

P7-2016-92

С. М. Лукъянов¹, М. А. Науменко¹, В. Бурьян², В. Глаголев²,
А. С. Деникин^{1,3}, В. Крога², К. Кутербеков⁴,
К. Мендибаев¹, Я. Мразек², Ю. Э. Пенионжкевич^{1,5},
С. Пискорж², Н. К. Скобелев¹, Ю. Г. Соболев¹,
В. Тржаска⁶, Ю. Тулеушев⁷, Г. Тюрин⁶, С. В. Хлебников⁶,
Б. А. Уразбеков^{1,3}

КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА ${}^9\text{Be}$ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЗМ ПЕРЕДАЧИ НУКЛОНОВ

Направлено в труды международной конференции «EXON-2016»,
Казань, 4–11 сентября 2016 г.

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт ядерной физики, Ржеж, Чехия

³ Государственный университет «Дубна», Дубна

⁴ Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана

⁵ Национальный исследовательский университет МИФИ, Москва

⁶ Физический факультет, Университет Ювяскюля, Ювяскюля, Финляндия

⁷ Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

Лукьянов С. М. и др.

P7-2016-92

Кластерная структура ${}^9\text{Be}$ и ее влияние на механизм передачи нуклонов

Для исследования кластерной конфигурации ${}^9\text{Be}$ изучались каналы передачи нейтрона и α -частицы от ядра мишени ${}^9\text{Be}$ к налетающему иону ${}^3\text{He}$ при энергии 30 МэВ. Путем анализа энергетических распределений продуктов реакций было показано, что исследованные каналы отвечают двухтельному механизму реакции. Также были измерены угловые распределения продуктов в каналах ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^4\text{He}){}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^6\text{Li}){}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Li}){}^5\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Be}){}^5\text{He}$. На основе анализа дифференциальных угловых распределений этих каналов реакции, главным образом соответствующих кластерным конфигурациям ($n + {}^8\text{Be}$) и ($\alpha + {}^5\text{He}$), получены значения вероятностей 69 и 25 % соответственно. Показано, что другие возможные кластерные конфигурации в ядре ${}^9\text{Be}$, например (${}^3\text{He} + {}^6\text{He}$), имеют значительно меньшую вероятность (менее 3 %).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Lukyanov S.M. et al.

P7-2016-92

Cluster Structure ${}^9\text{Be}$ and Mechanism of Transfer Nuclear Reaction

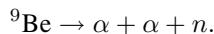
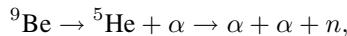
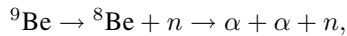
The study of inelastic scattering and multi-nucleon transfer reactions was performed by bombarding a ${}^9\text{Be}$ target with a ${}^3\text{He}$ beam at the incident energy of 30 MeV. Angular distributions for ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^4\text{He}){}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^6\text{Li}){}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Li}){}^5\text{Li}$, and ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Be}){}^5\text{He}$ reaction channels were measured. Experimental angular distributions for the corresponding ground states (g. s.) were analyzed within the framework of the optical model, the coupled-channel approach and the distorted-wave Born approximation. The contributions of different exit channels have been determined confirming that the ($\alpha + {}^5\text{He}$) configuration plays an important role. The configuration of ${}^9\text{Be}$ consisting of two bound helium clusters (${}^3\text{He} + {}^6\text{He}$) is significantly suppressed (less than 3%), whereas the two-body configurations ($n + {}^8\text{Be}$) (69%) and ($\alpha + {}^5\text{He}$) (25%) including unbound ${}^8\text{Be}$ and ${}^5\text{He}$ are found more probable.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Ядро ${}^9\text{Be}$ представляет интерес для исследований, поскольку является стабильным, но слабосвязанным ядром. Например, энергия связи одного нейтрона $S_{1n} = 1,7 \text{ МэВ}$, что даже несколько меньше, чем S_{1n} в нестабильном ядре ${}^6\text{He}$. Кроме того, ядро ${}^9\text{Be}$ может рассматриваться как ядро с так называемой борромиевской структурой: оно может быть представлено в виде конфигурации из трех частиц $\alpha + \alpha + n$, причем каждая парная комбинация в этой структуре является несвязанной. Возможные сценарии развала стабильного ядра ${}^9\text{Be}$ ассоциируются с выбыванием одного из кластеров и могут содержать промежуточные несвязанные ядерные системы ${}^8\text{Be}$ и ${}^5\text{He}$ [1–3], приводящие в итоге к трехчастичному конечному состоянию $\alpha + \alpha + n$:



Кластерная конфигурация ядра ${}^9\text{Be}$ имеет важные следствия в приложении к астрофизическим процессам. С одной стороны, как показано в работе [4], из-за коротких времен жизни для ${}^8\text{Be}$ и ${}^5\text{He}$ (10^{-16} и 10^{-20} с соответственно) вероятность подхвата n или α этими ядрами мала. Однако в работе [5] показано, что при температуре $T \sim 10^9 \text{ К}$ канал образования ${}^9\text{Be}$ через ядро ${}^5\text{He}$ становится доминирующим.

Структура ${}^9\text{Be}$ интенсивно изучалась во множестве экспериментальных работ. В частности, в работах [1, 2] приведены количественные оценки относительного выхода каналов развала $n + {}^8\text{Be}^{g.s.,2+}$ и ${}^5\text{He} + \alpha$ и показано, что распад высоколежащих возбужденных состояний ${}^9\text{Be}$ ($E^* > 4 \text{ МэВ}$) происходит преимущественно через ${}^5\text{He}_{g.s.}$.

Это результат, наряду с количественными данными о распаде, обсуждаемыми ниже, стимулирует детальное количественное исследование кластерной конфигурации (${}^8\text{Be} + n$) и (${}^5\text{He} + \alpha$) внутри ядра ${}^9\text{Be}$, а также влияния кластерной структуры на механизм реакции. Например, в работах [6, 7] исследовалась кластерная передача системы из четырех нуклонов. Теоретический подход к описанию возможности мгновенной одноступенчатой передачи пяти нуклонов в виде кластера ${}^5\text{He}$ разработан для анализа дифференциальных угловых распределений каналов реакции ${}^{16}\text{O}(p, {}^6\text{Li}){}^{11}\text{C}$ и ${}^{11}\text{B}(p, {}^6\text{Li}){}^6\text{Li}$,

соответствующих кластерной передаче ${}^5\text{He}$ от ядра мишени к налетающему протону.

В работе [8] при исследовании канала ${}^9\text{Be}(d, {}^4\text{He}){}^7\text{Li}$ с энергией дейтронов 7 МэВ был сделан однозначный вывод о передаче пяти нуклонов. Был также проведен учет вклада других каналов, в частности, учитывался вклад от α -распада составного ядра ${}^{11}\text{B}$.

Одной из целей настоящей работы является проведение количественного анализа полученных данных для определения степени кластеризации ядер мишени и роли различных кластерных конфигураций основного и возбужденных состояний в ядре ${}^9\text{Be}$ (например, $(n + {}^8\text{Be})$ или $({}^5\text{He} + \alpha)$) в реакции ${}^3\text{He}$ (30 МэВ) + ${}^9\text{Be}$. Вклад конфигураций, содержащих кластер ${}^5\text{He}$, представляет отдельный интерес как с точки зрения структуры ядер мишени, так и с точки зрения изучения возможного механизма подхвата кластера в реакциях с легким снарядом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Эксперименты с пучками ускоренных ионов ${}^3\text{He}$ и d проводились на циклотронах ускорительной лаборатории Университета Ювяскюля (Финляндия) и Института ядерной физики (Ржев, Чехия) при энергиях 30 и 19 МэВ соответственно. Средняя интенсивность пучка бомбардирующих ионов была 10 нА. В качестве мишени использовались самоподдерживающиеся фольги металлического бериллия толщиной 12 мкм.

Для регистрации продуктов реакций ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$ и $d + {}^9\text{Be}$ использовалось несколько полупроводниковых телескопов, состоящих из трех детекторов ΔE_0 , ΔE , E_r для измерения удельных потерь ΔE_0 , ΔE и остаточной

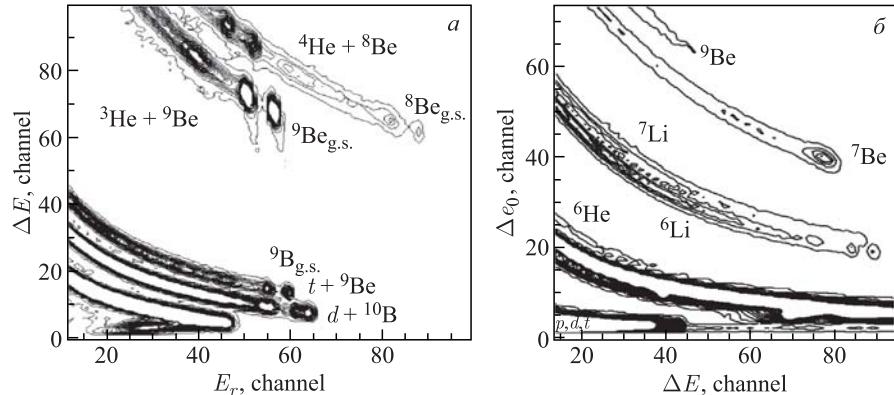


Рис. 1. Контурные диаграммы зависимости выхода продуктов от их удельных потерь и остаточной энергии $\Delta E - E_r$ (a) и $\Delta E_0 - \Delta E$ (b), полученные при исследовании реакции ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$ (см. текст)

энергии E_r . Использовались детекторы ΔE_0 , ΔE , E_r с толщиной 10, 100 и 3500 мкм для регистрации в диапазоне от p , d , t до изотопов Be. В качестве примера на рис. 1 представлены контурные диаграммы выхода продуктов от величин удельных потерь и остаточной энергии $\Delta E - E_r$ (рис. 1, *a*) и $\Delta E_0 - \Delta E$ (рис. 1, *б*), полученные при исследовании реакции $^3\text{He} + ^9\text{Be}$. Из представленных диаграмм видно, что используемые трехслойные телескопы позволяли надежно идентифицировать продукты реакций: видны каналы упругого, неупругого рассеяния, а также каналы передач нуклонов.

Используемые телескопы позволяли идентифицировать продукты реакций по заряду Z и массе A , а также измерять их полную кинетическую энергию путем сложения калиброванных значений удельных потерь ΔE_0 , ΔE и остаточной энергии E_r . В качестве примера на рис. 2 представлены энергетические распределения продуктов ^4He , ^7Be и ^7Li , зарегистрированных под углом $\theta_{\text{lab}} = 18^\circ$. Эти продукты выбраны потому, что каналы реакции приводят к образованию несвязанного комплементарного продукта: $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^4\text{He})^8\text{Be}$, $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^7\text{Be})^5\text{He}$ и $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^7\text{Li})^5\text{Li}$ соответственно. Как видно из рис. 2, форма энергетических распределений зарегистрированных ^4He , ^7Be и ^7Li воспроизводит схему заселения возбужденных уровней комплементарных несвязанных продуктов ^8Be , ^5He и ^5Li . На основании этого можно сделать вывод о двухтельном механизме реакции.

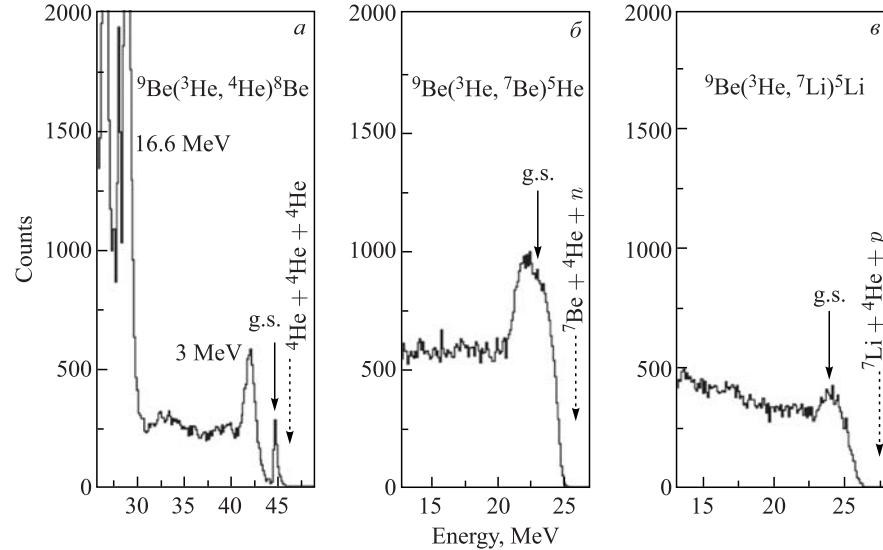


Рис. 2. Энергетические распределения продуктов ^4He , ^7Be и ^7Li , зарегистрированных под углом $\theta_{\text{lab}} = 18^\circ$. Положения пиков (отмеченные сплошными стрелками на гистограммах) соответствуют образованию двух продуктов в выходном канале в их основных (g.s.) состояниях

РЕАКЦИЯ ${}^3\text{He}$ (30 МэВ) + ${}^9\text{Be}$. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Энергетические распределения. Для подтверждения вывода о двухтельном механизме реакции проведены кинематические расчеты значений кинетической энергии для случая истинного трехтельного выходного канала, когда все продукты реакции образуются в процессе взаимодействия. Данные расчеты, выполненные с использованием кода базы знаний NRV [9], показывают, что поскольку ${}^8\text{Be}$, ${}^5\text{He}$ и ${}^5\text{Li}$ являются несвязанными ядерными системами с малым временем жизни и распадаются на ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$, ${}^4\text{He} + n$ и ${}^4\text{He} + p$ соответственно, то их энергетические распределения должны начинаться со значений, указанных на рис. 2 пунктирными стрелками, и иметь максимумы, соответствующие энергиям возбуждения только составной системы, чего не наблюдается. Таким образом, представленные на рис. 2 гистограммы подтверждают вывод о двухтельном механизме реакции. Положения пиков, отмеченные сплошными стрелками на гистограммах, соответствуют образованию двух продуктов в выходном канале в их основных состояниях. В частности, для случая канала реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Be}_{\text{g.s.}}){}^5\text{He}$ регистрация ${}^7\text{Be}$ с энергией около 25 МэВ соответствует наблюдению ${}^5\text{He}$ в основном состоянии в двухтельном выходном канале. Наблюданная в эксперименте ширина основного состояния в ядре ${}^5\text{He}_{\text{g.s.}}$ (рис. 2, б) составляет около 0,7 МэВ, что хорошо согласуется с известными данными [10]. Аналогичные выводы можно сделать для каналов ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^4\text{He}){}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Li}){}^5\text{Li}$, в спектрах которых наблюдаются узкое $\Gamma < 100$ эВ (рис. 2, а) и достаточно широкое $\Gamma = 1,2$ МэВ (рис. 2, в) основные состояния, соответствующие ${}^8\text{Be}$ и ${}^5\text{Li}$.

Итак, можно сделать вывод, что ${}^5\text{He}$ наблюдается в своем основном состоянии как продукт, комплементарный детектируемому изотопу ${}^7\text{Be}$. С точки зрения механизма реакции ядро ${}^5\text{He}$ может образовываться либо при передаче двух нейтронов от ядра ${}^9\text{Be}$ к налетающему снаряду ${}^3\text{He}$, либо как остаток от передачи α -частицы из ядра мишени, которое может быть представлено в виде кластера ${}^9\text{Be} = {}^5\text{He} + \alpha$.

Упругое и неупругое рассеяние, реакции передач. Дифференциальные сечения в зависимости от угла для различных каналов реакции представлены на рис. 3.

Отметим, что канал реакции ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + {}^4\text{He}$, приводящий к образованию ${}^8\text{Be}$ в основном и возбужденных состояниях, имеет максимальное сечение. Этот канал соответствует передаче одного нейтрона от мишени к налетающему иону ${}^3\text{He}$ с максимальным значением $Q = +19$ МэВ. Большое значение величины Q повышает вероятность заселения высоколежащих уровней ${}^8\text{Be}$ ($E^* \sim 16$ МэВ).

Вторым по величине сечения является канал ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Be} + {}^5\text{He}$ ($Q = -0,7$ МэВ), а минимальное значение сечения реакции наблюдается для канала

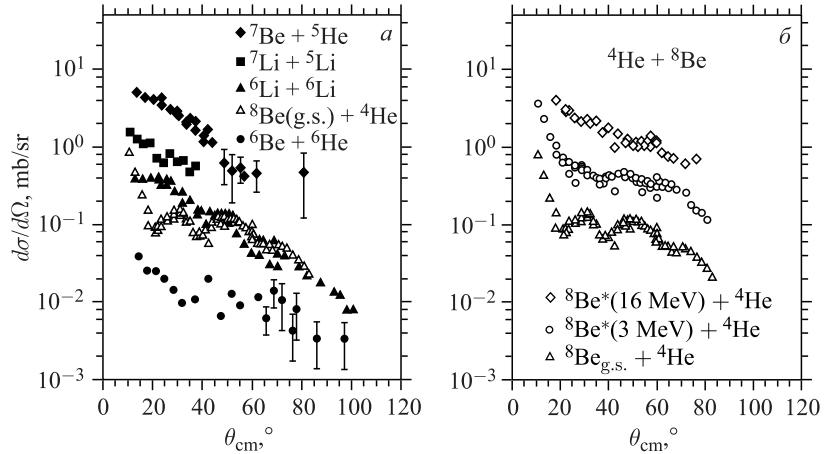


Рис. 3. Дифференциальные угловые распределения для каналов реакции *a)* ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Be} + {}^5\text{He}$, ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}_{\text{g.s.}} + {}^5\text{Li}$, ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li}_{\text{g.s.}} + {}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$, ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{He}_{\text{g.s.}} + {}^6\text{Be}$; *б)* ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}_{\text{g.s.}} + {}^4\text{He}$, ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}^*$ (3 МэВ) + ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}$ ($E^* = 16$ МэВ) + ${}^4\text{He}$

${}^6\text{He} + {}^6\text{Be}$ с крайне неблагоприятными условиями по балансу энергии ($Q = -9,7$ МэВ).

Для описания измеренных угловых распределений использована оптическая модель и метод искаженных волн (DWBA). Анализ в рамках оптической модели данных по упругому рассеянию позволил определить оптические потенциалы взаимодействия как во входном, так и в выходном каналах. Сравнение рассчитанного в рамках оптической модели сечения упругого рассеяния и экспериментальных данных показано на рис. 4.

Параметры найденного оптического потенциала представлены в табл. 1 в сравнении с аналогичными параметрами, полученными в работе [11] при исследовании реакции ${}^3\text{He}$ (60 МэВ) + ${}^9\text{Be}$. Видно, что параметры глубины реальной V_0 и мнимой W_0 частей уменьшаются с ростом энергии налетающих ионов как для упругого рассеяния, так и для других каналов реакций.

В дальнейшем с использованием полученных параметров для упругого рассеяния проведены расчеты угловых распределений выходных каналов: $\alpha + {}^8\text{Be}$ (рис. 5, *а*), ${}^5\text{He} + {}^7\text{Be}$ (рис. 5, *б*) и ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$ (рис. 5, *в*) с использованием кодов оптической модели, метода связанных каналов, а также метода сильной связи каналов реакции FRESCO, доступных на сайте базы знаний NRV [9]. Расчеты канала с образованием ${}^6\text{He}$ не проводились из-за маленькой статистики. На основе полученного хорошего согласия экспериментальных данных и теоретических расчетов можно сделать вывод, что для канала $\alpha + {}^8\text{Be}$ (рис. 5, *а*) доминирующим каналом является передача одного ней-

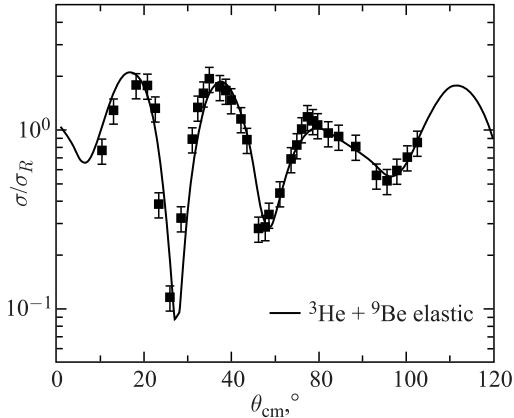


Рис. 4. Угловая зависимость отношения измеренного сечения упругого рассеяния к сечению Резерфорда для реакции ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$

Таблица 1. Параметры оптической модели ОМ и метода связанных каналов СС, полученные при описании экспериментальных дифференциальных угловых распределений в реакции ${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$, в сравнении с параметрами работы [11]

Канал реакции	r_c , фм	V_0 , МэВ	r_v , фм	a_v , фм	W_0 , МэВ	r_w , фм	a_w , фм	V_{so} , МэВ	r_{so} , фм	a_{so} , фм
${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$	1,3	108,5	1,123	0,54	15,69	1,15	0,855	13,63	1,83	0,4
${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$ [11]	1,3	143,4	1,02	1,10	38,3	1,405	1,17			
$\alpha + {}^8\text{Be}$		90,98	1,382	0,404	12,36	1,01	0,4			
$\alpha + {}^8\text{Be}$ [11]		143,4	1,024	1,35	38,3	2,539	1,67			
${}^5\text{He} + {}^7\text{Be}$		60,88	1,25	0,65	2,8	1,25	0,65	8,93	1,28	0,65
${}^5\text{He} + {}^7\text{Be}$ [11]		122,5	0,9768	0,61	51,71	0,914	1,178			
${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$		110,95	1,307	0,621	2,48	1,25	0,65	1,05	1,25	0,65
${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$ [11]		122,5	0,979	0,905	51,71	0,914	1,178			

трона, а для канала ${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$ (рис. 5, *в*) — передача t от мишени к налетающему снаряду.

Случай канала реакции, приводящего к образованию ${}^5\text{He} + {}^7\text{Be}$ (рис. 5, *б*), анализировался в предположении о двух возможных механизмах передачи: передачи α -частицы и двух нейтронов. В силу кинематических особенностей передача α -частицы происходит преимущественно под передними углами в системе центра масс, а передача нейтронов — под задними углами. Сечение в области малых углов рассеяния находится в хорошем согласии с теоретическими расчетами, выполненными в предположении одноступенчат-

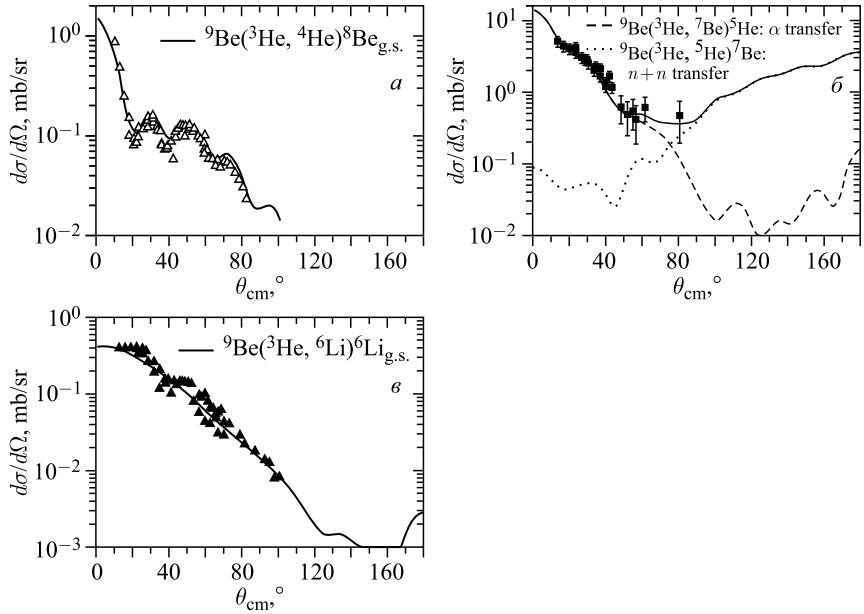
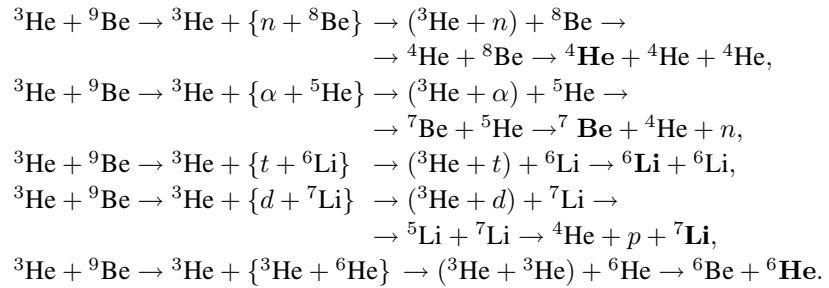


Рис. 5. Дифференциальные угловые распределения для каналов реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^4\text{He}){}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ (а), ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Be}){}^5\text{He}$ (б) и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^6\text{Li}){}^6\text{Li}_{\text{g.s.}}$ (в). Результаты анализа на основе ОМ и СС представлены в виде кривых

того механизма передачи ${}^5\text{He}$ -кластера, подтверждающего наличие $({}^5\text{He} + \alpha)$ -составляющей в структуре ядра мишени ${}^9\text{Be}$.

Несмотря на то, что данных под задними углами рассеяния недостаточно, проведенный анализ позволяет утверждать, что вклад передачи двух нейтронов также должен быть значительным. Для того чтобы можно было сделать более определенные выводы, требуется проведение дополнительных измерений в более широком угловом диапазоне.

Рассмотрим несколько каналов реакции, сопровождаемых передачей различных кластеров от мишени к ядру снаряда:



Каждый из этих каналов реакции может реализоваться, главным образом, если в исходном ядре ${}^9\text{Be}$ присутствует соответствующая конфигурация, указанная в фигурных скобках выше. Оценим вероятность указанных конфигураций, анализируя величины дифференциальных сечений, приведенных на рис. 3, полученных измерением угловых распределений продуктов реакции ${}^{4,6}\text{He}$, ${}^7\text{Be}$ и ${}^{6,7}\text{Li}$.

Для получения качественных оценок вероятностей различных конфигураций внутри ${}^9\text{Be}$ были проинтегрированы измеренные угловые распределения, представленные на рис. 3. В результате получены значения вероятностей, которые в большой мере соответствуют кластерным конфигурациям (табл. 2).

Таблица 2. Приведенная вероятность кластерной конфигурации ядра ${}^9\text{Be}$

Выходной канал	Соответствующая кластерная конфигурация	Значение вероятности, %
${}^4\text{He} + {}^8\text{Be}$	$n + {}^8\text{Be}$	$68,7 \pm 10$
${}^5\text{He} + {}^7\text{Be}$	$\alpha + {}^5\text{He}$	$25,1 \pm 5$
${}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}_{\text{g.s.}}$	$t + {}^6\text{Li}$	$3,3 \pm 2$
${}^5\text{Li} + {}^7\text{Li}_{\text{g.s.}}$	$d + {}^7\text{Li}$	$2,7 \pm 2$
${}^6\text{Be} + {}^6\text{He}_{\text{g.s.}}$	${}^3\text{He} + {}^6\text{He}$	$0,2 \pm 0,7$

Итак, из анализа дифференциальных угловых распределений каналов реакции, соответствующих возможным кластерным конфигурациям ($n + {}^8\text{Be}$) и ($\alpha + {}^5\text{He}$), получены значения вероятностей 69 и 25 % соответственно. Другие возможные конфигурации в ядре ${}^9\text{Be}$, например ${}^3\text{He} + {}^6\text{He}$, имеют значительно меньшую вероятность (менее 3 %).

Таким образом, можно сделать вывод, что соотношение вероятностей кластерных конфигураций ($n + {}^8\text{Be}$) и (${}^5\text{He} + \alpha$) внутри ${}^9\text{Be}$ составляет $\sim 2,8 : 1$, т. е. в ядре ${}^9\text{Be}$ валентный нейtron в трех случаях вращается вокруг кластера ${}^8\text{Be}$ и только в одном случае принадлежит кластеру ${}^5\text{He}$ внутри ${}^9\text{Be}$. Понятно, что сама по себе величина сечения канала не объясняется только вероятностью той или иной конфигурации в ядре. Нами получены оценочные данные о преобладающей роли кластера ${}^8\text{Be}$ и большой роли кластера ${}^5\text{He}$. Учесть статистические особенности, связанные со спинами участвующих ядер, энергетический баланс и т. д. в данном методе оценки не представляется возможным.

Для ответа на вопрос, возможно ли наблюдать передачу ${}^5\text{He}$ как кластера (если кластерная структура (${}^5\text{He} + \alpha$) существует, несмотря на «рыхлость» системы ${}^5\text{He}$), проведен эксперимент по исследованию канала $d + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$.

РЕАКЦИЯ $d(19,5 \text{ МэВ}) + {}^9\text{Be}$. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Дифференциальные сечения упругого рассеяния и неупругого возбуждения первого ротационного состояния в ${}^9\text{Be}$ представлены на рис. 6 вместе с результатами расчетов.

Расчет выполнен в рамках метода сильной связи каналов (СС) в адиабатической ротационной модели. Как и ранее, предполагается, что состояние 2,43 МэВ является первым возбужденным состоянием в ротационной полосе ${}^9\text{Be}$. Найденный из проведенного анализа данных параметр квадрупольной деформации ядра мишени равен $\beta_2 = 0,64$, что хорошо согласуется с выполненным ранее анализом реакции неупругого рассеяния ядер ${}^4\text{He}$ на той же мишени [3]. Параметры оптического потенциала, использованного для расчетов, показанных на рис. 6, представлены в табл. 3.

Для описания подхвата использован метод DWBA. Оптические потенциалы для входного и выходного каналов данной реакции подбирались на основе анализа данных по упругому рассеянию. Параметры представлены в табл. 3. Соответствующая кривая показана на рис. 7.

Кроме упругого и неупругого рассеяния также измерялись угловые распределения канала подхвата ${}^9\text{Be}(d, t){}^8\text{Be}$ (рис. 7).

Для выходного канала $t + {}^8\text{Be}$ доступных экспериментальных данных по упругому рассеянию нет, поскольку ${}^8\text{Be}$ нестабильное ядро. Поэтому использованы параметры потенциала для близкой системы, рекомендованные в работе [12]. Параметры этого потенциала дополнительно варьировались с целью описания полученных в работе данных, представленных в табл. 3.

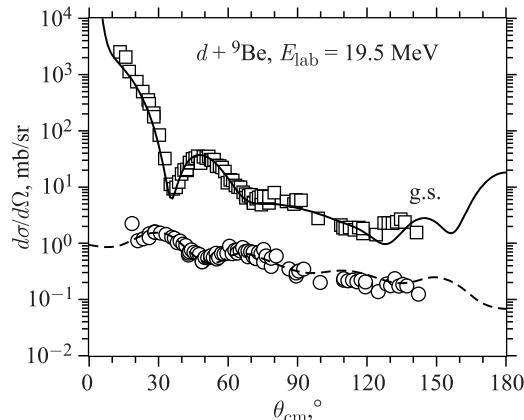


Рис. 6. Упругое (□) и неупругое (○) рассеяние в реакции $d(19,5 \text{ МэВ}) + {}^9\text{Be}$. Результаты расчета, выполненного в рамках метода сильной связи каналов в адиабатической ротационной модели, представлены сплошной линией

Таблица 3. Параметры оптической модели ОМ и метода связанных каналов СС, полученные при описании экспериментальных дифференциальных угловых распределений в реакции $d + {}^9\text{Be}$, в сравнении с параметрами работы [8]

Канал реакции	r_c , фм	V_0 , МэВ	r_v , фм	a_v , фм	W_0 , МэВ	r_w , фм	a_w , фм	V_{so} , МэВ	r_{so} , фм	a_{so} , фм
$d + {}^9\text{Be}$	1,25	121,2	1,654	0,56	15,5	1,445	0,5			
$d + {}^9\text{Be}$ [8]	1,3	150,	0,864	1,1	12,79	2,19	0,334			
$t + {}^8\text{Be}$	1,4	124,7	0,95	0,8	24,50	1,25	0,80	5,5	1,5	0,8
$t + {}^8\text{Be}$ [8]	1,07	141,2	1,156	0,758	16,4	1,535	0,99			
$p + {}^{10}\text{Be}$	1,05	57,3	1,01	0,62	7,5474	1,49	0,47			
$p + {}^{10}\text{Be}$ [8]	1,3	45,6	1,31	0,66				9,08	1,26	0,5
${}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$	1,3	151,1	1,73	0,57	10,44	1,73	0,57			
${}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ [8]	1,736	149,2	1,736	0,56				9,1	1,736	0,6

Кривая на рис. 7 демонстрирует хорошее согласие рассчитанного сечения и экспериментальных данных. Спектроскопические факторы, использованные при расчете сечения, были приняты равными $S(d + n) = 1,225$, $S({}^8\text{Be} + n) = 0,762$.

Канал срыва ${}^9\text{Be}(d, p){}^{10}\text{Be}$ также анализировался в рамках метода искаженных волн. Результаты представлены на рис. 8 для основного и первого возбужденного состояний ядра ${}^{10}\text{Be}$.

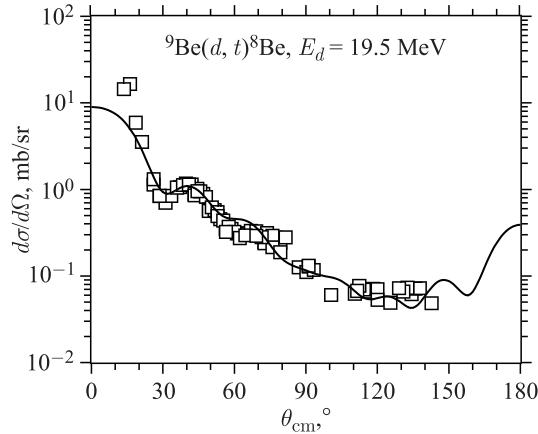


Рис. 7. Экспериментальное дифференциальное угловое распределение (□) канала реакции ${}^9\text{Be}(d, t){}^8\text{Be}$. Результаты расчета, выполненного в рамках метода DWBA, представлены сплошной линией

Во входном канале использован тот же самый оптический потенциал, что и для канала $t + {}^8\text{Be}$. Потенциалы выходного канала подобраны на основе параметров, использованных при описании данных по упругому рассеянию протонов на ${}^{10}\text{Be}$ при энергии 17 МэВ [13].

Как видно из рис. 8, расчеты значительно недооценивают экспериментальные дифференциальные сечения каналов передачи в основное и первое возбужденное состояния для больших углов. Одним из каналов, не учтенных при расчете в рамках метода DWBA, является канал испарения протонов из составного ядра. Расчеты угловых распределений для таких протонов были выполнены в рамках модели Хаузера–Фешбаха [14]. Соответствующие сечения представляют собой симметричные в системе центра масс распределения. Сплошные кривые на рис. 8 соответствуют сумме расчетов в рамках DWBA и в модели Хаузера–Фешбаха. Спектроскопические факторы первого и второго возбужденного состояний ${}^{10}\text{Be}$ составляют 1,58 и 0,46 соответственно, что хорошо согласуется с данными предыдущих исследований [15]. Отметим, что получить хорошее согласие между экспериментальными данными и результатами расчета в области больших углов не удается.

Особый интерес с точки зрения изучения кластерной передачи представляет канал реакции ${}^9\text{Be}(d, {}^4\text{He}){}^7\text{Li}$. Данный канал может реализовываться путем двух различных механизмов: через подхват дейтрона или передачу ${}^5\text{He}$ от мишени к снаряду. В выходном канале оба этих механизма реакции неотличимы друг от друга. В первом случае следует ожидать вылета ядер ${}^4\text{He}$ вперед в системе центра масс, в то время как во втором случае α -частицы должны преимущественно вылетать под задними углами в системе центра масс.

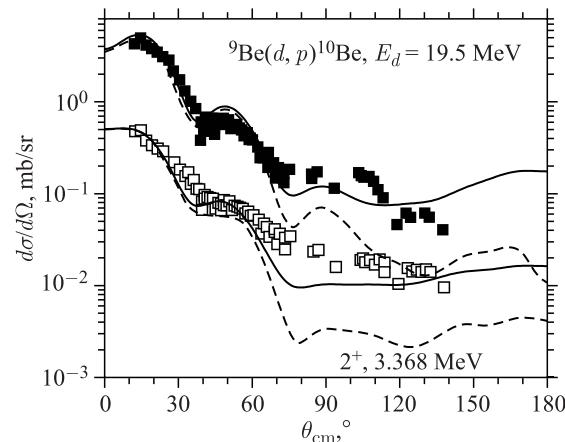


Рис. 8. Экспериментальное дифференциальное угловое распределение для канала ${}^9\text{Be}(d, p){}^{10}\text{Be}$ для основного (■) и первого возбужденного (□) состояний. Результаты расчета, выполненного в рамках метода DWBA, представлены сплошными линиями

Расчеты, выполненные в рамках метода DWBA для этих двух механизмов, представлены на рис. 9 совместно с экспериментальными данными. Сплошная кривая соответствует сечению передачи кластера ${}^5\text{He}$, пунктирная — передаче d .

Их когерентная сумма показана толстой кривой, которая хорошо согласуется с экспериментальными точками. Необходимо отметить, что для корректного описания амплитуды данных приходится выбирать достаточно большие

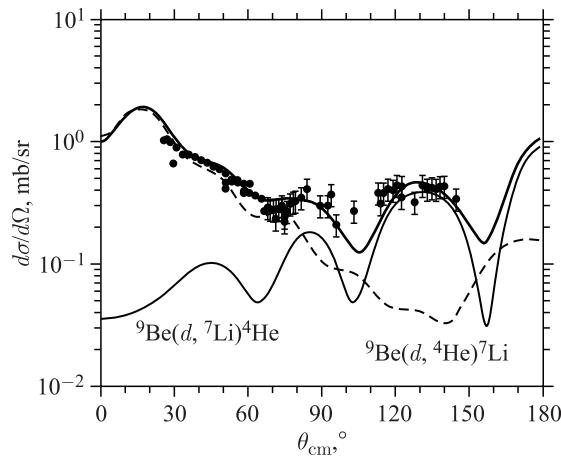


Рис. 9. Экспериментальное дифференциальное угловое распределение (●) для канала ${}^9\text{Be}(d, {}^4\text{He}){}^7\text{Li}$. Результаты расчета, выполненного в рамках метода DWBA, представлены сплошной линией для передачи кластера ${}^5\text{He}$ и пунктирной линией для передачи d

Таблица 4. Параметры связанных состояний, использованные при расчетах

Система	n	l_{tr}	s_{tr}	j_{tr}	E_b , МэВ	S
${}^7\text{Li} = d + {}^5\text{He}$	2	0	3/2	3/2	9,615	1,50
${}^7\text{Li} = d + {}^5\text{He}$	1	2	3/2	3/2	9,615	0,50
${}^9\text{Be} = \alpha + {}^5\text{He}$	6	0	3/2	3/2	2,463	1,0
${}^4\text{He} = d + d$	1	0	1	1	23,847	1,25
${}^9\text{Be} = {}^7\text{Li} + d$	2	2	1	1	16,694	1,0
$d = p + n$	1	0	1/2	1/2	2,224	1,4
${}^{10}\text{Be} = {}^9\text{Be} + n$ (g.s.)	1	1	1/2	3/2	6,812	1,58
${}^{10}\text{Be} = {}^9\text{Be} + n$ (3,37, 2+)	1	1	1/2	1/2	3,444	0,46
${}^3\text{H} = d + n$	1	0	1/2	1/2	6,257	1,23
${}^9\text{Be} = {}^8\text{Be} + n$	1	1	1/2	3/2	1,665	0,762

значения спектрскопических факторов для систем ${}^9\text{Be} = \alpha + {}^5\text{He}$ ($S = 1,0$) и ${}^7\text{Li} = d + {}^5\text{He}$ ($S = 0,5$). Кроме того, для описания структуры угловых распределений необходимо предположить 30 %-ю примесь d -состояния в структуре ${}^7\text{Li}$. Большое значение спектрскопического фактора для системы ${}^9\text{Be} = \alpha + {}^5\text{He}$ подтверждает не только $(\alpha + {}^5\text{He})$ кластерную структуру ядра ${}^9\text{Be}$, но и передачу ${}^5\text{He}$ как кластера.

Все параметры связанных состояний, использованные при расчетах, приведены в табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования кластерной конфигурации ${}^9\text{Be}$ изучались каналы передачи нейтрона и α -частицы от ядра мишени ${}^9\text{Be}$ к налетающему иону ${}^3\text{He}$ при энергии 30 МэВ. На основе анализа энергетических распределений продуктов реакций было показано, что исследованные каналы отвечают двухтальному механизму реакции. Также были измерены угловые распределения продуктов в каналах ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^4\text{He}) {}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^7\text{Be}) {}^5\text{He}$. На основе анализа дифференциальных угловых распределений этих каналов реакции, главным образом, соответствующих кластерным конфигурациям $(n + {}^8\text{Be})$ и $(\alpha + {}^5\text{He})$, получены значения вероятностей 69 и 25 % соответственно [3]. Показано, что другие возможные кластерные конфигурации в ядре ${}^9\text{Be}$, например ${}^3\text{He} + {}^6\text{He}$, имеют значительно меньшую вероятность (менее 3 %).

Для ответа на вопрос, возможно ли наблюдать передачу кластера ${}^5\text{He}$, проведен эксперимент по исследованию канала $d + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$. При теоретическом описании экспериментальных дифференциальных сечений учтен механизм передачи дейтрона от ядра мишени к налетающему иону с последующим образованием ${}^4\text{He}$, а также механизм передачи кластера ${}^5\text{He}$ из ядра ${}^9\text{Be}$ к налетающему дейтрону с последующим образованием ${}^7\text{Li}$. Для корректного описания амплитуды данных потребовалось выбрать достаточно большие значения спектрскопических факторов для системы ${}^9\text{Be} = \alpha + {}^5\text{He}$ ($S = 1,0$), что подтверждает не только $(\alpha + {}^5\text{He})$ кластерную структуру ядра ${}^9\text{Be}$, но и передачу ${}^5\text{He}$ как кластера.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке грантами РФФИ (13-02-00533, 14-02-91053), административно-финансовой поддержке CANAM (IPN ASCR, Чехия) и мобильным грантом Академии наук Финляндии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brown T.A.D., Papka P., Fulton B.R. et al. // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 054605.
2. Papka P., Brown T.A.D., Fulton B.R., Watson D.L. et al. // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. P. 045803.
3. Lukyanov S.M., Denikin A.S., Voskoboinik E.I. et al. // J. Phys. G, Nucl. Part. Phys. 2014. V. 41. P. 035102.

4. *Grigorenko L. V., Zhukov M. V.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 015803.
5. *Buchmann L., Gete E., Chow J. C. et al.* // Phys. Rev. C. 2001. V. 63. P. 34303.
6. *Détraz C., Duhm H. H., Hafner H.* // Nucl. Phys. A. 1970. V. 147. P. 488.
7. *Détraz C., Pougheon F., Bernas M. et al.* // Nucl. Phys. A. 1974. V. 228. P. 39.
8. *Szczurek A., Bodek K., Krug J. et al.* // Z. Phys. A. 1989. V. 333. P. 271.
9. *Zagrebaev V., Denikin A., Alekseev A.* DWBA for Nucleon Transfer Reactions. (2009). Nuclear Reaction Video Project. <http://nrv.jinr.ru/nrv/webnrv/transfer/>; *Thompson I.* <http://www.fresco.org.uk/>, <http://www.ianthompson.org/surrey/>.
10. <http://www.tunl.duke.edu/nuldata/>.
11. *Rudchik A. T. et al.* // Nucl. Phys. A. 1986. V. 609. P. 147.
12. *Perey C. M., Perey F. G.* // At. Data Nucl. Data Tables. 1974. V. 13. P. 293.
13. *Werby M. F., Edwards S., Thompson W. J.* // Nucl. Phys. A. 1971. V. 169. P. 81.
14. *Hauser W., Feshbach H.* // Phys. Rev. C. 1952. V. 87. P. 366.
15. *Denikin A. S., Lukyanov S. M., Skobelev N. K. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 5. P. 703.

Получено 28 декабря 2016 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 01.03.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,31. Тираж 235 экз. Заказ № 59048.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/