

Н 379

15-87-899

Нгуен Хоай Тьяу

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
СВОЙСТВ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ He  
В РЕАКЦИЯХ  
С УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ  $^{14}\text{C}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^9\text{Be}$

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник ПЕНИОНЖКЕВИЧ Ю.Э.

**Официальные оппоненты:**

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник ОГАНЕСЯН К.О.

доктор физико-математических наук  
профессор КАДМЕНСКИЙ С.Г.

**Ведущее предприятие:**

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 года  
в "\_\_\_" час на заседании Специализированного совета Д.047.01.05 при  
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ  
(г. Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 года.

Ученый секретарь Специализированного совета

ТАРАН Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Исследование свойств сильно нейтронообогащенных ядер является одной из фундаментальных задач ядерной физики. Особый интерес представляют легкие нейтроноизбыточные ядра. В настоящее время получить экспериментальную информацию о ядрах с большим избытком нейтронов ( $N/Z > 2$ ) можно, лишь изучая легкие ядра. Только в области самых легких ядер можно достигнуть границы нейтронной стабильности и наблюдать ядра, распадающиеся путем испускания нейтронов. Решение вопроса о положении границы стабильности атомных ядер является также одной из основных задач ядерной физики. Изучение свойств нуклидов, расположенных вблизи границы ядерной стабильности, дает возможность исследовать ядерную материю в экстремальных состояниях, при которых проявляются ее новые свойства, в том числе новые виды радиоактивного распада, и получать экспериментальную информацию для проверки тех или иных модельных представлений о структуре ядра, на основе которых делаются предсказания свойств ядер в различных областях масс. Несмотря на существование большого числа различных расчетов масс ядер, все они недостаточно надежны при значительном отходе от линии стабильности. В настоящее время экспериментально наблюдаются нейтроноизбыточные ядра легких элементов, у которых нейтронный избыток намного больше предсказанного, и в теоретических работах ставится вопрос о возможности существования ядер, состоящих из одних нейтронов. Таким образом, если бы продемонстрирована возможность существования ядер с аномально большим нейтронным избытком, то это дало бы существенный вклад в развитие наших сегодняшних представлений о ядре и оказало бы влияние на другие науки, например астрофизику. В связи с этим большой интерес представляет исследование структуры таких легких ядер, переобогащенных нейтронами, как тяжелые изотопы гелия. Экспериментальная информация, полученная для этих ядер об энергии связи нейтронов, энергии возбужденных уровней, позволяет не только определить их свойства, что представляет самостоятельный интерес, но также проверить различные ядерные модели у границы ядерной стабильности и предсказать свойства мультинейтронных систем.

### Цель работы

1. Разработка методики накопления и обработки данных в экспериментах по измерению масс стабильных и энергии квазистационарных со-

топний легких экзотических ядер с помощью измерительной установки на базе магнитного спектрометра МСП-144.

2. Исследование механизма реакций малонуклонных передач, а также реакций с эмиссией легких ядер с тяжелыми ионами при энергиях до 20 МэВ/нуклон и возможностей этих реакций для синтеза и исследования нейтроноизбыточных ядер легчайших элементов.

3. Проведение экспериментов по измерению масс стабильных и энергий квазистационарных состояний тяжелых изотопов гелия  $^5\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^7\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^9\text{He}$  в реакциях с ускоренными ионами  $^9\text{Be}$ ,  $^{11}\text{B}$  и  $^{14}\text{C}$ .

#### Научная новизна

Разработана высокочувствительная методика для исследования свойств стабильных и квазистационарных состояний нейтроноизбыточных ядер легких элементов. Созданы оригинальные программы для набора и обработки данных, которые обеспечивают высокую эффективность измерительной установки, надежную идентификацию и точность в определении энергии регистрируемых продуктов реакции.

Для выяснения механизма эмиссии высокоэнергетических частиц в реакциях с тяжелыми ионами применен метод анализа переданных продуктам реакции импульсов в корреляционных измерениях.

Впервые использованы пучки тяжелых ионов  $^9\text{Be}$  и  $^{11}\text{B}$ , а также радиоактивных  $^{14}\text{C}$  в исследовании энергетических уровней тяжелых изотопов гелия.

Наблюдены основные и возбужденные состояния ядер  $^5\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^7\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^9\text{He}$  и получены сечения образования этих состояний в реакциях  $^9\text{Be} + ^9\text{Be}$ ,  $^{11}\text{B} + ^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B} + ^9\text{Be}$  и  $^{14}\text{C} + ^9\text{Be}$ . Впервые наблюдали возбужденное состояние ядра  $^7\text{He}$  с энергией 3,4 МэВ и возбужденные состояния ядра  $^8\text{He}$  с энергиями 1,3 МэВ и 4,0 МэВ. В реакции  $^{14}\text{C} + ^9\text{Be}$  наблюдается нестабильное состояние  $^9\text{He}$  с энергией возбуждения  $\sim 1,8$  МэВ.

#### Практическая ценность работ

Созданная экспериментальная методика может быть использована для проведения высокочувствительных экспериментов по измерению масс стабильных и энергии квазистационарных состояний ядер в реакциях с тяжелыми ионами. Кроме того, полученные экспериментальные данные в настоящее время используются при разработке новой экспериментальной установки для корреляционных измерений масс легких экзотических ядер.

Результаты изучения характеристик эмиссии высокоэнергетических легких ядер в реакциях с тяжелыми ионами с энергией до 20 МэВ/нуклон используются для постановки экспериментов по получению легких экзотических ядер, а также могут быть использованы для проверки существующих

и развивающихся в настоящее время теоретических представлений о механизмах реакций данного типа.

Полученные экспериментальные результаты о массах изотопов гелия и энергиях возбужденных состояний этих ядер могут быть использованы и уже используются в теоретических исследованиях структуры легких ядер и для предсказания свойств легких мультинейтронных ядер. Данные о сечениях образования изотопов гелия в исследуемых реакциях могут быть полезными для теоретического изучения механизма реакций малонуклонных передач между ядрами с массовыми числами  $A < 20$  и энергией пучков  $E \sim 10$  МэВ/нуклон.

Полученные данные о возбужденных состояниях  $^7\text{He}$  и  $^8\text{He}$  могут лечь в основу экспериментов по исследованию распада этих ядер с вылетом нейтронных систем ( $^3n$ ,  $^4n$ ).

#### На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1) Созданная высокочувствительная методика для измерения масс и энергий квазистационарных состояний изотопов легких элементов является эффективным методом исследования легких экзотических ядер, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами.

2) Использование этой методики позволяет идентифицировать и проводить измерение энергии легких ядер с точностью до 0,3% при сечениях их образования порядка 1 нб/(МэВ.ср) в реакциях с тяжелыми ионами, ускоренными на циклотроне.

3) Реакции с тяжелыми ионами с энергией  $\sim 20$  МэВ/нуклон, сопровождающиеся эмиссией легких ядер, являются эффективным методом синтеза легких нейтроноизбыточных ядер.

4) Наблюдение первого возбужденного состояния  $^5\text{He}$  с энергией  $E = (5,2 \pm 0,3)$  МэВ и шириной  $\Gamma = (2,0 \pm 0,5)$  МэВ в реакции  $^{11}\text{B}(88 \text{ МэВ}) + ^7\text{Li}$ .

5) Обнаружение возбужденного состояния  $^7\text{He}$  с энергией  $E = (3,4 \pm 0,3)$  МэВ и шириной  $\Gamma = (1,5 \pm 0,5)$  МэВ в реакции  $^{14}\text{C}(152,6 \text{ МэВ}) + ^9\text{Be}$ .

6) Обнаружение возбужденных состояний  $^8\text{He}$  с энергиями 1,3 и 4,0 МэВ с шириной последнего  $\Gamma = (0,5 \pm 0,3)$  МэВ.

7) Наблюдение квазистационарного состояния у ядра  $^9\text{He}$  в реакции  $^{14}\text{C}(158 \text{ МэВ}) + ^9\text{Be}$ .

#### Апробация работ

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на Советании по экспериментам на пучках тяжелых ионов (Варна, НРБ, 1984 г.), на XXXIV и XXVII Советаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Алма-Ата, 1984 г. и Брнла, 1987 г.), на Международной летней школе по симметрии и квазиклассическим подходам к ядерной динамике (Брашов,

ССР, 1985 г.) на XV и XVI Международных симпозиумах по ядерной физике (Гауссиг, ГДР, 1985 г. и 1986 г.), на Совещания по мультинейтронным системам (Дубна, 1987 г.) и на Международном совещании по теории малочастичных и кварк-адронных систем (Дубна, 1987 г.).

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 121 страницу машинописного текста (включая рисунки), 34 рисунка, 9 таблиц и список литературы из 109 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и важность исследуемых в диссертации проблем. Кратко изложено основное содержание отдельных глав и приведены основные результаты, полученные автором в данной работе.

Первая глава посвящена рассмотрению некоторых особенностей двух типов реакций с тяжелыми ионами при  $E/A$  до 20 МэВ/нуклон: реакций малонуклонных передач (РМП) и реакций с эмиссией легких ядер, а также возможности использования этих реакций для синтеза и исследования легких нейтроноизбыточных ядер.

Рассматриваются особенности РМП между ядрами с массовыми числами  $A < 20$  при энергии  $E/A \sim 10$  МэВ/нуклон, которые необходимо учитывать при постановке экспериментов по исследованию легких экзотических ядер. Изучение энергетического спектра продуктов РМП указывает на существование двух способов передачи нуклонов между ядрами: кластерная или последовательная передача, причем кластерная передача характеризуется высокой избирательностью заселения в возбужденных состояниях продуктов реакций. Угловые распределения продуктов РМП описываются осциллирующими кривыми с подъемом при малых углах, что свидетельствует о прямом характере реакций. Важной характеристикой РМП является зависимость относительной вероятности заселения в различных состояниях образованных продуктов от кинематических условий реакций. В связи с этим рассматривается вопрос об оптимальном значении  $Q$ -реакции ( $Q_{\text{опт}}$ ) и проводится анализ различных моделей, на основе которых вычисляется  $Q_{\text{опт}}$ . Рассматривается зависимость сечений РМП от структуры переданной частицы. Представлены некоторые характеристики реакций перезарядки, которые обычно сопровождаются сильной перестройкой структуры сталкивающихся ядер.

В этой главе также представлен краткий обзор результатов инклюзивных измерений характеристик эмиссии легких ядер в реакциях с тяжелыми ионами с энергиями до 20 МэВ/нуклон и показана возможность ис-

пользования реакций данного типа для синтеза экзотических ядер. С целью выяснения механизма реакций, сопровождающихся эмиссией легких ядер, проведены корреляционные измерения  $\alpha$ -частиц с осколками деления в реакции  $^{12}\text{C}(85 \text{ МэВ}) + ^{232}\text{Th}$ . Результат анализа переданных продуктам реакции импульсов указывает на преобладающую роль механизма неполного слияния в данной реакции. Приведены также результаты измерений инклюзивных энергетических спектров изотопов легких элементов в реакциях ускоренных ионов  $^{20}\text{Ne}(360 \text{ МэВ})$  на мишенях  $^{181}\text{Ta}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Показано увеличение выходов изотопов легких элементов (почти на два порядка) при переходе энергии пучка от  $\sim 10$  МэВ/нуклон, что свидетельствует о перспективах использования реакций при энергиях налетающих ионов  $\sim 20$  МэВ/нуклон для синтеза легких экзотических ядер.

В последней части первой главы рассматриваются возможности РМП для синтеза и исследования структуры легких экзотических ядер. Описывается метод двухтельной реакции, который использован в настоящей работе для измерения массы и энергии возбужденных состояний изотопов гелия.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной методики, используемой в работе для исследования энергетических уровней изотопов  $^5\text{He}$ - $^9\text{He}$ . Малые сечения образования экзотических ядер и острая направленность продуктов реакций в передние углы, где велики сечения упругого и квазиупругого рассеяния, создают серьезные трудности в измерениях, что накладывает жесткие условия на выбор экспериментальной методики для проведения исследований. На рис. 1 показан схематический

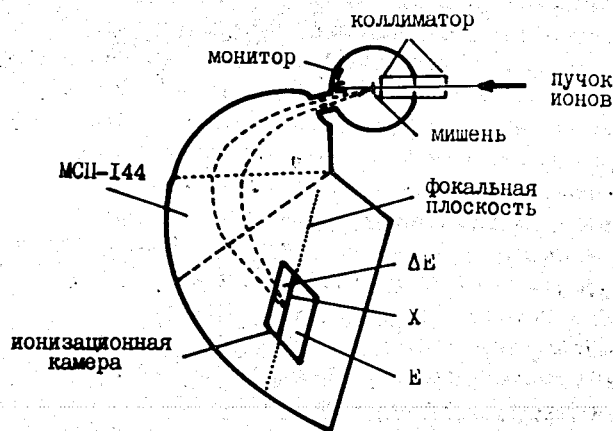


Рис. 1. Схематический вид экспериментальной установки для измерения энергетических спектров легких ядер, образованных в реакциях с тяжелыми ионами

вид экспериментальной установки для измерения энергетических спектров легких ядер. Пучки ускоренных ионов после прохождения коллимационной системы падали на мишень, расположенную в центре камеры рассеяния. Продукты реакций анализировались с помощью магнитного спектрометра МСП-144 и регистрировались ионизационной позиционно-чувствительной камерой  $\Delta E-E$ , расположенной в фокальной плоскости спектрометра. Спектрометр помещался под углом  $8^\circ$  или  $5^\circ$  относительно направления падающего пучка, его телесный угол составлял  $0,6 \text{ мср}$  с угловой апертурой  $1^\circ$ . Разрешение по импульсу данного спектрометра ( $\Delta P/P$ ) составляло  $\sim 10^{-4}$ . Ионизационная камера имела следующие параметры: разрешение по энергии ( $E$ ) было не хуже  $2,1\%$ ,  $\text{пол}E - 3,2\%$  и по координате  $X - 0,7 \text{ мм}$ . Вследствие разброса энергии пучка за длительное время измерений и других факторов, таких как толщина мишени, разброс по углам попадания частиц в камеру, точность в определении энергии частиц с помощью данной методики составила величину  $- 0,3\%$ , а ее чувствительность не хуже  $10^{-33} \text{ см}^2 / (\text{МэВ.ср})$ .

В этой же главе описана система регистрации и набора экспериментальной информации, построенная на основе электронных блоков в стандарте КАМАК и работающая "в линию" с ЭВМ СМ-3. Для проведения измерений на пучках высокой интенсивности на всех трактах электронной схемы введены релекторы наложенных импульсов, которые дают сигнал блокировки входов в АЦП в случае обнаружения сигнала наложения на одном из трактов.

Разработаны две основные программы накопления и обработки экспериментальной информации, в которые входят подпрограммы для управления ЭВМ и блоками КАМАК при выполнении различных операций, таких как передача данных в буфер, сортировка данных в двумерных представлениях и их высвечивание на цветном дисплее. Важным элементом программного обеспечения является процедура отбора данных посредством визуального представления экспериментальной информации. Осуществление предварительного отбора данных до их записи в память ЭВМ значительно повышает эффективность экспериментальной установки за счет уменьшения затраченного на запись информации времени и экономии памяти. Для организации накопления данных применяется метод двойной буферизации. Идентификация зарегистрированных частиц проводилась путем последовательного отбора данных:  $(\Delta E, E)$ -представление данных позволяет отобрать события интересующего нас элемента (рис. 2а) и после этого можно было разделить эти отобранные события по изотопам с помощью  $(X, E)$ -представления (рис. 2б) или  $(X, \Delta E)$ -представления. Этот метод обеспечивает надежную идентификацию данных даже в случае большого числа случайных совпадений. После идентификации энергия частиц вычисляется из значения магнитного поля спектрометра и  $X$ -координаты.

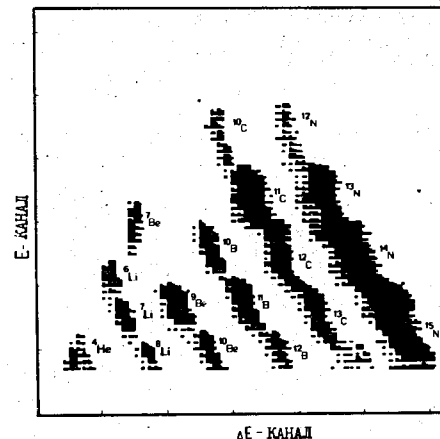


Рис. 2а

Двумерное представление  $(\Delta E, E)$  регистрируемых частиц из реакции  ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Li}$ .

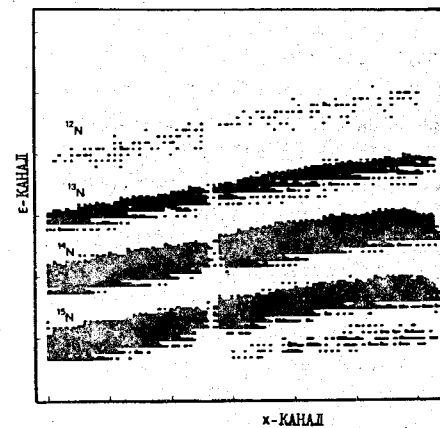


Рис. 2б

Двумерное представление  $(X, E)$  отобранных по  $(\Delta E, E)$ -представлению событий, принадлежащих к изотопам азота в реакции  ${}^9\text{Be} + {}^7\text{Li}$ . Провалы в  $X$ -спектрах - место перегородки входного окна камерн.

В конце главы кратко описана программа подгонки расчетов фазовых объемов различных выходных каналов реакции к экспериментальным данным.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию энергетических уровней тяжелых изотопов гелия  ${}^6\text{He}$ - ${}^9\text{He}$ . Измерены энергетические спектры сопряженных продуктов этих изотопов, полученных при облучении на выведенных пучках циклотрона У-300 мишеней из  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^9\text{Be}$  ионами  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ . На основе анализа этих результатов были сделаны выводы о массах и энергиях возбужденных уровней исследуемых ядер.

Таблица I. Основные характеристики исследуемых в работе реакций

Реакция	$E_{\text{лаб}}$ (МэВ)	Угол изме- рения (град.)	Выходной канал Q-реакции (МэВ)	Q-реакции (МэВ)
${}^{11}\text{B}+{}^7\text{Li}$	88	8	${}^{13}\text{C}+{}^5\text{He}$	9.56
			${}^{12}\text{C}+{}^7\text{He}$	5.98
			${}^{11}\text{C}+{}^7\text{He}$	-12.74
${}^{11}\text{B}+{}^9\text{Be}$	87	8	${}^{10}\text{C}+{}^8\text{He}$	-23.74
			${}^{13}\text{N}+{}^7\text{He}$	-11.0
${}^9\text{Be}+{}^9\text{Be}$	106.7	5	${}^{11}\text{C}+{}^7\text{He}$	-13.62
			${}^{10}\text{C}+{}^8\text{He}$	-24.62
${}^{14}\text{C}+{}^9\text{Be}$	152.6	8	${}^{16}\text{O}+{}^7\text{He}$	-6.56
			${}^{14}\text{O}+{}^9\text{He}$	-33.32
	158	8		

Основные характеристики исследуемых реакций представлены в табл. I. При анализе полученных результатов рассчитывалось оптимальное значение Q-реакции ( $Q_{\text{опт}}$ ), которое определяет энергетическую область наиболее вероятного заселения возбужденных уровней ядер. При  $Q_{\text{опт}} < Q$ -реакции с наибольшей вероятностью происходит заселение в возбужденных состояниях. При  $Q_{\text{опт}} > Q$ -реакции главным образом заселяются уровни вблизи основного состояния. Значение  $Q_{\text{опт}}$  рассчитывалось в рамках модели Вильчинского при нулевой энергии диссипации /а/:

$$Q_{\text{опт}} = V_f - E_{\text{с.м.}} + \frac{\mu_f}{\mu_i} K^2 (E_{\text{с.м.}} - V_i),$$

где  $V_i$ ,  $V_f$  - потенциалы взаимодействия ядер;  $\mu_i$ ,  $\mu_f$  - приведенные массы входного и выходного каналов соответственно;  $E_{\text{с.м.}}$  - энергия реакции в с.ц.м.;  $K$  - коэффициент, рассчитанный по массам ядер во входном и выходном каналах реакции.

Во всех измерениях было важно знать вклад в измеренные спектры реакций на ядрах примесей в мишенях. Такими примесями являются углерод, кислород и в случае бериллиевой мишени - медь. Влияние примесей в мишенях определялось путем измерения энергетического спектра и выхода продуктов ядерных реакций на мишенях из углерода, алунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и меди. С другой стороны, эксперименты ставились таким образом, чтобы проявляющиеся в некоторых случаях энергии уровней на ядрах примесей лежали в другом энергетическом диапазоне, нежели исследуемые энергетические спектры.

Изотоп  ${}^5\text{He}$  исследовался в реакции  ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, {}^{13}\text{C}){}^5\text{He}$ , в которой происходит рп-передача из ядра мишени к налетающему иону. В энергетическом

спектре  ${}^{13}\text{C}$  четко наблюдались два пика, соответствующие основному и первому возбужденному состояниям  ${}^5\text{He}$ . Это возбужденное состояние  ${}^5\text{He}$  находится при энергии  $E = (5,2 \pm 0,3)$  МэВ в системе  ${}^4\text{He}+n$ , его ширина  $\Gamma = (2,0 \pm 0,5)$  МэВ, т.е. значительно меньше приведенного в литературе значения ( $\Gamma \sim 4$  МэВ) /б/. Сечения этих двух состояний в данной реакции составляют  $(12 \pm 3)$  мкб/ср и  $(60 \pm 10)$  мкб/ср соответственно. В данной реакции  $Q_{\text{опт}} = -17,2$  МэВ, т.е. меньше Q-реакции на 27 МэВ. Это показывает малую вероятность заселения продуктов реакции в области энергии основного состояния, что отражается в сечениях наблюдаемых состояний: они значительно меньше типичного сечения рп-передачи при энергии налетающего иона 5-10 МэВ/нуклон /в/. При данной энергии реакция может происходить в две стадии: предварительное возбуждение  ${}^7\text{Li}$  и передача дейтрона /г/. Тогда образованное ядро  ${}^5\text{He}$  имеет большую вероятность находиться в возбужденном состоянии  $1/2^-$ , чем в основном состоянии.

Изотоп  ${}^6\text{He}$  исследовался в реакции  ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, {}^{12}\text{C}){}^6\text{He}$ . Его основное и первое возбужденное состояния наблюдались при измерении энергетического спектра  ${}^{12}\text{C}$  из данной реакции с сечениями  $(320 \pm 20)$  мкб/ср и  $(270 \pm 30)$  мкб/ср соответственно. Эта реакция представляет собой подхват одного протона о заполнением протонной р<sub>3/2</sub>-подоболочки в  ${}^{12}\text{C}$ . Такие реакции имеют сравнительно большие сечения. В этой реакции  $Q_{\text{опт}} = -10$  МэВ, т.е. на 16 МэВ меньше Q-реакции. Согласно критерию оптимального значения Q сечения образования продуктов в состояниях вблизи основного в данном случае будут небольшими. Действительно, полученные сечения намного меньше типичного сечения реакций передачи одного протона /в/.

Изотоп  ${}^7\text{He}$  исследовался в четырех реакциях:  ${}^{11}\text{B}+{}^7\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{B}+{}^9\text{Be}$ ,  ${}^9\text{Be}+{}^9\text{Be}$  и  ${}^{14}\text{C}+{}^9\text{Be}$ . В каждом из энергетических спектров сопряженных продуктов  ${}^7\text{He}$  в первых двух реакциях ( ${}^{11}\text{C}$  и  ${}^{13}\text{N}$ ) наблюдается только один максимум, соответствующий основному состоянию  ${}^7\text{He}$ . Сечения образования  ${}^7\text{He}$  в основном состоянии в этих реакциях составляют  $(4,8 \pm 0,5)$  мкб/ср и  $(29 \pm 5)$  мкб/ср соответственно. Энергетические спектры  ${}^{11}\text{C}$  и  ${}^{13}\text{N}$  хорошо описываются расчетами фазовых объемов с предположением о развале  ${}^7\text{He}$  ( ${}^6\text{He}+n$ ) в трехчастичных выходных каналах реакций. Поскольку кинематические условия этих двух реакций одинаковые (почти равные  $Q_{\text{опт}}$  и Q-реакции), большая разница в сечениях образования  ${}^7\text{He}$  объясняется различной степенью сложности передачи нуклонов: в первой реакции происходит обмен нуклонами, а во второй - подхват двух нуклонов. В измеренном энергетическом спектре  ${}^{11}\text{C}$  из третьей реакции ( ${}^9\text{Be}+{}^9\text{Be}$ ) четко наблюдаются пики, соответствующие основному состоянию  ${}^7\text{He}$  и возбужденным состояниям  ${}^{11}\text{C}$  при энергии 2,0; 4,32 и

4,8 МэВ. Сечение образования  ${}^7\text{He}$  в этой реакции составляет  $(39 \pm 3)$  мкб/ср.

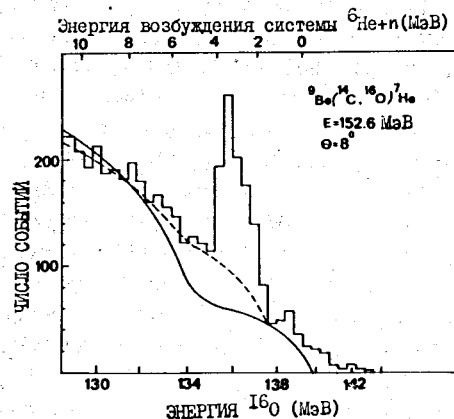


Рис. 3

Энергетический спектр  ${}^{16}\text{O}$  из реакции  ${}^9\text{Be}({}^{14}\text{C}, {}^{16}\text{O}){}^7\text{He}$ . Сплошная линия - кривая фазового объема трехчастичного выходного канала реакции  ${}^{16}\text{O}+{}^6\text{He}+n$ . Пунктирная линия соответствует фазовому объему с учетом вклада "экзотического" канала реакции  ${}^{16}\text{O}+{}^5\text{He}+2n$ .

В реакции  ${}^{14}\text{C}+{}^9\text{Be}$  наблюдалось кроме основного состояния  ${}^7\text{He}$  и его возбужденное состояние. Энергетический спектр  ${}^{16}\text{O}$  из этой реакции представлен на рис. 3. Сплошная линия представляет собой расчет фазового объема трехчастичного выходного канала  ${}^{16}\text{O}+{}^6\text{He}+n$  с образованием  ${}^{16}\text{O}$  в основном и двух первых возбужденных состояниях. Лучшее согласие с экспериментальными данными получается, если учесть вклад "экзотического" выходного канала  ${}^{16}\text{O}+{}^5\text{He}+2n$ , рассматривая  ${}^{16}\text{O}$  в основном состоянии (пунктирная линия на рис. 4). В спектре  ${}^{16}\text{O}$  наблюдалось два пика. Меньший пик при энергии возбуждения  $E=(0,5 \pm 0,3)$  МэВ в системе  ${}^6\text{He}+n$  соответствует основному состоянию  ${}^7\text{He}$ . Сечение этого состояния составляет  $(5 \pm 1)$  мкб/ср. Большой пик с шириной  $\Gamma=(1,5 \pm 0,5)$  МэВ находится при энергии возбуждения  $(3,4 \pm 0,3)$  МэВ. Его сечение составляет  $(84 \pm 15)$  мкб/ср (большая неточность в определении сечения этого состояния связана с неопределенностью расчета фазового пространства). Это возбужденное состояние  ${}^7\text{He}$  ранее не наблюдалось. Для него энергетически возможен канал распада с вылетом трех нейтронов ( ${}^7\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n + n + n$ ). В данной реакции  $Q_{\text{опт}}$  равна  $-24$  МэВ, что на  $17,4$  МэВ меньше  $Q$ -реакции. Это делает более выгодным заселение возбужденного состояния  ${}^7\text{He}$ .

Изотоп  ${}^8\text{He}$  исследовался в двух реакциях:  ${}^{11}\text{B}+{}^7\text{Li}$  и  ${}^9\text{Be}+{}^9\text{Be}$ . Эти реакции имеют большие отрицательные значения  $Q$ -реакции и процесс передачи нуклонов достаточно сложен: сталкивающиеся ядра обменялись тремя нуклонами в разных направлениях. Следовательно, сечения этих реакций ожидаются небольшими. В спектре  ${}^{10}\text{C}$  из реакции  ${}^{11}\text{B}+{}^7\text{Li}$  наблю-

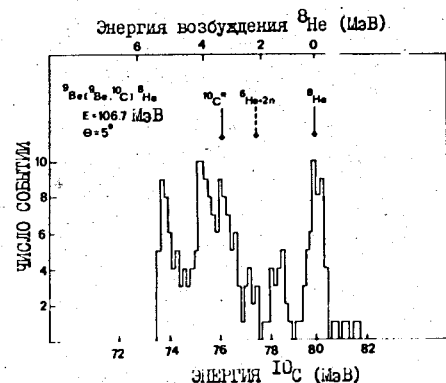


Рис. 4

Энергетический спектр  ${}^{10}\text{C}$  из реакции  ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{10}\text{C}){}^8\text{He}$ . Стрелки показывают энергии  ${}^{10}\text{C}$  при заселениях в основных и возбужденных состояниях продуктов реакции.

дены два пика, соответствующие основному и возбужденному состояниям  ${}^8\text{He}$  с сечениями  $(57 \pm 7)$  нб/ср и  $(93 \pm 25)$  нб/ср соответственно. Возбужденное состояние с шириной  $\Gamma=(1,0 \pm 0,5)$  МэВ имеет энергию  $(2,6 \pm 0,3)$  МэВ. Это состояние является нестабильным относительно распада на  ${}^6\text{He}+2n$ . Оно наблюдалось также в реакции  ${}^9\text{Be}({}^7\text{Li}, {}^8\text{B}){}^8\text{He}$  /д/. Кроме этих состояний, в реакции  ${}^9\text{Be}+{}^9\text{Be}$  наблюдали еще два возбужденные состояния  ${}^8\text{He}$ . На рис. 4 представлен энергетический спектр  ${}^{10}\text{C}$  из этой реакции, в котором наблюдали максимумы, соответствующие основному и возбужденному при энергии  $1,3$ ;  $2,6$  и  $4,0$  МэВ состояниям. Сечения этих состояний соответственно равны  $(275 \pm 40)$  нб/ср,  $(92 \pm 20)$  нб/ср,  $(49 \pm 15)$  нб/ср и  $(160 \pm 50)$  нб/ср. Из-за малой статистики нельзя с хорошей точностью извлечь ширину первых возбужденных состояний. Ширина состояния при энергии  $4,0$  МэВ  $\Gamma=(0,5 \pm 0,3)$  МэВ. Уровень при энергии  $1,3$  МэВ стабильный относительно нейтронного распада, а уровень при энергии  $4,0$  МэВ может распадаться путем эмиссии  $4$  нейтронов. Стабильный уровень при энергий  $1,3$  МэВ представляет интерес в расчетах структуры ядер, так как это первое нуклонно-стабильное возбужденное состояние тяжелых изотопов гелия ( $A > 5$ ). Уровень  $4,0$  МэВ представляет интерес с точки зрения изучения его распада с вылетом четырех взаимодействующих нейтронов.

Изотоп  ${}^9\text{He}$  исследовался в реакции  ${}^{14}\text{C}+{}^9\text{Be}$ , энергетический спектр  ${}^{14}\text{O}$  из которой представлен на рис. 5. Сплошная линия на этом рисунке является расчетом фазового объема выходного канала реакции  ${}^{14}\text{O}+{}^8\text{He}+n$ . Наблюдается широкое распределение над фазовым пространством. В пределах точности эксперимента можно определить сечение образования этого состояния и массу ядра  ${}^9\text{He}$ , которые составляют соответственно  $\sim 0,1$  мкб/ср и  $(41,5 \pm 1,0)$  МэВ. Это сечение существенно больше сечения



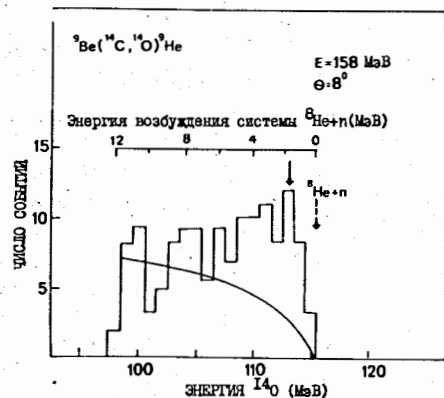


Рис. 5  
Энергетический спектр  $^{14}\text{O}$  из реакции  $^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^9\text{He}$ .  
Сплошная линия - кривая фазового объема трехтельного выходного канала  $^{14}\text{O}+^8\text{He}+n$ -реакции.  
Стрелка показывает центроид распределения над фазовым объемом.

Таблица 2. Наблюдаемые в настоящей работе энергетические уровни изотопов  $^5\text{He}$ - $^9\text{He}$

Изотоп	Реакция	Сечение (мкрб/ср)	$E^x$ (МэВ)	$\Gamma$ (МэВ)	Канал нейтрон-распада	Энергия распада (МэВ)
$^5\text{He}$	$^7\text{Li}(^{II}\text{B}, ^{I3}\text{C})$	$12 \pm 3$	о.с.	$0,8 \pm 0,3$	$^4\text{He}+n$	$0,9 \pm 0,3$
		$60 \pm 10$	$4,3 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,5$	$^4\text{He}+n$	$5,2 \pm 0,3$
$^6\text{He}$	$^7\text{Li}(^{II}\text{B}, ^{I2}\text{C})$	$320 \pm 20$	о.с.			
		$270 \pm 30$	$1,8 \pm 0,3$	$\leq 0,2$	$^4\text{He}+2n$	$0,8 \pm 0,3$
$^7\text{He}$	$^7\text{Li}(^{II}\text{B}, ^{II}\text{C})$	$4,8 \pm 0,5$	о.с.	$\leq 0,2$	$^6\text{He}+n$	$0,5 \pm 0,3$
		$29 \pm 5$	о.с.	$\leq 0,2$	$^6\text{He}+n$	$0,5 \pm 0,3$
		$39 \pm 3$	о.с.	$\leq 0,2$	$^6\text{He}+n$	$0,5 \pm 0,3$
		$5 \pm 1$	о.с.	$\leq 0,2$	$^6\text{He}+n$	$0,5 \pm 0,3$
		$84 \pm 15$	$2,9 \pm 0,3^*$	$1,5 \pm 0,5$	$^6\text{He}+n$ $^4\text{He}+3n$	$3,4 \pm 0,3$ $2,4 \pm 0,3$
$^8\text{He}$	$^7\text{Li}(^{II}\text{B}, ^{I0}\text{C})$	$(57 \pm 7) \cdot 10^{-3}$	о.с.			
		$(93 \pm 25) \cdot 10^{-3}$	$2,6 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,5$	$^6\text{He}+2n$	$0,5 \pm 0,3$
		$(275 \pm 40) \cdot 10^{-3}$	о.с.			
		$(92 \pm 20) \cdot 10^{-3}$	$1,3 \pm 0,3^*$	-		
$^9\text{Be}(^9\text{Be}, ^{I0}\text{C})$	$(49 \pm 15) \cdot 10^{-3}$	$2,6 \pm 0,3$			$^6\text{He}+2n$	$0,5 \pm 0,3$
		$4,0 \pm 0,3^*$	$0,5 \pm 0,3$		$^6\text{He}+2n$	$1,9 \pm 0,3$
					$^4\text{He}+4n$	$0,9 \pm 0,3$
$^9\text{He}$	$^9\text{Be}(^{I4}\text{C}, ^{I4}\text{O})$	$\sim 0,1$	о.с.	$\sim 3$	$^8\text{He}+n$	$\sim 1,8$

\* Эти уровни впервые наблюдаются в настоящей работе.

образования  $^9\text{He}$  в реакциях с  $\pi$ -мезонами /e/. Ширина этого состояния велика ( $\sim 3$  МэВ) и не исключено, что при большей статистике оно разделится на отдельные уровни /ж/.

Значения сечений наблюдаемых состояний для всех исследуемых реакций, их энергии и ширины представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, изотоп  $^8\text{He}$  более стабильный, чем  $^6\text{He}$ . Изотоп  $^7\text{He}$  хотя и является нестабильным ядром, но более связан, чем  $^5\text{He}$ . Существенно более связанным, чем предполагалось, оказался  $^9\text{He}$ . Такая особенность повышения стабильности тяжелых ядер гелия получила название "гелиевой аномалии" и может свидетельствовать о повышении стабильности мультинейтронных систем по мере удаления от долины стабильности. Этот важный вывод требует дальнейшей экспериментальной проверки, и с этой точки зрения особенно принципиальными могут быть эксперименты по измерению масс ядер  $^{10}\text{He}$  и  $^{12}\text{He}$ . В частности, перспективной может оказаться реакция  $^9\text{Be}(^{18}\text{O}, ^{17}\text{Ne})^{10}\text{He}$ .

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертационной работе.

1. Создана высокоэффективная методика для изучения структуры легких экзотических ядер, позволяющая измерить массы и энергии квазистационарных состояний этих ядер. Разработаны программы накопления и обработки экспериментальных данных на основе электроники в стандарте КАМАК для работы "в линию" с ЭВМ СМ-3.

2. Исследованы характеристики реакций малонуклонных передач, а также реакций с эмиссией легких ядер с ионами  $^9\text{Be}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{14}\text{C}$  и  $^{20}\text{Ne}$  ( $\sim 20$  МэВ/нуклон). Показана перспективность использования этих реакций для получения и исследования свойств нейтроноизбыточных ядер легких элементов.

3. Наблюдены первые возбужденные состояния ядер  $^5\text{He}$  и  $^6\text{He}$ . Получены новые значения энергии и ширины первого возбужденного состояния ядра  $^5\text{He}$ .

4. Наблюдены основное и возбужденное состояния ядра  $^7\text{He}$ . Для возбужденного состояния с энергией  $\sim 3,4$  МэВ энергетически возможен распад с эмиссией трех нейтронов. Проведены расчеты фазовых объемов трехчастичных выходных каналов исследуемых реакций с предположением о развале  $^7\text{He}(^6\text{He}+n)$ . Они хорошо описывают энергетические спектры сопряженных продуктов  $^7\text{He}$  из этих реакций.

5. В реакции  $^{11}\text{B}+^7\text{Li}$  наблюдаются  $^8\text{He}$  в основном и возбужденном состояниях. Для последнего энергетически возможен распад с вылетом двух нейтронов. В реакции  $^9\text{Be}+^9\text{Be}$  кроме этих состояний наблюдаются еще два

возбужденные состояния: одно - нейтроностабильное, а другое имеет энергию выше порога развала с эмиссией четырех нейтронов.

6. Наблюдено квазистационарное состояние  $^9\text{He}$  в реакции  $^{14}\text{C}+^9\text{Be}$  с энергией связи  $B_d \sim 1,8$  МэВ, что больше, чем предсказывалось в теоретических расчетах. Сечение образования  $^9\text{He}$  в данной реакции существенно выше сечения его образования в реакции с  $\pi$ -мезонами.

7. Проведен анализ полученных данных с точки зрения влияния кинематических условий и способов передачи нуклонов между сталкивающимися ядрами на относительные вероятности заселения в различных состояниях образованных продуктов исследуемых реакций и их сечения.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Белозеров А.В., Борча К., Герлик Э., Нгуен Хоай Тъяу, Кутнер В.Б., Калпакчиева Р., Калинин А.М., Оганесян Ю.П., Пенюонжкевич Ю.Э., Пронин Н.В., Флеров Г.Н. Синтез изотопов легких элементов вблизи границ ядерной стабильности в реакциях перезарядки с тяжелыми ионами. - В кн.: Тезисы докладов XXXIV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алма-Ата, 1984, с. 379.
2. Belozyorov A.V., Borcea C., Dlouhy Z., Kalinin A.M., Nguyen Hoai Chau, Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E. Experimental study of the nucleon stability of neutron-rich nuclei with  $Z \leq 4$  in reactions with  $^{14}\text{C}$  ions. - In: 7-th Int. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constants (AMCO-7): Abstracts. Darmstadt, Seeheim, 1984, p. 104.
3. Белозеров А.В., Борча К., Саламатина Т.С., Нгуен Хоай Тъяу. Программа обработки и анализа данных в экспериментах по изучению изотопов легчайших элементов. - В кн.: Совещание по экспериментам на пучках тяжелых ионов, Варна: Сборник аннотаций. Дубна, ОИЯИ, Д7-84-736, 1984, с. 68-69.
4. Белозеров А.В., Борча К., Длоуhy З., Калинин А.М., Калпакчиева Р., Нгуен Хоай Тъяу, Пенюонжкевич Ю.Э., Скобелев Н.К. Установка для измерения масс ядер, образующихся в двухчастичных реакциях с тяжелыми ионами. - Дубна, 1985. - 8 с. (Сообщение/ОИЯИ: I3-85-535).
5. Nguyen Hoai Chau, Augustyniak W., Borcea C., Lewitowicz M. Alpha-fragment correlation measurements in the reaction  $^{12}\text{C}(85 \text{ MeV}) + ^{232}\text{Th}$ . - In: Proc. XVth Int. Symposium on Nuclear Physics - Nuclear Fission, Gaussig, 1985, Dresden, 1986, p. 127-129.
6. Augustyniak W., Borcea C., Lewitowicz M., Nguyen Hoai Chau, Penionzhkevich Yu.E., Sandukowski V.G., Sowinski M., Chojnacki S. Experimental study of  $\alpha$ -fission fragment correlations in the

$^{232}\text{Th}(^{12}\text{C}, \alpha f)$  reaction. - Dubna, 1986. - 11 p. (Preprint/JINR: E7-86-732).

7. Dlouhy Z., Svanda J., Belezorov A.V., Borcea., Kalinin A.M., Kalpakchieva R., Nguyen Hoai Chau, Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E. Emission of H and He heavy isotopes in HIC at 8 MeV/n. - In: Proc. XVth Int. Symposium on Nuclear Physics-Dynamic of Heavy-ion collisions, Gaussig, 1986, Dresden, 1986, p. 204-211.
8. Belozyorov A.V., Borcea C., Dlouhy Z., Kalinin A.M., Nguyen Hoai Chau, Penionzhkevich Yu.E. Search for the tri- and tetra-neutron in reactions induced by  $^{11}\text{B}$  and  $^9\text{Be}$  ions on  $^7\text{Li}$  and  $^9\text{Be}$ . - Dubna, 1987. - 12 p. (Preprint/JINR: E7-87-140).
9. Belozyorov A.V., Borcea C., Dlouhy Z., Kalinin A.M., Nguyen Hoai Chau, Penionzhkevich Yu.E. Study of He isotopes with  $A \geq 5$  in Heavy-ion reactions at  $E/A \sim 10$  MeV/nucleon. - Dubna, 1987. - 18 p. (Preprint/JINR: E15-87-733).

#### Цитированная литература:

- a/ Wilczynski J., Siwek-Wilczynska, van Dierck J., Goygrijp S., Hageman D.C.J., Janssens R.V.F., Lukasiak J., Siemssen R.H., van Der Werf S.Y. Binary l-matched reactions in  $^{14}\text{N}+^{159}\text{Tb}$  collisions - Nucl.Phys., 1982, v. A373, No.1, p.109-140.
- b/ Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei  $A=5-10$ . Nucl.Phys., 1984, v. A413, No.1, p.1-214.
- v/ Anyas-Weiss N., Cornell J.C., Fisher P.S., Hudson P.N., Menchaca-rocha A., Millener D.J., Panagiotou A.O., Scott D.K., Strottman D., Brink D.M., Buck B., Ellis P., England T. Nuclear structure of light nuclei using the selectivity of high energy transfer reactions with heavy ions. - Phys.Rep., 1974, v. 120, No.3, p.201-272.
- г/ Bass R. Nuclear reactions with heavy ions. - Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980 - 410 p.
- д/ Александров Д.В., Глухов Ю.А., Демьянова А.С., Духанов В.И., Мазуров И.Б., Новацкий Б.Г., Оглоблин А.А., Сакута С.Б., Степанов Д.Н. Исследование реакций ( $^6\text{Li}, ^8\text{B}$ ) и ( $^7\text{Li}, ^8\text{B}$ ) на легких ядрах. - ЯФ, 1982, т. 35, вып. 2, с. 277-281.
- e/ Seth K.K. Pionic probes for exotic nuclei. - In: Proc. 4th Int. Conf. on nuclei far from stability, Helsingor (Denmark), 1981, Geneva, CERN 81-09, 1981, p. 655-663.
- ж/ Seth K.K., Artuso M., Barlow D., Iversen S., Kalotka M., Nann H., Parker B., Soundranayagam R. Exotic nucleus helium-9 and its excited states. Phys.Rev.Lett., 1987, v. 58, No.19, p.1930-1933.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 декабря 1987 года.