

Ю. Э. Пенюонжкевич, Ю. Г. Соболев, В. В. Самарин

Особенности полных сечений реакций взаимодействия легких кластерных экзотических ядер при низких и средних энергиях

Одним из важнейших направлений экспериментального исследования ядро-ядерных взаимодействий является изучение полных сечений реакций (ПСР). ПСР представляет собой своеобразный тест для различных модельных подходов, используемых для получения ядерно-спектроскопической информации, которая связана с такими важными вопросами ядерной физики, как соотношение коллективных эффектов и индивидуальных нуклон-нуклонных взаимодействий. С помощью теоретических методов анализа экспериментальных ПСР получают данные о структурных характеристиках ядер (распределение плотности материи, среднеквадратичные радиусы и др.). Структура взаимодействующих ядер может существенно влиять

на механизм ядерных реакций и проявляться в сечениях этих процессов. Полные сечения реакций под действием заряженных частиц с энергией меньше 30 МэВ/нуклон относятся к числу наименее исследованных ядерных величин [1].

За прошедшие 20 лет, с развитием и совершенствованием экспериментальных методик, появилось много новых экспериментальных результатов, анализ которых сильно изменил наши представления о механизме взаимодействия и структуре изотопов легких слабосвязанных ядер при низких и средних энергиях (5–30 АМэВ).

Экспериментальные исследования с использованием пучков радиоактивных ядер позволили об-

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

Peculiarities of Total Cross Sections for Reactions of Interaction of Light Cluster Exotic Nuclei at Low and Medium Energies

One of the most important areas of experimental research into nucleus–nucleus interactions is the study of total reaction cross sections (TRC). The TRC is a kind of test for various model approaches used to obtain nuclear spectroscopic information. The information obtained in this way is connected with such important questions of nuclear physics as the relationship between collective effects and individual nucleon–nucleon interactions. Using theoretical methods of analysis of experimental TRC, data are obtained on the structural characteristics of nuclei (matter density distribution, root-mean-square radii, etc.). The structure of interacting nuclei can significantly affect the mechanism of nuclear reactions and can manifest itself in the cross sections of these processes. The total cross sections for reactions induced by charged particles with energies below 30 MeV/nucleon are among the least studied nuclear quantities [1].

Over the past 20 years, with the development and improvement of experimental techniques, many new experimental results have appeared, the analysis of which has greatly altered our understanding of the interaction mechanism and the structure of the isotopes of light weakly bound nuclei at low and medium energies (5–30 A MeV).

Experimental studies using beams of radioactive nuclei made it possible to discover new interesting phenomena related to the properties of nuclei far from the region of β stability [1]. For some light neutron-rich nuclei, the energy E_n of separation of a valence neutron (or neutrons) is extremely small. Compared to stable nuclei, in which it is about 6–8 MeV, these nuclei have the energy of separation of one or more neutrons less than 1 MeV. The neutron density distribution in such weakly bound nuclei has a very extended part, called the neutron halo. The halo appears as a “tail” in the distribution of nuclear matter at a distance of

наружить новые интересные явления, связанные со свойствами ядер, удаленных от области β -стабильности [1]. У некоторых легких нейтронно-избыточных ядер энергия E_n отделения валентного нейтрона (или нейтронов) чрезвычайно мала. По сравнению со стабильными ядрами, у которых она составляет около 6–8 МэВ, у этих ядер энергия отделения одного или нескольких нейтронов меньше 1 МэВ. Распределение плотности нейтронов в таких слабосвязанных ядрах имеет весьма протяженную часть, называемую нейтронным гало. Гало возникает как «хвост» в распределении ядерного вещества на расстоянии 5–10 фм, где величина плотности равна примерно 1/100 его плотности в центре ядра. Плотности распределения нейтронов и протонов в периферической области таких ядер сильно различаются, так что они могут быть представлены в виде компактного инертного кора, окруженного одним или несколькими слабосвязанными нейтронами. Нейтронное гало, а также кластерная конфигурация ядер играют существенную роль в их структуре, а также в особенностях их взаимодействия с другими ядрами.

Реакции со слабосвязанными (кластерными и экзотическими) ядрами, протекающие при низких энергиях, имеют много особенностей. Одной из них является усиление сечений взаимодействия в околобарьер-

ной области значений энергии. Наиболее сильно этот эффект проявляется для кластерных ядер, например ${}^6\text{Li}$, а также ядер с нейтронным гало, например ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$.

Основные каналы взаимодействия таких ядер — реакции передачи, реакции развала и реакции слияния. Процесс развала с последующим слиянием ядра-остатка является предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. В соответствии с классическими представлениями слияние между взаимодействующими ядрами происходит после преодоления ими барьера, который определяется дальнедействующими кулоновскими силами и составляющей короткодействующего ядерного потенциала. Однако в случае взаимодействия слабосвязанных (кластерных и экзотических) ядер процесс слияния имеет более сложный характер в связи с большой вероятностью развала этих ядер с последующим захватом ядра-остатка (неполное слияние). Это существенно усложняет описание взаимодействия таких систем и приводит к новым неожиданным эффектам при энергиях вблизи кулоновского барьера.

В настоящее время экспериментальные возможности сепарации и детектирования образующихся в результате ядерных реакций экзотических ядер достигли такого совершенства (4 π -спектрометры), что основные

5–10 fm, where the density value is approximately 1/100 of the density at the centre of the nucleus. The density distributions for neutrons and protons in the peripheral region of such nuclei are very different, so that they can be represented as a compact inert core surrounded by one or more weakly bound neutrons.

The neutron halo and the cluster configuration of nuclei play a significant role in their structure and in the features of their interaction with other nuclei.

Reactions with weakly bound (cluster and exotic) nuclei at low energies have many features. One of them is the enhancement of the interaction cross sections in the near-barrier energy region. This effect is most pronounced for cluster nuclei, for example, ${}^6\text{Li}$, as well as for nuclei with a neutron halo, for example, ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$.

The main channels of interaction of such nuclei are transfer reactions, breakup reactions, and fusion reactions. The process of breakup followed by the fusion of the residual nucleus is the subject of numerous theoretical and experimental studies. According to classical concepts, fusion of interacting nuclei occurs after they overcome the barrier, which is determined by the long-range Coulomb forces and the component of the short-range nuclear potential. However, in the case of the interaction of weak-

ly bound (cluster and exotic) nuclei, the fusion process is more complicated due to the high probability of breakup of these nuclei with subsequent capture of the residual nucleus (incomplete fusion). This significantly complicates the description of the interaction of such systems and leads to new unexpected effects at energies near the Coulomb barrier.

At present, the experimental capabilities for the separation and detection of exotic nuclei formed as a result of nuclear reactions have reached such perfection (4 π spectrometers) that the main characteristics of atomic nuclei (mass, half-life, main decay modes) can be determined with high efficiency and accuracy based on the analysis of even a small number of them.

Experimental methods for measuring total reaction cross sections can be conventionally divided into two main ones: the transmission method and 4 π spectrometry. These methods are described in detail and applied in [2, 3]. The experiments were mainly carried out on the channel of the achromatic fragment-separator ACCULINNA [4] of the U-400M accelerator at FLNR JINR.

The technique used in the experiments made it possible to measure with high accuracy the energy dependences $\sigma_R(E)$ of the total cross sections for the reactions of in-

характеристики атомных ядер (масса, период полураспада, основные моды распада) могут быть получены с высокой эффективностью и точностью на основе анализа даже небольшого их числа.

Экспериментальные способы измерения полных сечений реакций можно условно разделить на два основных метода: метод трансмиссии и 4π -спектрометрию. Эти методы подробно описаны и применены в работах [2, 3]. В основном эксперименты проводились на канале ароматического фрагмент-сепаратора ACCULINNA [4] ускорителя У-400М ЛЯР.

Используемая в экспериментах методика позволила с высокой точностью измерить энергетические зависимости $\sigma_R(E)$ полных сечений реакций взаимодействия радиоактивных ядер ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$ на мишенях ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{181}\text{Ta}$ [3, 5–8]. Методика измерения $\sigma_R(E)$ основывалась на идентификации и подсчете событий

реакций посредством регистрации продуктов реакций и их распада (мгновенные γ -кванты и нейтроны) в телесном угле, близком к полному $\Omega = 4\pi$.

На рис. 1 приведены зависимости полных сечений $\sigma_R(E)$ реакций ${}^4,6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^{6,7,9}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$, полученные двумя методами: методом трансмиссии и 4π -методом, использующим распределения вероятностей $w_k(M_\gamma)$ и $\varepsilon(M_\gamma)$ [3]. Оба метода измерения σ_R имеют хорошее согласие во всем диапазоне энергий пучков ${}^4,6\text{He}$ и ${}^{6,7,9}\text{Li}$.

Из рисунка видно, что в энергетической зависимости $\sigma_R(E)$ полного сечения реакций ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ имеется ярко выраженный максимум в виде локального повышения сечения в интервале энергии 10–30 АМэВ («бампа»). Величина увеличения сечения значительно превышает погрешность измерения.

Для объяснения этого эффекта были рассмотрены наиболее вероятные конфигурации ядер ${}^6\text{He}$ ($\alpha + n + n$)

Рис. 1. Энергетические зависимости величин полных сечений σ_R реакций ${}^4,6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ (а) и ${}^{6,7,9}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ (б). Различными символами отмечены результаты измерений трансмиссионными методиками и методом 4π -сцинтилляционного спектрометра МУЛЬТИ с использованием зависимостей $w_k(M_\gamma)$ и $\varepsilon(M_\gamma)$ [3] в широком диапазоне энергий

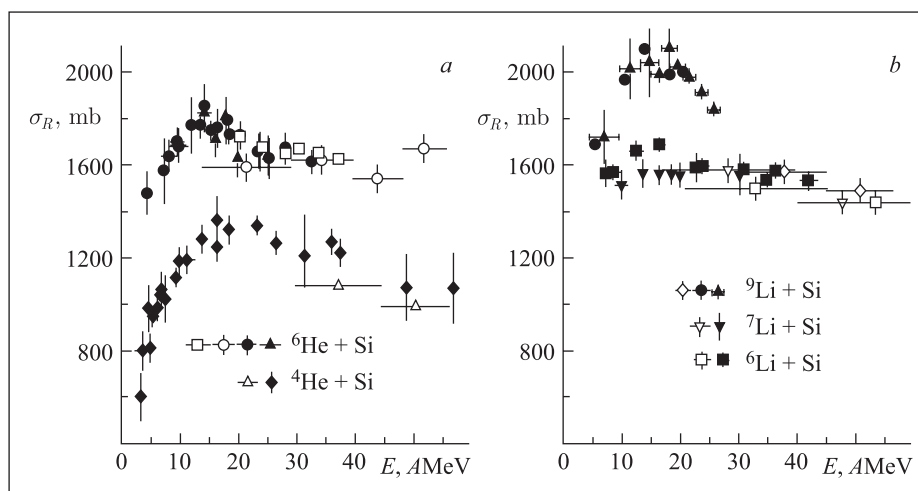


Fig. 1. Energy dependences of the total cross sections σ_R for the reactions ${}^4,6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ (a) and ${}^{6,7,9}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ (b). Different symbols show the results of measurements by transmission techniques and the method of 4π scintillation spectrometer MULTI using the dependences $w_k(M_\gamma)$ and $\varepsilon(M_\gamma)$ [3] in a wide energy range

interaction of the radioactive nuclei ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$ on the targets ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{181}\text{Ta}$ [3, 5–8]. The technique for measuring $\sigma_R(E)$ was based on identifying and counting reaction events by detecting reaction products and their decay (prompt γ quanta and neutrons) in a solid angle close to the total $\Omega = 4\pi$.

Figure 1 shows dependences of the total cross sections $\sigma_R(E)$ for the reactions ${}^4,6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ and ${}^{6,7,9}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ obtained by two methods: the transmission method and the 4π method using the probability distributions $w_k(M_\gamma)$ and $\varepsilon(M_\gamma)$ [3]. Both methods of measuring σ_R are in good agreement in the entire energy range of the ${}^4,6\text{He}$ and ${}^{6,7,9}\text{Li}$ beams.

It can be seen from the figure that in the energy dependence $\sigma_R(E)$ of the total cross section for the reactions

${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ and ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$, there is a pronounced maximum in the form of a local increase in the cross section in the energy range 10–30 АМэВ (“bump”). The magnitude of the cross section increase significantly exceeds the measurement error.

To explain this effect, the most probable configurations of the nuclei ${}^6\text{He}$ ($\alpha + n + n$) and ${}^9\text{Li}$ ($\alpha + t + n + n$) were considered. Their common feature is the presence of two outer neutrons forming a weakly bound neutral cluster — dineutron, which can penetrate into the target nucleus under the action of nuclear forces. In a simplified approximation, neutrons can be considered as moving independently in the mean field of the shell model. Their redistribution between the projectile nucleus and the target nucleus, for example, presence with a high probability

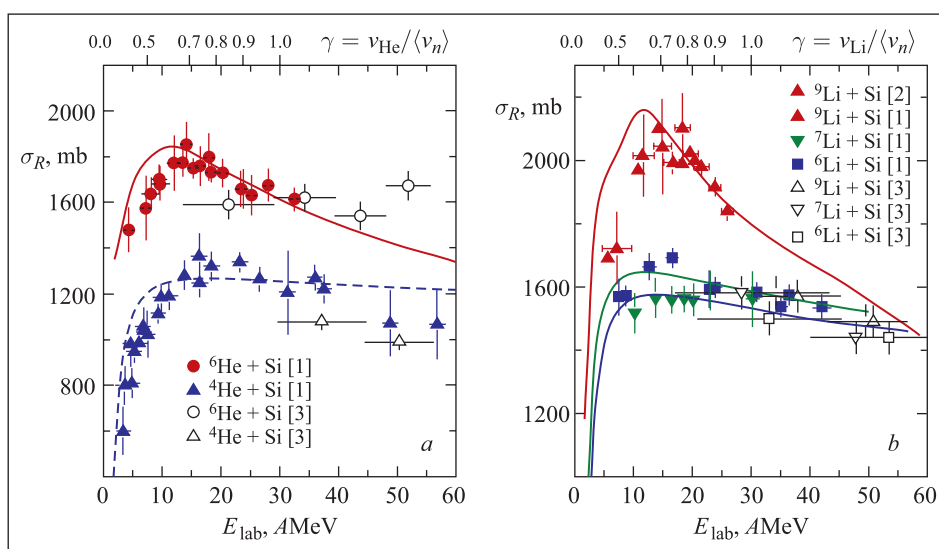
и ${}^9\text{Li}(\alpha + t + n + n)$, у которых общим является наличие двух внешних нейтронов, образующих слабосвязанный нейтральный кластер — динейтрон, который может проникать в ядро-мишень под действием ядерных сил. В упрощенном приближении нейтроны могут рассматриваться как движущиеся независимо в среднем поле оболочечной модели. Их перераспределение между ядром-снарядом и ядром-мишенью, например нахождение с большой вероятностью между поверхностями сталкивающихся ядер, может заметно усилить их взаимное притяжение и привести к возрастанию полного сечения реакции. Этому может способствовать α -кластерная структура ядра ${}^{28}\text{Si}$ из-за образования с помощью нейтронов связей между α -кластером кремния и α -кластером (триконом) ядер ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ с кратковременным образованием кластеров ${}^9\text{Be}(\alpha + n + \alpha)$ и ${}^{10}\text{Be}(\alpha + 2n + \alpha)$ в области контакта ядер.

Характер перераспределения внешних нейтронов при сближении ядер зависит от соотношения между средней скоростью внешнего нейтрона $\langle v \rangle$ и средней относительной скоростью $v_{\text{отн}}$ ядер за время столкновения. Средняя кинетическая энергия слабосвязанных нейтронов, в том числе в ядрах ${}^6\text{He}$ и ${}^9\text{Li}$, приблизительно равна глубине потенциальной ямы среднего поля.

Квантовое описание перераспределения внешних нейтронов при столкновении ядер на основе численного решения описывалось нестационарным уравнением Шредингера [3, 5], которое позволяет описывать процессы, протекающие с различными характерными временами. Такой подход служит дополнением к оптической модели, включающей подобные процессы в зависящие от энергии полуфеноменологические мнимую и реальную части оптического потенциала.

Рис. 2. Полные сечения реакций ${}^4,{}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ (a) и ${}^{6,7,9}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ (b), символы — экспериментальные данные, кривые — расчеты по оптической модели

Fig. 2. Total cross sections for the reactions ${}^4,{}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ (a) and ${}^{6,7,9}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ (b). Symbols are experimental data, curves — calculations in the optical model



between the surfaces of colliding nuclei, can noticeably increase their mutual attraction and lead to an increase in the total reaction cross section. This may also be due to the α -cluster structure of the ${}^{28}\text{Si}$ nucleus because of the formation of bonds between an α cluster of silicon and an α cluster (triton) of the ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ nuclei with short-term formation of ${}^9\text{Be}(\alpha + n + \alpha)$ and ${}^{10}\text{Be}(\alpha + 2n + \alpha)$ clusters in the region of contact of the nuclei.

The character of the redistribution of outer neutrons during the approach of the nuclei depends on the ratio of the average velocity of an outer neutron $\langle v \rangle$ and the average relative velocity v_{rel} of the nuclei during the collision. The average kinetic energy of weakly bound neutrons (including those in the ${}^6\text{He}$ and ${}^9\text{Li}$ nuclei) is approximately equal to the depth of the mean-field potential well.

The quantum description of the redistribution of outer neutrons in nuclear collisions based on numerical solution was given by the time-dependent Schrödinger equation [3, 5] which makes it possible to describe the process-

es with different characteristic times. This approach complements the optical model that includes such processes in the energy-dependent semi-phenomenological imaginary and real parts of the optical potential.

The absence of such changes in the optical potential for the ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ nuclei can serve as an indirect confirmation of the strong binding of outer neutrons with the formation of deuteron and triton clusters, respectively.

Satisfactory agreement between the calculations carried out in this way and the experimental data on the total cross sections for the reactions listed above is shown in Fig. 2.

The calculations confirmed that the observed features of the total cross sections for the reactions ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ and ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ are located in the region of transition from adiabatic to nonadiabatic redistribution of weakly bound neutrons. This can be interpreted as a consequence of the stable existence of an increased neutron density between the surfaces of the nuclei during the entire time of the collision. This enhances the attraction of the nuclei,

Удовлетворительное согласие проведенных таким образом расчетов с экспериментальными данными по полным сечениям перечисленных выше реакций показано на рис. 2. Расчеты подтвердили, что обнаруженные особенности полных сечений реакций ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ расположены в области перехода от адиабатического к неадиабатическому перераспределению слабосвязанных нейтронов. Это может интерпретироваться как следствие устойчивого существования повышенной нейтронной плотности между поверхностями ядер в течение всего времени столкновения. Меньшую по сравнению с реакцией ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ величину максимума сечения для реакции ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ можно объяснить большей протяженностью и разреженностью нейтронного гало ядра ${}^6\text{He}$ по сравнению с более компактным нейтронным слоем («скином») ядра ${}^9\text{Li}$. Можно объяснить также более крутой спад максимума сечения при больших энергиях для ядра ${}^8\text{He}$ и более пологий спад для ядра ${}^{11}\text{Li}$ с очень протяженным гало.

Таким образом, структурные особенности легких слабосвязанных ядер оказывают непосредственное влияние на энергетическую зависимость полного сечения реакции и наиболее существенно — при относительных скоростях, сравнимых со средней скоростью внешних нейтронов, для нейтроноизбыточных легких ядер ${}^6,8\text{He}$ и ${}^9,11\text{Li}$ и др.

shifts the position of the barrier R_B toward larger values, and increases the radius R_W of the region where the processes leading to the exit from the elastic channel begin with a noticeable probability. The smaller maximum of the cross section for the ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ reaction compared to the ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ reaction can be explained by the greater extension and sparsity of the neutron halo of the ${}^6\text{He}$ nucleus compared to the more compact neutron layer (“skin”) of the ${}^9\text{Li}$ nucleus. One can also explain the steeper decrease of the cross section maximum at high energies for the ${}^8\text{He}$ nucleus and the more gentle decrease for the ${}^{11}\text{Li}$ nucleus with a very extended halo.

Thus, the structural features of light weakly bound nuclei have a direct influence on the energy dependence of the total reaction cross section and are most significant at relative velocities comparable to the average velocity of outer neutrons for neutron-rich light nuclei ${}^6,8\text{He}$, ${}^9,11\text{Li}$, etc.

This conclusion is important for testing various models describing the mechanisms of interaction of exotic nuclei as well as for solving astrophysical problems related to nucleosynthesis in the region of light nuclei.

Этот вывод является важным для теста различных моделей, описывающих механизмы взаимодействия экзотических ядер, а также для решения астрофизических проблем, связанных с нуклеосинтезом в области легких ядер.

Список литературы/References

1. Penionzhkevich Yu. E., Kalpakchieva R. G. Light Exotic Nuclei near the Boundary of Neutron Stability. Singapore: World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd., 2022.
2. Sobolev Yu. G., Budzanowski A., Bialkowski E., Zholdybaev T. K., Zemlyanaya E. V., Kalpakchieva R., Kugler A., Kuznetsov I. V., Kulko A. A., Kuterbekov K. A., Kukhtina I. N., Kushniruk V. F., Lobastov S. P., Lukyanov V. K., Lukyanov K. V. Energy Dependence of Total Reaction Cross Section of the ${}^4,6\text{He}$, ${}^7\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ Interaction at 5–50 A MeV // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2005. V. 69, No. 11. P. 1605–1609.
3. Penionzhkevich Yu. E., Sobolev Yu. G., Samarin V. V., Naumenko M. A., Lashmanov N. A., Maslov V. A., Siváček I., Stukalov S. S. Energy Dependence of the Total Cross Section for the ${}^{11}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ Reaction // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. P. 014609.
4. Rodin A. M., Stepanov S. V., Bogdanov D. D., Golovkov M. S., Fomichev A. S., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Wolski R., Ter-Akopian G. M., Oganessian Yu. Ts., Yukhimchuk A. A., Perevozchikov V. V., Vinogradov Yu. I., Grishechkin S. K., Demin A. M., Zlatoustovskiy S. V., Kuryakin A. V., Filchagin S. V., Ilkaev R. I. Status of ACCULINNA Beam Line // Nucl. Instr. Meth. B. 2003. V. 204, Nos. 2–3. P. 114–118.
5. Penionzhkevich Yu. E., Sobolev Yu. G., Samarin V. V., Naumenko M. A. Peculiarities in Total Cross Sections of Reactions with Weakly Bound Nuclei ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ // Phys. At. Nucl. 2017. V. 80, No. 5. P. 928–941.
6. Sobolev Yu. G., Penionzhkevich Yu. E., Maslov V. A., Naumenko M. A., Samarin V. V., Siváček I., Stukalov S. S. The Measurements of the Total Reaction Cross Sections for ${}^6,8\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ and ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ Collisions // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019. V. 83, No. 4. P. 402–410.
7. Sobolev Yu. G., Penionzhkevich Yu. E., Samarin V. V., Naumenko M. A., Stukalov S. S., Siváček I., Krupko S. A., Kugler A., Louko J. Total Reaction Cross Sections for ${}^6,8\text{He}$ and ${}^9\text{Li}$ Nuclei on ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{59}\text{Co}$, and ${}^{181}\text{Ta}$ Targets // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2020. V. 84, No. 8. P. 948–956.
8. Samarin V. V., Sobolev Yu. G., Penionzhkevich Yu. E., Stukalov S. S., Naumenko M. A., Siváček I. Investigation of Reaction Cross Sections for Beams of ${}^8\text{Li}$, ${}^8\text{He}$ on ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{181}\text{Ta}$ Targets // Phys. Part. Nucl. 2022. V. 53, No. 2. P. 595–603.