

Краткая аннотация работ, представляемых на конкурс научных работ ОИЯИ 2023

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

Соболев Ю.Г., Самарин В.В., Стукалов С.С., Пенионжкевич Ю.Э., Науменко М.А., Маслов В.А., Крупко С.А., Безбах А.А., Шахов А.В., Мендибаев К.

Одним из важнейших направлений исследований ядро-ядерных взаимодействий является получение информации о полных сечениях реакций (ПСР). ПСР относится к классу наблюдаемых физических величин, которые могут быть измерены в эксперименте прямым и модельно-независимым способом. Величина ПСР определяет меру взаимодействия атомных ядер и имеет фундаментальное значение в ядерной физике. Измерение ПСР обеспечивает объективный и модельно-независимый тест для различных теоретических расчетов, используемых для получения ядерно-спектроскопической информации.

Исследование реакций с ядрами, удаленными от линии стабильности в диапазоне энергий 5–20 МэВ/нуклон, в частности, измерение ПСР, относятся к числу наименее исследованных ядерных величин как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения.

В настоящем цикле работ представлены результаты экспериментов по изучению энергетических зависимостей полных сечений реакций взаимодействия легких нейтроноизбыточных ядер ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{10,11,12}\text{Be}$, ${}^{14}\text{B}$ с мишенями Si, Au, Ta в диапазоне $E \approx 7 \div 50$ МэВ/нуклон и их теоретический анализ, который объясняет обнаруженные в эксперименте особенности зависимости $\sigma_R(E)$ со структурой взаимодействующих ядер.

Эксперименты проводились на канале ускорителя У-400М ЛЯР ОИЯИ с использованием пучков радиоактивных ядер, получаемых с помощью ахроматического фрагмент-сепаратора ACCULINNA. В экспериментах использовалась многодетекторная установка МУЛЬТИ, позволяющая событийно регистрировать и идентифицировать радиоактивные ядра, падающие на мишень, и продукты ядерных реакций- мгновенные γ -кванты и нейтроны в телесном угле, близком к полному $\Omega=4\pi$.

Таким образом, в представленном цикле работ приведены данные по систематическим измерениям энергетических зависимостей полных сечений ядерных реакций $\sigma_R(E)$ для легких слабосвязанных радиоактивных ядер ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{10,11,12}\text{Be}$, ${}^{14}\text{B}$ с различными мишенями в переходной энергетической области $E \approx 7 \div 50$ МэВ/нуклон, а также их интерпретация на основе разработанной теоретической модели.

В исследованиях, представленных в данном цикле работ, были получены следующие результаты:

1. Создан метод измерения $\sigma_R(E)$ прямым и модельно-независимым способом с помощью сцинтилляционного спектрометра с телесным углом, близким к полному $\Omega=4\pi$. Отличительный признак метода в том, что он позволяет проводить измерения $\sigma_R(E)$ с тяжелыми ядрами пучка, где стандартные подходы, основанные на трансмиссионных телескопах, не работают. Метод позволит проводить измерения $\sigma_R(E)$ реакций и исследовать структуру тяжелых радиоактивных ядер на границе нуклонной стабильности.

2. Получен большой объём уникальной информации об энергетических зависимостях полных сечений реакций со слабосвязанными нейтроноизбыточными ядрами ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{10,11,12}\text{Be}$, ${}^{14}\text{B}$ на мишенях ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{51}\text{Co}$, ${}^{181}\text{Ta}$ в ранее малоисследованной области энергий пучка $E = 5\text{--}30$ МэВ/нуклон.

Измерения $\sigma_{\text{R}}(E)$ проведены в одинаковых экспериментальных условиях и с одинаковыми систематическими погрешностями.

3. В реакциях ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{10-12}\text{Be}+{}^{28}\text{Si}$ выявлен ряд особенностей зависимости $\sigma_{\text{R}}(E)$:

а) в реакциях ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}+{}^{28}\text{Si}$ обнаружено значительное увеличение $\sigma_{\text{R}}(E)$ по сравнению с расчетными сечениями во всем исследуемом диапазоне энергий;

Отметим, что в ряде работ ядрам ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$ приписывается структура одно- и двух- нейтронного гало.

б) в реакциях ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{12}\text{Be}+{}^{28}\text{Si}$ наблюдался в узком диапазоне энергии пучка $E=10\text{--}20$ МэВ/нуклон значительный рост сечения с уменьшением энергии.

Сделаны выводы, что ядра ${}^8\text{He}$, ${}^{6,9}\text{Li}$, ${}^{12}\text{Be}$ обладают достаточно плотной структурой валентных нуклонов в периферийной области ядра (кожа или skin-структура).

4. Проведен анализ $\sigma_{\text{R}}(E)$ реакций с помощью микроскопической модели на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера, что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными $\sigma_{\text{R}}(E)$. Показано, что поведение волновых функций слабосвязанных кластерных ядер заметно отличается при различных энергиях – при низких энергиях образуются «молекулярные» состояния, охватывающие оба ядра, при промежуточных энергиях плотность вероятности в значительной мере концентрируется в области между двумя ядрами по сравнению с «замороженными» нейтронами, а при больших энергиях нейтроны не успевают перераспределиться.

Проведенный теоретический анализ особенностей полных сечений реакций ${}^6,8\text{He}+{}^{28}\text{Si}$ и ${}^{9,11}\text{Li}+{}^{28}\text{Si}$ по сравнению с реакциями ${}^4\text{He}+{}^{28}\text{Si}$ и ${}^7\text{Li}+{}^{28}\text{Si}$ подтвердил влияние внешних слабосвязанных нейтронов в ядрах-снарядах ${}^6,8\text{He}$ и ${}^{9,11}\text{Li}$ на механизм реакций.

В результате экспериментальных и теоретических исследований $\sigma_{\text{R}}(E)$, проведенных с рядом легких нейтроноизбыточных ядер, получен новый метод исследования структуры нейтроноизбыточных ядер, значительно удаленных от границы β -стабильности и ее влияния на механизм ядерных реакций..

Результаты, полученные в представленном цикле работ, важны не только с точки зрения фундаментальных аспектов ядерной физики, но и для смежных областей науки, например, в астрофизике при рассмотрении сценария нуклеосинтеза.

Результаты измерения $\sigma_{\text{R}}(E)$, полученные нами, используются в различных моделях, например модернизированной каскадной экситонной модели, которая широко используется в расчётах для ядерной медицины, включая адронную терапию, расчетов доз излучения для космонавтов и пр.

Литература

1. Ю.Э. Пенионжкевич, Ю.Г. Соболев, В.В. Самарин, М.А. Науменко, *Особенности полных сечений реакций со слабосвязанными ядрами ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$* , Ядерная Физика **80** (5) (2017) 525 // Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, V.V.Samarin, M.A. Naumenko, *Peculiarities in total cross sections of reactions with weakly bound nuclei ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$* , Physics of Atomic Nuclei **80** (5) (2017) 928. **По цитируемости за последние 5 лет вошла в список лучших статей журнала «Ядерная Физика».**

2. Ю.Г. Соболев, Ю.Э. Пенионжкевич, Д. Азнабаев, Е.В. Земляная, М.П. Иванов, Г.Д. Кабдрахимова, А.М. Кабышев, А.Г. Князев, А. Куглер, Н.А. Лашманов, К.В. Лукьянов, А. Май, В.А. Маслов, К. Мендибаев, Н.К. Скобелев, Р.С. Слепнев, В.И. Смирнов, Д.А. Тестов, *Экспериментальное исследование энергетической зависимости полных сечений реакций ${}^6\text{He}+{}^{\text{nat}}\text{Si}$ и ${}^9\text{Li}+{}^{\text{nat}}\text{Si}$* , Физика элементарных частиц и атомного ядра **48** (6) (2017) 871 // Physics of Particles and Nuclei **48** (6) (2017) 922.
3. Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, V.V. Samarin, M.A. Naumenko, *Study of enhancement of total cross sections of reactions with ${}^6\text{He}$, ${}^{6,9}\text{Li}$ nuclei*, Eurasian Journal of Physics and Functional Materials **1** (1) (2017) 12.
4. M.A. Naumenko, Yu.E. Penionzhkevich, V.V. Samarin, N.K. Skobelev, *Neutron rearrangement in reactions with light weakly-bound nuclei*, Eurasian Journal of Physics and Functional Materials **1** (1) (2017) 25.
5. M.A. Naumenko, Yu.E. Penionzhkevich, V.V. Samarin, Yu.G. Sobolev, *Role of external neutrons of weakly bound nuclei in reactions with their participation*, Journal of Physics: Conference Series **1023** (2018) 012018.
6. Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, V.V. Samarin, M.A. Naumenko, N.A. Lashmanov, V.A. Maslov, I. Sivacek, S.S. Stukalov, *Energy dependence of the total cross section for the ${}^{11}\text{Li}+{}^{28}\text{Si}$ reaction*, Physical Review C **99** (2019) 014609.
7. Ю.Г. Соболев, Ю.Э. Пенионжкевич, В.А. Маслов, М.А. Науменко, В.В. Самарин, И. Сивачек, С.С. Стукалов, *Измерение полных сечений реакций при столкновениях ${}^{6,8}\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$* , Известия РАН. Серия физическая **83** (4) (2019) 451 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics **83** (4) (2019) 402.
8. V.V. Samarin, Yu.E. Penionzhkevich, M.A. Naumenko, N.K. Skobelev, Yu.G. Sobolev, *Dynamics of nucleus-nucleus collisions and neutron rearrangement in time-dependent approach*, Il Nuovo Cimento **42C** (2019) 105.
9. Ю.Г. Соболев, Ю.Э. Пенионжкевич, В.В. Самарин, М.А. Науменко, С.С. Стукалов, И. Сивачек, С.А. Крупко, А. Куглер, Ю. Лоуко, *Полные сечения реакций ядер ${}^{6,8}\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ на мишенях ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{181}\text{Ta}$* , Известия РАН. Серия физическая **84** (8) (2020) 1152 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics **84** (8) (2020) 948.
10. I. Sivacek, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, S.S. Stukalov, *MULTI-2, a 4 π spectrometer for total reaction cross section measurements*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **976** (2020) 164255.
11. V.V. Samarin, Yu.G. Sobolev, Yu.E. Penionzhkevich, S.S. Stukalov, M.A. Naumenko, I. Sivacek, *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*, ЭЧАЯ **53** (2) (2022) 561 // Physics of Particles and Nuclei **53** (2) (2022) 595.
12. Yu.E. Penionzhkevich, R.G. Kalpakchieva, *Light exotic nuclei near the boundary of neutron stability* (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2022).
13. В.В. Самарин, М.А. Науменко, *Изучение процессов нуклонных передач в низкоэнергетических реакциях изотопов гелия с ядрами ${}^{197}\text{Au}$* , Ядерная Физика **86** (1) (2023) 155 // Physics of Atomic Nuclei **85** (6) (2022) 880.

14. Yu.G. Sobolev, S.S. Stukalov, V.V. Samarin, Yu.E. Penionzhkevich, M.A. Naumenko, *Total cross sections for the reactions $^{10,11,12}\text{Be} + ^{28}\text{Si}$ and $^{14}\text{B} + ^{28}\text{Si}$* , Submitted to Physical Review C (2023) [ArXiv \(2023\)](#).

Результаты, полученные в представляемом цикле работ, докладывались на следующих конференциях и семинарах за период с 2018 по 2023гг.

- IX International Symposium on EXOTic Nuclei (EXON-2018), Petrozavodsk, Russia, 10 - 15 September, 2018 (3 доклада):
 - Experimental studies of total reaction cross section energy dependence for $^{6,8}\text{He} + ^{28}\text{Si}$ and $^{9,11}\text{Li} + ^{28}\text{Si}$ reactions;*
 - Energy dependence of the Total Cross Section for the Reaction $^8\text{He} + ^{28}\text{Si}$;*
 - Upgrade Possibilities of the Spectrometer "MULTI";*
- LXVIII International conference «NUCLEUS 2018», Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies, Voronezh, Russia, 2-6 July, 2018:
 - Energy dependence of total reaction cross sections for $^{6,8}\text{He} + \text{Si}$ and $^{9,11}\text{Li} + \text{Si}$ collisions;*
- LXIX International conference "Nucleus-2019" on nuclear spectroscopy and nuclear structure "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies", Dubna, Russia, 1–5 July, 2019 (3 доклада):
 - "MULTI" set-up for spectroscopy nuclear reactions;*
 - Measurement of the total reaction cross section on the detection setup "MULTI";*
 - Energy dependence of total reaction cross sections for $^{6,8}\text{He}$, $^{8,9}\text{Li}$ beam particles on ^{28}Si , ^{59}Co , ^{181}Ta targets;*
- LXX International Conference "Nucleus-2020". Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies., NRC, Saint Petersburg, Russia, 12 – 17 October 2020:
 - Investigation of reaction cross section for beam of ^8Li , ^8He ON ^{28}Si , ^{59}Co , ^{181}Ta targets;*
- 20th Conference of Czech and Slovak Physicist, Jan Mlynar, Miroslav Cieslar, Czech Republic, Prague, 7 – 10 September, 2020:
 - A setup for measurement of the total reaction cross section;*
- LXXI International conference «Nucleus-2021» Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies, Saint Petersburg, Russia, 20 – 25 September 2021 (2 доклада):
 - Reaction cross sections for $^{10,11,12}\text{Be}$ beam ions on ^{28}Si , ^{59}Co , ^{181}Ta targets;*
 - Cluster of phoswich gamma-detectors for "MULTI" facility;*
- LXXII International conference NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications, Moscow, Russia, 11–16 July, 2022 (2 доклада):
 - Energy dependence of total reaction cross sections for isotopes of Be on targets ^{28}Si , ^{59}Co , ^{181}Ta ;*
 - 4π -methods for total reaction cross section measurements;*
- 55th meeting of the PAC for Condensed Matter Physics, FLNP, JINR, Dubna, Russia, 27 January, 2022:
 - Total reaction cross section with light weakly bound nuclei;*
- JINR Association of Young Scientists and Specialists, Conference "Alushta-2022", AYSS, JINR, Alushta, Russia, 5-12 June, 2022:

- *Experimental methods for total reaction cross section measurements in the interaction with exotic nuclei;*
10. IV International Scientific Forum “NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGIES” dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Nuclear Physics, Almaty, Republic of Kazakhstan, 26-30 September, 2022 (3 доклада):
- *Application of 4π -methods for measuring the total reaction cross sections with light neutron-rich exotic nuclei;*
 - *Total cross sections of the reactions with light weakly bound nuclei;*
 - *Theoretical approach to the analysis of total reaction cross sections for weakly bound exotic nuclei;*
11. LXXIII International conference NUCLEUS-2023: Fundamental problems and applications, Sarov, Russia, 9–13 October, 2023 (3 доклада):
- *Manifestation of halo and skin structure in nuclear reactions with Li and Be isotopes;*
 - *Cluster of CeBr₃-NaI(Tl) phoswich detectors for neutrons and γ -quanta measuring;*
 - *Measurements of total cross sections for reactions with weakly bound nuclei using a 4π scintillation spectrometer.*
12. Joint BLTP JINR - KLTP CAS Workshop on Physics of Strongly Interacting Systems, Yerevan, Armenia, 3-9 September, 2023:
- *Total reaction cross sections for light weakly bound nuclei*