

*Ю. Э. Пенюонжкевич*

## Структура ядер и механизмы реакций нуклонных передач

Реакции многонуклонных передач являются эффективным методом получения и изучения структуры экзотических ядер. Впервые для этого реакции многонуклонных передач были применены в ЛЯР ОИЯИ в экспериментах группы В. В. Волкова, в которых было получено более десятка новых ядер на границах нейтронной стабильности. Между тем нужно отметить, что сечения реакций передач, приводящих к образованию экзотических ядер в основном состоянии, могут быть очень малы.

Диапазон сечений простирается от нескольких нанобарн до микробарн. Все это накладывает определенные условия на экспериментальную методику: необходимость измерения продуктов под передними углами, высокая эффективность используемых спектрометров, высокое разрешение по массе и заряду образующихся в реакции продуктов, возможность сепарации продуктов реакции и ядер первичного пучка.

Для исследования реакций многонуклонных передач в ЛЯР ОИЯИ была создана экспериментальная установка, включающая в себя магнитный анализатор высокого разрешения (МАВР), а также специальная камера рассеяния с логарифмическими полупроводниковыми детекторами-телескопами (толщиной 10, 50, 100 и 3500 мкм). Это позволяло идентифицировать и измерять энергетические и угловые распределения продуктов реакций передач в широком диапазоне углов (от  $0^\circ$  до  $160^\circ$ ) с высоким угловым и энергетическим разрешением. Измерения под передними углами осуществлялись с помощью магнитного анализатора высокого разрешения МАВР, что позволяло проводить идентификацию продуктов реакций по  $A$  и  $Z$  с абсолютной точностью.

Проведенные исследования показали, что при взаимодействии слабосвязанных кластерных ядер в характеристиках их взаимодействия с ядрами-ми-

*Yu. E. Penionzhkevich*

## Structure of Nuclei and Mechanisms of Nucleon Transfer Reactions

Multinucleon transfer reactions are an efficient method for producing and studying the structure of exotic nuclei. For the first time, multinucleon transfer reactions were used for this purpose at JINR FLNR, in the experiments of the group of V. V. Volkov, in which more than a dozen new nuclei were obtained at the neutron stability boundaries. Meanwhile, it should be noted that the cross sections for transfer reactions leading to the formation of exotic nuclei in the ground state may be very small.

The range of cross sections extends from several nanobarns to microbarns. All this imposes certain conditions on the experimental technique: the need to measure the products at forward angles, the high efficiency of the spectrometers used, the high mass and charge resolution of the products formed in the reaction, and the possibil-

ity of separating the reaction products and nuclei of the primary beam. To study multinucleon transfer reactions, an experimental setup was created at JINR FLNR which includes a high-resolution magnetic analyzer (MAVR) and a special scattering chamber with logarithmic semiconductor detector-telescopes (10, 50, 100, and 3500  $\mu\text{m}$  thick). This made it possible to identify and measure the energy and angular distributions of the products of transfer reactions in a wide range of angles (from  $0^\circ$  to  $160^\circ$ ) with a high angular and energy resolution. Measurements at forward angles were carried out using the high-resolution magnetic analyzer MAVR, which made it possible to identify reaction products by  $A$  and  $Z$  with absolute accuracy.

шениями проявляются особенности их кластерной структуры. В реакции  $^{18}\text{O}$  (10 МэВ/нуклон) + Ta был обнаружен механизм многонейтронной передачи. Как показано, в этих экспериментах возможен процесс передачи шести нейтронов до самого нейтронно-избыточного стабильного изотопа кислорода с массой  $A = 24$ .

Были получены и изучены новые изомерные состояния в реакции с пучком ионов  $^3\text{He}$ . В реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$  впервые измерены основное и возбужденные состояния в ядре  $^{45}\text{Ti}$ , включая заселение изобар-аналогового состояния. Исследование реакций  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$  и  $^{197}\text{Au}(^3\text{He}, t)^{197}\text{Hg}$  показало, что их механизм можно объяснить зарядово-обменными процессами, в которых проявляется двухтельный характер обмена энергией.

Проведенный теоретический анализ полученных результатов позволил объяснить некоторые закономерности в механизмах реакций передачи нуклонов с точки зрения динамики реакций со слабосвязанными ядрами, как радиоактивными, так и стабильными. С теоретической точки зрения показано, что в низкоэнергетических ядро-ядерных столкновениях передача нуклонов (и/или их перераспределение) может играть важную роль и проявляться как непосредствен-

но в каналах нуклонных передач, так и в изменении потенциальной энергии системы, что, в свою очередь, приводит к изменению сечений отдельных каналов и полного сечения реакции по сравнению с моделью с неизменной в ходе столкновения нуклонной плотностью. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными по сечениям образования указанных изотопов при совместном учете процессов передачи нейтрона и процессов слияния–испарения в рамках статистической модели. Результаты расчетов и полученные зависимости в рамках этих расчетов позволяют с их помощью делать экстраполяции на другие ядра, что является важной задачей в вопросе синтеза новых экзотических ядер.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем исследовании процессов передачи нуклонов и/или кластеров, что позволит анализировать данные экспериментальных исследований реакций с легкими, экзотическими и радиоактивными ядрами, полученные как в ЛЯР ОИЯИ, так и в других научных центрах. Используемые теоретические подходы помогут провести планирование новых экспериментов и проанализировать их результаты.

Исследования, представленные в данном цикле работ, проводились в коллаборации с институ-

The performed studies have shown that, in the interaction of weakly bound cluster nuclei, the characteristics of their interaction with target nuclei manifest the features of their cluster structure. In the reaction  $^{18}\text{O}$  (10 MeV/nucleon) + Ta, a multineutron transfer mechanism was discovered. As shown in these experiments, the process of transfer of six neutrons is possible, to the most neutron-rich stable oxygen isotope with a mass of  $A = 24$ .

New isomeric states were obtained and studied in the reaction with a beam of  $^3\text{He}$  ions. In the reaction  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ , the ground and excited states in the  $^{45}\text{Ti}$  nucleus were measured for the first time, including the population of the isobar-analogue state. The study of the reactions  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$  and  $^{197}\text{Au}(^3\text{He}, t)^{197}\text{Hg}$  showed that their mechanism can be explained by charge-exchange processes with a two-body nature of energy exchange.

The theoretical analysis of the obtained results made it possible to explain some patterns in the mechanisms of nucleon transfer reactions from the point of view of the dynamics of reactions with weakly bound nuclei, both radioactive and stable. From a theoretical point of view, it was shown that, in low-energy nucleus–nucleus collisions,

the transfer of nucleons (and/or their redistribution) can play an important role and manifest itself both directly in the channels of nucleon transfer and in a change of the potential energy of the system, which, in turn, leads to a change in the cross sections of individual channels and the total reaction cross section as compared to the model with the unchanging nucleon density during the collision. Good agreement with the experimental data on the cross sections for the production of these isotopes was obtained when taking into account neutron transfer processes and fusion-evaporation processes within the framework of the statistical model. The results of calculations and the obtained dependencies in the framework of these calculations make it possible to use them for extrapolation to other nuclei, which is important from the perspective of the synthesis of new exotic nuclei.

The results of the work can be used in further studies of nucleon and/or cluster transfer processes, which will make it possible to analyze the results of experimental studies of reactions with light, exotic, and radioactive nuclei produced at JINR FLNR and in other scientific centres. The theoretical approaches used will help to plan new experiments and analyze their results.

тами стран-участниц ОИЯИ: Институтом ядерной физики (Ржеж, Чехия), Институтом ядерной физики (Алма-Ата, Казахстан), Евразийским национальным университетом им. Л. Н. Гумилева (Астана, Казахстан).

Данная работа была представлена на конкурс научно-методических работ ОИЯИ.

### Список литературы

1. *Penionzhkevich Yu. E., Kalpakchieva R. G.* Light Exotic Nuclei near the Boundary of Neutron Stability. Singapore: World Sci., 2022.

2. *Skobelev N. K., Penionzhkevich Yu. E., Sivacek I., Issatayev T., D'Adada G., Burjan V., Kilic A. I., Mrazek J., Glagolev V.* Population of Excited States in  $^{45}\text{Ti}$  Nuclei in Charge Exchange Reactions in a 29-MeV  $^3\text{He}$  Beam // *Phys. Part. Nucl.* 2022. V. 53. P. 382.

3. *Samarin V. V., Sobolev Yu. G., Penionzhkevich Yu. E., Stukalov S. S., Naumenko M. A., Sivacek 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. P. 595.

---

The studies presented in this series of works were carried out in collaboration with the institutes of the JINR Member States: the Nuclear Physics Institute (Řež, Czech Republic), the Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan), the L. N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan).

This work is submitted to the competition of scientific and methodological works of JINR.

### References

1. *Penionzhkevich Yu. E., Kalpakchieva R. G.* Light Exotic Nuclei near the Boundary of Neutron Stability. Singapore: World Sci., 2022.

2. *Skobelev N. K., Penionzhkevich Yu. E., Sivacek I., Issatayev T., D'Adada G., Burjan V., Kilic A. I., Mrazek J., Glagolev V.* Population of Excited States in  $^{45}\text{Ti}$  Nuclei in Charge Exchange Reactions in a 29-MeV  $^3\text{He}$  Beam // *Phys. Part. Nucl.* 2022. V. 53. P. 382.

3. *Samarin V. V., Sobolev Yu. G., Penionzhkevich Yu. E., Stukalov S. S., Naumenko M. A., Sivacek 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. P. 595.