

Таблица 1. Данные ЭДА

Образец	Элементный состав, %				
	Fe	O	Gd	Si	C
Gd _x Fe _{3-x} O ₄	20.55	40.23	9.82	-	-
Gd _x Fe _{3-x} O ₄ -ТЭОС	4.35	47.20	2.02	36.34	6.53
Gd _x Fe _{3-x} O ₄ -ТЭОС-МСПМА	1.88	56.01	1.15	20.93	18.73

В настоящий момент продолжается работа по модификации гадолиниевых ферритов и иммобилизации на их поверхность карборановых производных. Следующими этапами в данной работе будет исследование полученных наночастиц на цитотоксичность и реакторные исследования.

Список использованных источников

1. IARC, 150 Cours Albert Thomas, 69372 Lyon CEDEX 08, France
2. Barth R. F., Grecula J. C. Boron neutron capture therapy at the crossroads-Where do we go from here? //Applied Radiation and Isotopes 2019, С. 109029
3. Salt C. et al. Boron and gadolinium neutron capture therapy //Russian chemical bulletin. 2004, Т. 53, №. 9, С. 1871-1888.
4. Sena N. C. et al. Gadolinium ferrite nanoparticles: synthesis and morphological, structural and magnetic properties //Ceramics International 2017, Т. 43, №. 5, С. 4042-4047.

УДК 53.3937

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ЯДЕР ЛИТИЯ($a=6-11$) ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ: УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ И ПОЛНОЕ СЕЧЕНИЕ РЕАКЦИИ.

Елтай Жазира Алтайкызы

Zhazira.eltai@bk.ru

Магистрант 1-курса ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель – Кутербеков К.А.

В обзоре представлены последние экспериментальные данные по суммарным реакционным сечениям и угловым распределениям дифференциальных сечений для упругого рассеяния легких слабосвязанных ядер лития ($^{6,9,11}\text{Li}$). Представлены результаты их совместного анализа с использованием широкого спектра моделей: от простых моделей сильного поглощения до современных теоретических подходов.

Экспериментальные исследования с пучками радиоактивных ядер позволили обнаружить новые интересные явления, связанные со свойствами ядер, расположенных далеко от области β -стабильности. Для некоторых легких ядер, богатых нейтронами, энергия E_n разделения валентного нейтрона (или нейтронов) чрезвычайно мала. По сравнению со стабильными ядрами, для которых она составляет около (6-8) МэВ, в этих ядрах энергия разделения одного или нескольких нейтронов составляет менее 1 МэВ. Распределение плотности нейтронов в таких слабо связанных ядрах имеет длинную часть, называемую нейтронным ореолом. Гало появляется в виде " хвоста " при распределении ядерной материи на расстоянии (5-10), где плотность составляет примерно 1/100 от ее плотности в ядре.

Увеличение радиуса по сравнению со стандартным приращением, определяемым зависимостью ($A^{1/3}$), является первым признаком наличия гало в экзотических ядрах. Было обнаружено существование двух типов гало. Первый тип (GNH-1) связан с общим увеличением размера ядра (в случае ядер ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be и ^{17}B). Второй тип гало (GNH-2)

наблюдается для ядер с нормальными размерами (например, ${}^6\text{He}$ и ${}^{17}\text{He}$). Предполагается, что гало первого типа обусловлено очень низкой энергией связи валентных нейтронов, тогда как гало второго типа является результатом очень компактного (α -частица) ядра валентных нейтронов.

Низкая энергия связи нейтрона (или группы нейтронов) в ядрах гало ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$ и Ближний характер ядерных сил приводят к туннелированию нейтронов во внешнюю периферийную область на больших расстояниях от ядра. В этом случае плотность распределения периферийных нейтронов значительно меньше плотности распределения нейтронов внутри ядра. Нейтронное облако, окружающее ядро, распространяется на большие расстояния, чем радиус ядра, определяемый соотношением $R = 1.3A^{1/3}$.

Рассмотрим наиболее типичные каналы реакций с легкими слабосвязанными ядрами.

1) слабо связанное ядро может быть упруго или неэластично рассеяно на ядрах-мишенях.

2) слабо связанное ядро может полностью взаимодействовать с целевым ядром, и произойдет полное слияние.

3) слабосвязанное ядро в поле ядра-мишени может распасться, и в этом случае возможны несколько вариантов развития событий.

Суммарные поперечные сечения реакций для легких слабосвязанных (кластерных и экзотических) ядер.

Одной из важнейших характеристик взаимодействий легких экзотических ядер со стабильными ядрами-мишенями является сечение взаимодействия σ_I или полное сечение реакции σ_R . Танихата начал экспериментальное изучение легких экзотических ядер с измерения σ_I . В его работе впервые были измерены значения σ_I для ${}^{3,4,6,8}\text{He}$ ядер, взаимодействующих с ядрами-мишенями Be, C и Al при энергии 790 МэВ/нуклон. В работах такие же измерения были проведены для изотопов ${}^{6,9,11}\text{Li}$, бериллия и бора. Для всех изотопных цепей легких слабосвязанных ядер наблюдалось значительное увеличение R_{rms} с увеличением массового числа, отклоняющегося от зависимости $A^{1/3}$. В изотопах лития этот рост наблюдается при переходе от ${}^6\text{Li}$ к ${}^9\text{Li}$ и, особенно, к ${}^{11}\text{Li}$. На основе анализа измеренных сечений взаимодействия в рамках эмпирического подхода и приближения Глаубера был сделан вывод о значительном расширении плотности нейтронов в богатых нейтронами изотопах этих ядер, что позволило авторам выдвинуть и обосновать гипотезу о возможном существовании в некоторых из них так называемого нейтронного гало.

Ядро ${}^9\text{Li}$ имеет энергию связи 4,064 МэВ по отношению к распаду (${}^8\text{Li}+n$) и имеет другое связанное состояние – первое возбужденное состояние при:

$$E = 2,69 \text{ МэВ } (1/2^-).$$

Ядро ${}^{11}\text{Li}$ может быть представлено в виде ядра ${}^9\text{Li}$ и двух нейтронов. Каждая из подсистем (${}^9\text{Li}$) и ($n+n$) слабо связана. В ядре ${}^{11}\text{Li}$ энергия разделения одного нейтрона (${}^{10}\text{Li}+n$) составляет 0,395 МэВ, энергия разделения двух нейтронов (${}^9\text{Li}+2n$) - 0,369 МэВ, и ядро не имеет возбужденных связанных состояний ниже этих энергий. Поэтому корреляции в двухчастичных подсистемах играют важную роль в ядре ${}^{11}\text{Li}$ – они повышают стабильность ядер, особенно при соединении двух гало-нейтронов. Взаимодействие между двумя валентными нейтронами может быть настолько сильным, что в ядре ${}^{11}\text{Li}$ они могут образовывать два сильно коррелированных нейтрона (динейтрона). Однако вопрос о существовании динейтрона все еще остается открытым. Поэтому изучение корреляций этих нейтронов и возможности эмиссии нейтронов из них не представляется возможным системы, состоящие, например, из двух нейтронов (динейтронов) или четырех нейтронов (тетранейтронов), являются важной экспериментальной проблемой. Такие эксперименты в настоящее время проводятся на пучках радиоактивных ядер.

Измерения σ_R для большой группы легких экзотических ядер при промежуточных энергиях были впервые проведены. В экспериментах использовались Кремниевая мишень и новый прямой метод измерения ТРК. Эксперименты проводились с пучком ${}^9\text{Li}$ при 31,5 МэВ/нуклон и пучком ${}^{11}\text{Li}$ при 25,5 МэВ / нуклон. Для анализа экспериментальных данных

авторы использовали модель сильного поглощения с параметризацией Кох. В целом результаты, полученные при промежуточных энергиях, подтвердили тенденции, наблюдаемые при анализе экспериментальных данных по σ_I при высоких энергиях. Для ${}^9\text{Li}$ было получено значение $r_0 = 1.168 \text{ fm}$, а для ${}^{11}\text{Li}$: $r_0 = 1.42 \text{ fm}$. Эти значения r_0 значительно больше стандартного значения $r_0 = 1,10 \text{ fm}$, используемого при описании взаимодействий стабильных ядер.

Импульсное распределение

Информацию о размерах и энергии связи слабосвязанных (кластерных и экзотических) ядер можно получить из МО-ментальных распределений продуктов (ядро-ядро и валентные нейтроны), образующихся при их распаде. Низкая энергия связи таких ядер приводит к небольшой ширине распределения импульса. В отличие от стабильных ядер, для которых величина распределения импульса составляет около 100 МэВ/с , для слабосвязанных ядер эта величина лежит в диапазоне $(25-45) \text{ МэВ/с}$. Таким образом, измеряя распределение импульса продуктов распада ядер, мы получаем информацию об их структуре. В соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга был сделан вывод, что малая ширина распределения указывает на то, что удаленные нейтроны *va-lence* имеют малую флуктуацию импульса, что можно объяснить длинным распределением плотности нейтронов в гало. Таким образом, большой радиус и узкое распределение импульса являются первыми признаками существования нейтронного ореола в ядрах вблизи границы устойчивости.

Распределения импульсов остаточных ядер после распада ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^9\text{Li}$ были изучены в фнлр, ОИЯИ. В эксперименте наблюдалось узкое распределение импульса ${}^4\text{He}$, $(28-29) \text{ МэВ/с}$, от распада ${}^6\text{He}$ на ядра AU и C при энергии 10 МэВ/нуклон . Поскольку представлялось интересным сравнить ядро ${}^6\text{He}$ с его изобарой ${}^6\text{Li}$, были изучены распределения импульсов фрагментов ${}^4\text{He}$, полученных при распаде ${}^6\text{Li}$ на ядрах ${}^{28}\text{Si}$ с энергией $18,2 \text{ МэВ/НУКЛОН}$, а также на ядрах ${}^9\text{Be}$ и 181Ta с энергией 46 МэВ/НУКЛОН .

${}^{6,7}\text{Li}$ ядер: Резкий непрерывный спектр α -частиц был обнаружен в первых экспериментах по измерению угловых дисперсий дифференциальных сечений упругого рассеяния ионов ${}^{6,7}\text{Li}$ на ядрах ${}^{13}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{19}\text{F}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{40}\text{Ca}$ при 20 МэВ на тандемном ускорителе. Это указывало на то, что канал распада для частицы снаряда для ${}^{6,7}\text{Li}$ изотопов Li играет важную роль, и это является следствием возможной кластерной структуры этих ядер.

Для стабильных ядер ${}^{6,7}\text{Li}$ имеются данные об угловом распределении дифференциальных сечений упругого рассеяния на ядрах в широком диапазоне масс ($a=1-238$) и энергий ($5-600 \text{ МэВ}$).

${}^9\text{Li}$ ядер: Измерили угловые распределения упругого рассеяния ионов ${}^7\text{Li}$ и ${}^9\text{Li}$ на ядрах Pb и Ag при энергиях 56 и 86 МэВ соответственно. Определены эффективные радиусы взаимодействия и выявлены специфические особенности областей прозрачности взаимодействия.

Сечения упругого рассеяния богатых нейтронами ядер ${}^9\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Li}$ на протонной мишени впервые были измерены авторами статьи. В обратных кинематических условиях при энергиях 60 и 62 МэВ/НУКЛОН соответственно. Экспериментальные данные охватывают угловой диапазон от 25 до 65° . Следует отметить относительно небольшие погрешности измерений по сравнению с рассеянием ${}^{11}\text{Li}$ на ядрах ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{28}\text{Si}$. Сравнивая результаты для ${}^9\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Li}$, видно, что для ${}^{11}\text{Li}$:

- 1) дифракционный минимум смещается в сторону меньших углов по сравнению с ${}^9\text{Li}$, для которых $\text{min} = 44^\circ$;
- 2) поперечное сечение в диапазоне углов рассеяния, доступных для измерений, меньше, чем для ${}^9\text{Li}$.

${}^{11}\text{Li}$ ядер: Несмотря на техническую сложность и низкую интенсивность вторичного ионного пучка, удалось получить достоверные экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого рассеяния вторичного пучка ${}^{11}\text{Li}$ на кремниевой мишени при энергии 29 МэВ/нуклон .

Квазиупругое рассеяние изобар ^{11}Li и ^{11}C на ядре ^{12}C при 60 МэВ/НУКЛОН было исследовано. Качество экспериментальных данных несколько лучше, чем в случае рассеяния ^{11}Li на ^{28}Si . По сравнению с рассеянием ^{11}Li на ^{28}Si , отношение σ/σ_R для мишени ^{12}C имеет более выраженную структуру при малых углах рассеяния и быстро уменьшается по величине, начиная с угла 14° . Сравнивая угловые распределения для изобар ^{11}Li и ^{11}C , отметим, что формы угловых распределений различны для малых углов рассеяния, а σ/σ_R для ^{11}Li в 2-3 раза больше по величине, чем для ^{11}C .

Обзор опубликованных до настоящего времени работ по взаимодействию слабосвязанных (кластерных и экзотических) ядер $^{7,9}\text{Li}$ и ^{11}Li и их анализ показывают, что экспериментальных данных по ТРК нет и необходимо измерять их для изотопов Li при энергиях от кулоновского барьера $V_c = (3-4)$ МэВ до $(10-40)$ МэВ/нуклон на ядрах ^{28}Si , ^{27}Al , ^9Be и ^{12}C .

Одной из наиболее важных особенностей, объясняющих обилие легких элементов во Вселенной, является увеличение сечений взаимодействия в суббарьерной энергетической области при ядерных реакциях со слабо связанными ядрами. Этот эффект особенно сильно проявляется для легких слабосвязанных ядер $^{6,9,11}\text{Li}$. основными каналами взаимодействия таких ядер являются реакции переноса, распада и полного слияния.

На сегодняшний день проведено очень мало экспериментов по рассеянию радиоактивных слабосвязанных ядер ($^{8,9,11}\text{Li}$). Из-за технической сложности и малой интенсивности вторичного радиоактивного пучка достоверные экспериментальные данные по дифференциальным сечениям упругого рассеяния вторичного пучка ($^{8,9,11}\text{Li}$) на кремниевых и других мишенях при низких энергиях, в том числе вблизи кулоновского барьера, пока не получены. В то же время дифференциальные сечения для упругого рассеяния должны быть надежно (с разделением вклада неупругих процессов) измерены в максимально возможном угловом диапазоне с малыми погрешностями как по углу, так и по сечениям.

Список использованных источников

1. О.М. Knyazkov, I.N. Kukhtina, S.A. Fayans, Interaction cross sections and structure of light exotic nuclei, Phys. Part. Nucl. – 1999. –Vol. 30. – P.369.
2. L.F. Canto, P.R.S. Gomes, R. Donangelo, M.S. Hussein, Fusion and breakup of weakly bound nuclei, Phys. Rep. -2006. –Vol. 424. –P. 1-6.
3. N. Keeley, R. Raabe, N. Alamanos, J.L. Sida, Fusion and direct reactions of halo nuclei at energies around the Coulomb barrier, Progress Part. Nucl. Phys. – 2007. –Vol. 59. – 579p.
4. Y.E. Penionzhkevich, Special features of nuclear reactions induced by loosely bound ^6He and $^{6,7}\text{Li}$ nuclei in the vicinity of the Coulomb barrier height, Phys. Atomic Nuclei.- 2009. – Vol.72. – P.16-17.

ӘӨЖ 539.171.016

$^9\text{Be}+^{28}\text{Si}$ СЕРПІМДІ ШАШЫРАУ ПРОЦЕСІ ҮШІН ОҢТАЙЛЫ ОПТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕР ЖҮЙЕСІН АЛУ

Ерғалиұлы Ғани¹, Солдатхан Дәурен¹, Дауыл Кеңес²

gani.yergaliuly@mail.ru, soldathan.dauren@mail.ru, kenes.2094@mail.ru

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ Халықаралық ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының докторанттары¹ мен магистранты², Нұр-Сұлтан, Қазақстан
Ғылыми жетекшісі – Н. Амангелді

Атом ядроларының бір-бірінен серпімді және серпімсіз шашырау процесін зерттеу соңғы уақытта қарқынды түрде жүруде [1-5]. Шашырау нәтижесі бойынша ядроның