

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-12-19>

УДК 539.17.01: 539.17.02

АНАЛИЗ РАССЕЙНИЯ α -ЧАСТИЦ И ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ

К. А. Талпакова^{1,2*}, Н. Буртебаев¹, Л. И. Галанина³, Маулен Насурлла^{1,4}, С. Б. Сакута⁵, С. К. Сахиев¹, Маржан Насурлла¹, Р. А. Ходжаев¹, Д. А. Исаев^{1,4}, А. Қ. Нұрпейсов^{1,4}, С. А. Турганова^{1,4}

¹ РГП «Институт ядерной физики» Агентства РК по атомной энергии, Алматы, Казахстан

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Институт ядерной физики им. Скобелева, Москва, Россия

⁴ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁵ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

* E-mail для контактов: tkk_777@mail.ru

Проведен анализ по оптической модели ядра существующих экспериментальных данных упругого рассеяния α -частиц и ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$ в широкой области энергий (18–100 МэВ). Найдены оптимальные параметры оптических потенциалов. С этими потенциалами методом связанных каналов проанализированы измеренные угловые распределения упругого и неупругого рассеяния при энергиях α -частиц 45 и 50 МэВ и ${}^3\text{He}$ с энергиями 50 и 60 МэВ с возбуждением коллективных состояний 2,429 МэВ ($5/2^-$) и 6,38 МэВ ($7/2^-$) ядра ${}^9\text{Be}$. Извлечены значения параметров квадрупольной деформации. Сделана оценка вклада в возбуждение ядра кластерной структуры и механизма обмена кластерами ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$.

Ключевые слова: ядро ${}^9\text{Be}$, α -частицы, ${}^3\text{He}$, оптическая модель, метод связанных каналов, квадрупольная деформация.

ВВЕДЕНИЕ

В легких ядрах, в отличие от более тяжелых, эффекты альфа-кластеризации выражены более ярко [1, 2]. Это находит отражение в аномальном рассеянии на большие углы именно на легких ядрах. Альфа-частица представляет собой очень прочное образование с энергией связи нуклона, значительно превышающей аналогичные значения соседних легких ядер. Первое возбужденное состояние альфа-частицы лежит при энергии около 20 МэВ. Особый интерес представляют ядра с основными состояниями вблизи порога развала, где кластеризация доминирует [1]. В первую очередь это касается изотопа ${}^9\text{Be}$. Указанное ядро обладает, так называемой «боромиевской» структурой (Borromean structure), характеризуемой как трех-частичной ($\alpha + \alpha + n$), так и двух-частичной (${}^8\text{Be} + n$ и $\alpha + {}^5\text{He}$) системами, состоящими как из стабильных (α , n), так и нестабильных (${}^8\text{Be}$, ${}^5\text{He}$) кластеров. Хотя ${}^8\text{Be}$, ${}^5\text{He}$ нестабильны, они участвуют в формировании стабильной системы ${}^9\text{Be}$, которая распадается при удалении любого входящего в ее состав кластера (α , n , ${}^8\text{Be}$, ${}^5\text{He}$) [3–6].

Современное состояние кластеризации легких ядер в рамках микроскопической теории дано в работе [2]. В последние годы достигнут большой прогресс в понимании явления кластеризации в ${}^9\text{Be}$ и многих других ядрах. Кластерная структура ядра ${}^9\text{Be}$ изучалась в ряде работ в рамках различных подходов [7–10].

В экспериментах трех-частичная структура ${}^9\text{Be}$ ($\alpha + \alpha + n$) проявляет себя в реакциях развала и в бинарных реакциях с адронами при энергиях налетающих

частиц порядка 100 МэВ/нуклон. В этом случае для анализа часто используется модель Глаубера [11].

Двух-частичная кластерная структура ${}^9\text{Be}$ (${}^8\text{Be} + n$ и $\alpha + {}^5\text{He}$) исследуется в различных реакциях при энергиях около 10 МэВ/нуклон. В таких реакциях ядро вносится относительно малый импульс, и в этом случае результат существенно зависит от структуры участвующих в реакции ядер.

Существует другой аспект, касающийся свойств ядра бериллия, помимо его кластерной структуры. Согласно оболочечной модели ${}^9\text{Be}$, находящийся в середине p -оболочки, обладает очень большой деформацией [12], характеризуемой ядерным квадрупольным моментом $Q = +52,88$ мбн [13]. Вследствие чего низлежащие состояния ${}^9\text{Be}$ имеют выраженную коллективную природу и распределены по двум ротационным полосам, начинающимся с основного ($3/2^-$) и первого возбужденного ($E_x = 1,684$ МэВ, $1/2^+$) состояний. Первая полоса включает уровни 2,429 МэВ ($5/2^-$) и 6,38 МэВ ($7/2^-$), а вторая – 3,05 МэВ ($5/2^+$), 4,70 МэВ ($3/2^+$) и 6,76 МэВ ($9/2^+$). Соответствующие переходы изучались в неупругом рассеянии. Однако анализ экспериментальных угловых распределений главным образом проводился в рамках метода искаженных волн. Но при большой деформации ${}^9\text{Be}$ и, как следствие, при сильных квадрупольных переходах в неупругом рассеянии частиц на этом ядре, необходим учет связи каналов упругого и неупругого рассеяния. Поэтому в этом случае анализ методом связанных каналов является наиболее адекватным.

Целью настоящей работы является детальный анализ существующих экспериментальных данных

**АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ α -ЧАСТИЦ И ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ
В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ**

по упругому и неупругому рассеянию α -частиц и ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$ в рамках оптической модели и метода связанных каналов (МСК). При этом использовались оптические потенциалы, найденные из анализа упругого рассеяния α -частиц и ${}^3\text{He}$ в широкой области энергий. Экспериментальные сечения рассеяния α -частиц были взяты из работ, выполненных при энергиях налетающих частиц 18,4 МэВ [14], 29 и 45 МэВ [15], 50,5 МэВ [16] и 104 МэВ [17]. Сечения рассеяния ${}^3\text{He}$ взяты из работ, выполненных при энергиях 30 и 40 МэВ [18] и 50 и 60 МэВ [19]. Отметим, что МСК был ранее использован для анализа данных по рассеянию ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$ при энергиях 30, 40 и 47 МэВ [18].

**АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО УПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ,
ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ**

Выбор оптимальных параметров оптических потенциалов из данных по упругому рассеянию в широкой области энергий налетающих частиц очень важен для анализа неупругого рассеяния и реакций на ${}^9\text{Be}$.

На первом этапе упругое рассеяние анализировалось по оптической модели (ОМ) ядра. В расчетах использовался феноменологический потенциал Вудса-Саксона с объемным поглощением в форме:

$$U(r) = -V_0 f(r, R_V, a_V) - iW_V f(r, R_W, a_W) + V_C(r), \quad (1)$$

где V_0 и W_V – глубины реальной и мнимой частей ядерного потенциала, $f(r, R_i, a_i) = (1 + e^{x_i})^{-1}$ – Вудс-Саксоновские формфакторы с $x_i = (r - R_i)A^{1/3}/a_i$ и геометрическими параметрами радиуса $R_i = r_i A^{1/3}$ и диффузности a_i ($i = V, W$). $V_C(r)$ – кулоновский потенциал равномерно заряженной сферы с радиусом $R_C = r_C A^{1/3}$ при $r_C = 1,28$ Фм.

Дифференциальные поперечные сечения (ДПС) вычислялись по программе FRESKO [20]. Для исследования зависимости реальной части потенциала от энергии налетающей частицы и для исключения дискретной неоднозначности в определении глубины реальной части (V_0) потенциала использовались экспериментальные данные по упругому рассеянию α -частиц, измеренные в интервале энергии 18–104 МэВ [14–17]. В экспериментальных угловых распределениях упругого рассеяния при низких энергиях (18–50 МэВ), измеренных в полном угловом диапазоне, наблюдался значительный подъем сечений под большими углами, связанный, скорее всего, с механизмом обмена кластером. С целью исключения его вклада в сечение упругого потенциального рассеяния подгонка теоретических сечений по ОМ к экспериментальным данным осуществлялась только для передней полусферы, где механизм потенциального рассеяния доминирует. В начальном этапе подбор оптимальных параметров потенциалов взаимодействия по ОМ осуществлялся вариацией глубин реальной и мнимой частей потенциала (1) с использованием фиксированных значений радиусов: $r_V = 1,245$ Фм и $r_W = 1,57$ Фм, использованных в работе [21]. На вто-

ром этапе были зафиксированы значения диффузности: $a_V = 0,791$ Фм и $a_W = 0,91$ Фм, найденные из подгонки данных при энергии 104 МэВ. В результате для каждой энергии были получены три набора ОП – A , B и C , средний, мелкий и глубокий потенциалы, соответственно (таблица 1). Расчетные дифференциальные поперечные сечения при энергиях 18–104 МэВ сопоставляются с экспериментальными данными на рисунке 1.

Таблица 1. Параметры оптических потенциалов и объемных интегралов (J_V, J_W) для системы « $\alpha + {}^9\text{Be}$ »

| E_α , МэВ | Набор | V_0 , МэВ | a_V , Фм | W_V , МэВ | a_W , Фм | J_V , МэВФм ³ | J_W , МэВФм ³ |
|------------------|-------|-------------|------------|-------------|------------|----------------------------|----------------------------|
| 18,4 | A | 104,5 | 0,791 | 6,55 | 0,910 | 406,99 | 46,98 |
| | B | 50,0 | 0,791 | 6,55 | 0,910 | 194,73 | 46,98 |
| | C | 130,0 | 0,791 | 6,55 | 0,910 | 506,30 | 46,98 |
| 29 | A | 90,7 | 0,791 | 15,19 | 0,910 | 353,24 | 108,95 |
| | B | 70,0 | 0,791 | 15,19 | 0,910 | 272,62 | 108,95 |
| | C | 160,0 | 0,791 | 15,19 | 0,910 | 623,14 | 108,95 |
| 45 | A | 96,0 | 0,791 | 18,00 | 0,910 | 373,89 | 129,11 |
| | B | 70,0 | 0,791 | 18,00 | 0,910 | 272,62 | 129,11 |
| | C | 160,0 | 0,791 | 18,00 | 0,910 | 623,14 | 129,11 |
| 50,5 | A | 96,02 | 0,791 | 18,35 | 0,910 | 373,96 | 131,62 |
| | B | 70,0 | 0,791 | 18,35 | 0,910 | 272,62 | 131,62 |
| | C | 160,0 | 0,791 | 18,35 | 0,910 | 623,14 | 131,62 |
| 104 | A | 102,8 | 0,791 | 21,40 | 0,910 | 400,37 | 153,49 |
| | B | 70,0 | 0,791 | 21,40 | 0,910 | 272,62 | 153,49 |
| | C | 240 | 0,791 | 21,40 | 0,910 | 934,71 | 153,49 |

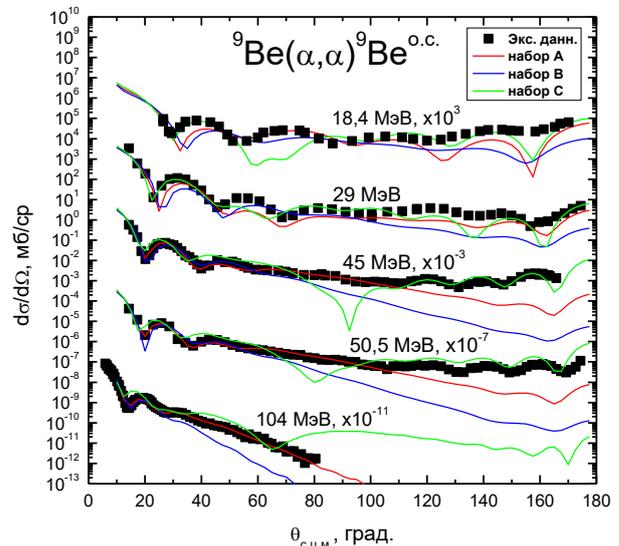


Рисунок 1. Угловые распределения дифференциальных сечений α -частиц, рассеянных на ядрах ${}^9\text{Be}$ при энергиях 18,4, 29, 45, 50,5 и 104 МэВ (красные кривые рассчитаны с набором А, синие – В, зеленые – С). Экспериментальные сечения взяты из работ [14–17]

Значения объемных интегралов реальной части потенциала J_V из таблицы 1 свидетельствуют о наличии трех дискретных семейств (A, B, C) при значениях J_V в районе 200, 400 и 600 МэВФм³. Использование

**АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ α -ЧАСТИЦ И ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ
В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ**

набора ОП (B) с малой глубиной для описания ДПС приводит к сильному уменьшению сечений с увеличением угла рассеяния. В случае же применения для расчетов глубокого потенциала (набор C) наблюдается обратная картина, особенно для энергии 104 МэВ свыше 70 градусов происходит резкое возрастание расчетных сечений. Наилучшие согласия теоретических расчетных ДПС с экспериментальными данными для передней полусферы достигнуто с использованием ОП со средней глубиной (A). Отметим, что расчеты по ОП фактически не могут воспроизвести подъем сечения под большими углами.

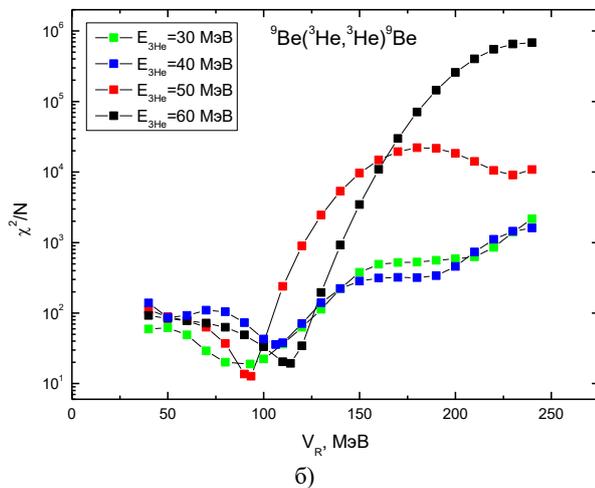
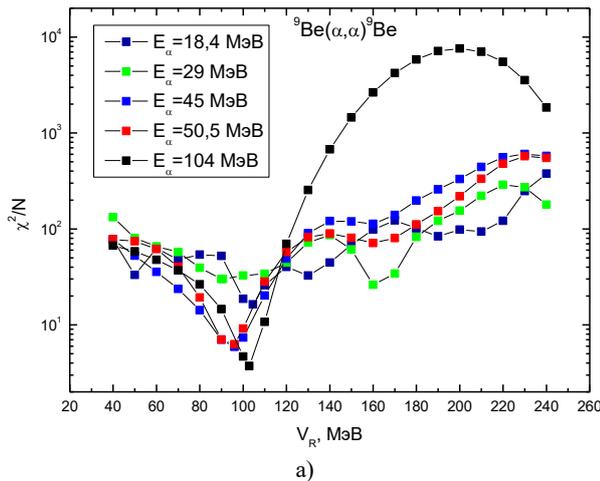


Рисунок 2. Зависимость χ^2 от глубины действительной части потенциала (V_0) для α -частиц (а) и ${}^3\text{He}$ (б)

Для изучения динамики дискретной неоднозначности от энергии при определении глубины действительной части потенциала были фиксированы радиусы и диффузности действительной и мнимой частей оптимальных потенциалов, а также глубина мнимого потенциала A для всех энергий. С этими параметрами, для набора A , были вычислены значения χ^2 для действительной части оптического потенциала в диапазоне глубин от 40 МэВ до 240 МэВ с шагом 10 МэВ при пяти значениях энергии. Установленная

таким образом зависимость χ^2 от глубины действительной части потенциала для каждой энергии падающих частиц показана на рисунке 2а. Видно, что при низких энергиях в значениях χ^2 наблюдается несколько минимумов. С увеличением энергии налетающих частиц число минимумов уменьшается, что позволило устранить дискретную неоднозначность и уменьшить число наборов оптических потенциалов до одного оптимального.

Аналогичное исследование было выполнено и для упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядре ${}^9\text{Be}$. Для анализа были привлечены данные при энергиях 30 и 40 МэВ [18], 50 и 60 МэВ [19]. В качестве стартовых ОП мы использовали значения, полученные в работе [19]. Как и в случае рассеяния α -частиц в значениях χ^2 для системы ${}^3\text{He}+{}^9\text{Be}$ наблюдаются несколько слабо выраженных минимумов при низких энергиях, а при энергии 60 МэВ имеется лишь один выраженный минимум χ^2 (см. рисунок 2б), что также позволило устранить дискретную неоднозначность и уменьшить число оптических потенциалов до одного оптимального.

Отметим, что в найденных по оптической модели параметрах потенциала неявно заложена компенсация неучтенной структуры ядра-мишени, особенно в мнимой части потенциала. Поэтому с переходом от ОП к более адекватным методам описания экспериментальных данных найденные параметры ОП могут меняться.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО УПРУГОМУ И НЕУПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ α -ЧАСТИЦ И ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$ МЕТОДОМ СВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ

Поскольку ядро ${}^9\text{Be}$, как уже отмечалось выше, обладает ярко выраженной квадрупольной деформацией, а его нижние состояния являются членами ротационных полос с $K = 3/2$ и $K = 1/2$, наиболее адекватным методом анализа рассеяния является метод связанных каналов. В этом случае, принимая во внимание только квадрупольную деформацию, стандартное выражение для ядерного радиуса оптического потенциала в формуле (1) имеет вид: $r_i(\theta) = r_i[1 + \beta_2 Y_{20}(\theta, \varphi)]$, что приводит к соответствующей деформации оптического потенциала.

В наших расчетах мы пренебрегали смешиванием полос основного состояния ($K = 3/2$) и полосы, начинающейся с уровня 1,684 МэВ ($1/2^+$). Это оправдано, поскольку сечения переходов на уровни полосы $K = 1/2$ малы.

Для анализа использовались ранее полученные экспериментальные данные по рассеянию α -частиц при энергии 50,5 МэВ и ${}^3\text{He}$ при энергиях 60 МэВ [22]. При энергии 45 МэВ данные для неупругого рассеяния были извлечены из дополнительный обработки энергетических спектров рассеянных α -частиц, измеренных в работе [15]. При энергии $E_{3\text{He}} = 50$ МэВ данные для неупругого рассеяния также были извлечены из дополнительной обработки

АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ α -ЧАСТИЦ И ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ

энергетических спектров рассеянных ионов ${}^3\text{He}$, измеренных ранее в работе [19].

Использованные в расчетах методом связанных каналов оптические потенциалы приведены в таблице 2. Они отличаются от потенциалов таблицы 1 только уменьшенной глубиной мнимых потенциалов (W_V). Это делалось для улучшения согласия расчетных сечений с экспериментом при включении связи каналов.

Таблица 2. Параметры ОП, использованных в расчетах упругого и неупругого рассеяния методом связанных каналов

| Частица | E , МэВ | V_0 , МэВ | r_V , ФМ | a_V , ФМ | W_V , МэВ | r_W , ФМ | a_W , ФМ |
|-----------------|-----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| α | 45 | 96,0 | 1,245 | 0,791 | 12,35 | 1,57 | 0,91 |
| | 50,5 | 96,02 | 1,245 | 0,791 | 15,35 | 1,57 | 0,91 |
| ${}^3\text{He}$ | 50,0 | 93,4 | 1,15 | 0,72 | 11,9 | 1,50 | 0,80 |
| | 60,0 | 114,0 | 1,15 | 0,87 | 13,7 | 1,59 | 0,80 |

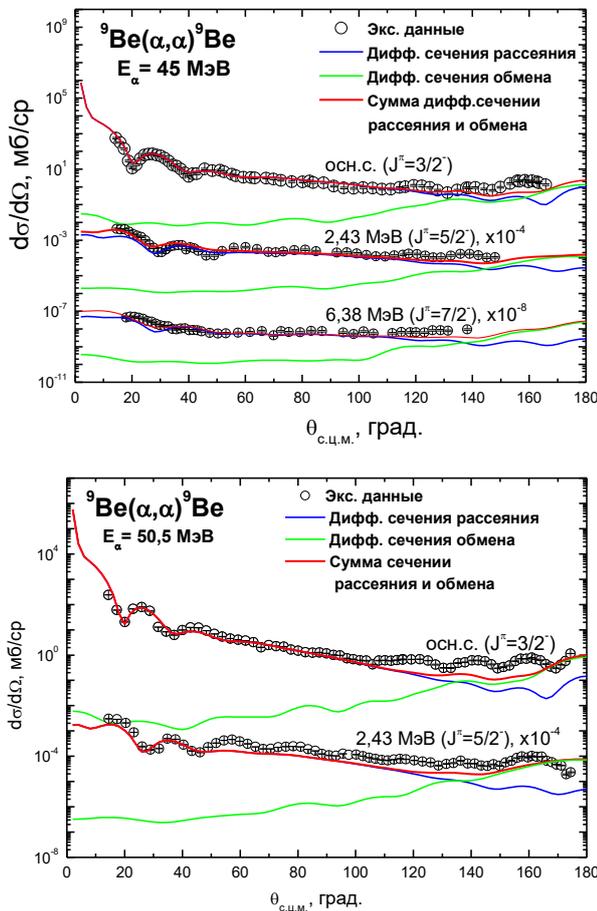


Рисунок 3. Дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния α -частиц на ядре ${}^9\text{Be}$

Из нормировки расчетных сечений на экспериментальные данные неупругого рассеяния в области углов передней полусферы были получены усредненные значения длин деформации $\delta_2(5/2^-) = 1,11$ Фм и $\delta_2(7/2^-) = 0,52$ Фм. Эти значения соответствуют па-

раметрам деформации $\beta_2 = 0,44 \pm 0,1$ и $\beta_2 = 0,21 \pm 0,1$ для состояний 2,43 МэВ ($5/2^-$) и 6,38 МэВ ($7/2^-$) при соответствующих радиусах реального потенциала. Ошибки связаны как с неоднозначным выбором параметров потенциала, так и области нормировки теоретических сечений. Сопоставление расчетных и экспериментальных сечений рассеяния α -частиц и ${}^3\text{He}$ показано на рисунках 3 и 4 синими кривыми.

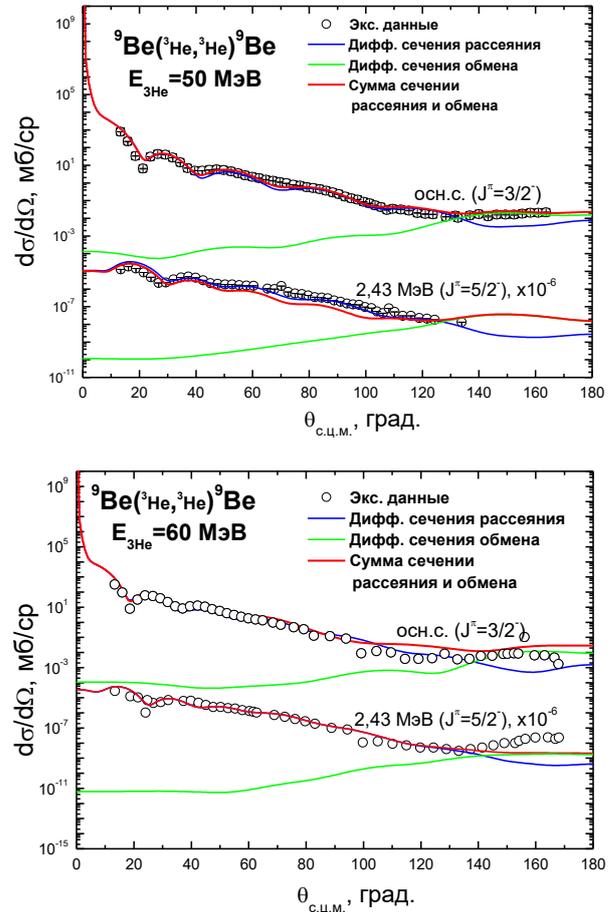


Рисунок 4. Дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния ${}^3\text{He}$ на ядре ${}^9\text{Be}$

В работах [23–25] в рамках МСК из анализа экспериментальных данных по неупругому рассеянию α -частиц для основного состояния ${}^9\text{Be}$ были извлечены значения параметра деформации β_2 в пределах 0,64–0,89. В работе [26] при анализе неупругого рассеяния ${}^3\text{He}$ с энергией 30 МэВ на ядре ${}^9\text{Be}$ с возбуждением уровня 2,43 МэВ ($5/2^-$) была получена длина деформации $\delta_2 = 1,97$ Фм. Наши результаты по длине деформации (δ_2) и параметру квадрупольной деформации (β_2) существенно меньше. Расхождения, скорее всего, связаны с неоднозначным выбором параметров ОП.

Как видно из рисунков 3 и 4, расчеты по методу связанных каналов (синие кривые) дают хорошее описание экспериментальных сечений по рассеянию α -частиц и ${}^3\text{He}$ при энергиях налетающих частиц в

АНАЛИЗ РАССЕЙЯНИЯ α -ЧАСТИЦ И ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА СВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ

области углов передней полусферы. Однако на больших углах (более 120°) теоретические сечения ниже экспериментальных значений. Это указывает на необходимость учета других механизмов помимо потенциального рассеяния.

Кластерная структура ядра ${}^9\text{Be}$ может приводить к модификации заселения возбужденных состояний. Анализ показал, что влияние механизма кластерного возбуждения невелико, и поэтому этот механизм не учитывался в окончательных расчетах. Рост сечений под большими углами можно связать с вкладом обменных процессов с передачей кластеров ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$ в рассеянии α -частиц и ${}^3\text{He}$, соответственно. Роль механизма обмена кластерами в рассеянии и реакция обсуждается в работах [27–29].

Диаграммы этих процессов показаны на рисунке 5.

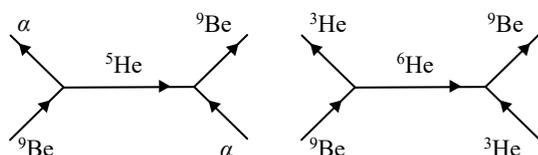


Рисунок 5. Диаграммы механизмов обмена кластеров ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$ в рассеянии α -частиц и ${}^3\text{He}$ на ядре ${}^9\text{Be}$

В программе FRESKO спектроскопическая амплитуда задается для каждого орбитального момента относительного движения между валентной и составной частицей и полного момента j , уносимого валентной частицей. Необходимые для расчетов вклада обменного процесса спектроскопические амплитуды рассчитаны в рамках трансляционно-инвариантной модели оболочек [30, 31] и представлены в таблице 3.

Таблица 3. Спектроскопические амплитуды (СА) кластеров ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$ в ядре ${}^9\text{Be}$

| | I | J | СА |
|--|-----|-----|--------|
| ${}^9\text{Be}(3/2^-) \rightarrow \alpha + {}^5\text{He}$ | 0 | 3/2 | 0,74 |
| | 2 | 3/2 | -0,78 |
| ${}^9\text{Be}(5/2^-) \rightarrow \alpha + {}^5\text{He}$ | 2 | 5/2 | 0,81 |
| | 4 | 5/2 | 0,33 |
| ${}^9\text{Be}(7/2^-) \rightarrow \alpha + {}^5\text{He}$ | 2 | 7/2 | 0,32 |
| | 4 | 7/2 | 0,34 |
| ${}^9\text{Be}(3/2^-) \rightarrow {}^3\text{He} + {}^6\text{He}$ | 1 | 1 | -0,46 |
| | 1 | 2 | -0,276 |
| | 3 | 2 | -0,092 |
| ${}^9\text{Be}(5/2^-) \rightarrow {}^3\text{He} + {}^6\text{He}$ | 3 | 2 | 0,29 |
| | 3 | 3 | -0,055 |

Надо отметить, что расчеты сечений для обменного механизма осложняются тем, что тяжелые кластеры ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$ могут передаваться не только в основном, но и в возбужденном состояниях, спектроскопические амплитуды которых известны с недостаточной точностью. Это приводит к неопределенностям в расчетах. Поэтому для грубой оценки мы рассматри-

вали процесс передачи кластеров ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$ только в основных состояниях.

На рисунках 3 и 4 дифференциальные сечения, отвечающие обменному механизму передачи кластеров, показаны зелеными кривыми. Красные кривые представляют собой дифференциальные сечения рассеяния α -частиц и ${}^3\text{He}$ с учетом вклада обменного механизма передачи. Из рисунков видно, что сечения, вычисленные в рамках МСК для обеих налетающих частиц (α и ${}^3\text{He}$) и для всех энергий, достаточно хорошо согласуются с экспериментом. Учет механизма обмена кластерами увеличивает сечения рассеяния на углах более 130° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках оптической модели проанализированы существующие экспериментальные данные по упругому рассеянию α -частиц и ${}^3\text{He}$ в широкой области энергий налетающих частиц от 18 до 100 МэВ. Найдены оптимальные параметры оптических потенциалов.

С найденными потенциалами с использованием программы FRESKO методом связанных каналов проведен анализ упругого и неупругого рассеяния α -частиц при энергиях 45 МэВ и 50,5 МэВ, а также ${}^3\text{He}$ при энергиях 50 МэВ и 60 МэВ с возбуждением состояний 2,43 МэВ ($5/2^-$) и 6,38 МэВ ($7/2^-$). Извлечены значения параметров квадрупольной деформации $\beta_2 = 0,44$ и $\beta_2 = 0,21$ для состояний 2,43 МэВ ($5/2^-$) и 6,38 МэВ ($7/2^-$), соответственно. Оценен вклад в рассеяние обменного механизма с передачей кластеров ${}^5\text{He}$ и ${}^6\text{He}$ в рамках метода искаженных волн с конечным радиусом взаимодействия, включенного в программу FRESKO. Соответствующие спектроскопические амплитуды вычислены в рамках трансляционно-инвариантной модели оболочек.

Учет механизма обмена кластерами позволил описать экспериментальные угловые распределения упругого и неупругого рассеяния в полном угловом диапазоне. Вклад обменного механизма увеличивает сечения рассеяния на больших углах.

Сопоставление экспериментальных и расчетной угловой зависимости измеренных сечений подтвердили необходимость использования при анализе наряду с коллективной моделью ядра ${}^9\text{Be}$ 2-х частичные структуры ${}^9\text{Be} \rightarrow \alpha + {}^5\text{He}$ и ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^6\text{He}$, которые проявляют себя в обменном механизме реакции.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке программы № BR23891530 (Развитие комплексных научных исследований в области ядерной и радиационной физики на базе ускорительных комплексов Казахстана) Министерства энергетики Республики Казахстан и выполнена в рамках государственного задания Института ядерной физики им. Скобельцына, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Von Oertzen W., Freer M., Kanada-En'yo Y. Nuclear clusters and nuclear molecules // *Physics Reports* – 2006. – Vol. 432 – P. 43.
2. Freer M., Horiuchi H., Kanada-En'yo Y., Lee D., Meibner Ulf-G. Microscopic clustering in light nuclei // *Reviews of Modern Physics*. – 2018. – Vol. 90. – P. 035004. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.035004>
3. Brown T.A.D., Papka P., Fulton B.R., Watson D.L., Fox S.P., Groombridge D., Freer M., Clarke N.M., Ashwood N.I., Curtis N., Ziman V., McEwan P., Ahmed S., Catford W.N., Mahboub D., Timis C.N., Baldwin T.D., Weisser D.C. Decay studies for states in ${}^9\text{Be}$ up to 11 MeV: Insights into the $n+{}^8\text{Be}$ and $\alpha+{}^5\text{He}$ cluster // *Phys. Rev.* – 2007. – Vol. 76. – P.054605.
4. Papka P., Brown T.A.D., Fulton B.R., Watson D.L., Fox S.P., Groombridge D., Freer M., Clarke N.M., Ashwood N.I., Curtis N., Ziman V., McEwan P., Ahmed S., Catford W.N., Mahboub D., Timis C.N., Baldwin T.D., Weisser D.C. Decay path measurements for the 2.429 MeV state in ${}^9\text{Be}$: Implications for the astrophysical $\alpha + \alpha + n$ reaction // *Phys. Rev.* – 2007. – Vol. 75. – P. 045803.
5. Burda O., Neumann-Cosell P., Richter A., Forsen C., Brown B. A. Resonance parameters of the first $1/2^+$ state in ${}^9\text{Be}$ and astrophysical implications // *Phys. Rev.* – 2010. – Vol. 82. – P. 015808.
6. Konobeevski E.S., Afonin A.A., Zuyev S.V., Kasparov A.A., Mitcuk V.V., Mordovskoy M.V., Lebedev V.M. and Spassky A.V. Probing the cluster structure of a light nucleus with d ${}^9\text{Be}$ scattering // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*. – 2019. – Vol.83. – P. 433.
7. Huang B.S., Ma Y.G. Dipole excitation of ${}^6\text{Li}$ and ${}^9\text{Be}$ studied with an extended quantum molecular dynamics model // *Phys.Rev.* – 2021. – Vol. 103. – P. 054318. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.103.054318>
8. Starastin V., Demyanova A.S., Danilov A.N. Determination of the radii of states in the 11–14 MeV excitation region in the ${}^9\text{Be}$ nucleus // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2023. – Vol. 86(4). – P. 445–449. <https://doi.org/10.1134/S10637788230403369>
9. Voronchev V.T., Kukulkin V.I., Pomerantsev V.N., Razikov Kh.D., Ryzhikh G.G. Analysis of the structure and properties of nuclei with $A = 9$ (${}^9\text{Be}$ - ${}^9\text{B}$) in the dynamic multicluster $2\alpha + N$ model // *Phys. Atomic Nuclei*. –1994. – Vol. 57. – P. 1890.
10. Voronchev V.T., Kukulkin V.I., Pomerantsev V.N. et al. Three-body calculations of $A=9$ nuclei with supersymmetric α - α potentials. // *Few-Body Systems*. –1995. – Vol. 18. – P. 191.
11. Ибраева Е.Т., Жусупов М.А., Зайкин А.Ю., Сагиндыков Ш.Ш. Трех-частичная структура изобар с $A = 9$: Be , Li , C , и упругое рассеяние протонов // *Ядерная физика*, – 2009. – Т. 72. – С. 1777. [Ibraeva E.T., Zhusupov M.A., Zaykin A.Yu., Sagindykov Sh.Sh. Trekh-chastichnaya struktura izobar s $A = 9$: Be , Li , C , i uprugoe rasseyaniye protonov // *Yadernaya fizika*, –2009. – Vol. 72. – P. 1777. (In Russ.)]
12. Bohr A., Mottelson B.R. *Nuclear Structure* / New York – 1974. –Vol. II.
13. Tilley D.R., Kelley J.H., Godwin J.L., Millener D.J., Purcell J., Sheu C.G. and Weller H.R. Energy Levels of Light Nuclei $A = 9$ // *Nucl. Phys. A*. – 2004. – Vol. 745. – P. 155.
14. Taylor R.B., Fletcher N.R., Davis R.H. Elastic scattering of 4-20 MeV alpha Particles by ${}^9\text{Be}$ // *Nucl.Phys.* – 1965. – Vol. 65. – P. 318.
15. Буртебаев Н. Исследование механизма упруго рассеяния α -частиц на ядре ${}^9\text{Be}$ // *ВАНТ, Физика ядерных реакторов*. – 2002. – № 1. –С. 137–142. [Burtebayev N. Issledovanie mekhanizma uprugogo rasseyaniya α -chastits na yadre ${}^9\text{Be}$ // *VANT, Fizika yadernykh reaktorov*. –2002. – No. 1. – P. 137–142. (In Russ.)]
16. Дуйсебаев А. и др. Аномальное рассеяние 50 МэВ α -частиц на ядрах ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$ // *Изв. АН Каз. ССР. Сер. физ.-мат.* – 1978. – № 4. – С.13. [Duysebaev A. i dr. Anomalnoe rasseyaniye 50 MeV α -chastits na yadrah ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$ // *Izv. AN Kaz. SSR. Ser. fiz.-mat.* –1978. – No. 4. – P.13. (In Russ.)]
17. Hauser G., Lohken R., Rebel H. et.al. Elastic scattering of 104 MeV alpha particles // *Nucl. Phys. A*. – 1968. – Vol. 128. – P. 81.
18. Jansetov D.M., Lukyanov S.M., Mendibayev K. et al. Investigation of the elastic and inelastic scattering of ${}^3\text{He}$ from ${}^9\text{Be}$ in the energy range 30-60 MeV // *International Journal of Modern Physics E*. – 2018. – Vol. 10 – P. 1850089. <https://doi.org/10.1142/S0218301318500891>
19. Адодин В.В., Дуйсебаев А.Д., Буртебаев Н. Радужные эффекты в процессах рассеяния и реакции (${}^3\text{He}, \alpha$) на ядрах ${}^9\text{Be}$, ${}^{12,13}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$ при энергиях ионов ${}^3\text{He}$ 50 и 60 МэВ // *Ядерная физика*. –1992. – № 3. – С. 577. [Adodin V.V., Duysebaev A.D., Burtebayev N. Raduzhnye efekty v protsessakh rasseyaniya i reaktcii (${}^3\text{He}, \alpha$) na yadrakh ${}^9\text{Be}$, ${}^{12,13}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$ pri energiyakh ionov ${}^3\text{He}$ 50 i 60 MeV // *Yadernaya fizika*. –1992. – No. 3. – P. 577. (In Russ.)]
20. Thompson I.J / FRESCO, Department of Physics, University of Surrey, July 2006, GuildfordGU27XH, England. version FRESCO 2.0. URL: <http://www.fresco.org.uk/>
21. Nolte M., Machner H., Wojowald J. Global optical potential for α -particles with energies above 80 MeV // *Phys. Rev. C* – 1987. – Vol. 36. – P. 1312.
22. Буртебаев Н., Бактыбаев М.К., Дуйсебаев Б.А., Сахийев С.К., Керимкулов Ж.К., Мукашев К.М., Исабекова Г.С. Анализ рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ и α -частиц на ядрах ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ и ${}^{11}\text{B}$ при энергиях 10–20 МэВ/нуклон // *Вестник КазНПУ им. Абая*. – 2007. – № 1. – С. 49–56. [Burtebayev N., Baktybaev M.K., Duysebaev B.A., Sakhiev S.K., Kerimkulov Zh K., Mukashev K.M., Isabekova G.S. Analiz rasseyaniya ionov ${}^3\text{He}$ i α -chastits na yadrakh ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ i ${}^{11}\text{B}$ pri energiyakh 10-20 MeV/nuklon // *Vestnik KazNPU im. Abaya*. –2007. – No. 1. – P. 49–56. (In Russ.)]
23. Roy S., Chatterjee J. M. and Majumdar H. Coupled channel folding model description of a scattering from Be // *Phys. Rev. C*. – 1995. – Vol. 52. – P. 1524.
24. Lukyanov S.M., Denikin A.S., Voskoboynik E.I. Study of internal structures of ${}^9,{}^{10}\text{Be}$ and ${}^{10}\text{B}$ in scattering of ${}^4\text{He}$ from ${}^9\text{Be}$ // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* – 2014. – Vol. 41. – P. 035102. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/41/3/035102>
25. Harakeh M.N., van Popta J., Saha A. and Siemssen R.H. Strong coupled-channels effects in the ${}^9\text{Be}(\alpha, t){}^{10}\text{B}$ reaction // *Nucl. Phys. A*. – 1980. – Vol. 15. – P. 344.
26. Urazbekov B.A., Issayev T., Lukyanov S.M., Azhibekov A., Denikin A.S., Mendibayev K., Jansetov D.M.,

- Penionzhkevich Yu.E., Kuterbekov K.A., Zholdybayev T.K. Reaction induced by 30 MeV beam on ${}^9\text{Be}$: cluster transfer reactions // Chinese Physics. – 2024. – Vol. 48. – P. 014001.
27. Теплов И.Б., Зеленская Н.С., Лебедев В.М., Спасский А.В. Обратные максимумы сечений в ядерных реакциях и обменные процессы // ЭЧАЯ. – 1977. – Т. 8. – С. 769. [Teplov I.B., Zelenskaya N.S., Lebedev V.M., Spasskiy A.V. Obratnye maksimumy secheniy v yadernykh reaktsiyakh i obmennye protsessy // EChAYa. – 1977. – Vol. 8. – P. 769. (In Russ.)]
28. Гриднев К.А., Оглоблин А.А. Аномальное рассеяние назад и квази-молекулярная структура ядер // ЭЧАЯ. – 1975. – Т. 6. – С. 393. [Gridnev K.A., Ogloblin A.A. Anomal'noe rasseyaniye nazad i kvazi-molekulyarnaya struktura yader // EChAYa. – 1975. – Vol. 6. – P. 393. (In Russ.)]
29. Madansky L., Oven G.E. Heavy particle stripping // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 91. – P. 99. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.99.1608>
30. Балашов В.В., Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф., Юдин Н.П. Приведенные ширины для нуклонных ассоциаций в модели оболочек // ЖЭТФ. – 1959. – Т. 37. – С. 1385. [Balashov V.V., Neudachin V.G., Smirnov Yu.F., Yudin N.P. Privedennyye shiriny dlya nuklonnykh assotsiatsiy v modeli obolochek // ZhETF. – 1959. – Vol. 37. – P. 1385. (In Russ.)]
31. Немец О.Ф., Неудачин В.Г., Рудчик А.Т., Смирнов Ю.Ф., Чувильский Ю.М. Нуклонные ассоциации в атомных ядрах и ядерные реакций многонуклонных передач / Киев. «Наукова Думка». – 1988. [Nemets O.F., Neudachin V.G., Rudchik A.T., Smirnov Yu.F., Tchuvil'skiy Yu.M. Nuklonnye assotsiatsiy v atomnykh yadrakh i yadernye reaktsiy mnogonuklonnykh peredach / Kiev. "Naukova Dumka". – 1988. (In Russ.)]

${}^9\text{Be}$ ЯДРОЛАРЫНДА α -БӨЛШЕКТЕР ЖӘНЕ ${}^3\text{He}$ ШАШЫРАУЫН ОПТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬ ЖӘНЕ БАЙЛАНЫСҚАН АРНАЛАР ӘДІСІ ШЕҢБЕРІНДЕ ЭНЕРГИЯНЫҢ КЕҢ АЙМАҒЫНДА ТАЛДАУ

К. А. Талпакова^{1,2,*}, Н. Буртебаев¹, Л. И. Галанина³, Маулен Насурлла^{1,4}, С. Б. Сакута⁵, С. Қ. Сахнев¹, Маржан Насурлла¹, Р. А. Ходжаев¹, Д. А. Исаев^{1,4}, А. Қ. Нұрпейсов^{1,4}, С. А. Турганова^{1,4}

¹ ҚР Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің «Ядролық физика институты» РМҚ, Алматы, Қазақстан

² Л.Н. атындағы Еуразия ұлттық университеті, Гумилев, Астана, Қазақстан

³ М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті,

Скобелев атындағы Ядролық физика институты, Мәскеу, Ресей

⁴ Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

⁵ ҰЗО «Курчатов институты», Мәскеу, Ресей

* Байланыс үшін E-mail: tkk_777@mail.ru

${}^9\text{Be}$ ядроларында α -бөлшектер мен ${}^3\text{He}$ серпімді шашырауы бойынша эксперименттік деректерді оптикалық модель бойынша энергияның кең аймағында (18–100 МэВ) талдау жүргізілді. Оптикалық потенциалдардың онтайлы параметрлері табылды. Осы потенциалдарды қолданып, байланысқан арналар әдісімен ${}^9\text{Be}$ ядросының 2,429 МэВ ($5/2^-$) және 6,38 МэВ ($7/2^-$) қозған ұжымдық күйлерін α -бөлшектердің 45 және 50 МэВ және ${}^3\text{He}$ 50 және 60 МэВ энергияларындағы серпімді және серпімсіз шашыраудың бұрыштық үлестірімдері талданды. Квадрупольді деформация параметрлерінің мәндері алынды. ${}^5\text{He}$ және ${}^6\text{He}$ кластерлерімен алмасу механизмі және кластерлік құрылымның ядроның қозуына қосқан үлесі бағаланды.

Түйін сөздер: ${}^9\text{Be}$ ядросы, α -бөлшектер, ${}^3\text{He}$, оптикалық модель, байланысқан арналар әдісі, квадрупольді деформация.

ANALYSIS OF SCATTERING OF α -PARTICLES AND ${}^3\text{He}$ ON ${}^9\text{Be}$ NUCLEI
IN A WIDE RANGE OF ENERGIES WITHIN THE FRAMEWORK OF THE OPTICAL MODEL
AND THE COUPLED CHANNEL METHOD

K. A. Talpakova^{1,2*}, N. Burtabayev¹, L. I. Galanina³, Maulen Nassurlla^{1,4}, S. B. Sakuta⁵, S. K. Sakhiyev¹,
Marzhan Nassurlla¹, R. A. Khojayevev¹, D. A. Issayev^{1,4}, A. K. Nurpeisov^{1,4}, S. A. Turganova^{1,4}

¹ RSE “Institute of Nuclear Physics” of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan

² L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

³ Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

⁴ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

⁵ National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

* E-mail for contacts: tkk_777@mail.ru

The analysis of the existing experimental data on the elastic scattering of α -particles and ${}^3\text{He}$ on ${}^9\text{Be}$ nuclei in a wide energy range (18–100 MeV) is carried out using the optical model of the nucleus. Optimal parameters of optical potentials are found. With these potentials, the measured angular distributions of elastic and inelastic scattering at α -particle energies of 45 and 50 MeV and ${}^3\text{He}$ with energies of 50 and 60 MeV with excitation of collective states of 2.429 MeV ($5/2^-$) and 6.38 MeV ($7/2^-$) of the ${}^9\text{Be}$ nucleus were analyzed using the coupled channel method. The values of the quadrupole deformation parameters are extracted. The contribution of the cluster structure and the mechanism of cluster exchange ${}^5\text{He}$ and ${}^6\text{He}$ to the excitation of the nucleus is estimated.

Keywords: ${}^9\text{Be}$ nucleus, α -particles, ${}^3\text{He}$, optical model, coupled channel method, quadrupole deformation.