данных по сечениям парциальных реакций, полученных в разных экспериментах, используются объективные физические критерии достоверности, не зависящие от способов получения таких данных [1] – отношения сечений конкретных парциальных реакций $\sigma(\gamma, in)$ к соответствующему сечению выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n)$. С помощью экспериментально-теоретического метода оценки [1], основанного на физических критериях, получены новые достоверные сечения парциальных и полных фотонейтронных реакций для 22 ядер (⁵¹V, ⁵⁹Co, ^{58,60}Ni, ^{63,65}Cu, ⁷⁵As, ^{76,78,80,82}Se, ⁸⁹Y, ^{90,91,92,94}Zr, ¹⁰³Rh, ¹²⁷I, ¹⁶⁵Ho, ¹⁸¹Ta, ^{206,207}Pb) [2, 3]. На основании результатов детального исследования разностей между оцененными и экспериментальными сечениями установлено, что расхождения между ними обусловлены проявлением в последних существенных систематических погрешностей трех разных типов.

Список литературы

1. Оцененные сечения реакций $\sigma(\gamma, nX)$ и $\sigma(\gamma, 2nX)$ на изотопах олова ^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}Sn / В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, В. А. Четверткова // Изв. РАН. Сер. физ.-2010-Том 74; С. 875-883.

2. Фотоядерные исследования: достоверность результатов экспериментов: учебное пособие / В. В. Варламов, А. И. Давыдов, В. Н. Орлин; Издательство «КДУ». МГУ. М., 2023. 86с.

3. Давыдов А. И., Варламов В. В., Орлин В. Н. Сечения парциальных фотонейтронных реакций: проблемы с достоверностью и новые данные // Вестник Московского университета. Серия 3. 2023. Том 78; № 3. С. 1–11.

NEW PHOTONEUTRON REACTION CROSS SECTIONS EVALUATED USING PHYSICAL RELIABILITY CRITERIA

A. I. Davydov, V. V. Varlamov

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University
119991 Moscow, Leninskie gory, MSU SINP, (495)9393483, (495)9390896,
alexdavdovmet@gmail.com

The problems of partial photoneutron reactions ($\gamma, 1n$), ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$) cross sections reliability of were considered. The essence is presence of significant disagreements between the results of various experiments. The studies carried out were devoted to answers the questions 1) what results are reliable exactly, 2) are experimental data reliable in general and 3) what data could be reliable, that is satisfying objective physical reliability criteria. The physical criteria do not dependent on the experimental methods of data obtaining [1] – ratios of definite partial reaction cross-section $\sigma(\gamma, in)$ to the correspondent neutron yield cross-section $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n)$ – were used to solve the problems of disagreements between data obtained in various experiments. New reliable cross sections of both partial and total photoneutron reactions for 22 nuclei (^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$) were obtained [2,3] using the experimental-theoretical evaluation method [1] basing on the physical criteria. Using the results of detail analysis of differences between evaluated and experimental cross sections it was found out that the disagreements between evaluated and experimental cross sections are because the presence in the last ones of essential systematic uncertainties of three various types.

References

1. Evaluated cross sections of the (γ, nX) and ($\gamma, 2nX$) reactions on $^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$ isotopes / V. V. Varlamov, B. S. Ishkhanov, V. N. Orlin, V. A. Chetvertkova // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. Vol. 74. P. 833-841.

2. Photonuclear research: reliability of experimental results: handbook / V. V. Varlamov, A. I. Davydov, V. N. Orlin; Publishing House «KDU». MSU. M., 2023. 86с.

3. Davydov A. I., Varlamov V. V., Orlin V. N. Cross sections of partial photoneutron reactions: the problems with reliability and new data // Вестник Московского университета. Сер. 3. 2023. Т. 78; № 3. С. 1–11.

К АКТИВАЦИОННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА γ - ПУЧКАХ ОТ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ $E\gamma \lesssim 40$ МэВ

Л. З. Джилавян^{1*}, С. С. Бельшев², В. В. Варламов³, А. А. Кузнецов^{2,3},
А. М. Лапик¹, А. Л. Полонский¹, А. В. Русаков¹, В. И. Шведун³

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук,
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический
факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 119234, ГСП-1, Москва,
Ленинские горы, д. 1, стр. 2, т. (499)1352112, ф. (499)1352268, E-mail: dzhil@inr.ru

В настоящей работе для разрабатываемого γ -источника от обратного комптоновского рассеяния с $E\gamma \lesssim 40$ МэВ продолжены исследования в согласии с общей программой работ [1] и предложенным мониторингом пучка [2]. В качестве начального этапа предложены сравнительно простые эксперименты с регистрацией наведенной активности с помощью одно- или двух-канальных γ -спектрометров (сцинтилляционных или полупроводниковых). Рассмотрена отработка методик настройки и мониторинга γ -пучка, а также детальных измерений фоновой обстановки с использованием результатов таких экспериментов. Кроме того, показано, что активационные исследования фотоядерных реакций на таких γ -пучках имеют фундаментальную ценность для выяснения множественности образования фотонейтронов, а также наличия сравнительно узких структурных особенностей в энергетических зависимостях сечений фотоядерных реакций, прежде всего, фотонейтронных реакций.

Список литературы

1. S. S. Belyshev, V. V. Varlamov, L. Z. Dzhilavyan, *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.
2. S. S. Belyshev, V. V. Varlamov, L. Z. Dzhilavyan, *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.

TO ACTIVATION STUDIES OF PHOTONUCLEAR REACTIONS ON γ - BEAMS FROM BACKWARD COMPTON SCATTERING AT $E\gamma \lesssim 40$ MeV

L. Z. Dzhilavyan^{1*}, S. S. Belyshev², V. V. Varlamov³, A. A. Kuznetsov^{2,3}, A. M. Lapik¹,
A. L. Polonski¹, A. V. Rusakov¹, V. I. Shvedunov³

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. 7a, 60th October Anniversary
Prospect, Moscow 117312, Russia

² Physics Department of M.V. Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, GSP-1,
Moscow 119991, Russia;

³ D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, 1(2),
Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
phone: (499)1352112, fax: (499)1352268

*E-mail: dzhil@inr.ru

In the present work for the projected γ -source from backward Compton scattering with $E\gamma \lesssim 40$ MeV, studies are continued in accordance with the general work program [1] and the proposed beam monitoring [2]. As an initial stage, relatively simple experiments were proposed with the registration of induced activity using one- or two-channel γ -spectrometers (scintillation or semiconductor ones). In these experiments, there were considered methods of tuning and monitoring of the γ - beam, as well as

studding the background situation in such experiments. In addition, it is shown that activation studies of photonuclear reactions on these γ - beams are of fundamental value for clarifying multiplicities of photoneutron production, as well as the presence of relatively narrow structural features in the energy dependences of cross sections of photonuclear reactions, first of all, photoneutron ones.

References

1. S. S. Belyshev, V. V. Varlamov, L. Z. Dzhilavyan, *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.
2. S. S. Belyshev, V. V. Varlamov, L. Z. Dzhilavyan, *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.

О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ НЕЙТРОНОВ ИЗ (γ, n) -РЕАКЦИЙ ПО ЭНЕРГИИ И УГЛАМ НА γ - ПУЧКАХ ОТ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ $E_\gamma \lesssim 40$ МэВ

Л. З. Джилавян^{1*}, А. М. Лапик¹, С. С. Бельшев², В. В. Варламов³,
А. А. Кузнецов^{2,3}, А. Л. Полонский¹, А. В. Русаков¹, В. И. Шведунов³

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук,
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет.
119991, Москва, Ленинские горы, 1 (2)

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,
119234, Москва, Ленинские горы, 1 (2)

т. (499)1352112, ф. (499)1352268

*E-mail: dzhil@inr.ru

Для дальнейшего развития адекватного модельного описания процессов возбуждения и релаксации изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса ($E1$ ГР) в атомных ядрах большой интерес представляет изучение распределений по энергии и углам быстрых нейтронов, образующихся в парциальных (γ, n) -реакциях. Некоторые исследования такого типа указывают на наличие весьма интересной тонкой структуры $E1$ ГР как на средних [1], так и на тяжелых ядрах [2]. Как показано, в частности, в [3], для таких исследований особенно привлекательны измерения на γ -пучках от обратного комптоновского рассеяния, благодаря малым разбросам по энергии, поперечным размерам, углам и длительности, а также возможной высокой поляризации в таких пучках. В настоящей работе рассматриваются некоторые детали таких исследований с использованием системы спектрометров быстрых нейтронов, использующих как амплитудную, так и времяпролётную информацию. Отмечено также, что довольно высокая ожидаемая интенсивность этих разрабатываемых γ -пучков при низком фоне электронов открывают новые возможности для изучения и фотопротонных реакций.

Список литературы

1. S. S. Verbitsky, A. M. Lapik, *et al.* // Physics of Atomic Nuclei, 2009. vol. 72, issue 3, p. 387.
2. N. K. Sherman, *et al.* // Phys. Rev. Lett., 1975, vol. 35, p. 1215.
3. S. S. Belyshev, V. V. Varlamov, L. Z. Dzhilavyan, *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.

ON DISTRIBUTIONS OF NEUTRONS FROM (γ, n) -REACTIONS IN ENERGY AND ANGLES ON γ - BEAMS FROM BACKWARD COMPTON SCATTERING AT $E_\gamma \lesssim 40$ MeV

A. M. Lapik¹, L. Z. Dzhilavyan^{1,*}, S. S. Belyshev², V. V. Varlamov³, A. A. Kuznetsov^{2,3},
A. L. Polonski¹, A. V. Rusakov¹, V. I. Shvedunov³

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences.
7a, 60th October Anniversary Prospect, Moscow 117312, Russia

² Physics Department of M. V. Lomonosov Moscow State University,
1(2), Leninskie gory, Moscow 119991, Russia

³ D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University, 1(2),
Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
phone: (499)1352112, fax: (499)1352268

*E-mail: dzhil@inr.ru

For the further development of an adequate model description of excitation and relaxation processes of the isovector electric dipole giant resonance (E1 GR) in atomic nuclei, it is essential to study the energy and angle distributions of fast neutrons produced in partial (γ, n) - reactions. Some studies of the type indicate the presence of a interesting fine structure of E1 GR on both medium [1] and heavy nuclei [2]. As shown, in particular, in [3], measurements on γ - beams from backward Compton scattering are especially attractive for such studies, due to small spreads in energy, transverse dimensions, angles and duration, as well as the possible high polarization in these beams. In present work, we consider some details of such studies with a system of fast neutron spectrometers that use both amplitude and time-of-flight information. It was also noted that a rather high expected intensity of these developed γ -beams at a low electron background opens up new possibilities for studying photoproton reactions as well.

References

1. S. S. Verbitsky, A. M. Lapik, *et al.* // Physics of Atomic Nuclei, 2009. vol. 72, issue 3, p. 387.
2. N. K. Sherman, *et al.* // Phys. Rev. Lett., 1975, vol. 35, p. 1215.
3. S. S. Belyshev, V. V. Varlamov, L. Z. Dzhilavyan, *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.

РЕГИСТРАЦИЯ β -ЧАСТИЦ ОТ ^{12}B -РАСПАДОВ ТЕЛЕСКОПАМИ ДЕ-ДЕТЕКТОРОВ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Л. З. Джилавыян^{1,*}, С. С. Бельшев², А. И. Карев³, А. М. Лапик¹, А. Л. Полонский¹,
В. Н. Пономарёв¹, А. В. Русаков¹, А. А. Туринге¹, В. В. Ханкин⁴

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук,
117312 Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

² Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1 (2)

³ Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук,
119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 53

⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,
119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1 (2)

т. (499)1352112, ф. (499)1352268
e-mail: dzhil@inr.ru

Для дальнейшего развития современных моделей ядерных реакций нужны достоверные данные о каналах реакций, ведущих к образованию ядер вне полосы стабильности, в частности, ^{12}B (β^- -распад, период полураспада $T_{1/2} = 20,2$ мс) в реакции $^{13}\text{C}(\gamma, p)$. Важно и то, что эта реакция

интересна для обнаружения скрытых концентраций углерода. До последнего времени модельные и экспериментальные данные о сечениях и выходах этой реакции различаются на порядок величин [1]. Предприняты между импульсами ускорителя электронов при $E_e \cong 55$ МэВ новые активационные измерения с графитовой мишенью выходов этой реакции в самом зале ускорителя. При этом вызывает опасение большой фон «гуляющих» в зале фотонейтронов. Для ослабления влияния такого фона использована регистрация β -частиц от распадов нарабатываемых в мишени ядер ^{12}B двумя телескопами тонких пластиковых ΔE -детекторов. Результаты сопоставляются с проведённым моделированием эксперимента [2].

Список литературы

1. O. I. Achakovskiy *et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., 2016, vol. 80, p. 572.
2. S. S. Belyshev *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.

REGISTRATION OF β - PARTICLES FROM ^{12}B -DECAYS BY ΔE -DETECTOR TELESCOPES BETWEEN PULSES OF THE ELECTRON ACCELERATOR

L. Z. Dzhilavyan^{1,*}, S. S. Belyshev², A. I. Karev³, A. M. Lapik¹, A. L. Polonski¹,
V. N. Ponomarev¹, A. V. Rusakov¹, A. A. Turinge¹, V. V. Khankin⁴

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,
7a, 60th October Anniversary Prospect, Moscow 117312, Russia

² Physics Department of Lomonosov Moscow State University,
1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia

³ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
53, Leninskiy Prospect, GSP-1, Moscow 119991, Russia

⁴ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University,
1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
phone: (499)1352112, fax: (499)1352268

*e-mail: dzhil@inr.ru

Further development of modern models of nuclear reactions requires reliable data on reaction channels producing nuclei outside the stability band, in particular, ^{12}B (β^- -decay, half-life $T_{1/2} = 20.2$ ms) in the reaction $^{13}\text{C}(\gamma, p)$. It is also important that this reaction is interesting for detecting hidden carbon concentrations. Until recently, model and experimental data on the cross sections and yields of this reaction differ by an order of their magnitude [1]. Between pulses of the electron accelerator at $E_e \cong 55$ MeV, new activation measurements of this reaction yields with a graphite target in the accelerator hall itself were undertaken. But in these cases, a large background of photoneutrons “walking” in this hall causes concern. To weaken the influence of such a background, we used the registration of β - particles produced in the target at ^{12}B - decay by means of two telescopes of thin plastic ΔE - detectors. The results are compared with the simulation of the experiment [2].

References

1. O. I. Achakovskiy *et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., 2016, vol. 80, p. 572.
2. S. S. Belyshev *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 2.

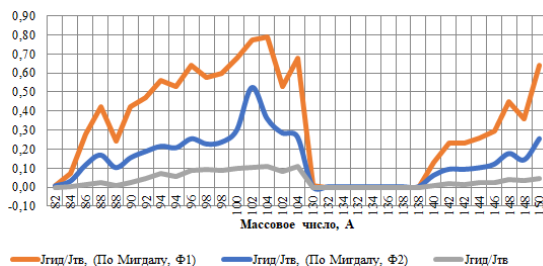
ОЦЕНКА МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ФРАГМЕНТОВ ДВОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

С. Г. Кадменский, Д. Е. Любашевский, А. А. Писклюков

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия,
E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

В работе [1] сделано предположение о зависимости средней величины спина S_f от массового числа фрагментов A_f , которая демонстрирует пилообразную структуру $S_f(A_f)$. В дальнейшем, используя модель деления FREYA, в работе [2] было показано, что такое поведение спинов фрагментов возникает естественным образом из-за изменения моментов инерции фрагментов при разрыве. Средние значения спина фрагмента масштабируются, как квадратный корень от момента инерции I_f , а момент инерции фрагмента определяется формулой $I_f(A_f) = c_{\text{rot}} \cdot I_{\text{rigid}}(A_f)$, где коэффициент c_{rot} принимается равным 0.5, к сожалению, без какого-либо физического обоснования.

В настоящей работе представлено физическое обоснование выбора величины c_{rot} на основе оценки предельных случаев твердотельных и гидродинамических (серая кривая), а также базирующихся на сверхтекучей модели атомного ядра (оранжевая и синяя кривые) моментов инерции. Как видно из рисунка, зависимость момента инерции от массового числа фрагмента имеет пилообразную форму, а среднее значение коэффициента c_{rot} лежит в диапазоне от 0.35 до 0.5, что хорошо согласуется и дает физическое обоснование выбору указанного коэффициента в работе [2]. Отклонение наблюдаемых значений моментов инерции от твердотельных значений обусловлены наличием корреляций между нуклонами, причиной которых является куперовское спаривание нуклонов в рамках сверхтекучей модели атомного ядра с осциллятором потенциалом [3] (оранжевая кривая).



Список литературы

1. J. Wilson et al., Nature (London) **590**, 566 (2021).
2. J. Randrup, R. Vogt, Phys.Rev. Lett. **127**, 062502 (2021).
3. А. Б. Мигдал, ЖЭТФ, **37**, 249 (1959).

ESTIMATION OF THE MOMENTS OF INERTIA OF FRAGMENTS OF DOUBLE NUCLEAR FISSION

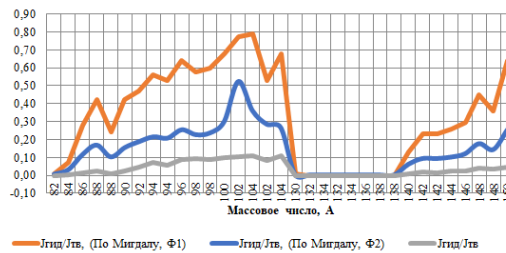
S. G. Kadmensky, D. E. Lyubashevsky, A. A. Pisklyukov

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia,
E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

In [1], an assumption was made about the dependence of the average spin S_f on the mass number of fragments A_f , which demonstrates the sawtooth structure $S_f(A_f)$. Subsequently, using the FREYA fission model, it was shown in [2] that this behavior of fragment spins arises naturally due to a change in the moments of inertia of fragments upon scission. The average values of the fragment spin are scaled

as the square root of the moment of inertia I_f , and the moment of inertia of the fragment is determined by the formula $I_f(A_f) = c_{\text{rot}} \cdot I_{\text{rigid}}(A_f)$, where the coefficient c_{rot} is taken equal to 0.5, unfortunately, without any physical justification.

In this article, we present a physical justification for the choice of the c_{rot} value based on an estimate of moments of inertia of the limiting cases of solid-state and hydrodynamic (grey curves) as well as superfluid model of the atomic nucleus (orange and blue curves). As can be seen from the figure, the dependence of the moment of inertia on the mass number of the fragment has a sawtooth shape, and the average value of the coefficient c_{rot} lies in the range from 0.35 to 0.5, which is in good agreement and provides a physical justification for the choice of this coefficient in [2]. The deviation of the observed values of the moments of inertia from the solid-state values is due to the presence of correlations between nucleons, which are caused by the Cooper pairing of nucleons in the framework of the superfluid model of an atomic nucleus with an oscillatory potential [3] (orange curve).



References

1. J. Wilson et al., Nature (London) **590**, 566 (2021).
2. J. Randrup, R. Vogt, Phys.Rev. Lett. **127**, 062502 (2021).
3. A. B. Migdal, JETP, **37**, 249 (1959).

СПИНОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ДВОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР С УЧЕТОМ BENDING- И WRIGGLING-КОЛЕБАНИЙ

С. Г. Кадменский, Д. Е. Любашевский, Д. С. Степанов

Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

Проблема описания спинов фрагментов деления (ФД) требует для своего решения использования квантовых представлений о динамике процесса деления. Указанный процесс всегда начинается с образования [1] термализованных возбужденных состояний составного делящегося ядра в первой яме его потенциала деформации. Многоквaziчастичные волновые функции указанных состояний включают компоненты, связанные с коллективными деформационными колебаниями делящегося ядра и соответствующие введенным О. Бором [1] переходным делительным состояниям. В настоящей работе показано, что для случая спонтанного и низкоэнергетического вынужденного деления делящееся ядро и вылетающие из него ФД в окрестности точки разрыва указанного ядра должны находиться только в холодных неравновесных состояниях. При построении их спиновых распределений необходимо учитывать только нулевые поперечные bending- и wriggling-колебания делящегося ядра [2]. Проведено обобщение аппарата, развитого в работе [3] на случай асимметричного деления. Для оценки моментов инерции ФД входящих в коэффициенты указанных поперечных колебаний в рамках сверхтекучей модели атомного ядра, получена зависимость моментов инерции ФД от массового числа, имеющая пилообразный характер. Момент инерции легкого ФД превосходит аналогичный момент инерции тяжелого ФД, что соответствует предсказаниям работы [4]. Зависимость рассчитанных спинов ФД от массового числа имеет пилообразный характер, аналогичный зависимости полученной в работе [5], но отличается по средним значениям, которые для легкого

и тяжелого ФД равны 9.5h и 8.3h. Эти данные разумно согласуются с величинами, полученными в работе [6], поскольку, как показано в работе [7], значения спинов ФД отличаются от полученных в [5] на величину от 3.5h до 5h вследствие испускания испарительных нейтронов и γ -квантов.

Список литературы

1. A. Bohr, B. Mottelson, *Nuclear Structure*, (Benjamin, N-Y, 1974) V.2.
2. J. R. Nix and W. J. Swiatecki, *Nucl. Phys.* **71**, 1 (1965).
3. В. Е. Бунаков, С. Г. Кадменский, Д. Е. Любашевский, *ЯФ* **79**, 198 (2016).
4. J. Randrup and R. Vong, *Phys. Rev. Lett.* **127**. 062502(2021).
5. J. N. Wilson *et al.*, *Nature (London)* **590**, 566 (2021).
6. A. Bulgac, I. Abdurrahman, K. Godbey, and I. Stetcu, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 022501 (2022).
7. A. Stutce, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 222501(2021).

SPIN DISTRIBUTION OF FRAGMENTS OF DOUBLE FISSION OF ATOMIC NUCLEI WITH BENDING AND WRIGGLING OSCILLATIONS TAKEN INTO ACCOUNT

S. G. Kadmensky, D. E. Lyubashevsky, D. S. Stepanov

Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

The problem of describing the spins of fission fragments (FF) requires the use of quantum concepts of the dynamics of the fission process for its solution. This process always begins with the formation [1] of thermalized excited states of a compound fissile nucleus in the first well of its deformation potential. The multiquasiparticle wave functions of these states include components associated with the collective deformation vibrations of the fissile nucleus and corresponding to the transition fission states introduced by O. Bohr [1]. In the present work, it is shown that for the case of spontaneous and low-energy induced fission, the fissile nucleus and the FFs emitted from it in the vicinity of the discontinuity point of the indicated nucleus should only be in cold nonequilibrium states. When constructing their spin distributions, it is necessary to take into account only zero transverse bending and wriggling vibrations of the fissile nucleus [2]. The apparatus developed in [3] is generalized to the case of asymmetric fission. To estimate the moments of inertia of the FF included in the coefficients of indicated transverse vibrations in the framework of the superfluid model of the atomic nucleus, the dependence of the moments of inertia of the FF on the mass number, which has a sawtooth character, is obtained. The moment of inertia of the light FF exceeds the similar moment of inertia of the heavy FF, which is consistent with the predictions of [4]. The dependence of the calculated FF spins on the mass number has a sawtooth character, similar to the dependence obtained in [5], but differs in the average values, which are equal to 9.5h and 8.3h for light and heavy FF. These data are in reasonable agreement with the values obtained in [6], since, as shown in [7], the values of the FF spins differ from those obtained in [5] by 3.5h to 5h due to the emission of evaporation neutrons and γ -quanta.

References

1. A. Bohr, B. Mottelson, *Nuclear Structure*, (Benjamin, N-Y, 1974) V.2.
2. J. R. Nix and W. J. Swiatecki, *Nucl. Phys.* **71**, 1 (1965).
3. V. E. Bunakov, S. G. Kadmensky, D. E. Lyubashevsky, *Nucl. Phys.* **79**, 304 (2016).
4. J. Randrup and R. Vong, *Phys. Rev. Lett.* **127**. 062502(2021).
5. J. N. Wilson *et al.*, *Nature (London)* **590**, 566 (2021).
6. A. Bulgac, I. Abdurrahman, K. Godbey, and I. Stetcu, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 022501 (2022).
7. A. Stutce, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 222501(2021).

УГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ СПИНОВ ФРАГМЕНТОВ ДВОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

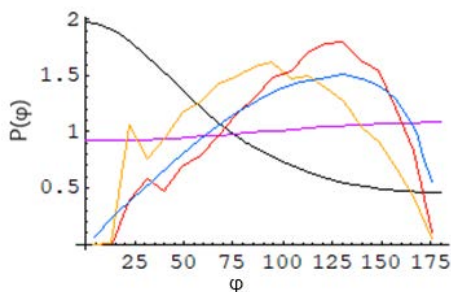
С. Г. Кадменский, Д. Е. Любашевский, А. А. Писклюков, Д. С. Степанов

Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

Природа спинов фрагментов деления (ФД), а также их относительного орбитального момента обсуждается более шести десятилетий. Интерпретация недавних экспериментальных результатов [1] была поставлена под сомнение несколькими теоретическими исследованиями, которые не согласуются друг с другом. Согласно интерпретации работы [1], спины ФД образуются значительно позже момента деления ядра на ФД. Соглашаясь с некоррелированностью спинов ФД, авторы [2] на основе феноменологической модели FRAYA заключают, что спины ФД имеют слабую корреляцию с незначительной ориентацией спинов в противоположные стороны с количественной оценкой $P(180^\circ)/P(0^\circ) \approx 1.18$ (фиолетовая линия). Авторы работы [1] в полностью микроскопическом исследовании показывают, что исходные конечные значения спинов ФД определяются до испускания мгновенных нейтронов и каскадных гамма-квантов и сильно коррелируют с относительным углом между спинами, близким к $2\pi/3$ (красная, оранжевая и синяя линия).

В настоящей работе в рамках жидко-капельной модели ядра [3], получено заключение, что спины ФД имеют сильную корреляцию со значительной ориентацией спинов в одном направлении с количественной оценкой $P(180^\circ)/P(0^\circ) \approx 0.25$ (черная линия). Представленный на рисунке график находит простое физическое обоснование: так как отношение констант $C_w/C_b \approx 2.3$, то wriggling – колебания, спины которого параллельны друг другу, значительно преобладают над bending – колебаниями, спины которого антипараллельны друг другу.



Список литературы

1. A. Bulgac, Phys. Rev. C. 106, 014624 (2022).
2. J. Randrup and R. Vogt, Phys. Rev. Lett. 127, 062502(2021).
3. J. R. Nix and W. J. Swiatecki, Nucl. Phys. 71, 1 (1965).

ANGULAR CORRELATIONS OF THE SPINS OF FRAGMENTS OF NUCLEAR DOUBLE FISSION

S.G. Kadmensky, D. E. Lyubashevsky, A. A. Pisklyukov, D. S. Stepanov

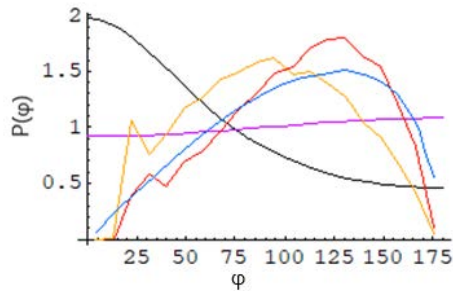
Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

The nature of the spins of fission fragments (FFs), as well as their relative orbital angular momentum, have been discussed for more than six decades. The interpretation of recent experimental results [1] has been challenged by several theoretical studies that are inconsistent with each other. According to the interpretation of [1], the FF spins are formed much later than the fission of the nucleus into the FF. Agreeing with the uncorrelatedness of the FF spins, the authors of [2] based on the phenomenological FRAYA model conclude that the FF spins have a weak correlation with an

insignificant orientation of the spins in opposite directions with a quantitative estimate of $P(180^\circ)/P(0^\circ) \approx 1.18$ (purple line). The authors of [1] in a fully microscopic study show that the initial final values of the FF spins are determined before the emission of prompt neutrons and cascade gamma quanta and strongly correlate with a relative angle between spins close to $2\pi/3$ (red, orange and blue lines).

In this work, in the framework of the liquid-drop model of the nucleus [3], it was concluded that the FF spins have a strong correlation with a significant orientation of the spins in one direction with a quantitative estimate of $P(180^\circ)/P(0^\circ) \approx 0.25$ (black line). The graph presented in the figure finds a simple physical justification: since the ratio of the constants $C_w / C_b \approx 2.3$, wriggling – oscillations, the spins of which are parallel to each other, significantly prevail over bending – oscillations, the spins of which are antiparallel to each other.



References

1. A. Bulgac, Phys. Rev. C. 106, 014624 (2022).
2. J. Randrup and R. Vogt, Phys. Rev. Lett. 127, 062502(2021).
3. J. R. Nix and W. J. Swiatecki, Nucl. Phys. 71, 1 (1965).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ *np*-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕАКЦИИ *nd*-РАЗВАЛА ПРИ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ 5 МэВ

А. А. Каспаров*, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, Д. Г. Цветкович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

Телефон: 8(499)135-77-60 (Москва), 8(495)850-42-01 (Троицк),

Факс: 8(499)135-22-68 (Москва), 8(495)850-42-28 (Троицк), E-mail: kasparov200191@gmail.com

Реакция *nd*-развала является одной из основных малонуклонных реакций для получения данных о *NN*-взаимодействии. Полученные данные о *nn*-взаимодействии в реакции *nd*-развала при различных энергиях нейтронов имеют большой разброс значений, превышающий экспериментальные ошибки. Так, недавний анализ полученных в реакциях *nd*-и *dd*-развала значений длин нейтрон-нейтронного рассеяния [1] в значительной мере подтвердил гипотезу о влиянии *3N*-сил на величины извлекаемых параметров *nn*-взаимодействия в реакциях с малонуклонными системами [2].

В недавней работе [3] полученные в кинематически полном эксперименте по исследованию реакции *nd*-развала при энергиях нейтронов 9 и 11 МэВ канала РАДЭКС ИЯИ РАН значения 1S_0 *np*-длины рассеяния существенно отличаются от значения, полученного в эксперименте по свободному *np*-рассеянию, что может быть связано со значительным влиянием трехнуклонных сил. Для проверки данного предположения в ИЯИ РАН планируется исследование реакции *nd*-развала при более низких энергиях нейтронов. Преимуществом канала РАДЭКС является возможность изучения реакции *nd*-развала в широком диапазоне энергий нейтронов за счет восстановления энергии первичного пучка из кинематики реакции.

В настоящей работе рассматриваются кинематическое моделирование реакции $n+{}^2\text{H}\rightarrow p+n+n$ при энергии нейтронов 5 МэВ, на основе которого выбираются оптимальные условия будущего эксперимента по определению низкоэнергетических параметров np -взаимодействия (синглетной np -длины рассеяния и энергии виртуального 1S_0 состояния E_{np}).

Список литературы

1. Е. С. Конобеевский, А. А. Каспаров, М. В. Мордовской, С. В. Зуев, С. И. Поташев, А. А. Афонин, В. В. Мицук. Данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, извлеченные из реакции nd -развала при $E_n = 9$ МэВ и $E_n = 11$ МэВ // Ядерная физика. 2022. Т. 85. № 3. С. 216–222.
2. Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. И. Кукулин, В. М. Лебедев, М. В. Мордовской, В.Н. Померанцев, А. В. Спасский. Низкоэнергетические параметры нейтрон-нейтронного взаимодействия: анализ данных, извлеченных из реакций nd - и dd -развалов // Ядерная физика. 2018. Т. 81. № 5. С. 555–563.
3. А. А. Каспаров, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, С. И. Поташев, В. В. Мицук. Данные о np -длины рассеяния из реакции nd -развала при низких энергиях // Ядерная физика. 2023. Т. 86. № 1. С. 245–251.

MODELING AND SELECTION OF THE OPTIMAL EXPERIMENT CONDITIONS TO DETERMINE THE LOW-ENERGY PARAMETERS OF THE np -INTERACTION IN THE nd -BREAKUP REACTION AT A NEUTRON ENERGY OF 5 MeV

A. A. Kasparov*, M. V. Mordovskoy, A. A. Afonin, D. G. Tsvetkovich

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312

Phone: +7 (499) 135 77 60 (Moscow) +7 (495)850 42 01 (Troitsk),

Fax: +7 (499) 135 22 68 (Moscow) +7 (495)850 42 28 (Troitsk), E-mail: kasparov200191@gmail.com

One of the main few-body reactions, in which data on NN -interaction are obtained, is the nd -breakup reaction. The obtained data on nn -interaction extracted from this reaction at different energies, have a large scatter of values that exceeds the experimental errors. For example, the analysis of the neutron-neutron scattering lengths obtained in the nd - and dd -breakup reactions that was performed recently in [1] confirmed, to a considerable extent, the hypothesis of the effect of three-nucleon forces on the nn -interaction parameters extracted in reactions involving few-nucleon systems [2].

In a recent paper [3], the values of 1S_0 np scattering length in a kinematically complete experiment on the study of the nd -breakup reaction at neutron energies of 9 and 11 MeV in the RADEX channel of the INR RAS were obtained. The ones differ significantly from the value obtained in the experiment on free np scattering. In turn, the difference in question may be due to a significant effect of three-nucleon forces. To verify this assumption, investigation of the $d+{}^1\text{H}\rightarrow p+p+n$ reaction at lower neutron energies is planned in the INR RAS. The advantage of RADEX channel is a possibility of studying nd -breakup reaction in a wide range of neutron energies by recovering the primary beam energy from the reaction kinematics.

In this work, kinematic simulation of the $n+{}^2\text{H}\rightarrow p+n+n$ reaction at a neutron energy of 5 MeV is considered. Based on the simulation results, the optimal conditions for the future experiment to determine the low-energy parameters of the np interaction (the singlet np scattering length and the energy of the virtual 1S_0 state E_{np}) are selected.

References

1. E. S. Konobeevski, A. A. Kasparov, M. V. Mordovskoy, S. V. Zuyev, S. I. Potashev, A. A. Afonin, V. V. Mitcuk. Data on the neutron-neutron scattering length from the nd -breakup reaction at $E_n = 8$ MeV and $E_n = 11$ MeV // Physics of Atomic Nuclei. 2022. V. 85. № 3. P. 289–295.
2. E. S. Konobeevski, S. V. Zuyev, A. A. Kasparov, V. I. Kukulin, V. M. Lebedev, M. V. Mordovskoy, V. N. Pomerantsev, A. V. Spassky. Low-energy parameters of neutron-neutron interaction:

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ ГАЗОВОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. Когоутова^{1,2}, А. М. Родин¹, Л. Крупа^{1,2,3}, Й. Пехоушек², П. Когоут^{1,2}, Е. В. Чернышева¹,
А. В. Гуляев¹, А. В. Гуляева¹, Я. Климан⁵, А. Б. Комаров¹, Х. Ю. Куркова¹, А. Махер⁶,
С. Новоселов¹, А. Опихал^{1,2}, А. В. Подшибякин¹, В. С. Саламатин¹, С. В. Степанцов¹,
В. Ю. Веденеев¹, С. А. Юхимчук¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций
имени Г. Н. Флерова, г. Дубна, Россия

² Университет имени Палацки, Оломоуц, Чехия

³ Чешский технический университет, Институт экспериментальной и прикладной физики,
Прага, Чехия

⁴ Западночешский университет, Пльзень, Чехия

⁵ Физический институт Словацкой академии Наук, Братислава, Словакия

⁶ Эль-Халифа Эль-Мамун, улица Аббасья, Каир, Египет

Масса – это фундаментальное свойство атома, содержащее всю информацию о его составляющих и их взаимодействиях. Таким образом, он несет информацию о внутренней структуре ядра, раскрывает структуру квантово-механической оболочки внутри сложных ядер и определяет энергию, доступную для ядерных превращений в процессах радиоактивного распада. Измерения массы позволяют нам сравнивать ядерные модели и, таким образом, способствуют исследованию природы самого сильного взаимодействия. С целью высокоточного измерения массы тяжелых и сверхтяжелых элементов в ЛЯР, Дубна строится новая экспериментальная установка. Установка состоит из следующих частей: мишенной блок; газонаполненный сепаратор продуктов реакции полного синтеза; криогенная газовая ионная ловушка (КГИЛ); радиочастотная система транспортировки и охлаждения низкоэнергетического пучка; и много отражательный времяпролетный масс-спектрометр (МОВ-МС). КГИЛ отвечает за окончательное замедление и термализацию фрагментов, произведенных и отобранных в газонаполненном сепараторе. Термализация достигается в объеме, заполненном сверхчистым газообразным гелием при криогенных температурах. После термализации фрагменты извлекаются и транспортируются с помощью радиочастотного квадруполь в МОВ-МС. Остановка и термализация поступающих продуктов реакции является ключевым этапом в измерении массы тяжелых элементов. Из-за низких сечений произведенных частиц КГИЛ должна быть максимально эффективной. Только те ионы, которые остановлены в объеме активного газа КГИЛ, могут быть извлечены. Эффективность торможения для продуктов реакции не может быть проверена в режиме онлайн и должна основываться на моделировании. Для использования КГИЛ на ионном пучке необходимо оценить оптимальную толщину фольги входного окна для каждой реакции. Проведено моделирование для определения эффективности и времени извлечения из КГИЛ продуктов, образующихся в следующих реакциях полного синтеза: $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{184}\text{Hg}^*$, $^{40}\text{Ar}+^{166}\text{Er}\rightarrow^{206}\text{Rn}^*$, $^{48}\text{Ca}+^{197}\text{Au}\rightarrow^{245}\text{Es}^*$, $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{256}\text{No}^*$, $^{48}\text{Ca}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{257}\text{Lr}^*$ and $^{48}\text{Ca}+^{242}\text{Pu}\rightarrow^{290}\text{Fl}^*$. На основе пакетов программ SRIM2013, GEANT4, ROOT, SIMION и COMSOL созданы две программы. Первая программа рассчитывала эффективность захвата продуктов реакции в зависимости от толщины входного окна и давления гелия в криогенной газовой ионной ловушке. Вторая программа определяла эффективность и время извлечения захваченных продуктов. Для испытаний газовой ловушки без пучка с использованием альфа-источника были рассчитаны эффективность и время извлечения из ловушки дочерних продуктов альфа-источника. Расчеты проводились для различных давлений гелия и в зависимости от положения альфа-источника в газовой ионной ловушке.

SIMULATION OF A CRYOGENIC GAS STOPPING CELL DESIGNED TO STUDY THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SUPERHEAVY ELEMENTS

A. Kohoutova^{a,d}, L. Krupa^{a,c,d}, A. M. Rodin^a, E. V. Chernysheva^a, A. V. Gulyaev^a,
A. V. Gulyaeva^a, J. Kliman^b, P. Kohouta^d, A. B. Komarov^a, N. Yu. Kurkova^a, A. Maheer^e,
A. S. Novoselov^a, A. Opichal^{a,d}, J. Pechousek^d, V. S. Salamatin^a, S. V. Stepantsov^a,
A. V. Podshibakin^a, V. Yu. Vedenev^a, S. A. Yukhimchuk^a

^aJoint Institute for Nuclear Research, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joliot Curie 6,
Dubna, Moscow region, 141980 Russia;

^bInstitute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Dubravska cesta, 9, Bratislava, 84228 Slovakia;

^cInstitute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University in Prague, Husova 240/5,
Prague 1, Czech Republic;

^dFaculty of Science of Palacký University Olomouc, 17. listopadu 1192/12, 779 00 Olomouc,
Czech Republic;

^eAin Shams University, El-Khalyfa El-Mamoun Street Abbasya, Cairo , Egypt
E-mail: kohoutova@jinr.ru

The mass is a fundamental property of an atom comprising all information on its constituents and their interactions. Thus, it carries information on the internal structure of the nucleus, reveal the quantum mechanical shell structure within complex nuclei and determine the energy available for nuclear transformations in radioactive decay processes. Mass measurements allow us to benchmark nuclear models and thus contribute to investigations of the nature of the strong interaction itself. With the aim of high-precision mass measurement (HPMM) of heavy and super heavy elements, a new experimental setup is being built in FLNR, Dubna. The setup consists of the following parts: target unit; gas-filled separator of complete fusion reaction products; cryogenic gas stopping cell (CGSC); a radio-frequency system for transporting and cooling a low-energy beam; and a multi-reflection time of flight mass spectrometer (MR-TOF MS). CGSC is responsible for the final slowing down and thermalizing the energy-bunched fragments produced and selected in the Gas Filled Separator. The thermalization is achieved in a volume filled with ultra-pure helium gas at cryogenic temperatures. After the thermalization, the fragments are extracted and transported with a radio frequency quadrupole (RFQ) to the MR-TOF MS. The stopping and thermalization of the incoming fusion-evaporation residuals (EVRs) is a key step in HPMM of the heaviest elements. Due to the typically low incoming ion rates and low particle integrals CGSC has to be as efficient as possible. Only the ions that are stopped within the active gas volume of the CGSC can be extracted. The stopping efficiencies for EVRs cannot be verified online and must be relied upon by simulations. To use the CGSC on ion beam the optimal entrance window foil thickness for every reaction is necessary to evaluate. Simulations were performed to determine the efficiency and extraction time from a cryogenic gas ion cell for products arising in the following complete fusion reactions: $^{40}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}\rightarrow^{184}\text{Hg}^*$, $^{40}\text{Ar}+^{166}\text{Er}\rightarrow^{206}\text{Rn}^*$, $^{48}\text{Ca}+^{197}\text{Au}\rightarrow^{245}\text{Es}^*$, $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{256}\text{No}^*$, $^{48}\text{Ca}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{257}\text{Lr}^*$ and $^{48}\text{Ca}+^{242}\text{Pu}\rightarrow^{290}\text{Fl}^*$. Based on the software packages SRIM2013, GEANT4, ROOT, SIMION and COMSOL, two programs were created. The first program calculated the efficiency of capture of reaction products as a function of the thickness of the entrance window and the helium pressure in the cryogenic gas ion trap. The second program determined the efficiency and extraction time of the captured products. To test a gas trap without a beam using an alpha source, the efficiency and extraction time from the trap of the progeny of the alpha source were calculated. The calculations were carried out for different helium pressures and depending on the position of the alpha source in the gas ion trap.

О ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СРАВНЕНИЯ ИЗОМЕРНОГО ОТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЯДЕР ^{186}Re ПРИ РАДИАЦИОННОМ ЗАХВАТЕ РЕАКТОРНЫХ ТЕПЛОВЫХ И НАДТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ПРИРОДНЫМ РЕЕНИЕМ

Ю. В. Волчихина¹, Д. М. Гордеева¹, А. А. Зырянова¹, В. В. Кольцов²,
И. М. Русских¹, В. А. Яковлев²

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловская обл., РФ

²АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург, РФ
тел. +7(911)9121226, e-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

Перспектива создания аккумулятора энергии на основе ядерного изомера ^{186m}Re (период полураспада $2 \cdot 10^5$ лет) делает актуальным вопрос о эффективности его наработки в зависимости от спектра нейтронов на образце природного рения в реакторе [1]. Нарботка изомера ^{186m}Re в реакторе при облучении нейтронами природного рения ($^{185}\text{Re} - 37\%$, $^{187}\text{Re} - 50\%$) экспериментально исследовалась только в работах [1, 2]. В работе [1] было показано, что сечение образования изомера ^{186m}Re отличается не более чем на 20 % при облучении рения термализованными нейтронами и нейтронами в активной зоне реактора. Этот результат соответствует расчетам зависимости от энергии нейтронов отношения сечений образования в (n, γ) реакции изомера ^{186m}Re и ядра ^{186}Re в основном состоянии [3], для нейтронов с энергией до ~ 10 кэВ это расчетное изомерное отношение меняется менее чем на 10 %.

Мы рассмотрели возможность измерить различие сечений образования изомера при радиационном захвате тепловых и надтепловых нейтронов, облучая в реакторе образец из шести сложенных стопкой металлических фольг природного рения толщиной по 0,1 мм; образец из Re-фольги толщиной 0,1 мм в плоском Cd-пенале с толщиной стенки 1 мм; и мониторы нейтронного потока. По распределению в Re-образцах отношения измеренной удельной активности изомерных ядер ^{186m}Re к расчетной величине наработки ядер ^{186}Re в основном состоянии можно определить различие интегрального изомерного отношения δI_m для тепловых и надтепловых нейтронов с точностью около 0.5 %. Расчет с использованием изомерных отношений [3] показал для Re-образцов максимальную величину $\delta I_m \approx 1.3\%$.

Список литературы

[1]. V. V. Koltsov // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – V. 84. –No 11. – P. 1817.

[2]. D. W. Seegmiller, M. Linder, R. A. Meyer // Nucl. Phys. – 1972. – V. A185. – P. 94.

[3]. M. B. Chadwick, P. G. Young // INDC(NDS)-263GSP, IAEA, Ref. Num.: 24043574. – 1992.

ON THE POSSIBILITY OF EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE ISOMER RATIO FOR ^{186}Re NUCLEI IN THE RADIATIVE CAPTURE OF REACTOR THERMAL AND EPITHERMAL NEUTRONS BY NATURAL RHENIUM

Yu. V. Volchikhina¹, D. M. Gordeeva¹, A. A. Zyryanova¹, V. V. Koltsov²,
I. M. Russkikh¹, V. A. Yakovlev²

¹JSC «Institute of Reactor Materials», Zarechny, Sverdlovsk Region, RF

²JSC “Khlopin Radium Institute”, Sankt-Petersburg, RF
tel.: +7(911)9121226, e-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

The prospect of creating an energy accumulator based on the nuclear isomer ^{186m}Re (half-life $2 \cdot 10^5$ years) makes the question of the efficiency of its production depending on the neutron spectrum on a sample of natural rhenium in a reactor [1]. The production of the ^{186m}Re isomer in a reactor during neutron irradiation of natural rhenium ($^{185}\text{Re} - 37\%$, $^{187}\text{Re} - 50\%$) was experimentally studied only in Ref. [1, 2]. It was shown in Ref. [1] that cross sections for the formation of the ^{186m}Re isomer differs by no more than 20 % when rhenium is irradiated with thermalized neutrons and neutrons in the reactor core. This

result corresponds to calculations of the neutron energy dependence of the ratio of the formation cross sections in the (n, γ) reaction of the ^{186m}Re isomer and the ^{186}Re nucleus in the ground state [3]. For neutrons with energies up to ~ 10 keV, this calculated isomeric ratio changes by less than 10 %.

We have considered the possibility of measuring the difference between the cross sections for isomer formation upon radiative capture of thermal and epithermal neutrons by irradiating in a reactor a sample of six stacked natural rhenium metal foils 0.1 mm thick; a sample of Re-foil 0.1 mm thick in a flat Cd-case with a wall thickness of 1 mm; and neutron flux monitors. From the distribution in Re samples of the ratio of the measured specific activity of ^{186m}Re isomeric nuclei to the calculated value of the production of ^{186}Re nuclei in the ground state, one can determine the difference in the integral isomeric ratio δI_m for thermal and epithermal neutrons with an accuracy of about 0.5 %. The calculation using isomeric ratios [3] showed for Re samples the maximum value $\delta I_m \approx 1.3\%$.

References

- [1]. V. V. Koltsov // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – V. 84. – No 11. – P. 1817.
- [2]. D. W. Seegmiller, M. Linder, R. A. Meyer // Nucl. Phys. – 1972. – V. A185. – P. 94.
- [3]. M. B. Chadwick, P. G. Young // INDC(NDS)-263GSP, IAEA, Ref. Num.: 24043574. – 1992.

О РЕЗОНАНСЕ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕР ЗА СЧЕТ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ АТОМОВ В ПЛАЗМЕ

В. В. Кольцов

АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург, РФ
тел. +7(911)9121226, e-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

Недавно была обнаружена стимуляция девозбуждения ядерных изомеров (СДЯИ) ^{110m}Ag и ^{186m}Re в плазме и ионов изомера ^{93m}Mo в пучке ускорителя (см. ссылки в [1]). Процесс СДЯИ наиболее эффективен при возбуждении изомера на близкий вышележащий триггерный уровень, откуда ядро быстро переходит в основное состояние. Триггерный переход энергии ΔE_N может возбуждаться в плазме при захвате электрона плазмы ионом с изомерным ядром, но расчетная вероятность в такой модели СДЯИ меньше наблюдаемой для изомеров ^{110m}Ag [1] или ^{93m}Mo [2]. Другие известные модели дают еще меньшую вероятность СДЯИ. Облучение неплазменных мишеней изомера ^{186m}Re рентгеном и электронами не привели к эффекту СДЯИ [1]. Для возбуждения перехода ядра при электронном переходе энергии ΔE_e в атоме (НЕЕТ процесс) вероятность считается малой, поскольку для изолированных атомов $\Delta E_{e,0} \neq \Delta E_N$. Таким образом, становится актуальным поиск новых моделей СДЯИ в плазме.

В плазме вероятность НЕЕТ может сильно увеличиться за счет деформации электронных оболочек иона (заряд eZ) с изомерным ядром при его столкновениях с другими ионами. Энергии переходов в электронных оболочках сталкивающихся ионов зависят от расстояния R между их ядрами $\Delta E_e(R) = \Delta E_{e,0} + \Delta E_{e,1}$, где $\Delta E_{e,1}$ порядка “молекулярного” расщепления электронных уровней $(eZ)^2/R$. При некотором расстоянии R_{res} на время T_{res} может возникнуть резонанс $\Delta E_e(R_{\text{res}}) = \Delta E_N$ с точностью до ширины электронного перехода Γ_e . Согласно [3], вероятность НЕЕТ пропорциональна времени процесса и по сравнению с недеформированным атомом коэффициент усиления НЕЕТ за счет достижения резонанса $\eta \sim T_{\text{res}} \Delta E_{e,1}^2 / \hbar \Gamma_e$. Время T_{res} максимально, если R_{res} совпадает с точкой поворота при лобовом столкновении ионов, это условие дает оптимальную ионную температуру плазмы $\theta_i \sim (eZ)^2/R_{\text{res}}$.

Список литературы

- [1]. V. Koltsov // Plasma Phys. and Technology. – 2021. – V. 8. – No 1. – P. 5.
- [2]. Y. Wu, C. H. Keitel, A. Palfy // Phys. Rev. Lett. 2019. – V. 122. – P. 212501.
- [3]. Y. K. Ho, B. H. Zhang, Z. S. Yuan // Phys. Rev. C. – 1991. – V. 44. – No 5. – P. 1910.

ON RESONANCE FOR NUCLEAR EXCITATION BY ATOMIC ELECTRON TRANSITIONS DURING COLLISIONS OF ATOMS IN A PLASMA

V. V. Koltsov

¹ JSC “Khlopin Radium Institute”, Sankt-Petersburg, Russia
tel.: +7(911)9121226, e-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

Stimulation of the deexcitation of nuclear isomers (SDNI) of ^{110m}Ag and ^{186m}Re in plasma and of ions of the ^{93m}Mo isomer in the accelerator beam was recently discovered (see references in [1]). The SDNI process is most efficient when the isomer is excited to a close overlying trigger level, from where the nucleus quickly transits to the ground state. The trigger transition of energy ΔE_N can be excited in plasma when a plasma electron is captured by an ion with an isomeric nucleus, but the calculated SDNI probability in this model is less than that observed for the ^{110m}Ag [1] or ^{93m}Mo [2] isomers. Other known models give an even lower SDNI probability. Irradiation of non-plasma targets of the ^{186m}Re isomer with X-rays and electrons did not lead to the effect of SDNI [1]. For the nuclear excitation by electron transition of energy ΔE_e in the atom (NEET process), the probability is considered small, since for isolated atoms $\Delta E_{e,0} \neq \Delta E_N$. Thus, the search for new models of SDNI in plasma becomes topical.

In plasma, the probability of NEET can greatly increase due to the deformation of the electron shells of the ion (charge eZ) with the isomeric nucleus during its collisions with other ions. The transition energies in the electron shells of colliding ions depend on the distance R between their nuclei $\Delta E_e(R) = \Delta E_{e,0} + \Delta E_{e,1}$, where $\Delta E_{e,1}$ is of the order of the “molecular” splitting of electronic levels $(eZ)^2/R$. At a certain distance R_{res} , during a time interval T_{res} a resonance $\Delta E_e(R_{\text{res}}) = \Delta E_N$ can occur with accuracy up to the electronic transition width Γ_e . According to [3], the NEET probability is proportional to the process time and, compared with an undeformed atom, the NEET amplification factor due to reaching the resonance is $\eta \sim T_{\text{res}} \Delta E_{e,1}^2 / \hbar \Gamma_e$. The time T_{res} is maximum if R_{res} coincides with the turning point in the head-on collision of ions, this condition gives the optimum ion plasma temperature $\theta_i \sim (eZ)^2/R_{\text{res}}$.

References

- [1]. V. Koltsov // Plasma Phys. and Technology. – 2021. – V. 8. – No 1. – P. 5.
- [2]. Y. Wu, C. H. Keitel, A. Palfy // Phys. Rev. Lett. 2019. – V. 122. – P. 212501.
- [3]. Y. K. Ho, B. H. Zhang, Z. S. Yuan // Phys. Rev. C. – 1991. – V. 44. – No 5. – P. 1910.

ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ДЕЛЕНИЯ ЧЕТНО-НЕЧЕТНЫХ ЯДЕР АКТИНИДОВ

П. В. Кострюков

Институт физики, Университет Марии Кюри-Склодовской,
20-031, Польша, Люблин, Радзишевского 10
kostr@kft.umcs.lublin.pl

Процесс деления атомных ядер не потерял своей актуальности, несмотря на долгую историю более чем восьмидесятилетнего открытия. В данной работе, используя обобщенный подход, где макроскопическая часть описывается энергией жидкой капли в рамках модели LSD [1], а микроскопические поправки определяются методом Струтинского. Одночастичные деформированные энергетические состояния рассчитываются с помощью [2] гамильтониана, имеющего эффективный потенциал типа Юкавы. Деформация составного делящегося ядра описывается в рамках Фурье параметризации [3], которая хорошо зарекомендовала себя при описании характеристик деления ядер [3–5] в различных областях таблицы нуклидов. Эволюция поверхности подчиняется многомерной системе уравнения Ланжевена, связанной с управляющим уравнением, отвечающим за испарение третьих частиц.

При учёте температурных зависимостей тензора диффузии и оболочечных эффектов получены первичные массовые и зарядовые распределения осколков деления ядер-актинидов с чётным и нечётным нуклонным составом. В случае низкоэнергетического деления также получены множественности нейтронов, вылетающих при термализации осколков, и вторичные массовые распределения для индуцированного и спонтанного деления ядер. Помимо этого, были изучены полные кинетические энергии, часть из которых также была сравнена с имеющимися экспериментальными данными. Сравнительный анализ распределений, полученных в рамках разработанной модели, показал хорошее согласие с имеющимися данными.

Список литературы

1. Pomorski K., Dudek J. Nuclear liquid-drop model and surface-curvature effects // *Phys. Rev. C*. 2003. Vol. 67, № 4. P. 044316.
2. Dobrowolski A., Pomorski K., Bartel J. Solving the eigenvalue problem of the nuclear Yukawa-folded mean-field Hamiltonian // *Computer Physics Communications*. 2016. Vol. 199. P. 118–132.
3. Schmitt C. et al. Performance of the Fourier shape parametrization for the fission process // *Phys. Rev. C*. 2017. Vol. 95, № 3. P. 034612.
4. Pomorski K. et al. Fission fragment mass yields of Th to Rf even-even nuclei * // *Chinese Phys. C*. 2021. Vol. 45, № 5. P. 054109.
5. Kostryukov P.V. et al. Potential energy surfaces and fission fragment mass yields of even-even superheavy nuclei * // *Chinese Phys. C*. 2021. Vol. 45, № 12. P. 124108.

THE DESCRIPTION OF FISSION DYNAMICS OF THE EVEN-ODD ACTINIDE-NUCLEI

P. V. Kostryukov

Institut Fizyki UMCS, Radziszewskiego 10, 20-031, Lublin, Poland
kostr@kft.umcs.lublin.pl

Process of atomic nuclear fission have not lost their relevance despite the long history of more than eighty years of discovery. In this work, using the macroscopic-microscopic approach, where the macroscopic part is described by the liquid droplet energy within the LSD model [1], and the microscopic corrections are determined by the Strutinsky method. The single-particle deformed energy states are calculated using [2] Hamiltonian with effective Yukawa-folded potential type. The deformation of the compound fissile nucleus is described in the framework of the Fourier parametrization [3], which has proved to be good in describing the fission characteristics of nuclei [3–5] in various regions of the nuclide table. The evolution of the surface obeys a multidimensional system of the Langevin equation coupled to the Master equation responsible for third light particle evaporation.

Taking into account temperature dependences of the diffusion tensor and shell effects, the primary mass and charge distributions of fission fragments of actinide nuclei with even and odd nucleon composition were obtained. In the case of low-energy fission, multiplicities of neutrons escaping during thermalization of fragments and secondary mass distributions for both induced and spontaneous nuclear fission also were obtained. In addition, the total kinetic energies have been studied as well, some of which have also been compared with available experimental data. The comparative analysis of the distributions obtained within the developed model showed good agreement with the available data.

References

1. Pomorski K., Dudek J. Nuclear liquid-drop model and surface-curvature effects // *Phys. Rev. C*. 2003. Vol. 67, № 4. P. 044316.
2. Dobrowolski A., Pomorski K., Bartel J. Solving the eigenvalue problem of the nuclear Yukawa-folded mean-field Hamiltonian // *Computer Physics Communications*. 2016. Vol. 199. P. 18–132.
3. Schmitt C. et al. Performance of the Fourier shape parametrization for the fission process // *Phys. Rev. C*. 2017. Vol. 95, № 3. P. 034612.

4. Pomorski K. et al. Fission fragment mass yields of Th to Rf even-even nuclei * // Chinese Phys. C. 2021. Vol. 45, № 5. P. 054109.

5. Kostryukov P.V. et al. Potential energy surfaces and fission fragment mass yields of even-even superheavy nuclei * // Chinese Phys. C. 2021. Vol. 45, № 12. P. 124108.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАСПАДА НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ ($A < 232$) ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕАКЦИИ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ $^{26}\text{Mg}+^{208}\text{Pb}$

А. А. Кузнецова^{1,*}, А. И. Свирихин^{1,2}, А. В. Ерёмин^{1,2}, А. Г. Попеко^{1,2}, А. В. Исаев¹, О. Н. Малышев^{1,2}, Ю. А. Попов^{1,2}, В. И. Чепигин¹, М. Л. Челноков¹, И. Н. Изосимов¹, Е. А. Сокол¹, М. С. Тезекбаева^{1,3}, Б. Сайлаубеков^{1,3,4} и Р. С. Мухин^{1,2}

^{1,*}Объединенный институт ядерных исследований, 141980 г. Дубна, Россия.

²Государственный Университет “Дубна”, 141982 г. Дубна

³Институт Ядерной Физики, 050032 Алматы, Казахстан

⁴Евразийский Национальный Университет им. Л. Н. Гумилева, 010000 Астана, Казахстан

*E-mail: aakuznetsova@jinr.ru

На сепараторе продуктов реакций полного слияния SHELS в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г. Н. Флерова, создана комбинированная детектирующая система GABRIELA, позволяющая проводить детальный анализ спектров α -, β -, γ -распадов тяжелых ядер. Недавно, детектирующая система была существенно модернизирована, монокристалльные Ge-детекторы были заменены на детекторы «клеверного» типа (всего 5 clover-детекторов). Была запущена в строй новая система сбора и накопления данных, на базе цифровой высокочастотной электроники National Instruments.

С модернизированной детектирующей системой уже был проведен ряд экспериментов с пучками ^{26}Mg , ^{40}Ar , ^{48}Ca и ^{54}Cr , изучались закономерности образования и свойства нуклидов от ^{230}Pu до ^{260}Sg . Для идентификации получаемых ядер применялись методы корреляционного анализа.

В докладе описывается эксперимент по изучению нейтронодефицитных ядер плутония, получаемых в реакции $^{26}\text{Mg}+^{208}\text{Pb}$. Проводилось сравнение выходов αn каналов с $1n$, $2n$ -каналами реакций полного слияния; уточнены свойства радиоактивного распада изотопа ^{230}Pu ($E_\alpha = 7066 \pm 9.8$ кэВ и 6990 ± 9.3 кэВ) и найдены X-лучи с энергией 88.5 ± 1.4 кэВ, вероятно, являющиеся следствием захвата электронов с атомной оболочки. Для ^{226}U , продукта альфа-распада ^{230}Pu , были найдены фотоны с энергией 181 кэВ, что может быть подтверждением перехода $2^+ \rightarrow 0^+$.

THE STUDY OF DECAY PROPERTIES OF NEUTRON-DEFICIENT ($A < 232$) ISOTOPES OF PLUTONIUM PRODUCED IN A COMPLETE FUSION REACTION OF $^{26}\text{Mg}+^{208}\text{Pb}$

А. А. Kuznetsova^{1,*}, А. I. Svirikhin^{1,2}, А. V. Yeremin^{1,2}, А. G. Popeko^{1,2}, А. V. Isaev¹, О. N. Malyshev^{1,2}, Yu. A. Popov^{1,2}, V. I. Chepigin¹, М. L. Chelnokov¹, I. N. Izosimov¹, E.A. Sokol¹, M. S. Tezekbayeva^{1,3}, B. S. Sailaubekov^{1,3,4} and R. S. Mukhin^{1,2}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, 141980 Russia

²Dubna State University, Dubna, 141982 Russia

³Institute of Nuclear Physics, Almaty, 050032 Kazakhstan

⁴L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010000 Astana, Kazakhstan.

*E-mail: aakuznetsova@jinr.ru

GABRIELA combined detecting system for detailed analysis of heavy nuclei α -, β -, γ -decay spectra was created at FLNR SHELS separator for products of complete fusion reactions. Recently, the detection system has been significantly upgraded, single-crystal Ge-detectors have been replaced by

detectors of the "clover" type (5 clover-detectors in total). A new data collection and accumulation system based on National Instruments digital high-frequency electronics was put into operation.

A series of experiments with ^{26}Mg , ^{40}Ar , ^{48}Ca and ^{54}Cr beams have already been carried out with the modernized detection system, and the regularities of formation and properties of nuclides from ^{230}Pu to ^{260}Sg have been studied. Methods of correlation analysis were used to identify the resulting nuclei.

The report describes an experiment on the study of neutron-deficient plutonium nuclei produced in the $^{26}\text{Mg}+^{208}\text{Pb}$ reaction. The yields of αn channels were compared with $1n$, $2n$ channels of complete fusion reactions; the properties of the radioactive decay of the ^{230}Pu isotope ($E_\alpha=7066\pm 9.8$ keV and 6990 ± 9.3 keV) were refined and X-rays with an energy of 88.5 ± 1.4 keV were found, probably resulting from the capture of electrons from the atomic shell. For ^{226}U , the alpha decay product of ^{230}Pu , photons with an energy of 181 keV were found, which may be a confirmation of the $2^+ \rightarrow 0^+$ transition.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА АТОМНЫХ ЯДРАХ

Л. С. Кузнецова ¹, М. А. Науменко ², В. В. Самарин ^{1,2}, А. С. Бажин ^{1,2}

¹ Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

E-mail: lyuba.kuznetzova1833@yandex.ru

Экспериментальные сечения упругого рассеяния медленных нейтронов на атомных ядрах [1–3] имеют ярко выраженные максимумы для некоторых ядер, например, для ^{58}Ni . Для объяснения этого эффекта были рассчитаны сечения упругого рассеяния медленных нейтронов на широком наборе ядер путем численного решения уравнения Шредингера. Экспериментальные данные объясняются на основе концепции виртуальных уровней [4]. Показано, что для ядер, у которых сечения упругого рассеяния резко возрастают, энергии s -уровней нейтронов в среднем поле ядра стремятся к нулю.

Рассчитанные радиальные плотности вероятностей s -состояний медленных нейтронов при упругом рассеянии на ядрах ^{28}Si и ^{58}Ni представлены на рис. Два максимума для кремния соответствуют низколежащему $2s$ -состоянию, три максимума для никеля соответствуют виртуальному $3s$ -состоянию. Резкое изменение волновой функции при переходе от ^{28}Si к ^{58}Ni объясняет резонансный характер упругого рассеяния медленных нейтронов на ядрах ^{58}Ni с сечением 25 барн, которое на порядок превышает сечение для ^{28}Si (2 барна). Таким образом, показано, что резонанс на виртуальном s -уровне с энергией, близкой к нулю, приводит к резкому увеличению сечения упругого рассеяния.

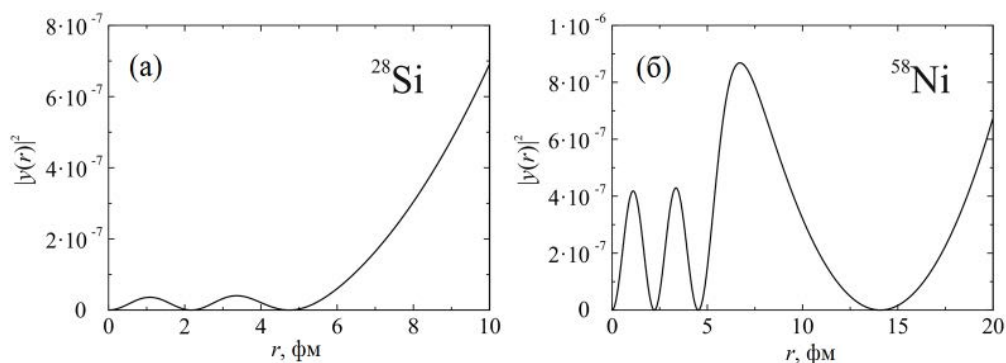


Рис. Радиальные плотности вероятностей s -состояний медленных нейтронов при упругом рассеянии на ядрах ^{28}Si (а) и ^{58}Ni (б).

Список литературы

1. V. I. Zagrebaev, A. S. Denikin, A. V. Karpov, A. P. Alekseev, M. A. Naumenko, V. A. Rachkov, V. V. Samarin, V. V. Saiko, NRV Web Knowledge Base on Low-Energy Nuclear Physics, <http://nrv.jinr.ru/>.

2. A. V. Karpov, A. S. Denikin, M. A. Naumenko, A. P. Alekseev, V. A. Rachkov, V. V. Samarin, V. V. Saiko, V. I. Zagrebaev, NRV Web Knowledge Base on Low-Energy Nuclear Physics, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **859**, 112 (2017).

3. National Nuclear Data Center, <https://www.nndc.bnl.gov/>.

4. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, Course of Theoretical Physics. Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory, Vol. 3 (Pergamon Press, 1977).

THEORETICAL STUDY OF RESONANCE ELASTIC SCATTERING OF SLOW NEUTRONS ON ATOMIC NUCLEI

L. S. Kuznetsova ¹, M. A. Naumenko ², V. V. Samarin ^{1,2}, A. S. Bazhin ^{1,2}

¹ Dubna State University, Dubna, Russia

² Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

E-mail: lyuba.kuznetsova1833@yandex.ru

Experimental cross sections for elastic scattering of slow neutrons on atomic nuclei [1-3] have clearly pronounced maxima for some nuclei, for example, for ⁵⁸Ni. To explain this effect, the cross sections for elastic scattering of slow neutrons on a wide set of nuclei have been calculated by numerical solution the Schrödinger equation. The experimental data are explained based on the concept of virtual levels [4]. It is shown that for the nuclei, for which the elastic scattering cross sections increase sharply, the energies of the *s*-levels of neutrons in the nuclear mean field go to zero.

The calculated radial probability densities for the *s*-states of slow neutrons upon elastic scattering on the ²⁸Si and ⁵⁸Ni nuclei are shown in Fig. The two maxima for silicon correspond to the low-lying 2*s*-state, three maxima for nickel correspond to the virtual 3*s*-state. The sharp change in the wave function when going from ²⁸Si to ⁵⁸Ni explains the resonance nature of elastic scattering of slow neutrons on the ⁵⁸Ni nuclei with a cross section of 25 barns, which is an order of magnitude higher than the cross section for ²⁸Si (2 barns). Thus, it is shown that the resonance at the virtual *s*-level with an energy close to zero leads to a sharp increase in the elastic scattering cross section.

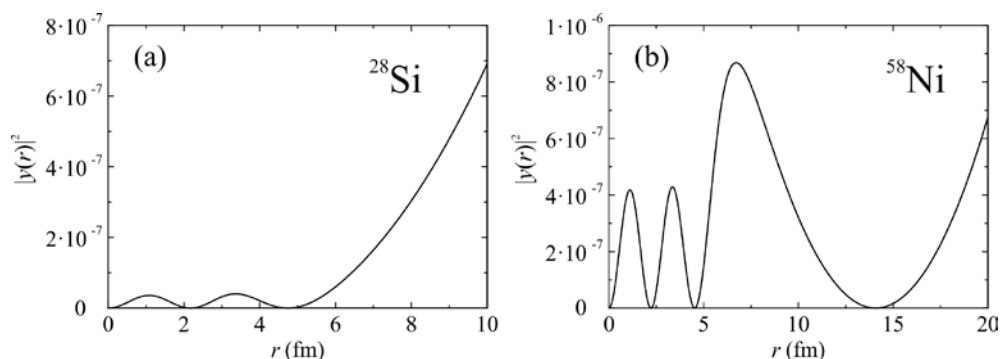


Fig. Radial probability densities for the *s*-states of slow neutrons upon elastic scattering on the ²⁸Si (a) and ⁵⁸Ni (b) nuclei

References

1. V. I. Zagrebaev, A. S. Denikin, A. V. Karpov, A. P. Alekseev, M. A. Naumenko, V. A. Rachkov, V. V. Samarin, V. V. Saiko, NRV Web Knowledge Base on Low-Energy Nuclear Physics, <http://nrv.jinr.ru/>.

2. A. V. Karpov, A. S. Denikin, M. A. Naumenko, A. P. Alekseev, V. A. Rachkov, V. V. Samarin, V. V. Saiko, V. I. Zagrebaev, NRV Web Knowledge Base on Low-Energy Nuclear Physics, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **859**, 112 (2017).

3. National Nuclear Data Center, <https://www.nndc.bnl.gov/>.

A – ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДА ^{12}B В ЗАРЯДОВО-ОБМЕННОЙ РЕАКЦИИ (^{12}C , ^{12}B)

М. А. Мартемьянов*, Б. М. Абрамов, Ю. А. Бородин, С. А. Булычев, И. А. Духовской, А. П. Крутенкова, В. В. Куликов, А. А. Куликовская, М. А. Мацюк, Е. Н. Турдакина

НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, Москва

Тел.: +7 (499) 1969539, Факс: +7 (499) 1961704

*E-mail: mmartemi@gmail.com

Зарядово-обменные ядерные реакции служат инструментом для изучения довольно широкого спектра задач. Соответствующие экспериментальные данные важны для оценки роли мезонных обменов, нуклон-нуклонных корреляций, модификации барионных резонансов в ядерной среде, а также спин-изоспиновых ядерных возбуждений. Несмотря на то, что первые работы по данной тематике появились еще в 80-х годах прошлого века, процессы фрагментации реакций, идущих с перезарядкой нуклонов, довольно слабо изучены экспериментально [1].

В работе представлены результаты по фрагментации ядер углерода, сопровождающихся рождением ^{12}B , на 4-х различных мишенях. Экспериментальные данные были получены на фрагмент-сепараторе ФРАГМ и ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН при энергии 300 МэВ/нуклон. Регистрация фрагментов реакции проводилась под углом в $3,5^{\circ}$ по отношению к падающему пучку. Приводится методика отбора различных фрагментов, в том числе с использованием координатной информации в промежуточном фокусе, что улучшает точность измерения импульса до 0,4 % [2, 3]. В случае бериллиевой мишени было измерено дифференциальное сечение рождения ^{12}B как функция импульса фрагмента в широком диапазоне [4]. Также представлена зависимость выхода ^{12}B от атомной массы мишени А. Измерения процессов перезарядки в этом диапазоне энергий выполнены впервые. Приводится сравнение экспериментальных данных с предсказаниями моделей ядро-ядерных взаимодействий. Представленные результаты расширяют существующую базу данных о процессах ядерной фрагментации и дают новый материал для проверки теоретических моделей.

Список литературы

- [1] M.Roy-Stephan *et al.*, *Nucl. Phys. A* 482 (1988) 373.
- [2] Б. М. Абрамов *и др.*, *ЯФ*, Т. 78, №5, 403 (2015).
- [3] В. М. Abramov *et al.*, *Phys. At. Nucl.* 85, № 9, 1541 (2022).
- [4] А. А. Куликовская *и др.*, *ЯФ*, Т. 85, №5, 339 (2022).

A – DEPENDENCE OF THE ^{12}B YIELD IN CHARGE-EXCHANGE REACTION (^{12}C , ^{12}B)

M. A. Martemianov*, B. M. Abramov, Yu. A. Borodin, S. A. Bulychjov, I. A. Dukhovskoy, A. P. Krutenkova, V. V. Kulikov, A. A. Kulikovskaya, M. A. Matsyuk, E. N. Turdakina

NRC «Kurchatov Institute», 123182 Russia, Moscow

Tel.: +7 (499) 1969539, Fax: +7 (499) 1961704

*E-mail: mmartemi@gmail.com

Charge-exchange nuclear reactions represent a tool for studying a fairly wide range of problems. The corresponding experimental data are important for evaluating the role of meson exchanges, nucleon-nucleon correlations, modification of baryon resonances in a nuclear medium, and spin-isospin nuclear excitations. Despite the fact that the first works on this topic appeared in the 80s of the last century, the

processes of fragmentation of reactions proceeding with nucleon charge exchange are rather poorly studied experimentally [1].

The paper presents the results on the fragmentation of carbon nuclei, accompanied by the ^{12}B production, on four different targets. Experimental data were obtained at the FRAGM fragment-separator and the ИТЕР-TWAC accelerator complex at energy of 300 MeV/nucleon. The reaction fragments were detected at angle $3,5^0$ with respect to the incident beam. A technique for selecting various fragments, including the use of coordinate information in an intermediate focus, is presented, which improves the accuracy of momentum measurement to 0,4% [2, 3]. In the case of a beryllium target, the differential cross section for ^{12}B production was measured as a function of the fragment momentum in a wide range [4]. The dependence of the ^{12}B yield on the atomic mass of the target A is also presented. Measurements of charge exchange processes in this energy range were performed for the first time. The experimental data are compared with the predictions of models of nucleus-nucleus interactions. The presented results expand the existing database of nuclear fragmentation processes and provide new material for testing theoretical models.

References

- [1] M. Roy-Stephan *et al.*, *Nucl. Phys. A* 482 (1988) 373.
- [2] B. M. Abramov *et al.*, *Yad. Fiz.*, V. 78, № 5, 403 (2015).
- [3] B. M. Abramov *et al.*, *Phys. At. Nucl.* 85, № 9, 1541 (2022).
- [4] A. A. Kulikovskaya *et al.*, *Yad. Fiz.*, V. 85, № 5, 339 (2022).

АНИЗОТРОПИЯ СПЕКТРОВ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ $^{232}\text{Th}(n,F)$ и $^{238}\text{U}(n,F)$

В. М. Маслов¹

¹Слободской проезд 4, 220025, г. Минск, Белоруссия
E-mail: mvm2386@yandex.ru

Угловая анизотропия вторичных нейтронов проявляется в эмиссионных нейтронных спектрах (ЭНС) $^{232}\text{Th}+n$ и $^{238}\text{U}+n$ [1, 2], проявление эффектов такой же природы может быть детально предсказано в наблюдаемых спектрах мгновенных нейтронов деления (СМНД). В случае ЭНС анизотропия обусловлена угловой зависимостью упругого рассеяния, прямого возбуждения коллективных уровней и пред-равновесной эмиссией 1-го нейтрона реакции $(n,nX)^1$, а в случае СМНД –эксклюзивными спектрами пред-делительных нейтронов реакций $(n,xnf)^1$. Для взаимодействий нейтронов с ^{232}Th и ^{238}U учитывалась связь уровней полосы основного состояния с $J^\pi = 0^+, 2^+, 4^+, 6^+, 8^+$ (в модели жесткого ротатора), связь уровней γ -полос с $K^\pi = 0^+, 2^+$, а также уровней октупольных полос с $K^\pi = 0^-$ учитывалась в модели мягкого ротатора [3–5] (уровни с энергиями возбуждения с $U = 0\sim 1.2$ МэВ). Детально описаны ЭНС для $^{232}\text{Th}+n$ и $^{238}\text{U}+n$ при $E_n \sim 6, \sim 12, \sim 14, \sim 18$ МэВ. В результате достигнуто адекватное описание дважды дифференциальных эмиссионных спектров и угловых распределений $(n,nX)^1$ нейтронов в области непрерывного спектра, соответствующего энергиям возбуждения остаточных $U = 1\sim 6$ МэВ для $E_n \sim 0.01\sim 20$ МэВ [6].

В случае СМНД анизотропия обусловлена тем, что часть $(n,nX)^1$ нейтронов будет проявляться в эксклюзивных спектрах пред-делительных нейтронов, аналогично реакции $^{235}\text{U}(n,xnf)$ [7]. Для реакций $^{232}\text{Th}(n,xnf)^{1\dots x}$ и $^{238}\text{U}(n,xnf)^{1\dots x}$ расчетные СМНД демонстрируют иную чувствительность к эмиссии $(n,xnf)^1$ нейтронов в переднюю и заднюю полусферы относительно налетающего пучка нейтронов. Средняя энергия $(n,xnf)^1$ нейтронов зависит от угла эмиссии нейтронов θ (см. Рис. 1), сечение деления, среднее число мгновенных нейтронов деления и полная кинетическая энергия осколков(продуктов) деления ТКЕ также зависят от угла эмиссии θ . Эксклюзивные спектры $(n,xnf)^{1\dots x}$ нейтронов для $\theta \sim 90^0$ соответствуют согласованному описанию наблюдаемых сечений реакций деления(эмиссии нейтронов) $^{232}\text{Th}(n,F)$ ($^{238}\text{U}(n,F)$) и

$^{232}\text{Th}(n, xn)$ ($^{238}\text{U}(n, xn)$) для $E_n \sim 0.01\text{--}20$ МэВ. Эксклюзивные спектры пред-делительных нейтронов реакций $(n, xnf)^{1\dots x}$, а также эксклюзивные спектры нейтронов (n, ny) и $(n, xn)^{1\dots x}$, вычислены в рамках формализма Хаузера–Фешбаха одновременно с сечениями (n, F) и (n, xn) реакций с включением угловой зависимости эмиссии первого нейтрона $(n, nX)^1$ [6]. Аппроксимация распределения $\omega(\theta)$ [6] согласуется с измеренными дважды дифференциальными ЭНС при $E_n \sim 6\text{--}18$ МэВ. Корреляция угловой анизотропии $(n, xnf)^1$ вторичных нейтронов с вкладом эмиссионного деления (n, nf) в наблюдаемое сечение деления и угловой анизотропией эмиссионных нейтронных спектров представлена на рис. 2 для $^{232}\text{Th}+n$ и $^{238}\text{U}+n$ с помощью отношения средних энергий СМНД и эксклюзивных $(n, xnf)^{1\dots x}$ спектров пред-делительных нейтронов.

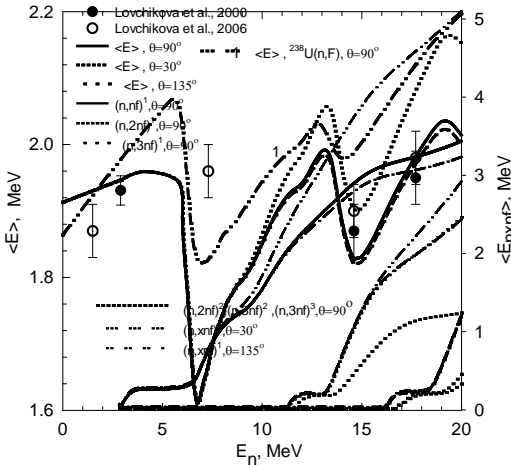


Рис. 1. $\langle E \rangle$ и $\langle E_{n, xnf} \rangle$ для $^{232}\text{Th}(n, F)$ и $^{238}\text{U}(n, F)$

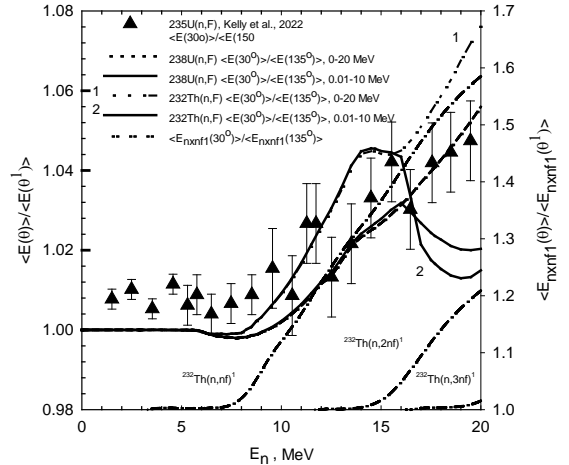


Рис. 2. $^{232}\text{Th}(n, F)$ и $^{238}\text{U}(n, F)$, отношения $\langle E \rangle$, $\langle E_{n, xnf} \rangle$ для $30^\circ/135^\circ$

Список литературы

1. M. Baba, H. Wakabayashi, N. Ito et al., Journ. Nucl. Sci. Techn., **27**, 601 (1990).
2. M. Baba, H. Wakabayashi, N. Ito et al., JAERI-M-89-143, 1989.
3. V. M. Maslov, Yu. V. Porodzinskij, N. A. Tetereva et al., Nucl. Phys. A, **764**, 212, (2006).
4. V. M. Maslov, M. Baba, A. Hasegawa, A. B. Kagalenko, N. V. Kornilov, N. A. Tetereva, INDC(BLR)-14, IAEA, Vienna (2003), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-blr-0014/>
5. V. M. Maslov, M. Baba, A. Hasegawa, A. B. Kagalenko, N. V. Kornilov, N. A. Tetereva, INDC(BLR)-16, IAEA, Vienna (2003), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-blr-0016/>
6. V.M., Maslov, LXXII International Conference “NUCLEUS-2022, Fundamental problems and applications”, Moscow, July, 11–16, 2022, Book of Abstracts, p.168, <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>.
7. K. J. Kelly, J. A. Gomez, M. Devlin et al, Phys. Rev. C **105**, 044615 (2022)

ANGULAR ANISOTROPY OF PRE-FISSION NEUTRONS IN $^{232}\text{Th}(n, F)$ AND $^{238}\text{U}(n, F)$

V. M. Maslov¹

¹Slobodskoy proezd 4, 220025, Minsk, Byelorussia
E-mail: mvm2386@yandex.ru

Neutron emission spectra (NES) of $^{232}\text{Th}+n$ and $^{238}\text{U}+n$ interactions [1, 2] provide strong evidence of angular anisotropy of secondary neutron emission, another evidence might be predicted in prompt fission neutron spectra (PFNS). In case of NES observed angular anisotropy is mostly due to angular dependence of elastic scattering, direct excitation cross sections of collective levels and pre-equilibrium emission of $(n, nX)^1$ neutrons. In current analysis of ^{232}Th and ^{238}U neutron data ground state

band levels $J^\pi = 0^+, 2^+, 4^+, 6^+, 8^+$ are coupled within rigid rotator model, while those of γ -bands with $K^\pi = 0^+, 2^+$, octupole band $K^\pi = 0^-$ are coupled within soft deformable rotator model [3–5] (level excitation energies $U=0\sim 1.2$ MeV). Data on $^{232}\text{Th}+n$ and $^{238}\text{U}+n$ NES are exhaustively described at $E_n\sim 6, \sim 12, \sim 14, \sim 18$ MeV. The net effect of these procedures is the adequate approximation of angular distributions of $(n,nX)^1$ first neutron inelastic scattering in continuum, which corresponds to $U=1\sim 6$ MeV excitations for $E_n\sim 0.01\text{--}20$ MeV [6].

In case of PFNS anisotropy would occur because some portion of $(n,nX)^1$ neutrons might be involved in exclusive pre-fission neutron spectra like in $^{235}\text{U}(n,xnf)$ reactions [7]. In $^{232}\text{Th}(n,xnf)^{1\dots x}$ and $^{238}\text{U}(n,xnf)^{1\dots x}$ reactions calculated PFNS demonstrates different responses to neutron emission in forward and backward (n,xnf) semi-spheres relative to the incident neutron momentum. Average energy of $(n,xnf)^1$ neutrons depends on the emission angle θ (see Fig.), i.e. fission cross sections, prompt neutron number and total kinetic energy depend on angle θ as well. Exclusive neutron spectra $(n,xnf)^{1\dots x}$ at $\theta\sim 90^\circ$ are consistent with observed $^{232}\text{Th}(n,F)$ ($^{238}\text{U}(n,F)$) and $^{232}\text{Th}(n,xn)$ ($^{238}\text{U}(n,xn)$) reaction cross sections within $E_n\sim 0.01\text{--}20$ MeV energy range. Exclusive neutron spectra of $(n,xnf)^{1\dots x}$, $(n,n\gamma)$ and $(n,xn)^{1\dots x}$ are calculated within Hauser-Feshbach formalism alongside with (n,F) and (n,xn) reaction cross sections, angular dependence of first neutron $(n,nX)^1$ emission distribution $\omega(\theta)$ being included $/6/$. Approximation obtained for $\omega(\theta) /6/$ is consistent the measured double differential NES at $E_n \sim 6\text{--}18$ MeV. The correlations of angular dependence of $(n,xnf)^1$ neutron emission with emissive fission (n,xnf) contribution to the observed fission cross section and angular anisotropy of NES of $^{232}\text{Th}+n$ and $^{238}\text{U}+n$ are shown on Fig. 2 as ratios of average energies of PFNS and those of $(n,xnf)^{1\dots x}$ exclusive pre-fission neutron spectra.

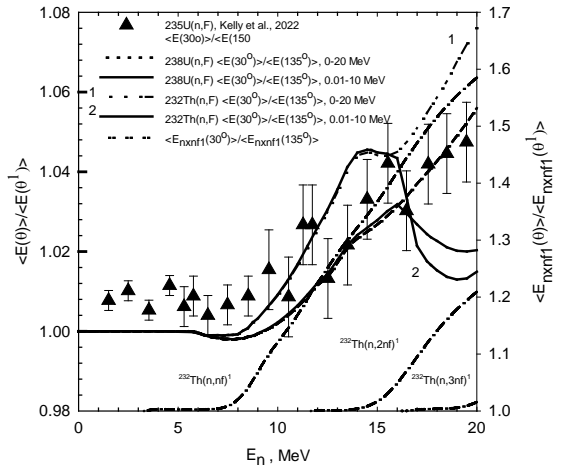
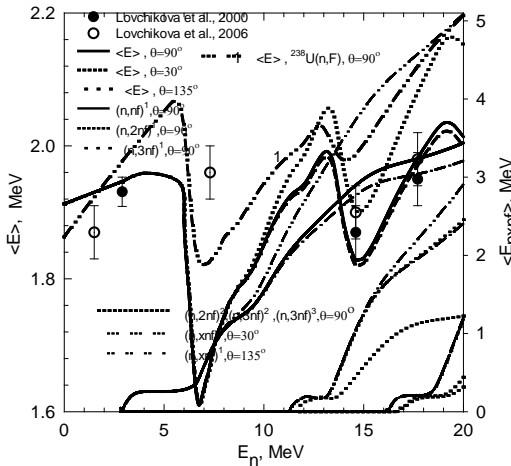


Fig. 1. $\langle E \rangle$ and $\langle E_{n,xnf} \rangle$ of $^{232}\text{Th}(n,F)$ and $^{238}\text{U}(n,F)$ Fig. 2. $^{232}\text{Th}(n,F)$ and $^{238}\text{U}(n,F)$ ratios of $\langle E \rangle$, $\langle E_{n,xnf} \rangle$ at $30^\circ/135^\circ$

References

1. M. Baba, H. Wakabayashi, N. Ito et al., Journ. Nucl. Sci. Techn., **27**, 601 (1990).
2. M. Baba, H. Wakabayashi, N. Ito et al., JAERI-M-89-143, 1989.
3. V.M. Maslov, Yu. V. Porodzinskij, N. A. Teterova et al., Nucl. Phys. A, **764**, 212, (2006).
4. V. M. Maslov, M. Baba, A. Hasegawa, A. B. Kagalenko, N. V. Kornilov, N. A. Teterova, INDC(BLR)-14, IAEA, Vienna (2003), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-blr-0014/>
5. V. M. Maslov, M. Baba, A. Hasegawa, A. B. Kagalenko, N. V. Kornilov, N. A. Teterova, INDC(BLR)-16, IAEA, Vienna (2003), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-blr-0016/>
6. V. M. Maslov, LXXII International Conference “ NUCLEUS-2022, Fundamental problems and applications”, Moscow, July, 11–16, 2022, Book of Abstracts, p.168, <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>.
7. K. J. Kelly, J. A. Gomez, M. Devlin et al, Phys. Rev. C **105**, 044615 (2022)

В. М. Маслов¹

¹Слободской проезд 4, 220025, г. Минск, Белоруссия
E-mail: mvm2386@yandex.ru

Спектры пред-делительных нейтронов являются индикатором распределения энергии реакции деления между кинетической энергией осколков ТКЕ, их энергией возбуждения и мгновенными нейтронам деления. На примере реакций $^{239}\text{Pu}(n,F)$ и $^{235}\text{U}(n,F)$ показано, как форма наблюдаемых спектров мгновенных нейтронов деления (СМНД) зависит от делимости (вероятности деления) составных и остаточных ядер [1]. Корреляция этого эффекта с вкладами эмиссионного деления (n,xnf) в наблюдаемое сечение деления и конкуренцией реакций ($n,n\gamma$), (n,xn)^{l...x} позволяет предсказать наблюдаемые СМНД, ТКЕ и $\nu_p(E_n)$ для $^{238,239,240,241,242}\text{Pu}(n,F)$. Эксклюзивные спектры пред-делительных нейтронов (n,xnf)^{l...x} соответствуют описанию сечений деления $^{242}\text{Pu}(n,F)$, $^{241}\text{Pu}(n,F)$, $^{240}\text{Pu}(n,F)$, $^{239}\text{Pu}(n,F)$, $^{238}\text{Pu}(n,F)$, $^{237}\text{Pu}(n,F)$ и $^{236}\text{Pu}(n,F)$, а также спектров эмиссии нейтронов $^{239}\text{Pu}(n,xn)$ для $E_n \sim 14$ МэВ. Исходные параметры модели фиксированы при описании СМНД $^{239}\text{Pu}(n_{th},F)$, $^{240}\text{Pu}(sf)$, $^{242}\text{Pu}(sf)$. Влияние спектров $^{239}\text{Pu}(n,xnf)$ ^{l...x} и $^{240}\text{Pu}(n,xnf)$ ^{l...x} на СМНД [2] показано на рис. 1, а на средние энергии $\langle E \rangle$ [3] на рис. 2. Влияние (n,xnf)^{l...x} нейтронов на отношения СМНД для $^{239}\text{Pu}(n,F)$ и $^{235}\text{U}(n,F)$ [4] приводит к скрытым структурам.

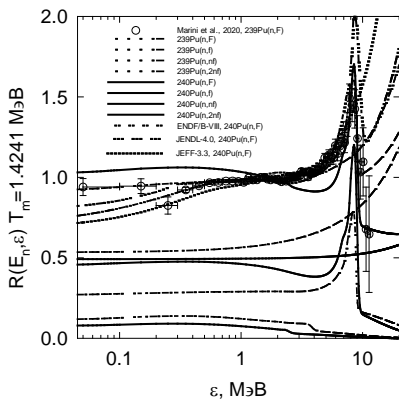


Рис. 1 СМНД $^{239,240}\text{Pu}(n,F)$

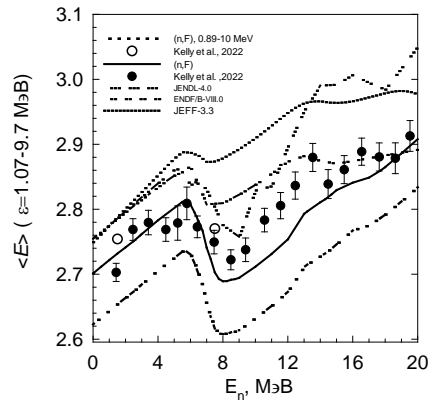


Рис. 2. $\langle E \rangle$ $^{240}\text{Pu}(n,F)$

Список литературы

1. Maslov V. M., LXXII Международная конференция “ Ядро-2022, Фундаментальные вопросы и приложения”, Москва, июль, 11–16, 2022, https://events.sinp.msu.ru/event/8/contributions/586/attachments/568/881/mvmNucl_2022%20B.pdf
2. Marini P., Taieb J., Laurent B. et al., Phys. Rev. C 101, 044614 (2020).
3. Kelly K. et al., Nuclear Data Week(s) 2022 (CSEWG-USNDP-NDAG) (31 October 2022 - 11 November 2022), <https://indico.bnl.gov/event/15497/contributions/69818/>
4. Devlin M., Bennett E.A., Buckner M.Q. et al., Proc. Intern. Conf. Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), Sacramento, USA, July 24–29, 2022, <https://indico.frib.msu.edu/event/52/contributions/616/attachments/491/2023/Devlin-ND2022.pdf>

V. M. Maslov¹

¹Slobodskoy proezd 4, 220025, Minsk, Byelorussia
E-mail: mvm2386@yandex.ru

Pre-fission neutrons are the marker of fission energy sharing between TKE, fission fragments excitation energy and pre-fission neutrons, they influence the observed prompt fission neutron spectra (PFNS), TKE and pre-fission neutrons. As shown for $^{239}\text{Pu}(n,F)$ and $^{235}\text{U}(n,F)$ the PFNS shapes depend on the fissilities of composite and residual nuclei [1]. These peculiarities when correlated with partial contributions of the emissive fission to the observed fission cross sections, competition of $(n,n\gamma)$, $(n,xn)^{l,\dots,x}$ allows to predict observed PFNS, TKE, $v_p(E_n)$ of $^{238,239,240,241,242}\text{Pu}(n,F)$. Exclusive pre-fission $(n,xnf)^{l,\dots,x}$ are consistent with observed fission cross sections of $^{242}\text{Pu}(n,F)$, $^{241}\text{Pu}(n,F)$, $^{240}\text{Pu}(n,F)$, $^{239}\text{Pu}(n,F)$, $^{238}\text{Pu}(n,F)$, $^{237}\text{Pu}(n,F)$ и $^{236}\text{Pu}(n,F)$ and emissive neutrons spectra $^{239}\text{Pu}(n,xn)$ at $E_n \sim 14$ МэВ. The initial model parameter values are fixed by fits of PFNS for $^{239}\text{Pu}(n_{th},F)$, $^{240}\text{Pu}(sf)$ and $^{242}\text{Pu}(sf)$. The influence of $^{239}\text{Pu}(n,xnf)^{l,\dots,x}$ and $^{240}\text{Pu}(n,xnf)^{l,\dots,x}$ pre-fission neutrons on PFNS [2] is shown on Fig. 1, while that on $\langle E \rangle$ [3] is shown on Fig. 2. The influence of $(n,xnf)^{l,\dots,x}$ neutrons on the ratios of PFNS) of $^{239}\text{Pu}(n,F)$ and $^{235}\text{U}(n,F)$ [4] is shown to produce hidden structures.

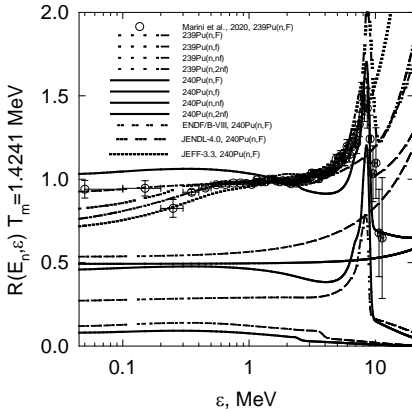


Fig. 1. PFNS of $^{239,240}\text{Pu}(n,F)$

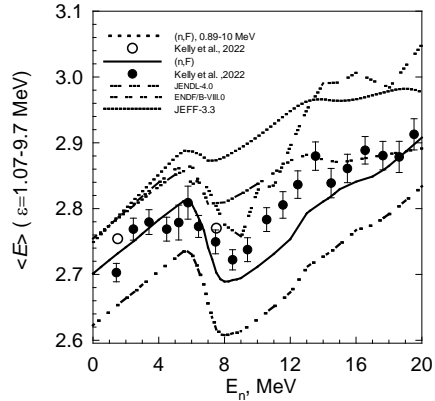


Fig. 2. $\langle E \rangle$ of $^{240}\text{Pu}(n,F)$

References

1. Maslov V. M., LXXII International Conference “NUCLEUS-2022, Fundamental problems and applications”, Moscow, July, 11–16, 2022, https://events.sinp.msu.ru/event/8/contributions/586/attachments/568/881/mvmNucl_2022%20B.pdf
2. Marini P., Taieb J., Laurent B. et al., Phys. Rev. C 101, 044614 (2020).
3. Kelly K. et al., Nuclear Data Week(s) 2022 (CSEWG-USNDP-NDAG) (31 October 2022 - 11 November 2022), <https://indico.bnl.gov/event/15497/contributions/69818/>
4. Devlin M., Bennett E. A., Buckner M. Q. et al., Proc. Intern. Conf. Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), Sacramento, USA, July 24–29, 2022, <https://indico.frib.msu.edu/event/52/contributions/616/attachments/491/2023/Devlin-ND2022.pdf>

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИЗОТОПНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВПЕРЕД ЛЕТЯЩИХ ФРАГМЕНТОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ВБЛИЗИ ЭНЕРГИИ ФЕРМИ

Т. И. Михайлова¹, Б. Эрдэмчимэг^{1,2}

¹141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6

²Национальный Университет Монголии, Центр Ядерной Физики, Улан-Батор, Монголия
E-mail: tmikh@jinr.ru

Реакции тяжелых ионов при энергиях в окрестности энергии Ферми могут быть использованы для получения ядер, удаленных от линии бета стабильности, не встречающихся в природе. Изучение механизма образования этих фрагментов может помочь в изучении ядерных потенциалов и определении зависимости внутренней энергии ядерной материи от плотности ядер. Поэтому очень важно предсказывать выходы различных изотопов, их энергии и угловые распределения с большой точностью. В применяемом нами транспортно-статистическом подходе процесс описания реакции делится на три этапа: инициализация основного состояния, динамическая эволюция системы двух сталкивающихся ионов во времени и последующий статистический распад первичных возбужденных фрагментов. Для описания временной эволюции мы используем метод переноса, основанный на транспортном уравнении Больцмана–Власова, а для описания де-возбуждения – описание в рамках модели статистической фрагментации. В данной работе мы обсуждаем, как влияет метод инициализации начального состояния на последующие расчеты. Приводится сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

CALCULATION CHARACTERISTICS OF ISOTOPE DISTRIBUTIONS OF FRAGMENTS MOVING IN BEAM DIRECTION OBTAINED IN NUCLEAR COLLISIONS AT FERMI ENERGIES

T. I. Mikhailova¹, B. Erdemchimeg^{1,2}

¹ Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

² Nuclear Research Center, National University of Mongolia

E-mail: tmikh@jinr.ru

Heavy-ion reactions at energies close to Fermi energy can be used to obtain nuclides far from stability line not occurred in nature. Studying the mechanism of these fragments formation could be useful in investigations of nuclear potentials and determination of the intrinsic energy dependence on nuclear matter density. This is why it is of great importance to predict isotope cross-sections, their velocities and angle distributions with high precision. In this report we use transport-statistical approach which consists of three: ground state initialization, dynamical evolution of the system of two colliding ions and following statistical decay of primary excited fragments. For the time evolution we use a Boltzmann-Vlasov type transport approach, and for the de-excitation a statistical multi-fragmentation description. In this report we discuss the influence of different models of ground state initialization on the quality of final isotope and velocity dependence predictions. Comparison with experimental data is presented.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОТОН-ПРОТОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$

В. В. Мицук^{*1}, А. А. Каспаров¹, М. В. Мордовской¹, В. М. Лебедев², А. В. Спасский²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а
Телефон: +7 (499)135-77-60 (Москва), +7 (495)850-42-01 (Троицк).
Факс: +7(499)135-22-68 (Москва), +7(495)850-42-28 (Троицк).
E-mail: vyacheslav.mitsuk@phystech.edu

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
(НИИЯФ МГУ), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
Телефон: +7(495)939-18-18. Факс: +7(495)939-08-96.
E-mail: info@sinp.msu.ru

В работе [1] выдвинута гипотеза, что расхождение в экспериментальных значениях длины нейтрон-нейтронного рассеяния a_{nn} , полученных в реакциях с тремя частицами в конечном состоянии, может быть связано с влиянием $3N$ -сил. Можно предположить, что подобный эффект будет наблюдаться в случае измерения низкоэнергетических параметров pp -взаимодействия (a_{pp} и E_{pp}) в реакциях с двумя протонами в конечном состоянии. Для проверки данного предположения в ИЯИ РАН проводятся исследования реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ [2].

В настоящей работе представлено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ и описание созданной по результатам моделирования экспериментальной установки. Приводятся результаты анализа предварительных данных измерений по исследованию этой реакции с регистрацией протонов от развала pp -системы и нейтрона отдачи. Проведено сравнение полученного экспериментального спектра с смоделированными спектрами, соответствующими различным значениям энергии виртуального 1S_0 состояния E_{pp} . Результаты сравнения позволили сделать оценку величины энергии виртуального протон-протонного состояния.

Список литературы

1. Конобеевский Е. С., Зуев С. В., Каспаров А. А., Кукулин В. И., Лебедев В. М., Мордовской М. В., Померанцев В. Н., Спасский А. В. Низкоэнергетические параметры нейтрон-нейтронного взаимодействия: анализ данных, извлеченных из реакций nd - и dd -развалов // Ядерная физика. 2018. Т. 81. № 5. С. 555–563.
2. Конобеевский Е. С., Афонин А. А., Зуев С. В., Каспаров А. А., Лебедев В. М., Мицук В. В., Мордовской М. В., Спасский А. В. Изучение pp -корреляций в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 492–496.

SIMULATION AND ANALYSIS OF PRELIMINARY DATA OF THE EXPERIMENT TO STUDY PROTON-PROTON CORRELATIONS IN THE $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ REACTION

V. V. Mitsuk^{*1}, A. A. Kasparov¹, M. V. Mordovskoy¹, V. M. Lebedev², A. V. Spassky²

¹Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312

Phone: +7 (499) 135 77 60 (Moscow) +7 (495)850 42 01 (Troitsk),

Fax: +7 (499) 135 22 68 (Moscow) +7 (495)850 42 28 (Troitsk).

E-mail: vyacheslav.mitsuk@phystech.edu

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU),

1(2), Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Phone: +7(495) 939 1818. Fax: +7(495) 939 0896.

E-mail: info@sinp.msu.ru

It was hypothesized in [1] that the discrepancy of experimental values of the neutron-neutron scattering length a_{nn} obtained in reactions with three particles in the final state may be due to the influence of $3N$ -forces. It can be assumed that a similar effect will be observed in a case of measuring low-energy parameters of the pp -interaction (a_{pp} and E_{pp}) in reactions with two protons in the final state. To verify this assumption, investigation of the $d+{}^1\text{H}\rightarrow p+p+n$ reaction is carried out in the INR RAS [2].

In this work a kinematic simulation of the $d+{}^1\text{H}\rightarrow p+p+n$ reaction and a description of the experimental setup based on the simulation results are presented. The analysis results of the preliminary measurement data on a study of the reaction with the registration of protons from the pp -system breakup and the recoil neutron are shown. The obtained experimental spectrum was compared with simulated ones corresponding to different values of the virtual ${}^1\text{S}_0$ state E_{pp} energy. The comparison results made it possible to estimate the value of the virtual proton-proton state energy.

References

1. Konobeevski E. S., Zuyev S. V., Kasparov A. A., Mordovskoy M. V., Kukulini V. I., Lebedev V. M., Pomerantsev V. N., Spassky A. V. Low-energy parameters of neutron–neutron interaction: analysis of data obtained in nd and dd breakup reactions // *Physics of Atomic Nuclei*. 2018. – V. 81. – № 5. – P. 595-603.

2. Konobeevski E. S., Afonin A. A., Zuyev S. V., Kasparov A. A., Mitsuk V. V., Mordovskoy M. V., Lebedev V. M., Spassky A. V. Studying pp -correlations in the $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ reaction // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020. V. 84. № 4. P. 378-381.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЛЕГКИХ ЯДЕР

**М. В. Мордовской^{*}, А. А. Каспаров, А. А. Афонин, Ю. М. Бурмистров,
В. П. Заварзина, В. В. Мицук, С. И. Поташев, И. В. Суркова**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

Телефон: 8(499)135-77-60 (Москва), 8(495)850-42-01 (Троицк),

Факс: 8(499)135-22-68 (Москва), 8(495)850-42-28 (Троицк)

E-mail: mvmordovsk@mail.ru

В работе описана созданная в ИЯИ РАН установка для исследования свойств высоковозбужденных состояний легких ядер и результаты первых тестовых измерений, полученных на ней. Установка представляет собой модернизированную версию прототипа,

описанного в работе [1], и включает в себя большую вакуумную камеру рассеяния с установленными внутри механизмом смены мишеней и телескопом кремниевых ΔE - E детекторов для регистрации вторичных заряженных частиц, а также годоскопом нейтронных сцинтилляционных детекторов вне камеры рассеяния для регистрации вторичных нейтронов.

Установка испытана на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН в реакции $n+{}^6\text{Li}$ при энергии нейтронов 40–60 МэВ с регистрацией в совпадении заряженных частиц и нейтронов. Приведены энергетические спектры заряженных частиц и нейтронов, а также оценки вкладов фоновых реакций.

Список литературы

1. А. А. Каспаров, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, В. В. Мицук. Тестовая установка для регистрации совпадающих сигналов из реакций с вылетом заряженных частиц и нейтронов на нейтронном канале РАДЭКС // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 8. С. 1077–1080.

SETUP FOR STUDYING THE PROPERTIES OF HIGHLY EXCITED STATES OF LIGHT NUCLEI

**M. V. Mordovskoy*, A. A. Kasparov, A. A. Afonin, Yu. M. Burmistrov,
V. P. Zavarzina, S. I. Potashev, V. V. Mitcuk, I. V. Surkova**

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312

Phone: +7 (499) 135 77 60 (Moscow) +7 (495)850 42 01 (Troitsk),

Fax: +7 (499) 135 22 68 (Moscow) +7 (495)850 42 28 (Troitsk), E-mail: mvmordovsk@mail.ru

In the work a setup designed at INR RAS for studying the properties of highly excited states of light nuclei and the results of first obtained test measurements are described. The setup is a modernized version of the prototype described in [1]. The setup includes a large vacuum scattering chamber with a target changing mechanism and a telescope of silicon ΔE - E detectors installed inside the scattering chamber to detect secondary charged particles. Also, a neutron scintillation detector hodoscope outside the scattering chamber for detecting secondary neutrons is installed.

The setup was tested on the RADEX neutron channel of the INR RAS in the $n+{}^6\text{Li}$ reaction at a neutron energy of 40-60 MeV with the detection of coincident neutrons and charged particles. The energy spectra of charged particles and neutrons, as well as estimates of the contributions of background reactions are presented.

References

1. A. A. Kasparov, M. V. Mordovskoy, A. A. Afonin, V. V. Mitcuk. Test setup for detecting coincident signals from reactions with emissions of charged particles and neutrons in the RADEX channel // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2022. V. 86. № 8. P. 889–892.

ОПТИКО-МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ДЕЙТРОНА НА ЯДРЕ ${}^{16}\text{O}$ С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНОГО ВКЛАДА

Л. Н. Генералов, В. А. Жеребцов, А. В. Морозова, С. М. Селянкина, С. М. Таова

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37
otd4@expd.vniief.ru

С использованием резонансного оптико-модельного кода OptModel [1, 2] выполнено описание всех доступных экспериментальных данных по упругому рассеянию дейтрона на ядре ${}^{16}\text{O}$: дифференциальных сечений – при энергиях дейтрона от 0.98 до 200 МэВ и полных сечений

реакции $^{16}\text{O}+d$ от 38 до 97 МэВ. Нарушение унитарности матрицы рассеяния (оптико-модельная + резонансная) в отдельных энергетических точках не превышало 14 %, что находится на уровне средних погрешностей анализируемых данных. В качестве примера на рисунке приводится описание функции возбуждения под углами 153.6 – 169.2 градусов.

$d\sigma/d\theta$

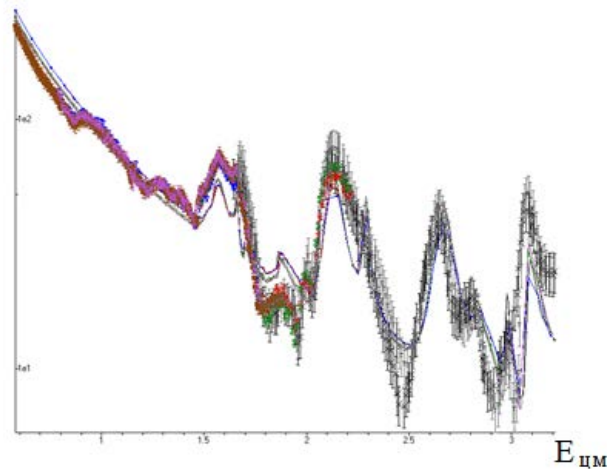


Рисунок. Функция возбуждения реакции $^{16}\text{O}(d,d_0)$ под углами 153.6 – 169.2 градусов в сцм (точки – экспериментальные значения, сплошные кривые – описание).

Список литературы

- [1] Генералов Л. Н., Жеребцов В. А., Таова С. М. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2016. Т. 80. № 3. С. 328.
- [2] Генералов Л. Н., Жеребцов В. А., Селянкина С. М. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2021. Т. 85. С. 1461

OPTICAL MODEL ANALYSIS OF DEUTERON ELASTIC SCATTERING ON ^{16}O NUCLEI WITH REGARD TO RESONANCE CONTRIBUTION

L. N. Generalov, V. A. Zherebtsov, A. V. Morozova, S. M. Selyankina, S. M. Taova

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

With the use of resonance optical-model code OptModel [1,2] there were fitted all available experimental data of deuteron elastic scattering on ^{16}O nuclei: differential cross section data at deuteron energies E_d from 0.98 to 200 MeV and $^{16}\text{O}+d$ total reaction cross section from 38 to 97 MeV. Violation of scattering matrix unitarity (optical-model + resonance) at several energies did not exceed 14% what corresponds to mean errors of the data analyzed. The description of excitation function at the angles of 153.6–169.2 degrees is given as an example in a Figure.

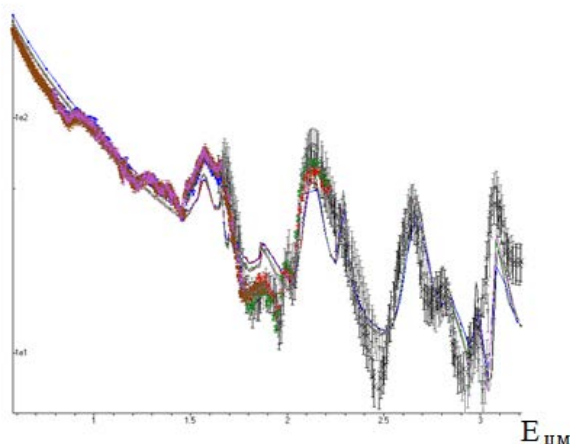
$d\sigma/d\theta$ 

Figure. Excitation function of the $^{16}\text{O}(d,d_0)$ reaction at the angles of 153.6 – 169.2 degrees in the center-of-mass system (points – experimental data, solid curves – fitting results)

References

1. L. N. Generalov, V. A. Zherebtsov and S. M. Taova, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 80, 295 (2016).
2. L. N. Generalov, V. A. Zherebtsov and S. M. Selyankina, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 85, 1461 (2021).

ФОТОНЕЙТРОННЫЕ РЕАКЦИИ НА ЯДРАХ ^{51}V И ^{59}Co В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ТОРМОЗНЫМ γ -ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. В. Варламов, А. И. Давыдов, И. А. Мостаков, В. Н. Орлин

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, (495)9393483, (495)9390896,
mostakov.ia18@physics.msu.ru

С помощью экспериментально-теоретического метода оценки сечений парциальных реакций, основанного на объективных физических критериях, исследована достоверность данных по сечениям реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на ядрах ^{51}V и ^{59}Co из нескольких экспериментов [1, 2], выполненных на пучках тормозного γ -излучения. Установлено, что сечения парциальных реакций, полученные с помощью внесения поправок, рассчитанных по статистической теории, в сечение выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$ критериям достоверности не удовлетворяют. В рассмотренных экспериментах сечения реакции $(\gamma, 1n)$ недостоверно существенно занижены, а реакции $(\gamma, 2n)$ – напротив завышены. Это очевидно обусловлено недостатками использованного метода получения информации о сечениях парциальных реакций с помощью поправок, рассчитанных по статистической теории.

Список литературы

1. Структура сечений фотонейтронных реакций на ядрах ^{51}V , ^{52}Cr и ^{59}Co в области энергий гигантского дипольного резонанса / Б. И. Горячев, Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1969. Том 33; С. 1736–1741.
2. Photoneutron cross sections for Co, Ni, Cu and Ga / G. Baciu, G. C. Bonazzola, B. Minetti, et al. // *Nucl. Phys.* 1965. V. 67. P. 178–186.

PHOTONEUTRON REACTIONS ON ^{51}V and ^{59}Co IN EXPERIMENTS WITH BREMSSTRAHLUNG

V. V. Varlamov, A. I. Davydov, I. A. Mostakov, V. N. Orlin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University
119991 Moscow, Leninskie gory, MSU SINP, (495)9393483, (495)9390896,
mostakov.ia18@physics.msu.ru

The reliability of data on $(\gamma, 1n)$ and $(\gamma, 2n)$ reactions on ^{51}V and ^{59}Co from several experiments [1, 2] carried out using beams of bremsstrahlung was investigated using the experimental–theoretical method of evaluation of photoneutron partial reaction cross sections based on objective physical criteria. It was found out that partial reaction cross sections obtained using the corrections calculated via statistical theory to the neutron yield cross section $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$ do not satisfy physical criteria of reliability. In experiments under discussion the $(\gamma, 1n)$ reaction cross sections were unreliably significantly underestimated, but the $(\gamma, 2n)$ reaction cross sections – vice versa overestimated. Evidently this is because of some shortcomings of the method used for obtaining the information on partial reaction cross sections with the aid of corrections calculated via statistical theory.

References

1. Structure of the photoneutron cross sections of ^{51}V , ^{52}Cr и ^{59}Co in the region of the giant dipole resonance // B. I. Goryachev, B. S. Ishkhanov, I. M. Kapitonov, et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 1968. Vol. 33. P. 1588–1593.
2. Photoneutron cross sections for Co, Ni, Cu and Ga / G. Baciu, G. C. Bonazzola, B. Minetti, et al. // Nucl. Phys. 1965. V. 67. P. 178–186.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ В РЕАКЦИЯХ $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ И $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}$, ^{197}Au

В. В. Самарин, М. А. Наumenко, С. М. Лукьянов, В. А. Маслов, Ю. Э. Пенионжкевич

Лаборатория ядерных реакций им. Флерова, 141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6
E-mail: anaumenko@jinr.ru

Изучение реакций передачи нуклонов является важной областью физики тяжелых ионов, так как такие реакции дают возможность получения новых экзотических ядер. Теоретические исследования механизмов передачи нуклонов имеют большое значение для планирования и проведения экспериментов по получению нейтронно-избыточных ядер, находящихся на границе нейтронной стабильности [1].

В данной работе изучаются процессы передачи нуклонов в реакциях $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ и $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}$, ^{197}Au при энергиях выше кулоновского барьера на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера для нуклонов [2, 3]. Вероятности передачи нуклонов зависят от структуры одночастичных состояний сталкивающихся ядер; нуклоны в основном передаются с верхних оболочек и на верхние оболочки. На рис. показан пример временной эволюции плотности вероятности для протона подоболочки $1h_{11/2}$ ядра ^{197}Au в столкновении $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ при энергии в системе центра масс 400 МэВ и прицельном параметре 9 фм.

Влияние структуры внешних нуклонных оболочек обсуждается на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными по зарядовым и массовым распределениям продуктов реакций $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ and $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}$ [4].

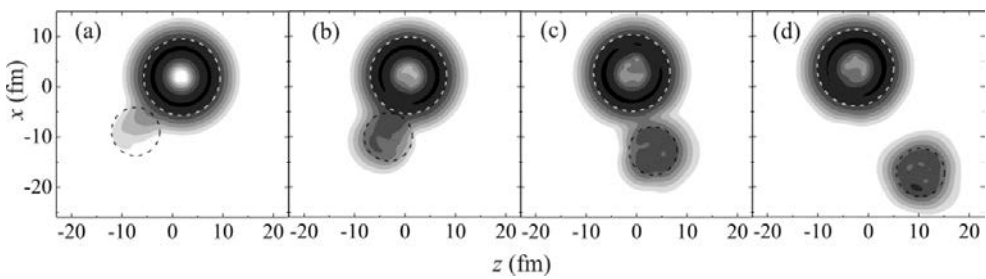


Рис. Пример временной эволюции плотности вероятности (оттенки серого, логарифмическая шкала) для протона подболочки $1h_{11/2}$ ядра ^{197}Au в столкновении $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ при энергии в системе центра масс 400 МэВ и прицельном параметре 9 фм. Расположение панелей (a)–(d) соответствует времени

Список литературы

1. Yu. E. Penionzhkevich, R. G. Kalpakchieva, Light exotic nuclei near the boundary of neutron stability (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2022).
2. V. V. Samarin *et al.* // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 128.
3. V. V. Samarin *et al.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. P. 486.
4. A. K. Azhibekov *et al.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 93.

STUDY OF NUCLEON TRANSFER PROCESSES IN THE REACTIONS $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ AND $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}, ^{197}\text{Au}$

V. V. Samarin, M. A. Naumenko, S. M. Lukyanov, V. A. Maslov,
Yu. E. Penionzhkevich

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6,
141980 Dubna, Moscow Region, Russia
E-mail: anaumenko@jinr.ru

The study of nucleon transfer reactions is an important field of heavy-ion physics, because such reactions provide the possibility of producing new exotic nuclei. Theoretical studies of the mechanisms of nucleon transfer are of great importance for planning and conducting experiments aimed at the production of neutron-rich nuclei located at the boundary of neutron stability [1].

In this work, we study nucleon transfer processes in the reactions $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ and $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}, ^{197}\text{Au}$ at energies above the Coulomb barrier based on numerical solution of the time-dependent Schrödinger equation for nucleons [2, 3]. The nucleon transfer probabilities depend on the structure of single-particle states of the colliding nuclei; nucleons are mainly transferred from/to upper shells. An example of time evolution of the probability density for the proton of the $1h_{11/2}$ subshell of the ^{197}Au nucleus in the collision $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ at an energy of 400 MeV in the center-of-mass and impact parameter 9 fm is shown in Fig.

The influence of the structure of the outer nucleon shells is discussed based on the comparison of the results of calculations with the experimental data on charge and mass distributions for the products of the reactions $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ and $^{18}\text{O} + ^{181}\text{Ta}$ [4].

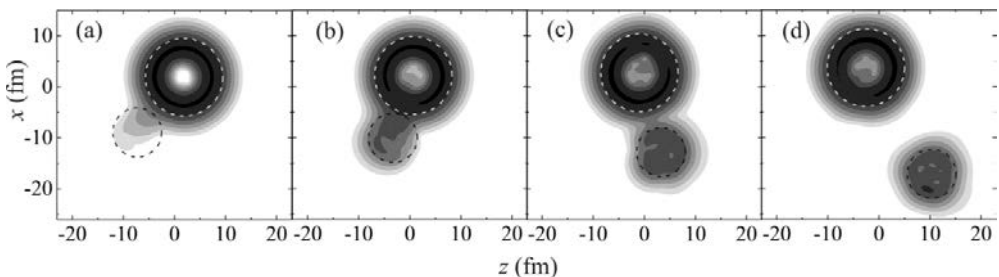


Fig. Example of time evolution of the probability density (shades of grey, logarithmic scale) for the proton of the $1h_{11/2}$ subshell of the ^{197}Au nucleus in the collision $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ at an energy of 400 MeV in the center-of-mass frame and impact parameter 9 fm. The location of panels (a)–(d) corresponds to time

References

1. Yu. E. Penionzhkevich, R. G. Kalpakchieva, Light exotic nuclei near the boundary of neutron stability (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2022).
2. V. V. Samarin *et al.* // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 128.
3. V. V. Samarin *et al.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. P. 486.
4. A. K. Azhibekov *et al.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 93.

ПРОЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЛО И СКИНА В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ С ИЗОТОПАМИ Li И Be

**В. В. Самарин, М. А. Науменко, Ю. Э. Пенионжкевич,
Ю. Г. Соболев, С. С. Стукалов**

Лаборатория ядерных реакций им. Флерова, 141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6
E-mail: anaumenko@jinr.ru

Сравнение реакций с изотопами Li и Be представляет значительный интерес, поскольку они имеют существенно различную структуру, что дает уникальную возможность проверки разных микроскопических моделей.

Внешние нейтроны ядра ${}^9\text{Li}$ с энергией отделения 4 МэВ имеют компактное пространственное распределение, которое можно назвать скином. Результаты экспериментов по измерению полных сечений реакции ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ в зависимости от энергии пучка в диапазоне $E = 5\text{--}50$ А МэВ [1] показали, что в диапазоне энергий $E = 10\text{--}20$ А МэВ значения полного сечения реакции ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ значительно больше, чем для реакции ${}^7\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ [2]. Такое усиление не могло быть объяснено существующими в то время теоретическими моделями. В работе [1] предполагалось, что причина усиления связана со свойствами оболочки слабосвязанных внешних нейтронов и ее эволюцией в процессе столкновения с ядром-мишенью.

В ядре ${}^{11}\text{Li}$ внешние нейтроны связаны еще слабее, их энергия отделения составляет 0.4 МэВ, что приводит к расширенному пространственному распределению, называемому гало. Экспериментально наблюдалось усиление сечения реакции ${}^{11}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ по сравнению с реакциями ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^7\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ во всем диапазоне энергий, вплоть до 50 А МэВ; это усиление было теоретически объяснено передачей нейтрона из расширенной гало-оболочки в состояния непрерывного спектра [3].

Кластеризация в легких ядрах особенно выражена у изотопов бериллия; их момент инерции оказался очень большим, что согласуется с их 2α -кластерной структурой, характеризующейся большой деформацией (например, [4]). Расчеты также дали гантелеобразную структуру из-за ярко выраженной 2α -кластеризации (например, [5]). В настоящей работе обсуждается проявление структуры изотопов ${}^{10,11,12}\text{Be}$ в реакциях с мишенью ${}^{28}\text{Si}$ в сравнении с экспериментальными данными по полным сечениям реакций для них и для изотопов ${}^{7,9,11}\text{Li}$ [1–3].

Список литературы

1. Yu. E. Penionzhkevich *et al.* // Phys. At. Nucl. 2017. V. 80. P. 928.
2. Yu. G. Sobolev *et al.* // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48. P. 922.
3. Yu. E. Penionzhkevich *et al.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. P. 014609.
4. Yu. E. Penionzhkevich, R. G. Kalpakchieva, Light exotic nuclei near the boundary of neutron stability (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2022).
5. Q. Zhao *et al.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. P. 157.

MANIFESTATION OF HALO AND SKIN STRUCTURES IN NUCLEAR REACTIONS WITH Li AND Be ISOTOPES

V. V. Samarin, M. A. Naumenko, Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev, S. S. Stukalov

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6,
141980 Dubna, Moscow Region, Russia. E-mail: anaumenko@jinr.ru

The comparison of the reactions with Li and Be isotopes is of considerable interest, because they have significantly different structures, which provides a unique opportunity for testing various microscopic models.

The outer neutrons of the ${}^9\text{Li}$ nucleus with an energy of separation of 4 MeV have a compact space distribution that may be called skin. The results of experiments on measuring total cross sections for the ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ reaction as a function of the beam energy in the range $E = 5\text{-}50$ A MeV [1] showed that, in the energy range $E = 10\text{-}20$ A MeV, the values of the total cross section for the ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ reaction are much larger than those for the ${}^7\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ reaction [2]. Such an enhancement could not be explained by the theoretical models existing at the time. In [1], it was assumed that the reason for the enhancement was related to the properties of the shell of the weakly bound outer neutrons and its evolution in the process of collision with the target nucleus.

In the ${}^{11}\text{Li}$ nucleus, the outer neutrons are even more weakly bound - their energy of separation is 0.4 MeV, which leads to an extended space distribution called halo. The enhancement of the cross section for the ${}^{11}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ reaction compared to those for the ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ and ${}^7\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ reactions was experimentally observed in the entire energy range, up to 50 A MeV; this enhancement was theoretically explained by neutron transfer from the extended halo shell to the states of the continuous spectrum [3].

Clustering in light nuclei is especially pronounced in the isotopes of beryllium; their moment of inertia turned out to be very large, which is consistent with their 2α -cluster structure characterized by a large deformation (e.g., [4]). Calculations also yielded a dumbbell-shaped structure due to the pronounced 2α -clustering (e.g., [5]). In this work, we discuss the manifestation of the structures of the ${}^{10,11,12}\text{Be}$ isotopes in the reactions with the ${}^{28}\text{Si}$ target in comparison with the experimental data on the total reaction cross sections for them and for the ${}^{7,9,11}\text{Li}$ isotopes [1–3].

References

1. Yu. E. Penionzhkevich *et al.* // Phys. At. Nucl. 2017. V. 80. P. 928.
2. Yu. G. Sobolev *et al.* // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48. P. 922.
3. Yu. E. Penionzhkevich *et al.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. P. 014609.
4. Yu. E. Penionzhkevich, R. G. Kalpakchieva, Light exotic nuclei near the boundary of neutron stability (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2022).
5. Q. Zhao *et al.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. P. 157.

АНАЛИЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ НИЗКОЛЕЖАЩИХ УРОВНЕЙ В ЯДРАХ ${}^{54,56}\text{Fe}$ ПРИ НЕУПРУГОМ РАССЕЯНИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 16 МэВ

В. И. Кудряшов¹, М. С. Онегин²

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, НИИФ им. В. А. Фока
198504 г. Санкт-Петербург, г. Петродворец, ул. Ульяновская, 1;

²Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт»
188300 Гатчина, Орлова Роща, 1. E-mail: Onegin_MS@pnpi.nrcki.ru

Структура уровней ядер ${}^{54,56}\text{Fe}$ анализируется в рамках оболочечной модели. Ядро ${}^{54}\text{Fe}$ имеет замкнутую нейтронную оболочку $1f^{7/2}$, тогда как ядро ${}^{56}\text{Fe}$ имеет два дополнительных нейтрона на оболочках $2p_{1/2}, 2p_{3/2}$ и $1f_{5/2}$. Протонная же оболочка в обоих ядрах не замкнута и

имеет две дырки в оболочке $1f_{7/2}$. Расчеты выполнялись в модельном пространстве fp оболочек для $gx1a$ гамильтониана в рамках кода NuShellX[1]. Следствием такой структуры, является сильное взаимодействие между нейтронными и протонными оболочками в ядре ^{56}Fe [2]. Так первый уровень 2_1^+ в ядре ^{56}Fe расположен существенно ниже по энергии, чем в ядре ^{54}Fe .

Как показано в работе [2], расчетный спектр возбуждения в ядре ^{56}Fe имеет ротационно-подобную структуру. Такая структура для ядра ^{54}Fe не ожидается. Используя экспериментальные данные по неупругому рассеянию поляризованных протонов при энергии протона 16 МэВ [3], проводится сравнение качества описания дифференциального сечения и анализирующей способности для уровней $2_1^+, 2_2^+, 4_1^+$ и 4_2^+ в указанных ядрах. Расчеты выполнялись с помощью кода ECIS-95. Использовалась коллективная модель возбуждений. Формфакторы переходов рассчитывались в рамках асимметричной ротационной модели или модели гармонических колебаний со смешанным числом фононных возбуждений.

Список литературы

1. B. A. Brown and W.D.M. Rae. *The Shell-Model Code NuShellX*. Nuclear data Sheets, **120**, 115 (2014).
2. H. Horie and K. Ogawa. Nucl. Phys. A **216**, 407 (1973)
3. A. Plavko, V. Kudriashov, M. Onegin, T. Clegg, H. Karwowski, R. Varner, *Spin-94 Contribution to the VIII Symposium on Polarization Phenomenon in Nuclear Physics*, Bloomington, Indiana, USA, 1994, p. 200–201.

ANALYSIS OF LOW ENERGY EXCITATIONS IN $^{54,56}\text{Fe}$ NUCLEI BY INELASTIC SCATTERING OF 16 MEV POLARISED PROTONS

V. I. Kudriashov¹, M. S. Onegin²

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ²Petersburg Nuclear Physics Institute of NRC “Kurchatov Institute”, Gatchina, Russia
E-mail: Onegin_MS@pnpi.nrcki.ru

We analyzed the level structure in $^{54,56}\text{Fe}$ nuclei using shell model. The ^{54}Fe nuclear has closed neutron shell $1f_{7/2}$ as well as ^{54}Fe nuclear has two additional neutrons on $2p_{1/2}, 2p_{3/2}$ and $1f_{5/2}$ shells. The protons shell in both nuclei is not closed and has two holes in $1f_{7/2}$ shell. The calculations were carried out in the fp model space with the $gx1a$ Hamiltonian using the code NuShellX [1]. The strong interaction between a neutron and proton shells have place as a result [2]. For this reason the first level 2_1^+ in ^{56}Fe nuclear situated considerably lower than in ^{54}Fe nuclear.

As was shown in [2], the calculated spectrum of nuclear levels in ^{56}Fe has a rotation-like structure. At the same time this level structure doesn't expected for the ^{54}Fe nucleus. We used experimental data on inelastic scattering of 16 MeV polarized protons [3] to compare the quality of the description of cross-section and analyzing power for $2_1^+, 2_2^+, 4_1^+$ and 4_2^+ levels in these nuclei. The ECIS-95 code was used for our calculations. The calculations were performed in the frame of collective model of nuclear excitations. We used asymmetric rotor model or harmonic vibrational model with mixed number of phonons to describe the formfactor of nuclear excitation.

References

1. B. A. Brown and W.D.M. Rae. *The Shell-Model Code NuShellX*. Nuclear data Sheets, **120**, 115 (2014).
2. H. Horie and K. Ogawa. Nucl. Phys. A **216**, 407 (1973)
3. A. Plavko, V. Kudriashov, M. Onegin, T. Clegg, H. Karwowski, R. Varner, *Spin-94 Contribution to the VIII Symposium on Polarization Phenomenon in Nuclear Physics*, Bloomington, Indiana, USA, 1994, p. 200–201.

АНАЛИЗ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ НА ЯДРЕ ^{56}Fe

М. С. Онегин

Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт»
188300 Гатчина, Орлова Роща
E-mail: Onegin_MS@pnpi.nrcki.ru

Ядро ^{56}Fe имеет уровни возбуждения 2_1^+ (0,846 МэВ), 4_1^+ (2,085 МэВ), 2_2^+ (2,657 МэВ), 4_2^+ (3,122 МэВ) и др. Дифференциальное сечение неупругого возбуждения этих уровней, а также анализирующая способность рассеяния протонов были получены из анализа рассеяния поляризованных протонов с энергией 16 МэВ на ядре ^{56}Fe . Эксперименты были выполнены в 90-х годах на ускорителе в TUNL (США) и отработаны В. И. Кудряшовым (СПбГУ) [1]. В работе [2] дифференциальное сечение возбуждения этих уровней протонами с энергией 26 МэВ анализировалось в рамках метода связанных каналов. Было показано, что дифференциальные сечения неупругого рассеяния можно удовлетворительно описать или, используя для волновых функций возбужденных состояний ядра многофононные возбуждения с примесью ангармоничности, или модель асимметричного ротатора [3]. Дополнительная информация для этих уровней в виде анализирующей способности рассеянных протонов позволяет сравнить качество описания угловых распределений в рамках двух рассматриваемых моделей волновой функции. Расчеты выполнялись по программе ECIS-95 в рамках метода связанных каналов для уравнения Шредингера. Использовалась коллективная модель для возбужденных состояний с деформированным оптическим потенциалом. Оптический потенциал был получен, исходя из имеющейся систематики и наилучшего описания дифференциального сечения и поляризации в канале упругого рассеяния.

Список литературы

1. A. Plavko, V. Kudriashov, M. Onegin, T. Clegg, H. Karwowski, R. Varner, Spin-94 Contribution to the VIII Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Physics, Bloomington, Indiana, USA, 1994, p. 200–201.
2. Kumar, D.K. Avasthi, A. Tripath, *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 014305 (2001).
3. A. S. Davydov & G. F. Filippov, Nucl. Phys. **8**, 237 (1958).

ANALYSIS OF INELASTIC POLARIZED PROTON SCATTERING ON ^{56}Fe

M. S. Onegin

Petersburg Nuclear Physics Institute National Research Center «Kurchatov Institute»
Gatchina, Leningrad oblast, 188300 Russia
E-mail: Onegin_MS@pnpi.nrcki.ru

Nucleus ^{56}Fe has the following excitation states: 2_1^+ (0,846 MeV), 4_1^+ (2,085 MeV), 2_2^+ (2,657 MeV), 4_2^+ (3,122 MeV). Differential cross sections and analyzing powers of these states were determined in the inelastic proton scattering at $E_p = 16$ MeV. The inelastic scattering experiments were performed in the 90-th at the Triangle Universities Nuclear Laboratory (USA) and analyzed by V. I. Kudriashov (SPbGU) [1]. In [2], the differential cross section of these states in inelastic scattering of protons with $E_p = 26$ MeV were analyzed in the scope of coupled channel (CC) calculations. It was shown that the differential cross sections can be described using wave functions of the excited states in terms of two collective models, i.e. the harmonic vibrational model and the asymmetric rotor model [3]. Additional information of inelastic scattering for these states – the analyzing power – can give the opportunity to

compare the description quality of angle distributions of inelastic scattering for these two models. The CC calculations were performed using the ECIS-95 code in the Schrödinger formalism. The optical potential was obtained by fitting the differential cross section and analyzing power in elastic channel using available systematics.

References

1. A. Plavko, V. Kudriashov, M. Onegin, T. Clegg, H. Karwowski, R. Varner, Spin-94 Contribution to the VIII Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Physics, Bloomington, Indiana, USA, 1994, p. 200–201.
2. Kumar, D.K. Avasthi, A. Tripathi, *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 014305 (2001).
3. A. S. Davydov & G. F. Filippov, Nucl. Phys. **8**, 237 (1958).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ В РЕАКЦИЯХ (γ, n) , $(n, 2n)$ И (n, γ) НА ЯДРАХ $^{85,87}\text{Rb}$

С. Р. Палванов¹, А. Х. Иноятов², С. Ашуров¹, Д. И. Тоймуродов¹,
А. А. Тоймуродов¹, Б. И. Курбонов³, О. Тожибоев³, Г. С. Палванова¹

¹ Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

² Объединенный Институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

³ Институт ядерной физики, Ташкент, Узбекистан

e-mail: satimbay@yandex.ru, palvanov1960@gmail.com

100174, Узбекистан, Город: Ташкент, Район: Алмазарский, ул. Университетская, 4

В данной работе представлены результаты работ по исследованию изомерных отношений выходов и сечений реакций $^{85}\text{Rb}(\gamma, n)^{84\text{m.gRb}}$, $^{85}\text{Rb}(n, 2n)^{84\text{m.gRb}}$, $^{87}\text{Rb}(\gamma, n)^{86\text{m.gRb}}$, $^{87}\text{Rb}(n, 2n)^{86\text{m.gRb}}$ и $^{85}\text{Rb}(n, \gamma)^{86\text{m.gRb}}$. Эксперименты проводились методом наведенной активности. В качестве мишеней использовались образцы сульфата рубидия (Rb_2SO_4). Образцы были облучены пучком тормозного излучения в диапазоне энергий 10–35 МэВ с шагом по энергии 1 МэВ. Для облучения нейтронами с энергией 14 МэВ использовался генератор нейтронов НГ-150. Для реакции (n, γ) эксперименты были проведены на исследовательском реакторе ВВЗ-СМ Института ядерной физики АН РУз [1].

Наведенная γ -активность мишеней измерялась на гамма-спектрометре фирмы Canberra, состоящем из германиевого детектора HPGe (с относительной эффективностью – 15 %, разрешением для линии ^{60}Co 1332 кэВ – 1,8 кэВ), цифрового анализатора DSA 1000 и персонального компьютера с программным пакетом Genie 2000 для набора и обработки гамма-спектров. Идентификация заселения изомерного и основного уровней проводилась по γ -линиям 216,2 кэВ ($^{84\text{m}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 20,5$ мин, $J^\pi = 6^+$), 881 кэВ ($^{84\text{g}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 32,9$ сут, $J^\pi = 2^-$), 555,6 кэВ ($^{86\text{m}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 1,02$ мин, $J^\pi = 6^-$), и 1078,8 кэВ ($^{86\text{g}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 18,6$ сут, $J^\pi = 2^-$). Для реакции (γ, n) функции возбуждений получены по экспериментальным изомерным отношениям и полным сечениям фотонейтронной реакции σ_{tot} [2]. Экспериментальные изомерные отношения сравниваются с результатами других работ и рассчитанными результатами по статистической модели ядра. Расчет изомерных отношений проводился с использованием программного пакета TALYS [3].

Список литературы

1. <http://www.inp.uz>
2. A. V. Varlamov et al. Atlas of GDR. INDS(NDS)-394.// Vienna: IAEA, 1999.
3. <http://www.talys.ed/>.

INVESTIGATION OF ISOMER RATIOS IN THE REACTIONS (γ , n), (n, 2n) AND (n, γ) ON $^{85,87}\text{Rb}$ NUCLEI

S. R. Palvanov¹, A. H. Inoyatov², S. Ashurov¹, D. I. To'ymurodov¹,
A. A. To'ymuradov¹, B. I. Kurbonov³, O. Tojiboev³, G. S. Palvanova¹

¹Department of Physics, National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

e-mail: satimbay@yandex.ru, palvanov1960@gmail.com

This paper presents the results of studies of isomeric ratios of yields and cross sections for the reactions $^{85}\text{Rb}(\gamma, n)^{84\text{m}}\text{Rb}$, $^{85}\text{Rb}(n, 2n)^{84\text{m}}\text{Rb}$, $^{87}\text{Rb}(\gamma, n)^{86\text{m}}\text{Rb}$, $^{87}\text{Rb}(n, 2n)^{86\text{m}}\text{Rb}$ and $^{85}\text{Rb}(n, \gamma)^{86\text{m}}\text{Rb}$. The experiments were carried out by the induced activity method. Samples of rubidium sulfate (Rb_2SO_4) were used as targets. The samples were irradiated with a bremsstrahlung beam in the energy range 10–35 MeV with an energy step of 1 MeV. For irradiation with neutrons with an energy of 14 MeV, an NG-150 neutron generator was used. For the (n, γ) reaction, experiments were carried out at the BB3-CM research reactor of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan [1].

The induced γ -activity of the targets was measured on a Canberra gamma spectrometer, consisting of a HPGe germanium detector (with a relative efficiency of 15 %, a resolution for the ^{60}Co 1332 keV line – 1.8 keV), a DSA 1000 digital analyzer, and a personal computer with the Genie software package. 2000 for acquisition and processing of gamma spectra. Identification of the population of the isomeric and ground levels was carried out using γ -lines 216.2 keV ($^{84\text{m}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 20.5$ min, $J^\pi = 6^+$), 881 keV ($^{84\text{g}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 32.9$ days, $J^\pi = 2^-$), 555.6 keV ($^{86\text{m}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 1.02$ min, $J^\pi = 6^-$), and 1078.8 keV ($^{86\text{g}}\text{Rb}$: $T_{1/2} = 18.6$ days, $J^\pi = 2^-$). For the reaction (γ, n), the excitation functions were obtained from the experimental isomeric ratios and total photoneutron reaction cross sections σ_{tot} [2]. The experimental isomeric ratios are compared with the results of other works and the calculated results using the statistical model of the nucleus. The calculation of isomeric ratios was carried out using the TALYS software package [3].

References

1. <http://www.inp.uz>
2. A. V. Varlamov et al. Atlas of GDR. INDS(NDS)-394.// Vienna: IAEA, 1999.
3. <http://www.talys.ed/>.

ПРИМЕНЕНИЕ БИБЛИОТЕКИ TalysLib ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ РЕАКЦИЙ РАССЕЙЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ЯДРАХ ^{28}Si И ^{32}S

Г. В. Пампушик¹, Н. А. Фёдоров^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
pampushik.g@gmail.com

В лаборатории нейтронной физики им. Франка базируется международный проект TANGRA по изучению рассеяния меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ на атомных ядрах. Для теоретических расчетов свойств нейтрон-ядерных реакций в проекте используется программа TALYS[1], которая обладает широким функционалом и содержит подробную базу данных о структуре атомных ядер, основанную на библиотеке RIPL-3[2]. Основным способом описания нейтрон-ядерных реакций в этой программе является оптическая модель, которая применяется для расчетов упругого и неупругого рассеяния. Для подбора параметров

оптического потенциала и упрощённого доступа к результатам расчета TALYS, а также к базе данных EXFOR [3], была разработана объектно-ориентированная C++ библиотека TalysLib. С помощью функционала библиотеки была проведена оптимизация параметров оптического потенциала для реакций рассеяния нейтронов на ядрах ^{28}Si и ^{32}S .

Список литературы

- 1) Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. «TALYS-1.0» // Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. EDP Sciences, 2007. С. 211–214.
- 2) IAEA-Tecdoc, RIPL3, Reference Input Parameter Library, <http://www-nds.iaea.org/RIPL-3>.
- 3) Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), <https://www-nds.iaea.org/exfor>.

APPLYING TalysLib LIBRARY FOR OPTIMIZATION OF OPTICAL POTENTIAL PARAMETERS FOR NEUTRON SCATTERING ON ^{28}Si AND ^{32}S

G. V. Pampushik¹, N. A. Fedorov^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

¹E-mail: pampushik.g@gmail.com

In the Frank Laboratory of Neutron Physics, the international project TANGRA is being implemented to study the scattering of tagged 14.1 MeV neutrons on atomic nuclei. For the purposes of the theoretical part of the project, the TALYS program is used. It has wide functionality, and also contains nuclear structure database and set of the nuclear reaction models parameters, based on the RIPL-3 library [2]. The main way to describe neutron-nuclear reactions in this program is the optical model, which is used to calculate the elastic and inelastic scattering cross sections. To simplify access to the calculation results and the TALYS database, as well as EXFOR[3] databases, object oriented C++ library, TalysLib is being developed. Using its functional we obtained new sets of optical model parameters for fast neutron scattering on ^{28}Si and ^{32}S which will be presented.

References

- 1) Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. «TALYS-1.0» // Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. EDP Sciences, 2007. С. 211–214.
- 2) IAEA-Tecdoc, RIPL3, Reference Input Parameter Library, <http://www-nds.iaea.org/RIPL-3>.
- 3) Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), <https://www-nds.iaea.org/exfor>.

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ $^{13}\text{C}(\alpha, \alpha_0)^{13}\text{C}$ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 2.0-7.0 МэВ

П. С. Прусаченко, Т. Л. Бобровский, М. В. Боховко, А. Ф. Гурбич

Физико-энергетический институт им. Лейпунского (ФЭИ), пл. Бондаренко 1, г. Обнинск,
249033, Россия;

E-mail: pprusachenko@ippe.ru

Дифференциальные сечения реакции $^{13}\text{C}(\alpha, \alpha_0)^{13}\text{C}$ были измерены под тремя углами (130° , 150° и 170°) в диапазоне энергий 2.0-7.0 МэВ. В качестве мишени был использован тонкий слой углерода, нанесенный на толстую подложку из бериллия. Толщина и обогащение мишени ^{13}C были определены методами ядерного микроанализа. При анализе полученных результатов учитывалось влияние нагара углерода, образующегося в процессе измерений на поверхности мишени. Результаты измерений могут быть использованы для пересмотра оценки сечения реакции $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ с помощью многоканальных R-матричных расчетов.

THE MEASUREMENTS OF THE $^{13}\text{C}(\alpha, \alpha_0)^{13}\text{C}$ REACTION CROSS-SECTION IN THE ENERGY RANGE OF 2.0 – 7.0 MeV

P. S. Prusachenko, T. L. Bobrovskiy, M. V. Bokhovko, A. F. Gurbich

I.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering (IPPE), Bondarenko sq. 1, Obninsk,
249033, Russia

E-mail: pprusachenko@ippe.ru

The differential cross-sections of the $^{13}\text{C}(\alpha, \alpha_0)^{13}\text{C}$ reaction were measured at three angles (130° , 150° and 170°) in the energy interval of 2.0–7.0 MeV. The thin layer of ^{13}C deposited to the beryllium backing was used as a target. The thickness and enrichment of the target were determined by the ion beam analysis methods. The effect of the carbon build-up was taken into account during the data analysis. The measurement results can be used for re-examination of evaluation of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction cross-section using multi-channel R-matrix calculations.

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ РЕАКЦИИ $^{76}\text{Se}(\gamma, xnnp)$, ИНДУЦИРОВАННЫЕ С КОНЕЧНЫМИ ЭНЕРГИЯМИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 20-80 МэВ

**F. A. Rasulova^{a,b}, R. A. Aliev^{c,d}, S. S. Belyshev^{e,f}, D. L. Demin^b, S. A. Evseev^b, N. J. Fursova^e,
V. V. Khankin^e, J. H. Khushvaktov^{a,b}, V. V. Kobets^b, A. A. Kuznetsov^{e,f}, S. V. Rozov^b,
E. T. Ruziev^a, T. N. Tran^b, E. A. Yakushev^b, B. S. Yuldashev^{a,b}**

^a Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

^b Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna, Russia

^c Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Russia

^d National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

^e Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

^f Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: rasulova@jinr.ru

Сечения на эквивалентный квант σ_q первые измерены для многонуклонных реакций $^{76}\text{Se}(\gamma, xnnp)$ в тормозном излучении гамма-квантов в интервале энергий 20-80 МэВ. Эксперименты проведены на пучке электронных ускорителей РМ-55 (НИИЯФ МГУ) и LINAC-200 (ЛЯП ОИЯИ) с помощью γ -активационной методики. Тормозные спектры вычислены с помощью программы Geant4.

Теоретические значения сечения на эквивалентный квант σ_q рассчитаны на основе парциальных сечений $\sigma(E)$, полученных с помощью программы TALYS и комбинированной модели фотоядерных реакций. Учет изоспинового расщепления в расчетах позволил описать экспериментальные данные по реакциям с вылетом протона. В тяжелых изотопах Se существенную роль играет изоспиновое расщепление ГДР, учет которого позволяет корректно описать фотопротонный канал распада ГДР.

Результаты настоящей работы можно рассматривать как полезное дополнение к имеющимся в литературе данным для диапазона энергий от 20 до 80 МэВ.

MULTIPARTICLE $^{nat}\text{Se}(\gamma, xny\bar{p})$ REACTIONS INDUCED WITH BREMSSTRAHLUNG END-POINT ENERGIES OF 20-80 MeV

F. A. Rasulova^{a,b}, R. A. Aliev^{c,d}, S. S. Belyshev^{e,f}, D. L. Demin^b, S. A. Evseev^b, N. J. Fursova^e,
V. V. Khankin^e, J. H. Khushvaktov^{a,b}, V. V. Kobets^b, A. A. Kuznetsov^{e,f}, S. V. Rozov^b,
E. T. Ruziev^a, T. N. Tran^b, E. A. Yakushev^b, B. S. Yuldashev^{a,b}

^a Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

^b Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna, Russia

^c Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Russia

^d National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

^e Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

^f Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: rasulova@jinr.ru

The cross sections per equivalent photon σ_q were first measured for the photonuclear multiparticle reactions $^{nat}\text{Se}(\gamma, xny\bar{p})$ at end-point bremsstrahlung gamma energies ranging from 20 to 80 MeV. The experiments were performed with the beam from the electron accelerators RM-55 (SINP MSU) and LINAC-200 (DLNP JINR) with the use of the γ -activation technique. The bremsstrahlung quantum flux was calculated with the program Geant4.

The theoretical values of the cross sections per equivalent photon σ_q were calculated using the partial cross section $\sigma(E)$ computed with the TALYS package code and the combined model of photonuclear reactions. Including isospin splitting in the calculations allowed us to describe experimental data on reactions with proton escape. In heavy Se isotopes, isospin splitting plays a significant role GDR, the accounting of which makes it possible to correctly describe photoproton decay channel of the GDR.

The results of the present work may be considered as a useful addition to the data available in the literature for the energy range 20 to 80 MeV.

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ РЕАКЦИИ $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xny\bar{p})$, ИНДУЦИРОВАННЫЕ С КОНЕЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 55 МэВ

F. A. Rasulova^{a,b}, R. A. Aliev^{c,d}, S. S. Belyshev^{e,f}, N. J. Fursova^e, V. V. Khankin^e,
A. A. Kuznetsov^{e,f}

^a Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

^b Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna, Russia

^c Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Russia

^d National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

^e Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

^f Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: rasulova@jinr.ru

Методом наведенной активности исследованы фотоядерные реакции на природной смеси изотопов стронция. В этом исследовании измерялись выходы радионуклидов ^{83}Sr , ^{85}Sr , $^{85\text{m}}\text{Sr}$, $^{87\text{m}}\text{Sr}$, ^{81}Rb , $^{82\text{m}}\text{Rb}$, ^{83}Rb , ^{84}Rb и $^{86\text{m}+g}\text{Rb}$, образующихся в многочастичных реакциях $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xny\bar{p})$ с конечной энергией тормозного излучения 55 МэВ. Эксперимент выполнен на пучке ускорителя электронов РМ-55 НИИЯФ МГУ с использованием метода γ -активации.

Экспериментальные значения сечений на эквивалентный квант σ_q рассчитывались с использованием экспериментальных выходов и потока квантов тормозного излучения, рассчитанного с помощью программы Geant4. Теоретические значения сечений на эквивалентный квант σ_q были рассчитаны с использованием парциального сечения $\sigma(E)$, рассчитанного с помощью программного кода пакета TALYS.

MULTIPARTICLE $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnp)$ REACTIONS INDUCED WITH BREMSSTRAHLUNG END-POINT ENERGY OF 55 MeV

F. A. Rasulova^{a,b}, R. A. Aliev^{c,d}, S. S. Belyshev^{e,f}, N. J. Fursova^e, V. V. Khankin^e,
A. A. Kuznetsov^{e,f}

^a Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

^b Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna, Russia

^c Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Russia

^d National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

^e Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

^f Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: rasulova@jinr.ru

The method of induced activity was used to study photonuclear reactions on a natural mixture of strontium isotopes. This study measured the yields of the radionuclides ^{83}Sr , ^{85}Sr , ^{85m}Sr , ^{87m}Sr , ^{81}Rb , ^{82m}Rb , ^{83}Rb , ^{84}Rb and $^{86m+g}\text{Rb}$ produced in $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnp)$ multiparticle reactions with bremsstrahlung end-point energy of 55 MeV. The experiment was performed with the beam from the electron accelerator RM-55 SINP MSU with the use of the γ -activation technique.

The experimental values of the cross sections per equivalent photon σ_q were calculated using the experimental yields and the bremsstrahlung quantum flux which was calculated with the program Geant4. The theoretical values of the cross sections per equivalent photon σ_q were calculated using the partial cross section $\sigma(E)$ computed with the TALYS package code.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ ПРИ ЭНЕРГИИ 41.3 МэВ

С. Б. Сакута^{3*}, Маулен Нассурлла^{1,2}, Н. Буртебаев^{1,2}, С. В. Артемов⁴, К. Русек⁵,
Маржан Нассурлла¹, Ф. Эргашов⁴, А. Сабидолда^{1,2}, Р. Ходжаев^{1,2}, И. Б. Муханов^{1,2},
Е. Пясецки⁵, Ш. Хамада⁶

¹ Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан

² Казахский Национальный Университет Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³ Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

⁴ Институт Ядерной Физики, Академия Наук Узбекистан

⁵ Лаборатория Тяжелых Ионов, Варшавский Университет, Польша

⁶ Факультет Науки, Танта Университет, Танта, Египет

Цель настоящей работы состояла в получении астрофизического S – фактора реакции радиационного захвата $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$, а также скорости этой реакции при звездных температурах с использованием значений асимптотических нормировочных коэффициентов (АНК) для связанных протонных конфигураций ядра ^{12}C ($^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + p$). Точные значения АНК получались из анализа прецизионно измеренных дифференциальных сечений реакции передачи протона $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ при энергиях несколько выше кулоновского барьера, где процесс передачи ожидается периферийным.

Дифференциальные сечения реакции $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ были измерены при энергии $E_{10\text{B}} = 41.3$ МэВ на пучке тяжелых ионов, выведенных из ускорителя U-200P Варшавского университета. Мишенями служили тонкие самоподдерживающиеся пленки бора толщиной до 100 мкг/см² (с обогащением по ^{10}B до 90 %). Для идентификации типа частиц была использована двумерная система анализа ΔE - E . Угловые распределения для переходов в основное и первое возбужденное состояния ядра ^{12}C получены в диапазоне углов 8 – 75° в системе центра масс. Систематическая погрешность экспериментальных дифференциальных сечений не превышала 15 %. Анализ дифференциальных поперечных сечений реакции $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ был выполнен в рамках метода связанных каналов реакций. Извлеченные из анализа величины спектроскопических амплитуд для системы $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + p$ находятся в согласии с литературными данными. Получены

соответствующие асимптотические нормировочные коэффициенты, что позволит извлечь значения астрофизического S – фактора реакции радиационного захвата $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$.

Данная работа поддержана Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP14870964 “Исследования взаимодействия протонов и ионов ^{10}B с ядрами ^{11}B для термонуклеарных и астрофизических применений”).

INVESTIGATION OF THE $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ REACTION AT AN ENERGY OF 41.3 MeV

**Maulen Nassurlla^{1,2}, N. Burtabayev^{1,2}, S. B. Sakuta^{3*}, S. V. Artemov⁴, K. Rusek⁵,
Marzhan Nassurlla¹, F. Ergashev⁴, A. Sabidolda^{1,2}, R. Khodjaev^{1,2}, Y. B. Mukanov^{1,2},
E. Piasecki⁵, Sh. Hamada⁶**

¹Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

²Al-Faraby Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

⁴Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of Uzbekistan

⁵Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw, Poland

⁶Faculty of Science, Tanta University, Tanta, Egypt

The purpose of this work was to obtain the astrophysical S – factor of the $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ radiative capture reaction, as well as the rate of this reaction at stellar temperatures using the values of asymptotic normalization coefficients (ANC) for coupled proton configurations ^{12}C nuclei ($^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + p$). Precise ANC values were obtained from the analysis of precision measured differential cross sections for the $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ proton transfer reaction at energies slightly above the Coulomb barrier, where the transfer process is expected to be peripheral.

The differential cross sections of the $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ reaction were measured at an energy of $E_{^{10}\text{B}} = 41.3$ MeV on the beam of the U-200P heavy ion accelerator at the University of Warsaw. The targets were thin self-supported boron films with a thickness of up to $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (with a ^{10}B enrichment of up to 90 %). A two-dimensional ΔE - E analysis system was used to identify the type of particles. The angular distributions of the proton transfer reaction for the ground and first excited state of the ^{12}C nucleus were obtained in the range of angles of 8–75 degrees in the center of mass system. The systematic error of experimental differential cross sections did not exceed 15 %.

The analysis of differential cross-sections of reaction $^{11}\text{B}(^{10}\text{B}, ^9\text{Be})^{12}\text{C}$ was carried out within the framework of the method of coupled channels of reactions. The values of spectroscopic amplitudes extracted from the analysis for the system $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + p$ is in agreement with the literature data. The corresponding asymptotic normalization coefficients are obtained, which will make it possible to extract the value of the astrophysical S -factor of the $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ radiative capture reaction.

This work is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant no. AP14870964 “Studies of the interaction of protons and ions ^{10}B with nuclei ^{11}B for thermonuclear and astrophysical applications”).

ОПТИКО-МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНА И ПРОТОНА НА ЯДРЕ ^6Li С УЧЁТОМ РЕЗОНАНСНОГО ВКЛАДА

Л. Н. Генералов, В. А. Жеребцов, С. М. Селянкина

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37

otd4@expd.vniief.ru

С использованием резонансного оптико-модельного кода OptModel [1, 2] (разработанного Л. Н. Генераловым и В. А. Жеребцовым для рассеиваемых $n, p, d, t, ^3, ^4, ^6\text{He}, ^6\text{Li}$) выполнено описание всех доступных экспериментальных данных по упругому рассеянию на ядре ^6Li нейтронов с энергией E_n от 1 кэВ до 24 МэВ и протонов с энергией E_p от 50 кэВ до 185 МэВ.

Одновременно анализировались дифференциальные сечения рассеяния, поляризация и полные сечения реакции, а в случае нейтронов – еще и полные сечения упругого рассеяния. Нарушение унитарности матрицы рассеяния (оптико-модельная+резонансная) в отдельных энергетических точках не превышало 15 %, что находится на уровне средних погрешностей анализируемых данных. В этом анализе, являющимся продолжением наших исследований по рассеянию протонов [3, 4] на ${}^6\text{Li}$, мы впервые использовали энергетическую зависимость радиусов и диффузностей в потенциалах поверхностного и объемного поглощений. Ранее такая зависимость использовалась для радиусов и диффузностей других частей оптического потенциала.

В работе обсуждаются оптические потенциалы зеркальных реакций упругого рассеяния нейтрона и протона. Ожидаемо потенциалы имеют близкие центральные реальные составляющие. Особое внимание уделено резонансной структуре анализируемых данных.

Список литературы

- [1] Генералов Л. Н., Жеребцов В. А., Таова С. М. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2014. Вып. 19. С. 164.
- [2] Генералов Л. Н., Жеребцов В. А., Таова С. М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 328.
- [3] Генералов Л. Н., Жеребцов В. А., Селянкина С. М. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2021. Т. 85. С. 1461.
- [4] Generalov L. N., Zherebtsov V. A., Selyankina S. M. // Book of abstracts Intern. Conf. Nucl. Phys. “Nucleus-2022”. 2022. P. 112–113.

OPTICAL MODEL ANALYSIS OF NEUTRON AND PROTON ELASTIC SCATTERING ON ${}^6\text{Li}$ NUCLEI WITH RESONANCE CONTRIBUTION

L. N. Generalov, V. A. Zherebtsov, S. M. Selyankina

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics»
Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

With the use of resonance optical-model code OptModel [1,2] (developed by L.N. Generalov and V.A. Zherebtsov for scattered n, p, d, t, ${}^{3,4,6}\text{He}$, ${}^6\text{Li}$) there were described all available experimental data on elastic scattering of neutrons with energies E_n from 1 keV to 24 MeV and protons with energies E_p from 50 keV to 185 MeV on ${}^6\text{Li}$ nuclei. Differential scattering cross sections, polarization and total cross sections were analyzed simultaneously; for the case of neutrons total elastic scattering cross sections were analyzed together with those mentioned above.

Violation of scattering matrix unitarity (optical-model + resonance) at several energies did not exceed 15% what corresponds to the mean errors of the data analyzed. In this analysis (continuation of our research of proton scattering [3, 4] on ${}^6\text{Li}$) we used for the first time the energy dependence of radius and diffuseness in the volume and surface absorption potentials. Previously such dependence was used for radius and diffuseness of other parts of optical potential.

In this paper optical potentials of mirror reactions of neutron and proton elastic scattering are discussed. As it was expected the potentials have close central real components. Particular attention is paid to the resonance structure of the data analyzed.

References

- [1] Generalov L. N., Zherebtsov V. A., Taova S. M. // Trudy RFNC-VNIIEF. 2014. Issue 19. P. 164.
- [2] Generalov L. N., Zherebtsov V. A., Taova S. M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 295.
- [3] Generalov L. N., Zherebtsov V. A., Selyankina S. M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. P. 1136.
- [4] Generalov L. N., Zherebtsov V. A., Selyankina S. M. // Book of abstracts Intern. Conf. Nucl. Phys. “Nucleus-2022”. 2022. P. 112–113.

СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ $^{19}\text{F}(d,t)^{18}\text{F}$

Л. Н. Генералов, В. А. Жеребцов, С. М. Селянкина

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37
otd4@expd.vniief.ru

В интервале энергии дейтронов 5–16 МэВ получена оценка (рис.) интегральных сечений реакции $^{19}\text{F}(d,t)^{18}\text{F}$. Оценка выполнена в электронной библиотеке SaBa (SarovBase) математическими средствами (сплайн аппроксимацией) этой библиотеки [1]. Мотивацией исследований служат новые данные по дифференциальным сечениям этой реакции при энергиях дейтронов 7 и 8 МэВ, полученные в результате обработки спектров тритонов [2]. По этим дифференциальным сечениям определены интегральные сечения, равные соответственно (4.22 ± 0.30) и (10.3 ± 0.6) мб, которые были использованы в качестве опорных: наши экспериментальные активационные данные [3] были уменьшены в 1.3 раза. Данные [5] оставлены без изменения. Для согласования с остальными данными, результаты [4], полученные в циклотронном эксперименте, смещены по энергии дейтронов на -1.4626 МэВ.

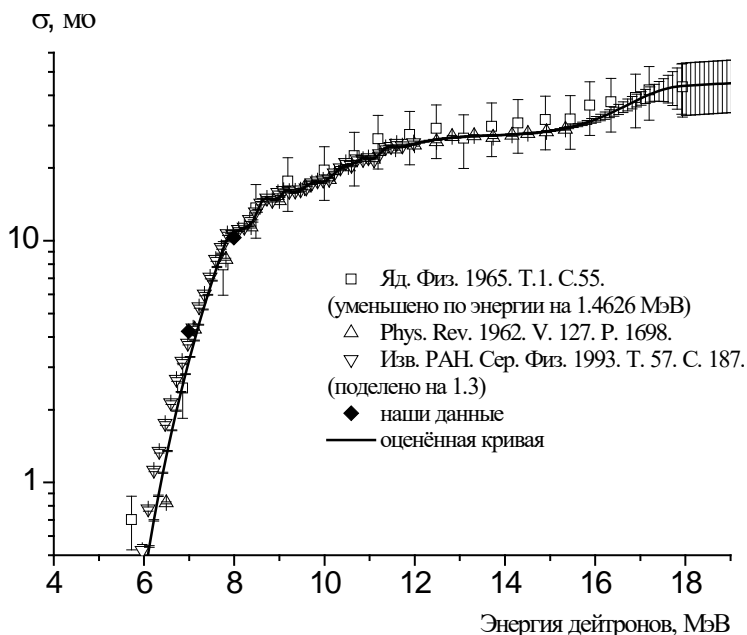


Рисунок. Оценённые и экспериментальные значения интегральных сечений реакции $^{19}\text{F}(d,t)^{18}\text{F}$

Список литературы

- [1]. Генералов Л. Н., Жеребцов В. А., Селянкина С. М. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2022. Т. 86. С. 1134.
- [2]. Генералов Л. Н., Вихлянцев О. П., Карпов И. А. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2020. Т. 84. С. 1774.
- [3]. Абрамович С. Н., Гужовский Б. Я., Генералов Л. Н. и др. // Изв. АН. Сер. физ. 1993. Т.57. С. 187.
- [4]. Бриль О. Д. // Яд. Физ. 1965. Т. 1. С. 55.
- [5]. Boven L. H. and Irvine J.W. Jr // Phys. Rev. 1962. V.127. p.1698.

$^{19}\text{F}(d,t)^{18}\text{F}$ REACTION CROSS SECTIONS

L. N. Generalov, V. A. Zherebtsov, S. M. Selyankina

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics»
Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

Evaluation of $^{19}\text{F}(d,t)^{18}\text{F}$ reaction integral cross sections was obtained in the deuteron energy range 5–16 MeV (Fig.). Evaluation was obtained in our electronic SaBa (Sarov Base) library using mathematic tools (spline-approximation) of this library [1]. Our new experimental data on differential cross-sections of this reaction for deuteron energies 7 and 8 MeV obtained as a result of processing spectra of tritons [2] have become the reason of researches. Basing on these differential cross-sections there were found integral cross-sections, correspondingly equal to (4.22 ± 0.30) and (10.3 ± 0.6) mb, that were used as reference ones: our experimental activation data [3] were lowered by a factor of 1.3. The data [5] were left unchanged. The results [4] obtained during a cyclotron experiment were shifted in deuteron energy by (-1.4626) MeV so that they agree with the other data.

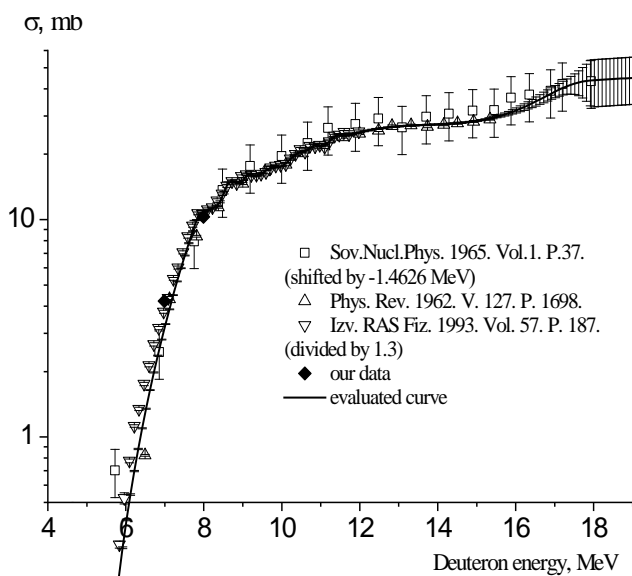


Figure. Evaluated and experimental $^{19}\text{F}(d,t)^{18}\text{F}$ reaction integral cross section

References

- [1] Generalov L. N., Zherebtsov V. A., Selyankina S. M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. P. 937.
- [2] Generalov L. N., Vikhlyantsev O. P., Karpov I. A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. P. 1511.
- [3] Abramovich S. N., Guzhovskii B. Ya., Generalov L. N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 1993. V. 57. P. 1832.
- [4] Brill O. D. // Sov. Nucl. Phys. 1965. V. 1. P. 37.
- [5] Boven L. H., Irvine J. W. Jr // Phys. Rev. 1962. V. 127. P. 1698.

ОЦЕНКА ДОЛИ КРОСС-ТОЛКОВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В ДЕТЕКТОРЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ (МНД)

О. В. Сидорова^{1,2}, Ш. Зейналов¹

¹141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, д. 6

²Государственный университет “Дубна”, Дубна, Московская область, Россия
E-mail: sidorova@jinr.ru

В ОИЯИ проводится эксперимент по детектированию мгновенных нейтронов деления (МНД) в резонансном нейтронном делении U-235. В качестве источника нейтронов предполагается использовать двойную ионизационную камеру (ДИК) с сетками Фриша вместе с детектором PFN, разработанным для спектроскопии осколков деления. Детектор PFN состоит из 32 заполненных сцинтилляционной жидкостью BC501 модулей фирмы Scionix (Нидерланды). Модули располагаются на поверхности сферы радиусом 50 см. Двойная ионизационная камера Фриша используется в качестве спектрометра осколков деления и служит источником запускающего сигнала для устройства регистрации МНД. Наличие большого числа модулей увеличивает интенсивность регистрации МНД детектором, однако многократное рассеяние нейтронов на модулях (кросс-толки) вносит дополнительную погрешность. В данной работе представлены результаты моделирования работы детектора с целью оценки вклада кросс-толков.

CROSS-TALK RATE ESTIMATION USING COMPUTER SIMULATION OF PFN DETECTOR

O. V. Sidorova^{1,2}, Sh. Zeynalov¹

¹ Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

²Dubna State University, Dubna, Moscow region, Russia

E-mail: sidorova@jinr.ru

PFN emission of $^{235}\text{U}(n,f)$ reaction are under investigation in JINR for last 20 year. The recent achievements in experimental apparatus simulation are the subject of this presentation. The object of simulation is prompt fission neutron (PFN) detector used for resonance neutron induced fission of U-235. The neutron source was IREN facility and double ionization chamber (DIC) with Frisch grids was used for fission fragment spectroscopy. The PFN detector was multi detector system consisted of 32 BC501 scintillation liquid filled modules from the Sionix (Netherlands) company. Detectors were located on the sphere surface with 50 cm radius. Double Frisch gridded ionization chamber, used as fission spectrometer at the same time generated trigger signal for PFN registration apparatus. For each fission event the following simulated information was recorded: correlated fission fragments time mark, emission angle in respect to the selected coordinate frames along with the pulse heights and shapes of neutron detector signals. Multiple neutron scattering and the cross-talks were taken into account in order to evaluate contribution of those effects in the final results.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ЯДЕР ДЕЙТЕРИЯ

А. С. Соловьев

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова
Россия, 127055, Москва, ул. Суцевская, д. 22

Телефон: +7 (499) 978-78-03; Факс: +7 (499) 978-09-03; E-mail: alexander.solovyev@mail.ru

В данной работе исследуется процесс радиационного захвата, протекающий в четырех-нуклонной ядерной системе при столкновении ядер дейтерия. Этот процесс представляет значительный интерес для ядерной астрофизики применительно к предсказаниям распространенности химических элементов, сформированных в ходе первичного нуклеосинтеза [1].

Теоретическую основу исследования составляет микроскопический многоканальный кластерный подход в осцилляторном представлении [2]. Вычисляются полное и парциальные сечения соответствующей реакции в терминах астрофизического S -фактора. Достигнуто хорошее согласие с экспериментальными данными. Показано, что тензорная сила ядерного взаимодействия играет ключевую роль для описания низкоэнергетической зависимости полного сечения (астрофизического S -фактора).

Список литературы

- [1] Cyburt R. H., Fields B. D., Olive K. A., and Yeh T.-H. Big bang nucleosynthesis: present status // Reviews of Modern Physics. 2016. Vol. 88. P. 015004.
[2] Solovyev A. S. Microscopic description of the ${}^2\text{H}(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ radiative capture reaction // Physical Review C. 2022. Vol. 106. P. 014610.

THEORETICAL STUDY OF THE DEUTEON + DEUTERON RADIATIVE CAPTURE

A. S. Solovyev

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA)
22 Sushchevskaya str., Moscow 127055, Russia

Phone: +7 (499) 978-78-03; Fax: +7 (499) 978-09-03; E-mail: alexander.solovyev@mail.ru

In this work, the radiative capture process in the four-nucleon $d + d$ system is studied. The considered process is of significant interest for astrophysical applications related to predictions for the abundances of the primordial elements synthesized during the big-bang nucleosynthesis [1]. The theoretical framework of the study is based on the microscopic multichannel cluster approach in the oscillator representation [2]. The total and partial cross sections for the reaction in terms of the astrophysical S factor are calculated. A good agreement with experimental data is achieved. The tensor force of the nuclear interaction is shown to play a key role in describing the low-energy dependence of the total cross section (astrophysical S factor).

References

- [1] Cyburt R. H., Fields B. D., Olive K. A., and Yeh T.-H. Big bang nucleosynthesis: present status // Reviews of Modern Physics. 2016. Vol. 88. P. 015004.
[2] Solovyev A. S. Microscopic description of the ${}^2\text{H}(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ radiative capture reaction // Physical Review C. 2022. Vol. 106. P. 014610.

ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ С ЯДРАМИ У ГРАНИЦЫ НУКЛОННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ 4П-СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

С. С. Стукалов, Ю. Г. Соболев, Ю. Э. Пенионжкевич, В. В. Самарин

ОИЯИ, Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6,
г. Дубна, Московская обл., Россия, 141980, +7 (49621)6-50-59/6-51-46, post@jinr.ru;
E-mail: stukalov@jinr.ru

Представлена методика измерения полных сечений реакций σ_R с использованием спектрометра на основе CsI – сцинтилляторов с телесным углом, близким к $\Omega = 4\pi$. Описана установка на основе многодетекторного спектрометра, использовавшаяся в экспериментах по измерению σ_R с радиоактивными ядрами в ЛЯР ОИЯИ [1–2]. Характеристики спектрометра,

полученные с помощью источника ^{60}Co , сравниваются с результатами расчетов по программе симуляции GEANT4. Показано преимущество представленной методики, использующей измеренные распределения вероятностей срабатывания определенного числа детекторов спектрометра в зависимости от множественности γ -квантов перед методикой, использующей среднюю эффективность установки. Будет продемонстрировано сравнение двух методик получения σ_R с помощью многодетекторного спектрометра на примере реакций $^6\text{He}+^{28}\text{Si}$, ^{59}Co , ^{181}Ta .

Список литературы

1. Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev, V. V. Samarin, M. A. Naumenko, N. A. Lashmanov, V. A. Maslov, I. Siváček and S. S. Stukalov, Energy dependence of the total cross section for the $^{11}\text{Li}+^{28}\text{Si}$ reaction// PHYSICAL REVIEW C 99, 014609, (2019);

2. Yu. G. Sobolev, Yu. E. Penionzhkevich, V. V. Samarin, M. A. Naumenko, S. S. Stukalov, I. Siváček, S. A. Krupko, A. Kugler, J. Louko, Total Reaction Cross Sections for ^6He and ^9Li Nuclei on ^{28}Si , ^{59}Co , and ^{181}Ta Targets// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, V. 84, No. 8, pp. 948–956, (2020).

MEASUREMENTS OF THE TOTAL CROSS SECTIONS FOR REACTIONS WITH NUCLEI NEAR THE NUCLEON STABILITY BOUNDARY USING A 4PI SCINTILLATION SPECTROMETER

S. S. Stukalov, Yu. G. Sobolev, Yu. E. Penionzhkevich, V. V. Samarin

JINR Joint Institute for Nuclear Research, 141980, 6 Joliot-Curie St.,
Dubna, Moscow Region, Russia,
141980, +7 (49621)6-50-59/6-51-46, post@jinr.ru;
E-mail: stukalov@jinr.ru

A technique will be presented for measuring the total reaction cross sections σ_R using a spectrometer based on CsI scintillators with a solid angle close to $\Omega = 4\pi$. A setup based on a multi-detector spectrometer, which was used in experiments to measure σ_R with radioactive poisons, is described [1–2]. The characteristics of the spectrometer obtained using the ^{60}Co source are compared with the results of calculations using the GEANT4 simulation program. The advantage of the presented technique, which uses the measured probability distributions of operation of a certain number of spectrometer detectors depending on the multiplicity of γ -quanta, over the technique that uses the average efficiency of the setup, is shown. A comparison of two methods for obtaining σ_R using a multi-detector spectrometer will be demonstrated using the reactions $^6\text{He}+^{28}\text{Si}$, ^{59}Co , ^{181}Ta as an example.

References

1. Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev, V. V. Samarin, M. A. Naumenko, N. A. Lashmanov, V. A. Maslov, I. Siváček and S. S. Stukalov, Energy dependence of the total cross section for the $^{11}\text{Li}+^{28}\text{Si}$ reaction// PHYSICAL REVIEW C 99, 014609, (2019);

2. Yu. G. Sobolev, Yu. E. Penionzhkevich, V. V. Samarin, M. A. Naumenko, S. S. Stukalov, I. Siváček, S. A. Krupko, A. Kugler, J. Louko, Total Reaction Cross Sections for ^6He and ^9Li Nuclei on ^{28}Si , ^{59}Co , and ^{181}Ta Targets// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, V. 84, No. 8, pp. 948–956, (2020).

ЭКСПЕРИМЕНТ MONUMENT: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА МЮОНОВ АТОМНЫМИ ЯДРАМИ

**D. Bajpai¹, L. Baudis², В. В. Белов³, E. Bossio⁴, Т.Е. Cocolios⁵, Н. Ejiri⁶, М. В. Фомина³,
I. H. Hashim⁷, M. Heines⁵, К. Н. Гусев^{3,4}, С. В. Казарцев³, А. Knecht⁸, E. Mondragon⁴,
Ng Zheng Wei⁷, I. Ostrovskiy¹, F. Othman⁷, G. Rodrigues Araujo², Н. С. Румянцева³,
S. Schönert⁴, M. Schwarz⁴, E. А. Шевчик³, М. В. Ширченко³, Ю. А. Шитов^{3,9}, J. Suhonen¹⁰,
E. O. Сушенюк³, S. M. Vogiatzi^{8,11}, C. Wiesinger³, И. В. Житников³, Д. Р. Зинатулина³**

¹ The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama 35487, USA

² University of Zurich, Rämistrasse 71, 8006 Zürich, Switzerland

³ 141980 Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6

⁴ Technical University of Munich, Boltzmannstrasse 15, 85748 Garching, Germany

⁵ Katholieke Universiteit Leuven, Oude Markt 13, 3000 Leuven, Belgium

⁶ Osaka University, 1-1 Yamadaoka, Suita, 565-0871 Osaka, Japan

⁷ Universiti Teknologi Malaysia, Jalan Iman, 81310 Johor Bahru, Johor, Malaysia

⁸ Paul Scherrer Institute, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen, Switzerland

⁹ Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University in Prague, Husova 240/5,
110 00 Prague, Czech Republic

¹⁰ University of Jyväskylä, Seminaarinkatu 15, 40014 Jyväskylä, Finland

¹¹ Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Switzerland
e-mail: sushenok@jinr.ru, тел.: +7 (49621) 6-36-05

Процесс мюонного захвата атомными ядрами представляет интерес для широкого круга задач, связанных с различными проблемами мезоатомной физики и структуры ядра; его изучение отвечает на вопросы об универсальности описания слабого взаимодействия, а также имеет ряд астрофизических приложений. Одной из актуальных задач является поиск кандидатов на безнейтринный двойной бета-распад. Для данного процесса характерны передачи больших импульсов, как и в случае мюонного захвата, который с этой точки зрения можно считать удобной площадкой как для проверки различных ядерных моделей, так и для определения констант слабого взаимодействия. Последнее возможно благодаря хорошей экспериментальной точности определения скоростей захвата, что объясняет интерес к данному процессу.

Целью проекта MONUMENT является проведение экспериментальных измерений мюонного захвата в ядрах. Идея экспериментов по мюонному захвату основана на точном измерении время-энергетического распределения гамма-лучей после захвата мюона. Анализ временных распределений и интенсивностей задержанных гамма-квантов позволяет определить полные и парциальные скорости мюонного захвата. Сами измерения проводятся на базе экспериментальной инфраструктуры мезонной фабрики Института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария), которая обеспечивает требуемую точность измерений за счёт высокой монохроматичности выдаваемого мюонного пучка. На базе Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ), в свою очередь, производится закупка всей необходимой для эксперимента электроники и обеспечивается производство выбранных мишеней и детектирующей системы, в основе которой используется несколько германиевых детекторов различных типов. Мишенная система сконструирована таким образом, что позволяет проводить измерения как с твёрдыми, так и с газообразными мишенями. Измерения проводятся научной группой из ОИЯИ, которая имеет богатый опыт в прецизионной ядерной спектроскопии.

Данный проект продолжает и расширяет программу измерений, предложенную и реализуемую ОИЯИ в период с 1996 по 2006 гг. На фоне возросшего интереса к экспериментальным данным со стороны теоретических программ исследований безнейтринного двойного бета-распада в 2017 г. было решено возобновить измерения мюонного захвата. В период с 2020 по 2022 гг. были измерены ядра в широкой области таблицы изотопов, в том числе ⁷⁶Se, ⁹⁶Mo, ¹⁰⁰Mo, ¹³⁶Ba. Данные по мюонному захвату в ¹³⁶Ba и ⁷⁶Se имеют особое значение для ведущих международных экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада, таких как nEXO, KamLAND2-Zen, NEXT, DARWIN, PandaX-III и LEGEND. В 2023 г. планируются измерения с ядром ⁴⁸Ti, по результатам которых ожидается получить значения полных и парциальных скоростей захвата, а также сравнить эти результаты с теоретическими предсказаниями для их интерпретации относительно различных ядерных моделей.

MONUMENT: MUON ORDINARY CAPTURE FOR THE NUCLEAR MATRIX ELEMENTS

D. Bajpai¹, L. Baudis², V. V. Belov³, E. Bossio⁴, T. E. Cocolios⁵, H. Ejiri⁶, M. V. Fomina³, I. H. Hashim⁷, M. Heines⁵, K. N. Gusev^{3,4}, S. V. Kazartsev³, A. Knecht⁸, E. Mondragon⁴, Ng Zheng Wei⁷, I. Ostrovskiy¹, F. Othman⁷, G. Rodrigues Araujo², N. S. Romyantseva³, S. Schönert⁴, M. Schwarz⁴, E. A. Shevchik³, M. V. Shirchenko³, Yu. A. Shitov^{3,9}, J. Suhonen¹⁰, E. O. Sushenok³, S. M. Vogiatzi^{8,11}, C. Wiesinger³, I. V. Zhitnikov³, D. R. Zinatulina³

¹ The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama 35487, USA

² University of Zurich, Rämistrasse 71, 8006 Zürich, Switzerland

³ Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie st., 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

⁴ Technical University of Munich, Boltzmannstrasse 15, 85748 Garching, Germany

⁵ Katholieke Universiteit Leuven, Oude Markt 13, 3000 Leuven, Belgium

⁶ Osaka University, 1-1 Yamadaoka, Suita, 565-0871 Osaka, Japan

⁷ Universiti Teknologi Malaysia, Jalan Iman, 81310 Johor Bahru, Johor, Malaysia

⁸ Paul Scherrer Institute, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen, Switzerland

⁹ Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University in Prague, Husova 240/5, 110 00 Prague, Czech Republic

¹⁰ University of Jyväskylä, Seminaarinkatu 15, 40014 Jyväskylä, Finland

¹¹ Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Switzerland

Muon capture in nuclei is of interest of many problems of nuclear and particle physics. In particular, the latter is related to search of Majorana neutrino. If one assumes that neutrino is Majorana particle, the neutrinoless double β -decay becomes possible. In determining of $0\nu\beta\beta$ -decay limit, that can be translated into a limit for the mass of Majorana neutrino, the crucial role plays the calculation of the involved nuclear matrix elements (NMEs). Both processes, μ -capture and $0\nu\beta\beta$ -decay, are governed by huge momentum transfer ~ 100 MeV with no restriction on angular momentum and parity change. This features make the muon capture an attractive testing ground for nuclear model description of the NMEs for neutrinoless $\beta\beta$ -decay as well as for theoretical description of weak processes. At the same time, the interest of studying of μ -capture is supported by a relatively good experimental accuracy of total rate measurements.

The MONUMENT experimental program includes precise measurements of the γ -ray spectrum produced following ordinary (nonradiative) muon capture (OMC). The measurement accuracy is achieved by using the high-purity germanium (HPGe) detectors. By investigating energy and time distributions, the muon lifetime can be deduced. It should be mentioned that OMC is typically followed by the one- or two-neutron emission. Detailed analysis of the intensity of the γ -lines allows the extraction of the relative yields of final nuclei. This makes possible to obtain the partial rates of μ -capture to excited nuclear states of daughter nuclei. These rates are important for theoretical calculation of nuclear matrix elements for $\beta\beta$ -decay and Supernova studies.

The experiment aims to proceed μ -capture measurements in order to provide experimental input to the $\beta\beta$ NMEs calculation. This implies measurements of the total and partial muon capture rates in corresponding isotopes, such as ^{76}Se , $^{96,100}\text{Mo}$ and ^{136}Ba . In the case of ^{76}Se and ^{136}Ba , these isotopes are of particular importance for the leading experimental searches for the neutronless $\beta\beta$ -decay of ^{136}Xe – nEXO, KamLAND2-Zen, NEXT, DARWIN, and PandaX-III – and of ^{76}Ge – LEGEND. The isotopes $^{96,100}\text{Mo}$ look rather attractive from the astrophysical point of view. In 2023, measurements of the ^{48}Ti isotope are planned. It is expected to obtain the total and partial capture rates and compare these results with theoretical predictions for their interpretation with respect to various nuclear models.

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТРОЙНОЕ ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР-АКТИНИДОВ С ВЫЛЕТОМ НУКЛОНОВ И ЛЕГКИХ ЯДЕР

С. Г. Кадменский, Л. В. Титова, Я. О. Отводенко, Е. С. Петрыкина

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия, titova_lv@phys.vsu.ru

В работе [1] предложен виртуальный механизм спонтанного тройного деления ядра (A, Z) , которое рассматривается как двухступенчатый процесс, когда на первой стадии легкая заряженная частица (ЛЗЧ) (A_3, Z_3) или нуклон с кинетической энергией T испускается из ядра (A, Z) , и формируется виртуальное состояние промежуточного ядра $(A - A_3, Z - Z_3)$, которое на второй стадии испытывает двойное деление. Энергетическое распределение ЛЗЧ $W(T)$, нормированное на выход N ЛЗЧ, при учете близости делительных ширин $\Gamma_f^{A-A_3}(T)$ и $\Gamma_f^{A-A_3}(T)$ ядер (A, Z) и $(A - A_3, Z - Z_3)$ из конфигурации (0) с шейкой радиуса R_{neck} между предфрагментами

деления, определяется как
$$W(T) = \frac{1}{2\pi} \frac{(\Gamma_3^A(T))^{(0)} \Gamma_f^{A-A_3}(T)}{(Q-T)^2 \Gamma_f^A(T)},$$
 где $(\Gamma_3^A(T))^{(0)} = \omega \frac{\hbar c \sqrt{2T}}{2R_{\text{neck}} \sqrt{\mu c^2}} P(T)$ – ширина распада ядра (A, Z) из конфигурации (0), взятая из теории Гамова,

Q – теплота распада ядра с вылетом (A_3, Z_3) , $P(T)$ – фактор проницаемости кулоновского барьера для ЛЗЧ, ω – вероятность формирования ЛЗЧ в области шейки делящегося ядра, μ – приведенная масса ядер $(A - A_3, Z - Z_3)$ и (A_3, Z_3) . При использовании экспериментальных энергетических распределений ЛЗЧ в спонтанном делении $^{250}\text{Cf}(s,f)$, $^{252}\text{Cf}(s,f)$ и индуцированном тепловыми нейтронами делении $^{249}\text{Cf}(n,f)$, $^{251}\text{Cf}(n,f)$ с вылетом α -частиц, тритонов, ядер ^6He [2]; $^{242}\text{Cm}(s,f)$, $^{244}\text{Cm}(s,f)$, $^{246}\text{Cm}(s,f)$ и $^{241}\text{Cm}(n,f)$, $^{243}\text{Cm}(n,f)$, $^{245}\text{Cm}(n,f)$ с вылетом α -частиц и тритонов [3], а также $^{240}\text{Pu}(s,f)$, $^{242}\text{Pu}(s,f)$ и $^{239}\text{Pu}(n,f)$, $^{241}\text{Pu}(n,f)$ с вылетом α -частиц [4] получены оценки R_{neck} , которые оказываются близкими друг к другу для (s,f) и (n,f) деления соответствующих ядер. Этот результат позволяет сделать вывод, что и спонтанное, и вынужденное тройное деление рассматриваемых ядер-актинидов с испусканием ЛЗЧ происходит из близких конфигураций делящегося ядра, а энергия связи теплового нейтрона B_n , вносимая в составное делящееся ядро в реакциях (n,f) , идет в энергию деформации делящегося ядра, а не в кинетическую энергию ЛЗЧ.

Список литературы

1. S. G. Kadmsky et al. PEPAN 63, 620 (2022).
2. S. Vermote et al., Nucl. Phys. A806, 1 (2008).
3. S. Vermote et al., Nucl. Phys. A837, 176 (2010).
4. O. Serot et al., Nucl. Phys. A641, 34 (1998).

LOW-ENERGY TERNARY FISSION OF ACTNIDES WITH NUCLEONS AND LIGHT CHARGED PARTICLES EMISSION

L. V. Titova, S. G. Kadmsky, Ya. O. Otvoidenko, E. S. Petrykina

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia, titova_lv@phys.vsu.ru

In [1] the virtual mechanism of the spontaneous ternary fission of the nucleus (A, Z) , which is considered as two-step process, when at the first stage light charged particle (LCP) (A_3, Z_3) or nucleon is emitted with kinetic energy T from the nucleus (A, Z) , and the virtual state of the intermediate nucleus

$(A - A_3, Z - Z_3)$ is formed, and on the second stage this nucleus is involved in the binary fission, was suggested. Energy distribution of the LCP $W(T)$, normalized by yield N for LCP, with taking into account the proximity of the fission width $\Gamma_f^{A-A_3}(T)$ and $\Gamma_f^{A-A_3}(T)$ for nuclei (A, Z) and $(A - A_3, Z - Z_3)$ from the configuration (0) with the neck with radius R_{neck} between two fission prefragments are

defined as $W(T) = \frac{1}{2\pi} \frac{(\Gamma_3^A(T))^{(0)} \Gamma_f^{A-A_3}(T)}{(Q-T)^2 \Gamma_f^A(T)}$, where $(\Gamma_3^A(T))^{(0)} = \omega \frac{\hbar c \sqrt{2T}}{2R_{\text{neck}} \sqrt{\mu c^2}} P(T)$ is Gamow's

theory decay width for nucleus (A, Z) from configuration (0), Q is the heat of the decay of the nucleus with (A_3, Z_3) emission, $P(T)$ is Coulomb barrier penetrability factor for LCP, ω is the probability of the LCP formation in the fissile nucleus, μ is the reduced mass of nuclei $(A - A_3, Z - Z_3)$ and (A_3, Z_3) . Using the experimental energy distributions for the spontaneous fission of ^{250}Cf (s,f), ^{252}Cf (s,f) and induced by thermal neutrons fission of ^{249}Cf (n,f), ^{251}Cf (n,f) with α -particle, tritons and ^6He emission [2]; ^{242}Cm (s,f), ^{244}Cm (s,f), ^{246}Cm (s,f) and ^{241}Cm (n,f), ^{243}Cm (n,f), ^{245}Cm (n,f) with α -particles and tritons emission [3], and also of ^{240}Pu (s,f), ^{242}Pu (s,f) and ^{239}Pu (n,f), ^{241}Pu (n,f) with α -particles emission [4] the estimations of the radius R_{neck} were derived, which are close to each other for (s,f) and (n,f) reaction in corresponding nuclei. This result allows to make the conclusion that the spontaneous and induced ternary fission of the mentioned actinides with LCP emission occurs from the similar configurations of the fissile nucleus, and the thermal neutron binding energy B_n , contributed in compound fissile nucleus in (n,f) reactions, goes to the deformation energy of the nucleus, but not in the LCP kinetic energy.

References

1. S. G. Kadmsky et al. PEPAN 63, 620 (2022).
2. S. Vermote et al., Nucl. Phys. A806, 1 (2008).
3. S. Vermote et al., Nucl. Phys. A837, 176 (2010).
4. O. Serot et al., Nucl. Phys. A641, 34 (1998).

РАССЕЯНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЯДЕР ^3He НА ТЕНЗОРНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ДЕЙТРОНАХ И ПРОВЕРКА Т-ИНВАРИАНТНОСТИ

М. Н. Платонова^{1,2}, Н. Т. Турсунбаев¹, Ю. Н. Узиков¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри, д. 6, г. Дубна, Московская обл., 141980
Тел. 49621 62417, факс: 49621 66666

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991
uzikov@jinr.ru

Полное сечение взаимодействия ядер ^3He , поляризованных поперечно по отношению к направлению пучка, с поляризацией P_y и тензорно-поляризованных дейтронов с поляризацией P_{xz} является нуль-тест сигналом эффекта нарушения инвариантности относительно обращения времени (Т) при сохранении пространственной (Р) четности. При этом нуль-тест сигнал не может быть имитирован взаимодействием в начальном и конечном состояниях. В этом отношении процесс ^3He -d-рассеяния аналогичен процессу рассеяния поляризованных протонов на дейтронах [1]. Нами вычислен нуль-тест сигнал для процесса ^3He -d рассеяния (с точностью до неизвестной константы Т-нечетного Р-четного NN-взаимодействия) при энергиях пучка ядер ^3He в интервале 100-1000 МэВ/нуклон на основе теории Глаубера с учетом зависимости амплитуд упругого рN-рассеяния от спинов [2] при включении вклада нарушающих Т-инвариантность, но сохраняющих Р-четность взаимодействий между нуклонами. При этом в расчете амплитуды упругого ^3He -d-рассеяния используется разработанный ранее формализм для упругого рd-рассеяния [1, 2] с учетом S- и D-волн дейтрона, а спиновые рN-амплитуды заменяются на спиновые амплитуды ^3He -N-рассеяния. Необходимые при этом расчете амплитуды N ^3He -рассеяния

построены нами также на основе спин-зависящей теории Глаубера в S-волновом приближении для волновой функции ядра ${}^3\text{He}$. Результаты расчета дифференциального сечения и векторной анализирующей способности A_y процесса ${}^3\text{He}$ -рассеяния хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными [3] в передней полусфере углов при энергиях 150–1000 МэВ. Представлена зависимость нуль-тест сигнала от энергии ${}^3\text{He}$ -d-столкновения для разных типов T-нечетного P-четного NN-взаимодействия [4].

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-22-00123, <https://rscf.ru/project/23-22-00123/>.

Список литературы

1. Y. N. Uzikov, J. Haidenbauer, Phys. Rev. C **94**, 035501 (2016).
2. M. N. Platonova, V. I. Kukulin, Phys. Rev. C **81**, 014004 (2010).
3. D. K. Hasell et al., Phys. Rev. C **34**, 236 (1986).
4. M. Simonius, Phys. Rev. Lett. **78**, 4161 (1997).

SCATTERING OF POLARIZED ${}^3\text{He}$ NUCLEI ON TENSOR-POLARIZED DEUTERONS AND TEST OF T-INVARIANCE

M. N. Platonova^{1,2}, N. T. Tursunbayev¹, Yu. N. Uzikov¹

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie str., 6, Dubna, Moscow region, 141980
Tel. 49621 62417, fax: 49621 66666,

² Skobeltsyn Institute for Nuclear Physics, Lomonosov
Moscow State University, Leninskie Gory, 1/2, Moscow, 119991
uzikov@jinr.ru

The total cross section of the interaction of ${}^3\text{He}$ nuclei polarized transversely with respect to the beam direction with the polarization P_y and tensor-polarized deuterons with the polarization P_{xz} is a null-test signal of the effect of violation of invariance with respect to time reversal (T) while conserving spatial (P) parity. In this case, the null-test signal cannot be simulated by the interaction in the initial and final states. In this respect, the ${}^3\text{He}$ -d scattering process is similar to the scattering of polarized protons on deuterons [1]. We have calculated the null-test signal for the ${}^3\text{He}$ -d scattering process (up to an unknown constant of the T-odd P-even NN interaction) at the energies of the ${}^3\text{He}$ nuclear beam in the range of 100-1000 MeV/nucleon based on the Glauber theory, taking into account the spin dependence of the pN elastic scattering amplitudes [2] with the contribution of T-invariance violating, but P-parity conserving interactions between nucleons. At the same time, when calculating the amplitude of elastic ${}^3\text{He}$ -d scattering, the previously developed formalism for elastic pd scattering [1,2] is used, taking into account the S and D waves of the deuteron wave function, and the spin-dependent pN scattering amplitudes are replaced by spin-dependent amplitudes of the ${}^3\text{He}$ -N scattering. The $N^3\text{He}$ scattering amplitudes necessary for this calculation are also constructed by us on the basis of the spin-dependent Glauber theory in the S-wave approximation for the wave function of the ${}^3\text{He}$ nucleus. The results of the calculation of the differential cross section and the vector analyzing power A_y of the ${}^3\text{He}$ scattering process are in good agreement with the available experimental data [3] in the forward hemisphere at energies of 150-1000 MeV. The dependence of the null-test signal on the ${}^3\text{He}$ -d collision energy for different types of T-odd P-even NN interaction [4] is presented.

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-22-00123, <https://rscf.ru/project/23-22-00123/>.

References

1. Y. N. Uzikov, J. Haidenbauer, Phys. Rev. C **94**, 035501 (2016).
2. M. N. Platonova, V. I. Kukulin, Phys. Rev. C **81**, 014004 (2010).
3. D. K. Hasell et al. Phys. Rev. C **34**, 236 (1986).
4. M. Simonius, Phys. Rev. Lett. **78**, 4161 (1997).

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ДЕЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

А. В. Унжакова, Ю. В. Иванский

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
Университетская наб., д. 7-9, 199034 Россия
E-mail: a.unzhakova@spbu.ru

За 85 лет, прошедших со дня открытия деления ядер, теоретическое объяснение природы мультимодальности деления тяжелых ядер остается актуальной задачей.

Экспериментальные исследования спонтанно делящихся ядер ^{252}Cf и ^{248}Cm на сопоставимые по массе осколки, уже много лет ведущиеся на время-пролетном спектрометре тяжелых ионов ФОБОС в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, показали определяющее влияние кластеризации на образование различных делительных мод [1–3]. В работе [1] впервые было проведено сравнение специально обработанных экспериментальных данных с систематическими теоретическими расчетами многомерных поверхностей потенциальной энергии для ядер калифорния и таким образом подтверждена связь образования новых делительных мод с произошедшей внутри делящейся системы кластеризацией будущих фрагментов деления.

В данной работе рассматривается задача теоретического описания динамики процесса кластеризации нуклонов внутри делящегося ядра. Подход, впервые предложенный в [4], основан на микроскопическом моделировании кластеризации как нового типа коллективного движения частиц [5]. Применение алгоритма динамической кластеризации в области тяжелых ядер потребовало разработки эффективного многочастичного взаимодействия для такого типа микроскопических моделей.

Были произведены расчеты основных кластеров наблюдающихся экспериментально в мультимодальном делении ядер калифорния.

Список литературы

1. Y. V. Pyatkov, V. V. Pashkevich, A. V. Unzhakova *et al*, Nucl. Phys. A. V. 624, p. 140, 1997.
2. Y. V. Pyatkov, V. V. Pashkevich, A. V. Unzhakova *et al*, Phys. Atom. Nucl. V. 67, p. 1754, 2004.
3. Y. V. Pyatkov, D. V. Kamanin, A. N. Solodov *et al*, Phys. Atom. Nucl. V. 85, p. 763, 2022.
4. Y. V. Ivansky, A. V. Unzhakova, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, V. 86, p. 1108, 2022.
5. A. Jadbabaie, J. Lin, A. S. Morse, IEEE Transactions on Automatic Control, p. 2953, 2003.

DYNAMICAL MODELLING OF CLUSTERING IN MULTIMODAL HEAVY NUCLEI FISSION

A. V. Unzhakova, Y. V. Ivansky

Saint-Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia
E-mail: a.unzhakova@spbu.ru

Over the 85 years that have passed since the discovery of nuclear fission, the theoretical explanation of the multimodal nature of heavy nuclei fission remains an actual task.

Experimental studies of ^{252}Cf and ^{248}Cm spontaneous fission into mass comparable fragments, which have been carried out for many years at the time-of-flight heavy ion spectrometer FOBOS in Flerov Laboratory of Nuclear Reactions JINR, have shown the determining influence of clustering on the formation of various fission modes [1,2,3]. In [1], for the first time, specially processed experimental data were compared with systematic theoretical calculations of multidimensional potential energy surfaces for californium nuclei and thus, a relationship between the formation of new fission modes and clustering of future fission fragments occurring within a fissioning system was established.

In this paper, we consider the problem of theoretical description of the dynamics of the nucleon clustering process inside a fissioning nucleus. The approach, first proposed in [4], is based on microscopic modelling of clustering as a new type of particle collective motion [5]. Adaptation of the dynamical algorithm of clustering for the region of heavy nuclei required the development of an effective multiparticle interaction for this type of microscopic models.

The calculations for the main clusters observed experimentally in the multimodal fission of californium nuclei have been performed.

References

1. Y. V. Pyatkov, V. V. Pashkevich, A. V. Unzhakova *et al*, Nucl. Phys. A. V. 624, p. 140, 1997.
2. Y. V. Pyatkov, V. V. Pashkevich, A. V. Unzhakova *et al*, Phys. Atom. Nucl. V. 67, p. 1754, 2004.
3. Y. V. Pyatkov, D. V. Kamanin, A. N. Solodov *et al*, Phys. Atom. Nucl. V. 85, p. 763, 2022.
4. Y. V. Ivansky, A. V. Unzhakova, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, V. 86, p. 1108, 2022.
5. A. Jadbabaie, J. Lin, A. S. Morse, IEEE Transactions on Automatic Control, p. 2953, 2003.

ВЫХОДЫ γ -КВАНТОВ, ИСПУСКАЕМЫХ КАЛЬЦИЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МЭВ

Н. А. Федоров*, **Д. Н. Грозданов**, **Ю. Н. Копач**, **В. Р. Ской**, **Т. Ю. Третьякова**,
К. Храмко, **И. Н. Русков**, **Г. Ахмедов**, **Д. Бериков**, **А. В. Андреев**, **П. Г. Филончик**
и коллаборация “TANGRA”

141980 Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6
тел. +7 (496) 216-50-59, факс. +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru
*nfedorov@jinr.ru

Информация о свойствах γ -излучения, испускаемого в ходе нейтрон-ядерных реакций, необходима как для фундаментальных, так и для прикладных целей: с одной стороны, сведения о выходах γ -квантов полезны для тестирования теоретических моделей. С другой же, максимально точная информация о сечениях реакций типа $(n, X\gamma)$ необходима для развития современных методов быстрого элементного анализа на быстрых нейтронах с использованием ДТ генераторов.

Одной из целей проекта TANGRA [1] является создание максимально подробной и точной базы данных характеристик γ -излучения, испускаемого в реакциях с нейтронами энергии 14.1 МэВ, для последующего использования при разработке методики и установок быстрого элементного анализа.

Кальций является одним из интересных объектов для выполнения измерений, так как входит в число самых распространенных в природе элементов, но при этом нельзя сказать, что он хорошо изучен. Сечение реакции $(n, X\gamma)$ на нем невелико, существующие данные имеют существенные расхождения [2]. В последнее время исследование процесса $\text{Ca}(n, X\gamma)$ приобрело особую актуальность, так как точное определение концентрации CaCO_3 необходимо для целей быстрого элементного анализа почв и разделения органической и неорганической компонент почвенного углерода [3].

В докладе будут представлены новые данные по выходам γ -квантов в реакции $\text{Ca}(n, X\gamma)$, полученные коллективом коллаборации TANGRA.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-12-00239).

Список литературы

1. Ruskov I. N., Kopatch Y. N., Bystritsky V. M. et al. TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission induced by 14.1 MeV neutrons //Physics procedia. – 2015. – Т. 64. – С. 163–170.

2. Simakov S. P., Pavlik A., Vonach H. et al. Status of Experimental and Evaluated Discrete Gamma-Ray Production at $E_n = 14.5$ MeV / International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. 1998.

3. McTaggart R. The assay of soil carbon with naturally occurring cosmic ray neutrons // Journal of Environmental Radioactivity. – 2023. – Т. 264. – С. 107202.

YIELDS OF γ -QUANTA EMITTED BY CALCIUM DURING 14.1 MeV NEUTRONS IRRADIATION

N. A. Fedorov^{*}, D. N. Grozdanov, Yu. N. Kopatch, V. R. Skoy, T. Yu. Tretyakova, K. Hramco, I. N. Ruskov, G. Akhmedov, D. Berikov, A. V. Andreev, P. G. Filonchik and “TANGRA” collaboration

Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
tel. +7 (496) 216-50-59, fax. +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru * nfedorov@jinr.ru

Information about the properties of γ -radiation emitted in the neutron-nuclear reactions is necessary for both fundamental and applied purposes: on the one hand, data about the yields of γ -quanta is useful for testing theoretical models. On the other hand, the most accurate information on the cross sections for reactions of the $(n, X\gamma)$ type is necessary for the development of modern methods of fast elemental analysis on fast neutrons using DT generators.

One of the goals of the TANGRA project [1] is to create the most detailed and accurate database of the characteristics of γ -radiation emitted in reactions with neutrons of energy 14.1 MeV, for subsequent use in the development of methods and facilities for fast elemental analysis.

Calcium is one of the interesting objects for measurements, as it is one of the most abundant elements in nature, but it is not well studied. The cross section of the reaction $(n, X\gamma)$ on it is low, the existing data have significant discrepancies [2]. The study of the $\text{Ca}(n, X\gamma)$ process is relevant now, since accurate determination of the CaCO_3 concentration is necessary for the purposes of fast elemental analysis of soils and separation of the organic and inorganic components of soil carbon [3].

New data on the yields of γ -quanta in the reaction $\text{Ca}(n, X\gamma)$, obtained by the team of the TANGRA collaboration will be presented.

This work was supported by the RSCF grant 23-12-00239.

References

1. Ruskov I. N., Kopatch Y. N., Bystritsky V. M. et al. TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission induced by 14.1 MeV neutrons // Physics procedia. 2015. Т. 64. S. 163–170.

2. Simakov S. P., Pavlik A., Vonach H. et al. Status of Experimental and Evaluated Discrete Gamma-Ray Production at $E_n = 14.5$ MeV / International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. 1998.

3. McTaggart R. The assay of soil carbon with naturally occurring cosmic ray neutrons // Journal of Environmental Radioactivity. 2023. Т. 264. S. 107202.

ИЗУЧЕНИЕ СЕЧЕНИЯ $^{54,57}\text{Fe}(n, \alpha)^{51,54}\text{Cr}$ РЕАКЦИЙ ПРИ ЭНЕРГИЯХ НЕЙТРОНОВ ОТ 4,3 ДО 7,0 МЭВ

Т. А. Хромылева, В. В. Кетлеров, Н. Н. Титаренко, О. Г. Томилов, В. А. Хрячков

Физико-энергетический институт им. Лейпунского (ФЭИ), пл. Бондаренко 1,
г. Обнинск, 249033, Россия

Приводятся результаты измерения сечения (n, α) реакций на железе-54 в диапазоне энергий падающих нейтронов 4,75–7 МэВ, а также на железе-57 при энергиях нейтронов от 4,3 до 6,5 МэВ. Для регистрации α -частиц использовалась ионизационная камера с сеткой Фриша

и цифровой подход для получения информации о свойствах регистрируемых частиц. Разработанная измерительная система позволяет напрямую регистрировать продукты изучаемой реакции. Выполнен анализ полученных распределений, основанный на использовании программы TALYS.

STUDY OF THE CROSS SECTION OF $^{54,57}\text{Fe}(n,\alpha)^{51,54}\text{Cr}$ REACTIONS AT NEUTRON ENERGIES FROM 4.3 TO 7.0 MeV

T. A. Khromyleva, V. V. Ketlerov, N. N. Titarenko, O. G. Tomilov, V. A. Khryachkov

I.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering (IPPE), Bondarenko sq. 1,
Obninsk, 249033, Russia

The results of measurements of the cross section (n,α) of reactions on iron-54 in the energy range of incident neutrons 4.75–7.0 MeV, as well as on iron-57 at neutron energies from 4.3 to 6.5 MeV are presented. To register α -particles, an ionization chamber with a Frisch grid was used and a digital approach was used to obtain information about the properties of registered particles. The developed measuring system makes it possible to directly register the products of the studied reaction. An analysis of the obtained distributions based on the use of the TALYS program was performed.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ В СЕЧЕНИИ РЕАКЦИИ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

В. А. Хрячков, В. В. Кетлеров, Н. Н. Титаренко, О. Г. Томилов, Т. А. Хромылева

Физико-энергетический институт им. Лейпунского (ФЭИ), пл. Бондаренко 1,
г. Обнинск, 249033, Россия

Реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ широко используется на практике для регистрации тепловых нейтронов или защиты от них. Сечение данной реакции является общепринятым стандартом в широком диапазоне энергий нейтронов. Все известные оценки сечения данной реакции дают гладкую функцию возбуждения без узких резонансов. В проведенных измерениях сечения реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ вблизи энергии 3,4 МэВ была обнаружена особенность, ширина которой оказалась практически равной ширине нейтронного распределения, генерируемого при помощи ускорителя. Проведенный анализ данных других авторов показал, что в них наблюдались признаки существования найденного резонанса. Теоретический анализ показал, что в схеме уровней ядра ^{11}B имеются уровни, которые могут быть причиной формирования наблюдаемого резонанса.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FINE STRUCTURE IN THE REACTION CROSS SECTION $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

Khryachkov V., Ketlerov V., Titarenko N., Tomilov O., Khromyleva T.

I.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering (IPPE), Bondarenko sq. 1,
Obninsk, 249033, Russia

The $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaction is widely used in practice for registration of thermal neutrons or protection against them. The cross section for this reaction is a generally accepted standard in the neutron energy range up to 1 MeV. All known estimates of the cross section for this reaction give a smooth excitation function without narrow resonances. In the measurements of the cross section of the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaction near an energy of 3.4 MeV, a resonance was found, the width of which turned out

to be practically equal to the width of the neutron distribution generated by the accelerator. The analysis of the data of other authors showed that they showed signs of the existence of the found resonance. Theoretical analysis showed that there are levels in the level scheme of the ^{11}B nucleus that can be the reason for the formation of the observed resonance.

INTERACTION OF PHOTONS WITH SILVER AND INDIUM NUCLEI AT ENERGIES UP TO 20 MeV

**J. H. Khushvaktov^{a,b}, D. L. Demin^a, S. A. Evseev^a, V. V. Kobets^a,
F. A. Rasulova^{a,b}, S. V. Rozov^a, E. T. Ruziev^b, A. A. Solnyshkin^a,
V. I. Stegailov^a, T. N. Tran^{a,c}, E. A. Yakushev^a, B. S. Yuldashev^{a,b}**

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^b Institute of Nuclear Physics ASRU, Tashkent, Uzbekistan

^c Institute of Physics VAST, Hanoi, Viet Nam

The study of isomeric states of atomic nuclei provides information on the nature of excited states of atomic nuclei. Phenomenon of isomerism of atomic nuclei is associated with a large difference in the spins or deformations of the isomeric state relative to the ground state of the atomic nucleus. The probability of isomer population as a result of photonuclear reactions depends on the reaction energy, the orbital momentum of emitted particles, the momentum and parity of the final state, and also depends on the probabilities of cascade transitions to it from higher lying states [1, 2].

In addition to isomeric ratios, in this work we investigated the yields and cross sections of photonuclear reactions in silver and indium samples. The yields of photonuclear reactions in ^{107}Ag , ^{113}In , and ^{115}In nuclei were measured. Monte Carlo simulations were performed using the Geant4 code and the results were compared with experimental ones. According to the comparison results, the ratio Calc./Exp. is in the range of 0.40-2.51. The isomeric ratios of the yields in the reactions $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106\text{m.g}}\text{Ag}$ and $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m.g}}\text{In}$ were determined, which coincide with the literature data. Based on the experimental data, the cross sections for the reactions $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106\text{g}}\text{Ag}$ and $^{107}\text{Ag}(\gamma, 2n)^{105}\text{Ag}$ at an energy of 20 MeV were determined, and these values also coincide with the literature data.

References

1. Belyshev, S. S., Ishkhanov, B. S., Kuznetsov, A. A. et al. Isomeric ratios for products of photonuclear reactions on a natural mixture of silver isotopes. *Phys. Atom. Nuclei* 78, 895–904 (2015).
2. Mazur, V. M., Bigan, Z. M. & Symochko, D. M. Excitation of ^{109}Pd and ^{112}In nuclear isomers in (γ, n) reactions. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 5, 374–378 (2008).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ИЗОТОПАХ КАЛЬЦИЯ

Д. А. Юсюк*, М. В. Желтоножская, А. П. Черняев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

* denisyusyuk@gmail.com, +7(903) 574-33-15

Изучение фотоядерных реакций представляет значительный интерес для теоретической ядерной физики, позволяя на основе полученных данных исследовать структуру атомных ядер и уточнять существующие модели ядра. Практическое использование фотоядерных реакций открывает возможности не только для наработки разнообразных медицинских и промышленных радиоизотопов, но и для решения целого спектра прикладных задач.

Природный кальций представляет собой смесь из шести изотопов: ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca , ^{46}Ca и ^{48}Ca . На сегодняшний день имеющиеся данные о фотоядерных реакциях представлены преимущественно реакциями на изотопе ^{40}Ca . В работе приведены результаты исследования фотоядерных реакций на изотопах ^{43}Ca , ^{44}Ca и ^{48}Ca . Для оценки экспериментальных значений средневзвешенных по потоку тормозного излучения выходов реакций производилось облучение в течение 31 мин мишени из хлорида кальция CaCl_2 и мониторинговой мишени из ^{181}Ta тормозным излучением с граничной энергией 20 МэВ на медицинском ускорителе электронов Varian Trilogy. Измерения облученных мишеней проводились на полупроводниковых спектрометрах с детекторами из сверхчистого германия. Для оценки интегрального потока тормозного излучения использовалась мониторинговая реакция на тантале $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{182}\text{Ta}$. В результате были получены экспериментальные значения выходов рассматриваемых реакций. Экспериментальные данные сравнивались с теоретическими расчетами в рамках статистической модели ядра с использованием программного кода TALYS 1.96. Полученные результаты обсуждаются. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-01013).

Таблица 1

Экспериментальные выходы изученных реакций

Реакция	Y, мбарн
$^{43}\text{Ca}(\gamma, p)^{42}\text{K}$	$1,67 \pm 0,14$
$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	$3,36 \pm 0,25$
$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	$13,0 \pm 0,9$

STUDY OF PHOTONUCLEAR REACTIONS ON CALCIUM ISOTOPES

D. A. Yusyuk, M. V. Zheltonozhskaya, A. P. Chernyaev

Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory 1, b. 2

* denisyusyuk@gmail.com, +7(903) 574-33-15

The study of photonuclear reactions is of interest for theoretical nuclear physics and allows to complement and create new approaches to describe the structure of atomic nuclei. The practical use of photonuclear reactions opens up opportunities not only for the production of various medical and industrial radioisotopes, but also for solving a whole range of applied problems.

Natural calcium is a mixture of six isotopes: ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca , ^{46}Ca and ^{48}Ca . To date, the available data on photonuclear reactions are mainly represented by reactions on the ^{40}Ca isotope. A small amount of data on the cross sections of photonuclear reactions on calcium isotopes makes such an experimental study promising.

The paper presents the results of a study of photonuclear reactions on the isotopes ^{43}Ca , ^{44}Ca and ^{48}Ca . To calculate the experimental values of average flux-weighted reaction yields, a calcium chloride CaCl_2 target and a ^{181}Ta monitor target were irradiated for 31 minutes with 20 MeV end-point energy bremsstrahlung at the Varian Trilogy medical electron accelerator. Irradiated targets were measured on semiconductor spectrometers with high-purity germanium detectors. We used the monitor reaction on tantalum $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{182}\text{Ta}$ to estimate the integral bremsstrahlung flux. As a result, the experimental yields of the considered reactions were obtained. Experimental data were compared to theoretical calculations within the framework of the nucleus statistical model using the TALYS 1.96 program code. The results obtained are discussed. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 22-29-01013).

Table 1

Experimental yields of studied reactions

Reaction	Y, mb
$^{43}\text{Ca}(\gamma, p)^{42}\text{K}$	$1,67 \pm 0,14$
$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	$3,36 \pm 0,25$
$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	$13,0 \pm 0,9$