

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2004-128

На правах рукописи
УДК 539.1.074

РОДИН

Александр Михайлович

**СЕПАРАТОР АКУЛИНА — УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ПУЧКОВ ЛЕГКИХ ЭКЗОТИЧЕСКИХ ЯДЕР,
ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЯДРА ${}^6\text{He}$**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2004

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Г.М.Тер-Акопян

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук

Б.Г. Новацкий

доктор физико-математических наук,
профессор

В. Г. Калинин

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва

Защита диссертации состоится “___” _____ 2004 года в
“___” час. на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 при
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна Московской
области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2004 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

 А.Г.Попеко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Изучение легчайших ядер, находящихся на границе нейтронной и протонной стабильности, является одним из актуальных направлений исследований в современной ядерной физике. Специальный интерес вызывают исследования структуры ядер с нейтронным или протонным гало, представляющим собой разреженное ядерное вещество. В настоящее время уровень знаний таков, что не исключается существование аномально нейтронно-избыточных ядер, таких как, например ${}^7\text{H}$. Теория, исходящая из современных знаний о свойствах ядерных сил, может хорошо описывать легкие ядра. Поэтому важно получение новых экспериментальных данных о свойствах ядер на линии нуклонной стабильности и резонансных состояний ядерных систем за границей нуклонной стабильности. За последние 10 – 15 лет на передний край вышли исследования, основанные на использовании пучков радиоактивных ядер. В ряде лабораторий существуют установки, на которых получают радиоактивные пучки, как прямой сепарацией продуктов реакций, так и с последующим ускорением, обеспечивая малый эмиттанс пучка и высокое энергетическое разрешение. Большое значение для изучения структуры, как самих ускоренных вторичных ядер, так и ядер, получающихся в результате их взаимодействия с мишенями, имеют методы, использующие реакции малонуклонных передач. Такие методы развивались на протяжении нескольких десятков лет для изучения свойств ядер с использованием стабильных пучков.

В Лаборатории ядерных реакций действует циклотронный комплекс У-400 и У-400М, предоставляющий исключительные возможности для получения радиоактивных пучков легчайших ядер и проведения экспериментов с ними. Это связано с высокой интенсивностью пучков тяжелых ионов, ускоряемых до 32-50 МэВ/А, что позволяет получать вторичные пучки радиоактивных ядер с энергиями в диапазоне 10-40 МэВ/А.

Этот диапазон энергий выгоден для изучения реакций передачи как в отношении интерпретации механизмов взаимодействий, так и в связи с возможностью получения лучшего энергетического разрешения экспериментов по сравнению с диапазоном 50-100 МэВ/А.

Цель работы:

Целью настоящей диссертации является создание установки АКУЛИНА – сепаратора вторичных пучков экзотических ядер высокой интенсивности и сравнительно хорошего качества. Сепаратор использовался в ряде экспериментов, в которых были изучены его рабочие характеристики. Эксперименты, посвященные изучению структуры ядра ${}^6\text{He}$, также являются предметом данной диссертации. В диссертации получены данные о выходах, угловых и энергетических распределениях продуктов реакции первичных циклотронных пучков ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{15}\text{N}$ на толстых бериллиевых мишенях.

Научная новизна:

1. Создан новый ахроматический сепаратор, предназначенный для получения пучков экзотических ядер, работающий на пучках ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{13}\text{C}$ и ${}^{15}\text{N}$ с интенсивностями до $3 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$.

2. Впервые получены пучки вторичных радиоактивных ядер в диапазоне энергий от 10 до 40 МэВ/А с интенсивностью: ${}^6\text{He} - 1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$, ${}^8\text{He} - 3 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$, ${}^9\text{Li} - 2 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$.

3. Получены новые данные о выходах, угловых и энергетических распределениях продуктов реакций, образующихся при бомбардировках толстой бериллиевой мишени ионами ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{15}\text{N}$ с энергиями 35,4; 32,6 и 45,7 МэВ/А соответственно.

4. Впервые изучены реакции упругого рассеяния ${}^6\text{He} + {}^4\text{He}$ в широком угловом диапазоне и реакции передачи $1n$, $2n$ при взаимодействии пучка ${}^6\text{He}$ с водородной мишенью, послужившие доказательством наличия “двухнейтронной” структуры в ядре ${}^6\text{He}$. Впервые показана особая структура ядра

${}^6\text{He}$, проявляющая аномально низкую кластеризацию $t+t$, в отличие от зеркального ядра ${}^6\text{Li}$, где структура ${}^3\text{He}+t$ имеет большую вероятность.

Практическая ценность работы:

1. Создана установка (сепаратор) для получения вторичных пучков с комплексом аппаратуры, на которой проводятся эксперименты по изучению структуры экзотических ядер с использованием реакций упругого, неупругого рассеяния и малонуклонных передач.

2. Данные о выходах, угловых и энергетических распределениях, полученные при бомбардировке толстой бериллиевой мишени пучками ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{15}\text{N}$ были использованы при проектировании ускорительного комплекса DRIBS, а также имеют практическое значение при проектировании других подобных установок.

3. Данные о поперечных сечениях реакций ${}^6\text{He}+{}^4\text{He}$ и ${}^6\text{He}+p$ применяются в теоретических работах при рассмотрении механизмов этих реакций, а также при расчетах структуры гало ядер, вычисления спектроскопических амплитуд различных видов их кластеризации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Сепаратор АКУЛИНА, установленный на линии выведенных пучков циклотрона У-400М, предназначенный для получения пучков легких экзотических ядер в диапазоне энергий 10-40 МэВ/А. Сепаратор включает в себя: ахроматическую ионно-оптическую систему, дополненную восьмиметровым прямолинейным участком с фокусирующими элементами, который доставляет пучки экзотических ядер в помещение с низким радиационным фоном; узел производящей мишени, рассчитанный на мощность первичного пучка до 0,5 кВт; узел профилированного поглотителя; реакционную камеру с комплексом криогенной газовой мишени и системой регистрации продуктов ядерных реакций.

2. Результаты получения пучков легких нейтронно-избыточных экзотических ядер ${}^{6,8}\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{11,12,14}\text{Be}$, данные об их интенсивности, содержанию примесей, энергии и разбросе по энергии, эмиттансе.

3. Данные о выходах, угловых и энергетических распределениях ядер ${}^{6,8}\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{11,12,14}\text{Be}$, полученные при бомбардировке толстых бериллиевых мишеней пучками ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{15}\text{N}$. Результаты были использованы при проектировании узла производящей мишени и горячего поглотителя ускорительного комплекса DRIBS.

4. Данные экспериментов по изучению упругого рассеяния ядер ${}^6\text{He}$ с энергией 151 МэВ на мишени ${}^4\text{He}$, полученные в диапазоне углов 20° – 47° и 120° – 160° в системе центра масс, а также данные по изучению реакции передачи одного и двух нейтронов для системы ${}^6\text{He}+p$, полученные при энергии пучка ${}^6\text{He}$ 25 МэВ/А в диапазоне углов от 20° до 160° в системе центра масс. Результаты измерений послужили основой для выводов о наличии “ди-нейтронной” структуры гало в ядре ${}^6\text{He}$.

Апробация работы:

Материалы, послужившие основой данной диссертации, докладывались на международных конференциях и совещаниях:

1. The Third International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings. // Bernkastel-Kues, Germany, 30 September – 4, October 1996.

2. Eleventh International Advanced ICFA Beam Dynamic Workshop on Beam Cooling and Instability Damping Dedicated to the 30th Anniversary of Electron Cooling. // On board a ship from Moscow to Nizhny Novgorod 18 June - 26 June 1996.

3. International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to Their Applications. April 1997.

4. International Symposium on Cyclotron and their Applications 98, Caen, 14-19 June 1998.

5. International Conference on Nuclear Physics NUCLEAR SHELLS-50 YEARS 49th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure. // Dubna, Russia 21-24 April 1999.

6. 7th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics. Rab, Island of Rab, Croatia, 14-19 June 1999.

7. International Conference on Perspectives in Nuclear Physics. UK 1999.

8. Eighth International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2003) Moscow, Russia, 17 - 21 June 2003.

9. International Conference on Nuclear Physics at Border Lines. Lipary (Messina), Italy, 21-24 May 2001.

10. 14th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications. Victoria, BC, Canada, 6 - 10 May 2002.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав заключения и списка литературы. Она содержит 101 страницу машинописного текста, включая в себя 38 рисунков, 14 таблиц и списка литературы из 66 наименований.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах.

Содержание работы

Во введении сформулированы основные цели исследования и определен круг решаемых задач.

В первой главе рассмотрены основные направления исследований с применением пучков радиоактивных ядер и методы получения таких пучков. Дано понятие ядерного гало, описаны основные свойства и экспериментальные наблюдения этого явления. Обосновано применение радиоактивных пучков для исследования структуры ядерного гало с использованием реакций малонуклонных передач в диапазоне энергий 15-30 МэВ/А. Рассмотрены методы получения пучков радиоактивных ядер: метод

прямой сепарации “на лету” продуктов фрагментации и ISOL (Isotope Separation On Line)-метод. Описан магнитный ахроматический спектрометр потерь энергии с профилированным поглотителем как основной метод прямой сепарации продуктов фрагментации налетающих ядер при энергиях ниже 100 МэВ/А. Приведены параметры ряда работающих сепараторов. ISOL – метод рассмотрен на основе ставшей уже классической схемы: высокоэнергичный пучок легких частиц тормозится в толстой мишени, продукты фрагментации выделяются из горячей мишени или специального поглотителя, установленного за ней, затем доставляются в источник ионов, где формируется вторичный пучок низкой энергии, который далее инжектируется в следующий ускоритель. Приведены параметры ISOL установок. Проведено сравнение двух описанных методов получения пучков радиоактивных ядер, отмечены достоинства и недостатки каждого из них.

Вторая глава посвящена описанию сепаратора АКУЛИНА. Дана мотивация и обоснованы цели создания сепаратора. Описана ионно-оптическая система, техническая реализация, отдельные узлы установки. Описана методика и приведены результаты измерений параметров сепаратора.

Схема сепаратора АКУЛИНА представлена на рисунке 1. Дублет магнитных квадрупольных линз $Q01-Q02$ фокусирует первичный циклотронный пучок в плоскости объектной щели $F1$, где размещается производящая мишень. Продукты фрагментации сепарируются и фокусируются в ахроматической плоскости $F3$ и далее транспортируются по прямопролетному каналу к физической мишени, расположенной в фокусе $F4$, где проводятся ядерно-физические эксперименты.

Магнитооптическая система включает в себя два 30° дипольных магнита ($D1, D2$) и пятнадцать магнитных квадрупольных линз ($Q01-Q15$). Ахроматическая часть сепаратора зеркально симметрична относительно промежуточной плоскости $F2$. Основным режимом работы является

ахроматический режим, который используется при получении вторичных пучков. Плоскость $F2$ является местом для установки клиновидного поглотителя энергии, предназначенного для очистки экзотического пучка. Ионно-оптические расчеты сепаратора АКУЛИНА производились с помощью программы TRANSPORT с точностью до второго порядка величины. В таблице 1 приведены основные параметры установки для ахроматической настройки.

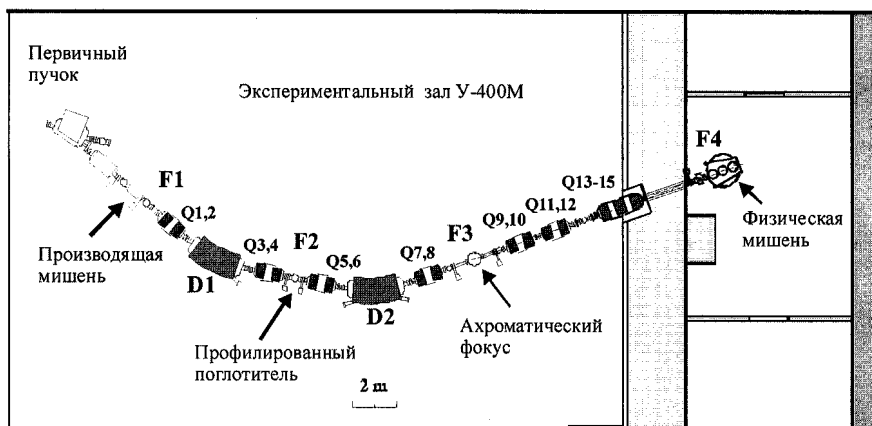


Рисунок 1. Схема сепаратора АКУЛИНА.

Магнитооптическая система сепаратора построена из стандартных элементов, использующихся для транспортировки выведенных пучков циклотрона У-400М. Измерение параметров сепаратора производилось как на первичных пучках, так и на стадии отладки условий получения вторичных пучков. С помощью средств диагностики первичного пучка и пучков радиоактивных ядер были измерены следующие характеристики сепаратора: размеры изображений в плоскостях $F2$, $F3$ и $F4$, дисперсия, телесный угол захвата, импульсный акцептанс и эмиттанс. Численные значения измеренных параметров находятся в хорошем согласии с результатами расчетов и их отклонение от проектных значений не превышает ошибок измерений.

Таблица 1. Основные характеристики сепаратора АКУЛИНА

Параметр	Единицы измерения	Величина
Максимальная магнитная жесткость	Тл×м	3,6
Телесный угол захвата	мср	0,9
Горизонтальный угловой аксептанс	мрад	20
Вертикальный угловой аксептанс	мрад	14
Импульсный аксептанс	%	4,2 – 8,4
Промежуточная фокальная плоскость F2		
Горизонтальное увеличение	отн. ед.	0,5
Вертикальное увеличение	отн. ед.	2,0
Дисперсия по импульсу	мм/%	4,0 – 18,0
Разрешение по импульсу (2,35σ)	отн. ед.	3×10^{-3}
Ахроматическая фокальная плоскость F3		
Дисперсия по импульсу	мм/%	-
Горизонтальное и вертикальное увеличение	отн. ед.	1,0
Горизонтальный размер пучка (2,35σ)	мм	8
Вертикальный размер пучка (2,35σ)	мм	10
Финальная фокальная плоскость F4		
Дисперсия по импульсу	мм/%	-
Горизонтальный размер пучка (2,35σ)	мм	20
Вертикальный размер пучка (2,35σ)	мм	16
Горизонтальный аксептанс	π×мм×мрад	60
Вертикальный аксептанс	π×мм×мрад	43

В третьей главе представлены результаты получения пучков радиоактивных ядер с помощью сепаратора АКУЛИНА. В начале главы дано краткое представление о модели Гольдхабера, описывающей основные параметры продуктов, получаемых в реакции фрагментации. Приведены характеристики пучков, ускоряемых на циклотроне У-400М, которые являются перспективными для получения пучков экзотических ядер в диапазоне энергий от 10 до 35 МэВ/А. Описан эксперимент по измерению выходов вторичных ядер в реакциях фрагментации первичных пучков на бериллиевой мишени. При оптимизации условий получения пучков вторичных ядер варьировались толщины производящей мишени и профилированного поглотителя. На практике наибольшая интенсивность нейтронно-избыточных ядер получалась при условии, что если величина их скорости была меньше скорости первичного пучка на 20-25%.

Оптимальные выходы некоторых изотопов для энергии 25 МэВ/А, полученные при фрагментации ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$ и ${}^{18}\text{O}$ на бериллиевой мишени, представлены в таблице 2. Там же даны результаты расчетов, проведенных с помощью программы INTENSITY, в которой используется модель Голдхабера. Из таблицы видно, что расчеты дают неплохое согласие с экспериментальными данными. В случае, когда требуется пучок радиоактивных ядер с энергией, большей, чем 25 МэВ/А, выгоднее использовать пучки ${}^{13}\text{C}(E=43 \text{ МэВ/А})$ или ${}^{15}\text{N}(E=49 \text{ МэВ/А})$. Пучок ${}^{18}\text{O}$ позволяет получать такие экзотические ядра, как ${}^{11}\text{Li}$ и ${}^{14}\text{Be}$. Содержание примесных ядер в пучках, получаемых с помощью сепаратора АКУЛИНА, в большинстве случаев не превышает 10-15% от полной интенсивности.

С целью оптимизации условий получения пучков вторичных ядер низкой энергии в рамках первой фазы проекта DRIBS были измерены выходы продуктов ядерных реакций из толстой бериллиевой мишени при ее бомбардировке ионами ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{15}\text{N}$. Проведенные исследования показали, что:

а) Для всех трех реакций, даже при толщинах мишеней, равных пробегу ионов первичного пучка, происходит $\approx 100\%$ -ный вылет из мишеней нейтронообогащенных изотопов гелия – ${}^{6,8}\text{He}$.

б) Ширина углового распределения вылетающих из мишени нуклидов возрастает с увеличением разности между массой бомбардирующего иона и массой ядра-продукта.

в) Средняя энергия вылетающих из мишеней изотопов гелия определяются в основном энергией бомбардирующего иона и для исследованных реакций лежат в интервале от 15 до 25 МэВ/А.

Из полученных данных следует, что все три реакции можно успешно использовать для получения интенсивных пучков нейтронообогащенных атомов гелия в источнике с разделенными производящей мишенью и тормозящим поглотителем. Оптимальным является использование реакции

${}^7\text{Li} + {}^9\text{Be}$ для получения пучков ${}^6\text{He}$ и реакции ${}^{11}\text{B} + {}^9\text{Be}$ для получения пучков ${}^8\text{He}$.

Таблица 2. Оптимальные выходы радиоактивных ядер.

Изотоп	Энергия, МэВ/А	Выход, $\text{с}^{-1}/(6,25 \cdot 10^{12} \text{с}^{-1})$,		Пучок (МэВ/А)
		экспер.	расчет	
${}^6\text{He}$	25	$1,1 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^3$	${}^7\text{Li}(32)$
${}^6\text{He}$	25	$2,7 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	${}^{13}\text{C}(43)$
${}^6\text{He}$	32	$5,2 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^3$	${}^{13}\text{N}(47)$
${}^6\text{He}$	30	$1,2 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^4$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^8\text{He}$	28	$5,9 \cdot 10^2$	$5,3 \cdot 10^2$	${}^{11}\text{B}(34)$
${}^8\text{He}$	25	$2,4 \cdot 10^3$	$3,9 \cdot 10^3$	${}^{13}\text{C}(43)$
${}^8\text{He}$	33	$2,5 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$	${}^{13}\text{N}(47)$
${}^8\text{He}$	24	$2,5 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^9\text{Li}$	34	$2,1 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^4$	${}^{13}\text{N}(47)$
${}^9\text{Li}$	36	$3,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^3$	${}^{13}\text{C}(43)$
${}^9\text{Li}$	29	$2,1 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^{11}\text{Li}$	35	$2,6 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^2$	${}^{13}\text{N}(47)$
${}^{11}\text{Li}$	27	$1,3 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^{12}\text{Be}$	27	$5,3 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	${}^{13}\text{N}(47)$
${}^{12}\text{Be}$	27	$1,3 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^3$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^{14}\text{Be}$	26	$4,0 \cdot 10^1$	$4,1 \cdot 10^1$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^{15}\text{B}$	23	$2,4 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^3$	${}^{18}\text{O}(36)$
${}^8\text{B}$	38	$4,3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	${}^{13}\text{N}(47)$

В четвертой главе описаны эксперименты по изучению структуры ядра ${}^6\text{He}$, представлены результаты этих экспериментов и проведен их анализ. Реакции передачи предоставляют большие возможности для определения структурных параметров и спектроскопических факторов простых ядерных конфигураций, поэтому было естественным использовать их для изучения структуры ядра ${}^6\text{He}$. При изучении рассеяния ${}^6\text{He}$ на ${}^4\text{He}$, можно исследовать так же и передачу двух нейтронов. При этом эффект обмена в системе центра масс выглядит, как упругое рассеяние в обратном направлении. Чтобы этот эффект проявился наиболее четко, оптимальный энергетический диапазон налетающих ионов ${}^6\text{He}$ должен составлять 20-30 МэВ/А.

Эксперимент по изучению упругого рассеяния ${}^6\text{He}$ на ${}^4\text{He}$ проводился на сепараторе АКУЛИНА. Вторичный пучок ${}^6\text{He}$ был получен фрагментацией

пучка ионов ${}^7\text{Li}$ с энергией 32 МэВ/А на ${}^9\text{Be}$ мишени. Пучок ${}^6\text{He}$ с энергией 151 МэВ и интенсивностью $\approx 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ бомбардировал гелиевую мишень. Представлявший интерес канал упругого рассеяния назад выделялся путем регистрации обоих продуктов, ${}^6\text{He}$ и ${}^4\text{He}$. Система измерения состояла из двух телескопов, в которых были использованы позиционно-чувствительные кремниевые детекторы, позволявшие идентифицировать частицы, измерять их полную энергию и углы вылета из мишени. Полученная в результате угловая зависимость дифференциального поперечного сечения упругого рассеяния $d\sigma/d\Omega$ представлена на рисунке 2: черные кружки соответствуют экспериментальным значениям, горизонтальные штрихи со стрелками, направленными вниз, соответствуют верхним пределам.

Для расчета поперечных сечений процесса прямой передачи двух нейтронов использовалось упрощенное приближение, в котором два нейтрона в ядре ${}^6\text{He}$ рассматривались как кластер, описываемый волновой функцией, зависящей только от координаты R_{nn} . Кривая 3 на рисунке 2 представляет поперечное сечение двухнейтронной передачи, рассчитанное с использованием модельной волновой функции ${}^6\text{He}$, включающей в себя “ди-нейтронную” и “сигарообразную” компоненты. Кривая 4 демонстрирует результаты расчета, выполненные с использованием модельной волновой функции, из которой была удалена “ди-нейтронная” компонента. Представленные этой кривой значения поперечного сечений на два порядка величины ниже экспериментальных значений. Это свидетельствует о том, что вклад “сигарообразной” компоненты волновой функции ${}^6\text{He}$ в поперечное сечение реакции передачи двух нейтронов мал. Это позволяет прийти к заключению, что спектроскопический фактор двухнейтронного кластера в ядре ${}^6\text{He}$ близок к единице. Таким образом, для одноступенчатой передачи двух нейтронов именно “ди-нейтронная” конфигурация ядра ${}^6\text{He}$ является определяющей.

Результаты экспериментов по изучению упругого рассеяния ${}^6\text{He}$ на ${}^4\text{He}$ в заднюю полусферу показали хорошее согласие с предсказаниями модели трех тел. Согласно расчетам по оболочечной модели ядро ${}^6\text{He}$ характеризуется большими спектроскопическими амплитудами для $\alpha+2n$ и $t+t$ конфигураций. Таким образом, можно было предполагать, что в ядре ${}^6\text{He}$ конфигурация $t+t$, может проявиться в реакциях передач для системы ${}^6\text{He} + p$. С этой целью были проведены исследования упругого рассеяния, а также реакций передачи $1n$ и $2n$ для системы ${}^6\text{He} + p$ при энергии пучка бомбардирующих ионов 25 МэВ/А .

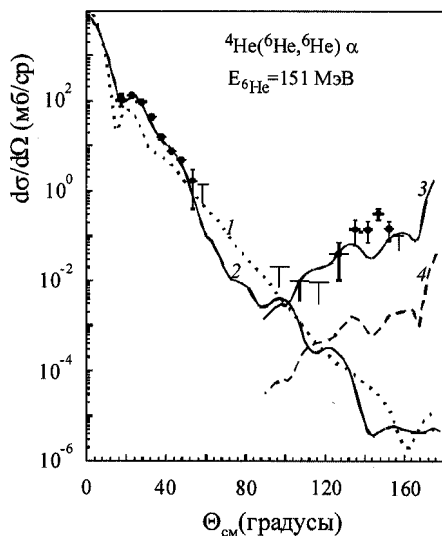


Рисунок 2. Дифференциальное сечение упругого рассеяния ${}^6\text{He}(151 \text{ МэВ}) + {}^4\text{He}$.

Вторичный пучок ${}^6\text{He}$ с энергией 25 МэВ/А и интенсивностью $1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ бомбардировал полиэтиленовую мишень толщиной 400 мкм . Продукты реакции регистрировались с помощью двух $\Delta E \times \Delta E \times E$ телескопов. Регистрировались совпадающие события, соответствующие трем выходным каналам реакции ${}^6\text{He} + p$, ${}^5\text{He} + d$ и $\alpha + t$. Суммарные результаты трех серий

экспериментов для каналов ${}^6\text{He}+p$, ${}^5\text{He}+d$ и ${}^4\text{He}+t$ представлены на рисунке 3. Упругое рассеяние (рис.3а) хорошо описывается с помощью оптической модели. Параметры оптических потенциалов, полученные при этом описании, использовались в дальнейших расчетах. На рисунке 3в) показано угловое распределение реакции ${}^6\text{Li}({}^1\text{H}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$ при энергии протонного пучка 25 МэВ. Данные, представленные на рисунке 3в) обнаруживают расхождение для реакций ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^4\text{He}){}^3\text{H}$ и ${}^6\text{Li}({}^1\text{H}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$. Осцилляции, измеренные для реакции ${}^6\text{He}+p$, выражены более ярко. Отношение амплитуд осцилляций для реакции ${}^6\text{He}+p$ обратно тому, что наблюдалось для реакции $p+{}^6\text{Li}$, хотя средние значения поперечных сечений этих реакций достаточно близки по величине. Результаты, показанные на рисунке 3в), свидетельствуют о малой вероятности обнаружения в ядре ${}^6\text{He}$ кластерной структуры $t + t$ по сравнению со структурой ${}^3\text{He} + t$ в ядре ${}^6\text{Li}$.

Итак, впервые в широком угловом диапазоне измерены сечения реакций передачи $1n$ и $2n$ для системы ${}^6\text{He} + p$ при энергии 25 МэВ/А. Экспериментальные результаты были описаны расчетами, выполненными с использованием метода искаженных волн в борновском приближении. Были определены параметры оптического потенциала, удовлетворительно описывающие выходной канал реакции $p({}^6\text{He}, {}^5\text{He})d$. Канал реакции $\alpha + t$ рассматривался как сумма процессов передачи $2n$ и тритона. Расчет внутренних спектроскопических амплитуд, выполненных в рамках оболочечной модели для различных кластерных состояний ${}^6\text{He}$, дает для этой реакции завышенные значения поперечных сечений в области больших углов в системе центра масс, когда процесс передачи тритона предположительно должен играть доминирующую роль. Лучшее согласие с экспериментальными данными было получено в том случае, когда спектроскопическая амплитуда состояния $t + t$ была уменьшена в два раза по сравнению с предсказанием трансляционно-инвариантной модели оболочек и по сравнению с известными данными о спектроскопической амплитуде $t+{}^3\text{He}$

кластеризации ядра ${}^6\text{Li}$. Меньшая вероятность тритон-тритонной кластеризации ${}^6\text{He}$, по-видимому, связана со специфической структурой ядра ${}^6\text{He}$ обладающим нейтронным гало.

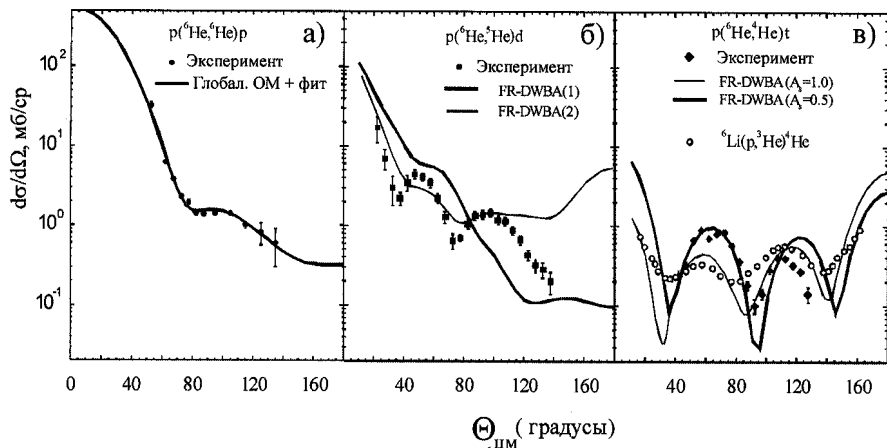


Рисунок 3. Экспериментальные данные (символы) и результаты расчетов (линии) дифференциальных поперечных сечений:

а) Описание упругого рассеяния при помощи оптической модели с глобальной параметризацией при фитированных значениях параметров потенциала. б) Реакция передачи $1n$ для канала ${}^5\text{He}+d$; толстая сплошная линия (3) есть результат расчетов с вновь определенными параметрами потенциала ОМ для выходного канала реакции. в) Реакция передачи $2n$ ${}^6\text{He}+p \rightarrow \alpha+t$. Результат расчета в рамках модели связанных каналов для $2n$ и t передачи с использованием спектроскопических амплитуд (СА) для $\alpha+2n$ и $t+t$ кластеризации в ${}^6\text{He}$, сплошная тонкая (1,0) показывают результаты, полученные соответственно для двух тритонной кластеризации СА, поделенной на 2.

В заключении представлены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе.

Основные результаты диссертации

1. Создан сепаратор АКУЛИНА, установленный на линии выведенных пучков циклотрона У-400М, предназначенный для получения пучков легких экзотических ядер в диапазоне энергий 10-40 МэВ/А. Сепаратор включает в

себя: ахроматическую ионно-оптическую систему; восьмиметровый прямопролинейный участок с фокусирующими элементами, который доставляет пучки экзотических ядер в помещение с низким радиационным фоном; узел производящей мишени, рассчитанный на мощность первичного пучка до 0,5 кВт; узел профилированного поглотителя; реакционную камеру с комплексом криогенной газовой мишени и системой регистрации продуктов ядерных реакций.

2. Экспериментально измерены следующие основные характеристики сепаратора: телесный угол захвата ядер, вылетающих из производящей мишени – 0,9 мср; импульсный акцептанс – 6,2%; дисперсия по импульсу – 5,8 мм/%; разрешение по импульсу – 3×10^{-3} ; размер пучка в плоскости ахроматического изображения – ± 4 мм по вертикали и горизонтали; размер пучка на физической мишени – ± 8 мм по вертикали и горизонтали соответственно; угловая расходимость пучка на физической мишени – ± 6 мрад.

2. Получены вторичные пучки легких нейтронно-избыточных ядер ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{11,12,14}\text{Be}$ с энергиями в диапазоне от 10 до 40 МэВ/А. Максимальная интенсивность пучка ${}^6\text{He}$ составляет $1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$, а ${}^8\text{He}$ – $3 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$. Содержание примесей других ионов при этом не превышает 15%. Угловой разброс траекторий ионов не превышает $\pm 0,4^\circ$.

3. Получены данные о выходах, угловых и энергетических распределениях ядер ${}^6,8\text{He}$, ${}^{8,9,11}\text{Li}$, ${}^{11,12,14}\text{Be}$, образующихся при бомбардировке толстых бериллиевых мишеней пучками ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{15}\text{N}$. Эти результаты были использованы при проектировании узла производящей мишени и горячего поглотителя ускорительного комплекса DRIBS.

4. Выполнены эксперименты по изучению упругого рассеяния бомбардирующих ядер ${}^6\text{He}$ с энергией 151 МэВ на мишени ${}^4\text{He}$, в диапазоне углов 20° - 47° и 120° - 160° в системе центра масс. Результаты позволили сделать вывод о наличии “ди-нейтронной” структуры гало в ядре ${}^6\text{He}$.

5. Выполнены эксперименты по изучению упругого рассеяния ${}^6\text{He}$ на протоне и реакций передачи одного и двух нейтронов при энергии пучка ${}^6\text{He}$ 25 МэВ/А в диапазоне углов от 20° до 160° в системе центра масс. Результаты подтверждают вывод о наличии “ди-нейтронной” структуры гало в ядре ${}^6\text{He}$ как основной, исключая предсказание трансляционно-инвариантной оболочечной модели о ${}^3\text{H}-{}^3\text{H}$ кластеризации ${}^6\text{He}$ как одной из двух основных. Это является следствием особой структуры гало-ядра ${}^6\text{He}$, отличающей его от зеркального ядра ${}^6\text{Li}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M., Fomichev A.S., Wolski R., Galinskiy V.B., Ivanov G.N., Ivanova I.B., Gorshkov V.A., Lavrentyev A.Yu., Oganessian Yu.Ts. High resolution line for secondary radioactive beams at the U400M cyclotron. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 126 (1997) 236-241

2. Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M., Fomichev A.S., Wolski R., Galinskiy V.B., Ivanov G.N., Ivanova I.B., Gorshkov V.A., Lavrentyev A.Yu., Oganessian Yu.Ts. High resolution beam line of the U400M cyclotron and a possibility of RIB accumulation and cooling in the K4 storage ring. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 391 (1997) 228-232.

3. Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M., Fomichev A.S., Wolski R., Galinskiy V.B., Ivanov G.N., Ivanova I.B., Gorshkov V.A., Lavrentyev A.Yu., Oganessian Yu.Ts. High resolution beam line of the U400M cyclotron and a possibility of RIB accumulation and cooling in the K4 storage ring. // Nuclear Physics A 626 (1997) 567c-574c.

4. Ter-Akopian G.M., Rodin A.M., Fomichev A.S., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V., Wolski R., Chelnokov M.L., Gorshkov V.A., Lavrentev A.Yu.,

Zagrebaev V.I., Oganessian Yu.Ts.. Two-neutron exchange for the “di-neutron” configuration of ${}^6\text{He}$. // *Physics Letters B* 426 (1998) 251-256.

5. Fomichev A.S., Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M., Wolski R., David I., Chelnokov M.L., Gorshkov V.A., Lavrentev A.Yu., Gikal B.N., Gulbekian G.G., Bogomolov S.L., Kutner V.B., Lebedev A.N., and Oganessian Yu.Ts.. Production of Radioactive Nuclear Beams at the ACCULINNA Set-up. // *Proceedings of the International Symposium on Cyclotron and their Applications* 98, Caen, 14-19 June 1998, 338-341.

6. Wolski R., Fomichev A.S., Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M., Chelnokov M.L., Gorshkov V.A., Lavrentev A.Yu., Oganessian Yu.Ts., Roussel-Chomaz P., Mittig W., David I.. Cluster structure of ${}^6\text{He}$ studied by means of ${}^6\text{He}+p$ reaction at 25 MeV/n energy. // *Physics Letters B* 467 (1999) 8-14.

7. Богданов Д.Д., Вольски Р., Горшков В.А., Матош М., Родин А.М., Сидорчук С.И., Слепнев Р.С., Степанцов С.В., Фомичев А.С., Челноков М.Л., Тер-Акопян Г.М.. Выходы продуктов ядерных реакций из толстой бериллиевой мишени при ее облучении пучками ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{15}\text{N}$. // *Письма в ЭЧАЯ, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна* 2000, с. 32-43.

8. Rodin A.M., Stepantsov S.V., Bogdanov D.D., Golovkov M.S., Fomichev A.S., Sidorchuk S.I., Slepnev R.S., Wolski R., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu.Ts., Yukhimchuk A.A., Perevozchikov V.V., Vinogradov Yu.I., Grishechkin S.K., Demin A.M., Zlatoustovskiy S.V., Kuryakin A.V., Fil'chagin S.V., Ilkaev R.I.. Status of ACCULINNA beam line. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 204 (2003) 114-118.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 10.08.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № 54557.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/