

УДК 539.1
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ${}^9\text{Be} + {}^{27}\text{Al}$ В РАМКАХ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ И
МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ.

Сабырбеков Нурали Нурланович

nurali.23kz@gmail.com

Магистрант ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель - Буртебаев Н.

Реакции со слабосвязанными нестабильными ядрами интенсивно изучались в последние два или более десятилетия в связи с появлением ускорителей нового поколения и развитием экспериментальной техники. Это привело к возрождению интереса к изучению реакций со слабосвязанными устойчивыми ядрами из-за сходства их структурных свойств. Ожидается, что изучение реакций поможет понять динамику реакций со слабосвязанными нестабильными ядрами. Таким образом, для нас стало возможным исследование слабосвязанных ядер, таких как ${}^9\text{Be}$. ${}^9\text{Be}$ - интересное ядро, которое можно описать как конфигурацию $\alpha + \alpha + n$ из трех тел; можно также рассматривать его как ядерную систему сконфигурацией из двух тел ${}^8\text{B} + n$ или ${}^5\text{He} + \alpha$. Он имеет самую низкую пороговую энергию нейтронов как $S_n = 1,6654$ МэВ. По этим причинам ядро ${}^9\text{Be}$ интенсивно изучается, и накоплено большое количество экспериментальных данных по взаимодействию с различными ядрами-мишенями.

В этих исследованиях взаимодействия были проанализированы с использованием различных подходов. Общей чертой этих исследований является выявление пороговой аномалии (ТА) или пороговой аномалии распада (ВТА). Исследования упругого рассеяния на сильно связанных ядрах от тяжелых мишеней обнаруживают ТА в зависимости оптического потенциала от энергии. Напротив, было обнаружено, что рассеяние слабосвязанных ядер

демонстрирует ВТА. Некоторые из них были даны следующим образом. Камачо и другие в своей работе [1] использовали энергетическую зависимость оптического потенциала для изучения ТА реакций со слабосвязанным ядром ${}^9\text{Be}$ на ${}^{144}\text{Sm}$ и ${}^{64}\text{Zn}$ для энергий вблизи кулоновского барьера. Зависящие от энергии параметры потенциала были получены из одновременного анализа методом хи-квадрат данных упругого рассеяния и слияния. Есть признаки того, что на самом деле для этих систем проявляется так называемый ВТА. Этот вывод согласуется с другими расчетами, включающими слабосвязанные ядра. В работе [2] была представлена попытка систематизировать имеющиеся в литературе результаты по полному и неполному синтезу слабосвязанного ядра ${}^9\text{Be}$ на мишенях с различной массой или зарядом (${}^{89}\text{Y}$, ${}^{24}\text{Sn}$, ${}^{144}\text{Sm}$, ${}^{208}\text{Pb}$). Они подчеркнули, что, хотя вероятность неполного синтеза и подавление полного синтеза являются очень тесно связанными величинами, первая является экспериментальной величиной, тогда как последняя зависит от модели. Достигнута тенденция систематического поведения вероятности неполного синтеза в зависимости от заряда мишени, но не подавления полного синтеза.

В работе [3] приближенным методом был получен поляризационный потенциал, связанный с брейк-ап связью в столкновениях ${}^9\text{Be} + {}^{144}\text{Sm}$ при околбарьерных энергиях. Этот метод особенно полезен при столкновениях слабосвязанных ядер, которые распадаются более чем на два осколка. Они обнаружили, что этот потенциал отталкивает на больших расстояниях вызывает дальнейшее поглощение. Используя этот потенциал, они оценили сечения распада и слияния. В случае термоядерного синтеза, для которого имеются данные, их результаты очень хорошо согласуются с экспериментом. Бенджамин и другие [4] измерили упругое рассеяние ядра радиоактивного гало ${}^6\text{He}$ на ${}^{27}\text{Al}$ при четырех энергиях вблизи кулоновского барьера на установке Radioactive Ion Beams in Brazil (RIBRAS). Был использован потенциал Сан-Паулу (SPP) [5, 6], а его диффузность и мнимая сила были скорректированы в соответствии с угловыми распределениями упругого рассеяния. Сечения реакции были извлечены из подгонки оптической модели. Приведенные сечения реакции ${}^6\text{He}$ на ${}^{27}\text{Al}$ аналогичны сечениям для стабильных и слабосвязанных ядер, таких как ${}^{6,7}\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, и больше, чем у стабильных и прочно связанных ядер, таких как ${}^{16}\text{O}$ на ${}^{27}\text{Al}$. При сравнении полных сечений реакций для ядер ${}^6\text{He}$, ${}^{6,7}\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{16}\text{O}$ на мишени из ${}^{64}\text{Zn}$. Гомес и другие [7] показали, что наибольшее сечение реакции имеет ${}^6\text{He}$ (ядро гало с пороговой энергией 0,975 МэВ), за ним следует группа из трех стабильных и слабосвязанных ядер и, наконец, сильно связанное ядро ${}^{16}\text{O}$ дает наименьшее полное сечение реакции. Анджос и соавторы в работе [8] измерили полные сечения синтеза для систем ${}^9\text{Be} + {}^{27}\text{Al}$ и ${}^{19}\text{F} + {}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$ при энергиях выше кулоновского барьера с целью исследования возможного влияния затруднения синтеза из-за распада слабосвязанного ядра. Сравнение с одномерными моделями проникновения через барьер и с другими подобными системами, в которых не ожидается разрыва, не показывает никаких признаков затруднения синтеза. Для слабосвязанного рассеяния ${}^9\text{Be}$ имеются противоречивые результаты. Для рассеяния на ${}^{64}\text{Zn}$ [9, 10] и ${}^{209}\text{Bi}$ [11, 12] ТА не наблюдается. Действительно, для рассеяния на ${}^{64}\text{Zn}$ мнимый потенциал возрастает при околбарьерных энергиях вместо обычного убывания, наблюдаемого при рассеянии сильно связанных ядер и того, что реальный потенциал примерно постоянен. Для мишени ${}^{209}\text{Bi}$ наблюдается аномальное поведение, так как действительная часть потенциала показывает тесно связанные ядра, тогда как мнимый потенциал увеличивается с уменьшением энергии по направлению к барьеру.

Воллискрофт и другие [13] утверждали, что абсолютное значение коэффициента перенормировки потенциала складывания очень чувствительно к точности используемых плотностей, несмотря на качественные результаты, для которых они не получают изменений для различных протестированных плотностей ${}^9\text{Be}$. Упругое рассеяние слабосвязанного ${}^9\text{Be}$ на ${}^{27}\text{Al}$ было измерено при околбарьерных энергиях Гомес [14]. Кулоновский барьер для этой системы составляет 8,05 МэВ в системе центра масс. Анализ данных оптической модели с реальной и мнимой частями глобального потенциала двойного сворачивания не показывает убедительных доказательств обычного ТА. Такие же результаты были получены при использовании оптического потенциала формы Вудса–Саксона при расчете сил потенциала при

большом радиусе поглощения. Причину такого поведения можно объяснить наличием каналов развала и передачи при низких энергиях. Марти и другие в работе [15] измерили полное сечение синтеза для системы ${}^9\text{Be} + {}^{27}\text{Al}$ при энергиях, близких и выше кулоновского барьера. Сечения реакции для этой системы были получены из данных упругого рассеяния, а сечения канала разрыва и переноса были оценены по разнице между этими данными и измеренным поперечным сечением слияния. Позже, в 2010 г. Камачо и другие в работе [16] спомощью оптических модельных расчетов провели одновременный анализ упругого рассеяния и слияния слабосвязанного ядра ${}^9\text{Be}$ с легкой деформированной мишенью ${}^{27}\text{Al}$ при энергиях, близких к кулоновскому барьеру. Их результаты были сравнены с результатами для того же ядра на мишени среднего размера и сферической формы из ${}^{144}\text{Sm}$, чтобы исследовать влияние кулоновского разрушения и деформации мишени на поведение упругого рассеяния. Также в данной работе определена энергетическая зависимость действительной и мнимой частей термоядерного потенциала и потенциала прямой реакции для системы ${}^9\text{Be} + {}^{27}\text{Al}$. Установлено, что на радиусе чувствительности действительная и мнимая части потенциалов подчиняются закону дисперсии.

Основной целью диссертационной работы является исследование новых параметров потенциала реакции ${}^9\text{Be} + {}^{27}\text{Al}$ с феноменологическим потенциалом и потенциалом двойного сворачивания в рамках расчетов по оптическим моделям. Кроме того, следует исследовать поведение полученного оптического потенциала при близких и больших энергиях по сравнению с кулоновским барьером.

Система ${}^9\text{Be} + {}^{27}\text{Al}$ исследуется при энергиях вблизи и выше кулоновского барьера. В теоретических расчетах использовалась оптическая модель. Полный эффективный потенциал состоит из кулоновского, центробежного и ядерного потенциалов следующим образом:

$$V_{total}(r) = V_{nuclear}(r) + V_{Coulomb}(r) + V_{centrifugal}(r). \quad (1)$$

В полном эффективном потенциале хорошо известны кулоновский и центробежный потенциалы. Кулоновский потенциал от заряда $Z_P e$, взаимодействующего с зарядом $Z_T e$, равномерно распределенным по сфере радиуса R_C , определяется выражением

$$V_C(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_P Z_T e^2}{r} \quad r \geq R_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_P Z_T e^2}{2R_C} \left(3 - \frac{r^2}{R_C^2}\right) \quad r < R_C \quad (2)$$

где R_C - кулоновский радиус и в расчетах принимается равным $R_C = 1.1(A_P^{\frac{1}{3}} + A_T^{\frac{1}{3}})\text{fm}$ для всех систем, Z_P и Z_T — заряды ядра P и T соответственно. Центробежный потенциал

$$V_{centrifugal}(r) = \frac{(l+1)lh^2}{2\mu r^2} \quad (3)$$

где μ - приведенная масса. Наконец, комплексный ядерный потенциал $V_{nuclear}(r)$ считается суммой реального квадратного потенциала Вудса-Саксона и мнимого потенциала Вудса-Саксона, заданного как

$$V_{nuclear}(r) = -\frac{V_0}{\left[1 + \exp\left(\frac{r-R_V}{a_V}\right)\right]^2} + \frac{-W_0}{\left[1 + \exp\left(\frac{r-R_W}{a_W}\right)\right]} \quad (4)$$

Где V_0 и W_0 - действительная и мнимая глубины, а радиус ядра равен $R_i = r_i \left(A_P^{\frac{1}{3}} + A_T^{\frac{1}{3}}\right)$ ($i = v$ или w , где A_P и A_T - массы ядер-снарядов и ядер-мишеней, r_v и r_w - параметры радиуса действительной и мнимой частей ядерных потенциалов, соответствующие).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A.G. Camacho, E.F. Aguilera, E.M. Quiroz, P.R. Gomes, J. Lubian Elastic scattering reactions: ${}^9\text{Be}+{}^{27}\text{Al}$ new results // Journal of the Korean Physical Society. 2015 Volume 66. P.748-753
2. P.R. Gomes Search for systematic behavior of incomplete-fusion probability and complete-fusion suppression induced by ${}^9\text{Be}$ on different targets // Physical Review Journal C. 2011 Volume 84. № 014615
3. V.N. Garcia, J. Lubian, P.R. Gomes, Gomes-Camacho and F. Canto ${}^9\text{Be}$ breakup polarization potential at near-barrier energies // Physical Review Journal. 2009 Chapter 80. №037602
4. E.A. Benjamim Elastic scattering and total reaction cross section for the ${}^6\text{He} + {}^{27}\text{Al}$ system // Physics Letters B. 2007 Volume 647. P. 30-35
5. L.C. Chamon, D. Pereira, M. Hussein, C. Ribeiro and D. Galetti Nonlocal Description of the Nucleus-Nucleus Interaction // Physics Review Letters.1997 Chapter79. №5218
6. L.C. Chamon Toward a global description of the nucleus-nucleus interaction // Physical Review Journal. 2002 Chapter 66. №014610
7. P.R. Gomes Fusion, reaction and break-up cross sections of weakly bound projectiles on ${}^{64}\text{Zn}$ // Physics Letters B. 2004 Volume 601. P. 20-26
8. R.M Anjos No evidence of break-up effects on the fusion of ${}^9\text{Be}$ with medium-light nuclei // Physics Letters B. 2002 Chapter 534. P. 45-51
9. S.B. Moraes Fusion and elastic scattering of ${}^9\text{Be}+{}^{64}\text{Zn}$: A search of the breakup influence on these processes // Physical Review Journal C. 2000 Volume 61. №064608
10. P.R. Gomes Heavy Ion Physics // 2000. P. 11-361
11. C. Signorini Interaction at the barrier in the systems ${}^9, {}^{10}, {}^{11}\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$: Well-established facts and open questions // European Physical Journal A. 2002 Volume 13. P. 129-133
12. C.Signorini The potential of the loosely bound ${}^9\text{Be}$ from ${}^{209}\text{Bi}$ elastic scattering: unusual behaviour at near threshold energy // Nuclear Physics A. 2002 Volume 701. P. 23-28R.J.
Woolliscroft Elastic scattering and fusion of ${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$: Density function dependence of the double folding renormalization // Physical Review Journal C. 2002 Volume 69. №044612.
13. P.R. Gomes Threshold anomaly with weakly bound projectiles: Elastic scattering of ${}^9\text{Be}+{}^{27}\text{Al}$ // Physical Review Journal C. 2004 Volume 70. №054605
14. G.V. Martı́ Fusion, reaction, and breakup cross sections of ${}^9\text{Be}$ on a light mass target // Physical Review Journal C. 2005 Volume 71. №027602