***"*** ***Нуклонные и кластерные передачи в реакциях с ядром 9Be"***

**А.К. Ажибеков, С.М. Лукьянов, Ю.Э. Пенионжкевич, М.А. Науменко,   
В.В. Самарин, Т. Исатаев, В.А. Маслов, К. Мендибаев, Д. Азнабаев,   
Т.К. Жолдыбаев**

**A.K. Azhibekov, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, M.A. Naumenko,   
V.V. Samarin,** **T. Issatayev, V.A. Maslov, K. Mendibayev, D. Aznabayev,   
T.K. Zholdybayev.**

Исследование структуры легких ядер открыло новое интересное направление, имеющее самые необычные последствия – кластеризация в ядрах, и связанные с этим такие эффекты, как увеличение радиусов отдельных состояний одного и того же ядра, кластерные распады, необычные механизмы реакций и др.

В данном цикле работ [1-6] представлены результаты исследований передачи нуклонов и кластеров в реакциях с различными снарядами на ядре 9Be: d+9Be [6], 3He+9Be [2], 6Li+9Be [1,3]. Целью работы было выявить проявление кластерной структуры 9Be в изучаемых каналах реакции.

Известно, что 8Ве состоит из двух α-кластеров. В этом ядре установлена ротационная полоса, построенная на основном состоянии 0+(g.s.), 2+(3.04 МэВ) и 4+ (11.4 МэВ). Ядро 9Ве также имеет молекулярную структуру с двумя центрами, т.е. состоит из двух хорошо разделенных α-частиц и одного валентного нейтрона, который создает молекулярную связь для α-частиц. Расстояние между двумя α-частицами в 9Be определяется из момента инерции, извлекаемого из энергий возбуждения и спинов уровней в ротационной полосе основного состояния с *Kπ* = 3*/*2−. Определенное таким образом расстояние составляет 3.1 фм. Однако, в этих ядрах могут существовать и другие кластерные состояния, которые проявляются при распаде этих ядер и в механизме их взаимодействия с другими ядрами. С этой точки зрения ядро 9Be рассматривается как лучший пример нуклонно-стабильной ядерной молекулы. Оно имеет борромиановскую структуру в основном состоянии и обычно в теоретических работах представляется в виде системы из двух α-кластеров и нейтрона. Экспериментальные работы по кластерным каналам распада ядра 9Ве также свидетельствуют в пользу (α+n+α) -структуры. Однако с некоторой вероятностью ядро 9Ве может находиться в состоянии, соответствующем двухчастичной структуре, о чем свидетельствуют результаты наших экспериментальных работ, в которых показано, что в ядре 9Ве могут формироваться конфигурации 9Ве = n+8Be или 9Ве = α+5Не.

В работе [6] нами изучены реакции, индуцированные дейтронами на мишени 9Be, при энергиях столкновения 19,5 и 35 МэВ. Рассчитанный потенциал двойной свертки успешно применен при описании сечений упругого и неупругого рассеяния, реакций однонуклонной передачи и кластерной передачи. Определен параметр деформации для состяния 5/2– ядра 9Be. Показаны эффекты сильной связи для ядерных реакций однонуклонной передачи (d; p) и (d; t). Кроме того, установлено, что в ядерной реакции 9Be(d, 4Не)7Li тяжелый кластер 5He передается в основном одновременно, а вклад его последовательной передачи на порядок меньше. Выявлена важность учета механизма последовательной передачи системы n-p. На основании этих наблюдений при изучении взаимодействия дейтрона с 9Be сделан вывод о том, что ядро 9Be имеет кластерную структуру.

В работе [2] нами были измерены дифференциальные сечения для упругого и неупругого рассеяния, заселяющих возбужденные состояния в 9Ве на пучке 3Не при различных энергиях. Упругий канал был проанализирован с использованием оптической модели, в то время как неупругий канал был исследован с помощью метода связанных каналов. Были получены новые параметры для оптического потенциала системы 3He + 9Be. Были проанализированы все возможные механизмы передачи кластеров в каналах реакции 7Be+5He, 6Li+6Li и 6He+6Be. Получены дифференциальные сечения для этих механизмов передачи. Было обнаружено, что первичный захват валентного нейтрона является заметным в каналах переноса кластера. Этот результат убедительно показал наличие кластерной структуры n+8Be в 9Be и ее влияния на механизм реакции передачи. Особый интерес представляет канал 6He+6Be. В рамках CRC было достигнуто хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных сечений в предположении о двухступенчатых механизмов передачи, n-2n и 2n-n. Между тем, анализ показал также возможность потенциального участия и других процессов, таких как прямая передача трех нейтронов.

В работе [1, 3] были измерены энергетические и угловые распределения для каналов 9Be(6Li,6Li)9Be, 9Be(6Li,7Li)8Be, 9Be(6Li,8Li)7Be и 9Be(6Li,7Be)8Li в реакции 6Li+9Be при энергии 68 МэВ. Измерены энергетические распределения образованных в этих реакциях ядер. Полученные результаты позволили воспроизвести схему заселения основного и низколежащих возбужденных состояний комплементарных ядер, что также подтверждает двухчастичную природу полученных в данной работе выходных каналов реакции. Результаты исследования одно- и двухступенчатых передач нуклонов и кластеров в ядерных реакциях дает возможность ответить на вопрос о существовании многонейтронных систем, что является одной из важных проблем ядерной физики. В этой проблеме большой интерес представляет динейтрон, который может образовываться вблизи поверхности нейтронно-избыточных ядер. Нами было показано, что передача динейтрона 2n вносит больший вклад в сечения канала реакции 9Be(6Li,8Li)7Be под передними углами по сравнению с передачей протона и двухступенчатой передачей двух нейтронов. Передача протона вносит вклад, сопоставимый с передачей динейтрона в диапазоне углов 60-130°. Вклад двухступенчатой передачи двух нейтронов пренебрежимо мал во всем диапазоне углов. Осцилляции в угловом распределении для канала реакции 9Be(6Li,8Li)7Вe указывают на интерференцию механизмов передачи. Большой вклад передачи динейтрона в сечения показывает, что ядра 8Li и 9Be могут проявлять конфигурации, соответствующие двухтельным структурам 6Li+2n и 7Be+2n соответственно.

В работах [1, 3] исследовались проявления кластерной структуры 9Be в реакциях передачи. Выполнен теоретический анализ вкладов одно шаговых и двухшаговых механизмов передачи нейтронов. Определена вероятность этих передач (нейтрона 9Be(6Li,7Li)8Be и протона 9Be(6Li,7Be)8Li, а также передачи двух нейтронов 9Be(6Li,8Li)7Be). Показано, что в канале реакции 9Be(6Li,8Li)7Be под передними углами доминирующий вклад вносит механизм передачи динейтронного кластера.

В работе [4,5] были предложены новые формы парных потенциалов взаимодействия альфа-кластеров с нуклонами и альфа-кластеров между собой в альфа-кластерных ядрах. Продемонстрировано существенное перекрытие двух альфа-кластеров ядра 9Be в области наиболее вероятного нахождения валентного нейтрона (между кластерами). Это делает вероятным формирование в данном ядре нуклонных кластеров с числом нуклонов 2 и 3, в частности, 2n, d,3H,3He, передачу их в ходе ядро-ядерных столкновений. Различное взаимное расположение частиц в системе (α+n+α) позволяет реализовываться и двух тельной конфигурации α + 5Не.

Таким образом, в цикле представленных на конкурс работ были получены следующие результаты:

* Установлено, что в реакции 9Be(*d*,α)7Li передача тяжелого кластера 5He вносит большой вклад в сечение реакции под задними углами (θц.м.=120-150°). Этот результат подтверждает ранее выдвинутые предположения о том, что с некоторой вероятностью ядро 9Ве может находиться в состоянии, соответствующем двухчастичной структуре α+5Не.
* Последовательная передача нейтрона и дейтронного кластера *n*-*d* в канале реакций 9Be(3He,6Li)6Li преобладает над последовательными пердачами *d*-*n*, 2*n*-*p*. Это наблюдение является подтверждением структуры *n* + 8Be в 9Be.
* Показано, что динейтронный кластер в структуре 9Be проявляется в канале реакции 9Be(3He,7Be)5He. Расчеты, проведенные в рамках метода связанных каналов реакции (CRC), показали, что двухступенчатые механизмы передачи (*n*-2*n* и 2*n*-*n*) вносят существенный вклад в сечение реакции, что является косвенным свидетельством передачи динейтронного кластера.

Установлено, что динейтронная передача 2*n* вносит больший вклад в сечения канала реакции 9Be(6Li,8Li)7Be под прямыми углами по сравнению с передачей протона и двухступенчатой передачей двух нейтронов. Это позволяет утверждать о наличии динейтронной структуры в ядре 9Be, проявляющаяся в ходе реакций нейтронных передач.

* Показано, что характерными особенностями реакций передач двух нейтронов являются доминирование динейтронной передачи и интерференция механизмов передач.
* Дано теоретическое обоснование структуры ядра 9Be, в котором наряду с наиболее вероятной конфигурацией с валентным нейтроном между α-кластерами α + *n +*α возможна и конфигурация α + 5Не с меньшей вероятностью. Существенное перекрытие двух альфа-кластеров ядра 9Be в области наиболее вероятного нахождения валентного нейтрона объясняет формирование в данном ядре нуклонных кластеров с числом нуклонов 2 и 3, в частности, 2n, d,3H, 3He и передачу их наряду с нейтроном и кластерами α, 5Не в ходе ядро-ядерных столкновений.

Представленные в данном цикле работ результаты экспериментальных и теоретических исследований передачи нуклонов и кластеров показывают проявления в реакциях известных (α+*n*+α), необычных (*n*+8Be, α+5Не) и новых (с формированием в ходе реакции динейтронного кластера в структуре ядра 9Be=7Be+2*n*) конфигураций структуры ядра 9Be. Результаты этих исследований помогают продвинуться к более глубокому пониманию свойств ядерной материи в области легких ядер, а также экстраполировать их на более тяжелые ядра.

Результаты, полученные в представляемом цикле исследований опубликованы в следующих журналах:

1. *A.K. Azhibekov, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, B.A. Urazbekov, M.A. Naumenko, V.V. Samarin, T. Issatayev, V.A. Maslov, K. Mendibayev, D. Aznabayev, T.K. Zholdybayev, A. Temirzhanov*, Study of one-step and two-step neutron transfer in the reaction 6Li + 9Be // Chinese Physics C 48 (**2024**) 114101

2. *B.A. Urazbekov, T. Issatayev, S.M. Lukyanov, A. Azhibekov, A.S. Denikin, K. Mendibayev, D.M. Janseitov, Yu.E. Penionzhkevich, K.A. Kuterbekov, T.K. Zholdybayev*, Reactions induced by 30 MeV 3He beam on 9Be : cluster transfer reactions // Chinese Physics C 48 (**2024**) 014001

3. *S.M. Lukyanov, A.K. Azhibekov, T. Issatayev, Yu.E. Penionzhkevich, K. Mendibayev, A. Shakhov, V. Maslov and Nguyen Hoai Chau,* Nucleon and delute cluster transfer in the reactions 6Li + 9Be// EPJ Web of Conferences 311 (**2024**) 00017

*4. A.S. Bazhin, V.V. Samarin,* Study of the Structure of the 9Be Nucleus in the Alpha-Cluster Model by the Method of Hyperspherical Functions *//* Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics88 (**2024**) 1177–1184

5. *V.V. Samarin,* Study of spatial structures in α-cluster nuclei // European Physical Journal A 58 (**2022**) 1-23

6. *B.A. Urazbekov, A.S. Denikin, S.M. Lukyanov, N. Itaco, D.M. Janseitov, K. Mendibayev, V. Burjan, V. Kroha, J. Mrazek, W.H. Trzaska, M.N. Harakeh, D. Etasse, I. Stefan, D. Verney, T. Issatayev, Yu.E. Penionzhkevich, K.A. Kuterbekov and T. Zholdybayev*,  Clusterization and strong coupled-channels effects in deuteron interaction with 9Be nuclei // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 46 (**2019**) 105110

Кроме этого, результаты работ с 2018 по 2024 г. были представлены на многих Международных конференциях и семинарах.

Только в 2021-2024 гг. эти результаты докладывались:

1. LXXI International conference "NUCLEUS – 2021 Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 20-25 September, Saint Petersburg, Russia.
2. III International Scientific Forum “NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGIES” dedicated to the 30th anniversary of Independence of the Republic of Kazakhstan, 20-25 September (2021), Almaty, Kazakhstan.
3. The 7th International Conference on Advancement in Nuclear Instrumentation Measurement Method and their Applications, ANIMA2021, Prague, Czech Republic, June 21-25, (2021).
4. 22nd COLLOQUE GANIL. Autrans-Méaudre-en-Vercors, France, September 27th – October 1st 2021.
5. The LXXI International conference "NUCLEUS – 2022. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies" will be held in Moscow, Jullay 2022.
6. III International Scientific Forum “Nuclear Science and Technologies”, Almaty, Kazakhstan, 20-24 September 2022.
7. Конференция по физике тяжелых ионов, Ст.Петербург, июль, 2022
8. Международная конференция по ядерной физике (INPC-2022),  
    Кейптаун. Южно-Африканская Республика, с 10 по 17 сентября 2022 г.
9. Школа молодых ученых, Алушта, июнь, 2022.
10. LXXIII International conference NUCLEUS-2023: Fundamental problems and applications, Sarov, Russia, 9–13 October, 2023.
11. Joint BLTP JINR - KLTP CAS Workshop on Physics of Strongly Interacting Systems, Yerevan, Armenia, 3-9 September, 2023.
12. African Nuclear Physics Conference (ANPC 2023), Cape Town, South Africa, 29 November - 3 December, 2023.
13. Fifth International Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics”, June 10-14,2024, Hvar Island, Croatia.
14. LXXIV International conference «Nucleus-2024»: Fundamental problems and applications, 1-5 of July, 2024, Dubna.