

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

K17

7-88-205

УДК 539.172.17

КАЛИНИН

Александр Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ
ВОДОРОДА И МУЛЬТИНЕЙТРОНОВ
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1988

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

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
профессор

ОГАНЕСЯН Ю.Ц.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

ГОЛЬДБЕРГ В.З.

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

ЕРЕМИН Н.В.

Ведущее предприятие:
Институт ядерных исследований АН УССР, Киев

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

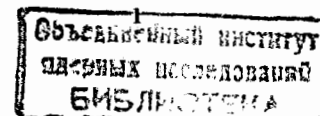
Актуальность проблемы

Изучение малонуклонных систем занимает особое место в ядерной физике. Интерес к этой области исследований объясняется в первую очередь возможностью проверки различных теоретических методов для точного безмоделного описания таких систем, а также установлению вида нуклон-нуклонного потенциала и границ применимости потенциального подхода в теории ядра. В настоящее время достигнуты большие успехи в теоретическом описании ядер S -оболочки, однако они не дают однозначного заключения о виде $N-N$ потенциала и для дальнейшего продвижения в строгом микроскопическом описании ядер необходимо расширение области вычислений на более тяжелые системы, в которых присутствуют нечетные компоненты $N-N$ потенциала. Эти компоненты играют столь же существенную роль в формировании глобальных характеристик ядер (энергия связи, радиусы), что и четные составляющие. С другой стороны, для описания обычных известных ядер число компонент потенциала и различных комбинаций взаимодействия неизмеримо возрастает и расчеты возможны только в рамках серьезных упрощений. Уникальную в этом смысле возможность представляют исследования нукло-стабильных или квазистационарных ядер, состоящих из одних нейтронов, где отсутствуют компоненты $N-N$ потенциала с $T=0$ и кулоновское взаимодействие. Значительный интерес представляют также тяжелые изотопы водорода с $A > 3$, как наиболее обогащенные нейтронами ядра. В настоящее время не существует строгих теоретических запретов на существование таких мультинейтронных ядер $/a/$, и интерес к их экспериментальному поиску значительно возрос после обнаружения квазистационарных систем ${}^6\text{H}$ и ${}^9\text{He}$ $/b, в/$, которые оказались существенно более стабильными, чем предсказывалось ранее.

Основная цель работы заключалась в разработке и создании экспериментальной установки с использованием магнитного спектрометра МСП-144, и проведении на ней экспериментов по поиску и измерению масс тяжелых изотопов водорода ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, ${}^6\text{H}$ и мультинейтронов 3_n , 4_n , 5_n в двухтелных реакциях с тяжелыми ионами на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научная новизна

Создана экспериментальная установка на базе магнитного анализатора для измерения масс ядер, образующихся в двухтелных реакциях



с тяжелыми ионами при энергиях 10–12 МэВ/нуклон, которая позволила проводить исследования с рекордным для экспериментов такого типа уровнем чувствительности по сечению $\sim 1 \text{ нб/МэВ}\cdot\text{ср}$.

Впервые на большом количестве измеренных энергетических спектров тяжелых фрагментов из многочастичных реакций с тяжелыми ионами показано, что данные спектры хорошо описываются кривыми фазового объема многочастичного развала в выходном канале реакции.

Обнаружен возбужденный уровень в системе ${}^4\text{H}$ с энергией $E(T+n) = (5,8 \pm 0,5) \text{ МэВ}$ и шириной $\Gamma = (2,1 \pm 0,5) \text{ МэВ}$. Подтверждено наличие квазистационарного состояния в системе ${}^6\text{H}$, измерены его параметры: $E(T+3n) = (2,6 \pm 0,5) \text{ МэВ}$, $\Gamma = (1,5 \pm 0,5) \text{ МэВ}$.

Проведен анализ экспериментальных данных на основе оболочечной модели, позволяющий объяснить имеющиеся к настоящему времени экспериментальные данные по тяжелым изотопам водорода.

Разработано новое регистрирующее устройство для продолжения экспериментов с уровнем чувствительности по сечению $\sim 10 \text{ пб/МэВ}\cdot\text{ср}$.

Практическая ценность работ

Созданная установка может быть использована для проведения поисковых экспериментов по обнаружению и измерению масс легких экзотических ядер с высоким уровнем чувствительности по сечению. Предложенный метод исключения наложений импульсов может быть использован в других экспериментальных модулях для проведения экспериментов с большими нагрузками. Разработанное регистрирующее устройство может быть эффективно использовано в экспериментах на пучках тяжелых ионов.

Экспериментальное подтверждение возможности описания энергетических спектров тяжелых фрагментов из реакций с тяжелыми ионами кривыми фазового объема многочастичного развала в выходном канале реакции позволит в дальнейших экспериментах проводить прецизионный анализ спектров с целью обнаружения резонансов в различных ядерных системах.

Полученные экспериментальные данные по массам ${}^4\text{H}$ и ${}^6\text{H}$ могут быть использованы для теоретических расчетов этих ядер и предсказания свойств других легких нейтроноизбыточных ядер. Результаты анализа возможных квантовых состояний возбужденного уровня ${}^4\text{H}$ и основного состояния ${}^6\text{H}$ представляют интерес для проведения дальнейших экспериментов по изучению этих систем.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Созданная установка для измерения масс ядер, образовавшихся в двухтельных реакциях с тяжелыми ионами, ускоренными на циклотроне, позволила проводить поисковые эксперименты с уровнем чувствительности по сечению $\sim 1 \text{ нб/МэВ}\cdot\text{ср}$ и точностью измерения масс $\sim 0,3 \text{ МэВ}$.

2. Обнаружение возбужденного уровня в системе ${}^4\text{H}$ при энергии $E(T+n) = (5,8 \pm 0,5) \text{ МэВ}$ с шириной $\Gamma = (2,1 \pm 0,5) \text{ МэВ}$, измерение параметров основного состояния ${}^4\text{H}$ $E(T+n) = (3,5 \pm 0,5) \text{ МэВ}$, $\Gamma = (0,9 \pm 0,5) \text{ МэВ}$.

3. Подтверждение наличия в системе ${}^6\text{H}$ квазистационарного состояния, измерение его параметров $E(T+3n) = (2,6 \pm 0,5) \text{ МэВ}$, $\Gamma = (1,5 \pm 0,5) \text{ МэВ}$.

4. Верхние границы на сечение образования мультинейтронов в реакциях ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, {}^{15}\text{O}){}^3\text{n}$, ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, {}^{14}\text{O}){}^4\text{n}$, ${}^7\text{Li}({}^9\text{Be}, {}^{12}\text{N}){}^4\text{n}$, ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{14}\text{O}){}^4\text{n}$, ${}^9\text{Be}({}^9\text{Be}, {}^{13}\text{O}){}^5\text{n}$ составляют величину $\sim 1 \text{ нб/МэВ}\cdot\text{ср}$.

5. Энергетические спектры тяжелых фрагментов из многочастичных реакций с тяжелыми ионами хорошо описываются кривыми фазового объема многочастичного развала в выходном канале реакции.

6. Квантовые числа I^+ возбужденного состояния ${}^4\text{H}$ и основного состояния ${}^6\text{H}$ позволяют объяснить имеющиеся экспериментальные данные по тяжелым изотопам водорода ($A > 3$).

7. Разработанное регистрирующее устройство позволит проводить эксперименты с уровнем чувствительности по сечению $\sim 10 \text{ пб/МэВ}\cdot\text{ср}$.

Апробация работ

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на XXXV и XXXVI совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Алма-Ата, 1985 г., Харьков, 1986 г.), Международной конференции по механизму ядерных реакций (Варенна, Италия, 1985 г.), сессии АН СССР по ядерной физике (Москва, 1986 г.), Международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна, 1987 г.), Международной школе "Симметрии и полуклассические подходы к ядерной динамике" (Братов, СРР, 1986 г.), Международном коллоквиуме по физике тяжелых ионов (Кан, Франция, 1986 г.), Международной школе по ядерной физике (Миколайки, ПНР, 1985 г.), Совещании по мультинейтронным системам (Дубна, 1987 г.), неоднократно на семинарах лаборатории и других институтов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, двух приложений, заключения и списка литературы. Она содержит 103 страницы машинописного текста (включая рисунки), 26 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 65 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с предсказанием масс легчайших ядер и определением их ядерной стабильности, а также реакции, приводящие к образованию нейтроноизбыточных легчайших ядер. В отличие от области средних и тяжелых ядер, где такой параметр как энергия связи нуклона меняется плавно, претерпевал лишь незначительные скачки, в области легчайших ядер изменение числа нуклонов на единицу может кардинальным образом изменить ситуацию. Более того, при одном и том-же числе нейтронов и протонов ядра могут образовывать устойчивые конфигурации с различной энергией, причем разница энергий сравнима с энергией основного состояния. Времена жизни нуклононестабильных состояний ядер определяются наличием кулоновского или центробежного барьеров, а также структурных факторов при распаде, например, запрет по изоспину. Предсказания нуклонной устойчивости ядер, основанные на точном микроскопическом расчете в настоящее время сопряжены со значительными математическими трудностями и неоднозначным выбором нуклон-нуклонного потенциала, что приводит к неоднозначным предсказаниям стабильности различными теоретическими методами. Лучшие предсказания получены на основании оболочечной модели и в формализме с изоспином, т.е. в предположении изотопической инвариантности ядерных сил. Однако точность предсказаний значительно ухудшается при удалении от долины стабильности. Экспериментальные возможности исследования легчайших нейтроноизбыточных ядер далеко не исчерпаны.

Для получения ядер, удаленных от линии β -стабильности, используется широкий набор реакций. В перечисленных реакциях не обнаружено связанных или квазистационарных состояний 3n , 4n , 5n , 6n и т.д., но из этого еще не следует, что они не существуют. Необходимо отметить, что вероятность заселения отдельных состояний в значительной мере определяется правилами отбора, а также механизмом ядерной реакции. В связи с этим ненаблюдение в эксперименте конкретного состояния не означает его отсутствие в данной системе. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются пучки тяжелых ионов, позволяющие варьировать в широких пределах характеристики входного канала реакции. В настоящей работе мы остановимся на выборе именно таких реакций.

Во второй главе дается анализ экспериментальных возможностей циклотрона У-300 для проведения исследований, рассматриваются критерии выбора реакций. Наиболее чувствительным способом поиска неизвестных ядер и определения масс являются двухтельные реакции, приводящие к образованию двух конечных ядер в определенном энергетическом состоянии. Масса исследуемого ядра определяется из величины Q -реакции, которая извлекается из измерений энергетического спектра сопряженного продукта известной массы. Основная часть главы посвящена описанию экспериментальной установки для измерения масс ядер, образующихся в двухчастичных реакциях с тяжелыми ионами.

Реакции, приводящие к образованию экзотических ядер, обладают следующими особенностями: большой отрицательной величиной Q -реакции (30-60 МэВ), что определяет малую величину их поперечного сечения, кроме того, острой направленностью продуктов реакции в передние углы, где велико сечение упругого рассеяния. Эти обстоятельства создают серьезные трудности для изучения реакций с образованием экзотических ядер и накладывают жесткие условия на выбор экспериментальной установки для проведения исследований. На ускорителе У-300 была создана

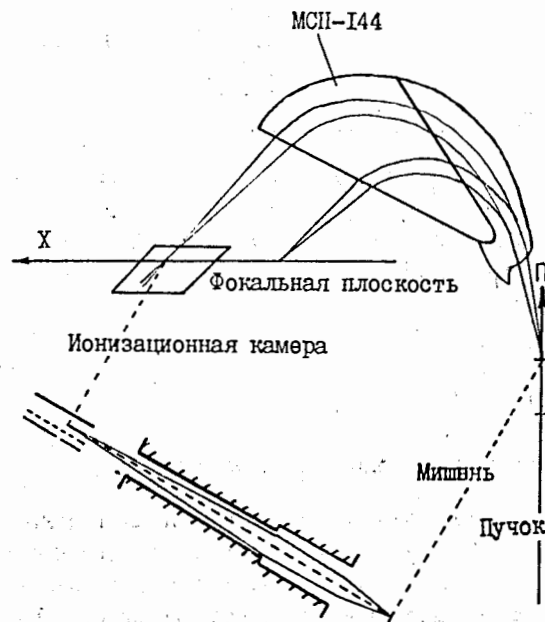


Рис. I. Схема экспериментальной установки.

установка на базе широкодиапазонного магнитного анализатора МСП-144 /д/, который позволил избавиться от значительной части продуктов фоновых реакций и провести прецизионные измерения энергетических спектров. Экспериментальная установка (рис. I) включает в себя магнитный анализатор со ступенчатыми полюсами, камеру рассеяния, коллимационную систему, детектор в фокальной плоскости магнитного анализатора, а также электронное обеспечение и мини-ЭВМ СМ-3, с помощью которой производится накопление и обработка информации.

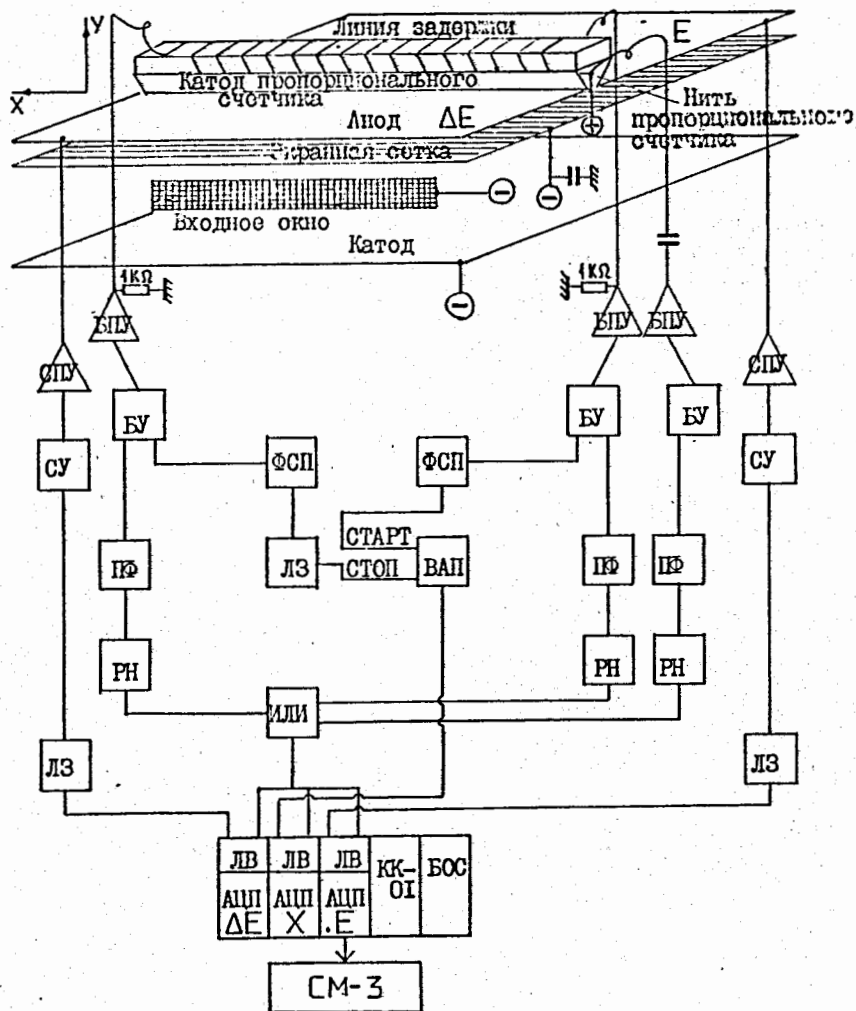


Рис.2. Схема ионизационной камеры и блок-схема электроники.

Для регистрации продуктов ядерных реакций использовалась ионизационная камера с сеткой (рис.2). Анод камеры разделен на две части, первый участок регистрирует потери энергии (ΔE), второй - остаточную энергию (E). В зазоре между пластинами анода расположен пропорциональный счетчик с линией задержки для измерения координаты (X) вдоль фокальной плоскости магнитного анализатора. Измерение этих трех параметров позволяет надежно идентифицировать изотоп и прово-

дуть измерение энергетических спектров. При проведении экспериментов мы столкнулись с проблемой высокого уровня наложений импульсов в ионизационной камере. Для решения этой проблемы был предложен метод исключения наложений, основанный на пространственном разделении ионов. Ионы, попавшие в камеру одновременно, но разделенные по координатам X либо Y на некоторое расстояние дадут на выходе с линии задержки либо с пропорциональной нити непрерывающиеся по времени импульсы, и специальный блок, включенный в электронную схему, формирует импульс, который закрывает линейные ворота амплитудно-цифрового преобразователя. Как показали измерения, данный метод позволил понизить уровень наложений в 50-60 раз и проводить эксперименты с уровнем чувствительности по сечению ~ 1 нб/МэВ.ср.

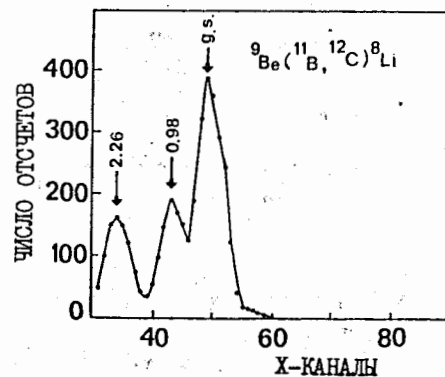


Рис.3. Спектр ядер ^{12}C вдоль фокальной плоскости (координата X) в реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^8\text{Li}$.

Рис.3. демонстрирует возможности созданной установки и циклотрона У-300 для измерения энергии ядерных уровней. На рисунке представлен координатный спектр ядер ^{12}C , образующихся в реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^8\text{Li}$. Стрелками обозначены расчетные значения координат спектра, соответствующие образованию ядер в основном состоянии и возбуждению первых двух уровней в ядре ^8Li .

В табл. I приведен вклад различных неопределенностей, входящих в ошибку определения положения ядерных уровней. Точность в определении энергии

составила величину $\pm 0,33\%$, соответственно точность в определении Q -реакции и массы ^8Li составила величину ~ 280 кэВ.

Для описания сплошных спектров использовалась простая формула для вероятности перехода в случае образования в выходном канале реакции N независимых частиц

$$\frac{d^2\sigma}{dE_1 d\Omega_1} = \frac{2\pi}{h^2} \frac{\mu_p}{k_p} \langle |M|^2 \rangle S_N(E_1, \Omega_1),$$

где $S_N(E_1, \Omega_1) = \pi \frac{2N-6}{2} \cdot 2 \frac{2N-5}{2} \left(\prod_{i=1}^N m_i \right)^{1/2} M^{2N-2} (E_1) \left[\frac{M-m_1}{M} Q - E_1 + 2a_1(E_1)^{1/2} \cos \theta_1 - a_2 \right]^{2N-2}$

- фазовый объем реакции в выходном канале ($N \geq 3$), E_1 - энергия измеряемой частицы, $\mu_p = \frac{m_p m_T}{m_p + m_T}$ - приведенная масса во входном канале,

$M = \sum_{i=1}^N m_i$, $a_i^2 = \frac{m_i m_p}{(m_p + m_i)^2}$, $\langle |M_i| \rangle$ - матричный элемент перехода, который считался не зависящим от E_I .

Таблица I

Вклад различных неопределенностей в ошибку измерения массы ядра ${}^8\text{Li}$ в реакции ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{12}\text{C}){}^8\text{Li}$

Стабильность магнитного поля анализатора	0,01%	кэВ 9
Стабильность энергии пучка	$\pm 0,12\%$	± 107
Определение центроида типа	$\pm 0,009\%$	± 7
Неопределенность калибровки координат	$\pm 0,08\%$	± 75
Неопределенность толщины мишени	$\pm 10\%$	± 64
Неопределенность толщины мишени при измерении энергии пучка	$\pm 10\%$	± 54
Ошибка юстировки магнита по углу	$\pm 0,1\%$	± 27
*Геометрические размеры мишени	4мм	± 53
*Кинетическая неопределенность внутри входной апертуры анализатора	$\pm 0,52^0$	± 212
<hr/>		
$\pm 0,33\%$		± 278 кэВ

*ошибки коррелируют

В третьей главе приводятся результаты экспериментов по поиску и измерению масс нейтроноизбыточных изотопов водорода ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, ${}^6\text{H}$ и мультинейтронов ${}^3\text{n}$, ${}^4\text{n}$, ${}^5\text{n}$, а также сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что спектры тяжелых фрагментов хорошо описываются кривыми фазового объема многочастичного развала в выходном канале реакции. Обнаружены квазистационарные состояния в ${}^4\text{H}$ и ${}^6\text{H}$, предел на сечение образования мультинейтронов и ${}^5\text{H}$ составил величину ~ 1 нб/МэВ.ср. Итогом проведенных экспериментов может служить таблица 2, где приведен перечень исследованных нами реакций и результаты. На рис.4 представлена высокоэнергетическая часть спектра ${}^{16}\text{O}$ из реакции ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, {}^{16}\text{O}){}^4\text{H}$. Стрелкой отмечена энергия 79,3 МэВ, соответствующая образованию ${}^4\text{H}$ с нулевой энергией связи относительно ${}^3\text{H}+\text{n}$. Энергетический спектр описывался суммой фазовых кривых от различных процессов развала в выходном канале реакции. Разность между экспериментальными точками и суммарной фазовой кривой представлена на том же рисунке. Лучшее описание остаточного спектра предполагается наличием двух пиков с параметрами $E^* = 5,8$ МэВ, $\Gamma = 2,1$ МэВ; $E^* = 3,5$ МэВ, $\Gamma = 0,9$ МэВ. Критерий согласия χ^2 для 22 точек спектра равняется 6,2, что соответствует уровню достоверности 0,98.

Таблица 2

Результаты поиска ${}^m\text{H}$ и ${}^m\text{H}$ в различных реакциях

Реакция	Энергия лаб/ц.м. (МэВ)	Q-реакции (МэВ)	Интервал измерений (МэВ)	Угол из- мерения	Результат	Сечение об- разования (мкб/ср) или (мкб/МэВ.ср)
$\text{II } {}_7\text{B} + {}_3\text{Li} \rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	87,5/34,0	-2,3	73-82	$80 \pm 0,5$	не наблюда.	$< 0,5$
$\text{II } {}_7\text{B} + {}_4\text{Be} \rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	88,0/39,6	+1,7	54-85	"-	$3,5 \pm 0,5$ $\Gamma = (1 \pm 0,5)$ $5 \pm 1 \quad \Gamma = 2$	0,15
$\rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	"-	-13,9	58-71	"-	не наблюда.	$< 0,05$
$\rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	"-	-27,2	52-58	"-	$2,7 \pm 0,5$ $\Gamma = (1 \pm 0,5)$	0,016
$\text{I } {}_8\text{O} + {}_3\text{Li} \rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	218/61,0	-38,4	160-135	$50 \pm 0,5$	не наблюда.	$< 0,003$
$\text{II } {}_7\text{B} + {}_3\text{Li} \rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	88,0/34,2	-16,7	56-75	"-	"-	$< 0,01$
$\rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	"-	-3,5	48-71	"-	"-	$< 0,003$
${}^9\text{Be} + {}_3\text{Li} \rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	107,0/46,8	-23,4	58-85	"-	"-	$< 0,001$
${}^9\text{Be} + {}_4\text{Be} \rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	107,0/53,5	-17,6	72-90	"-	"-	$< 0,001$
$\rightarrow {}_8\text{O} + {}_1\text{H}$	"-	-40,8	65-58	"-	"-	$< 0,002$

*Значение Q вычисляется в предположении о нулевой энергии связи в системах ${}^3\text{H}$, ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$ и ${}^3\text{H} + m\text{n}$.

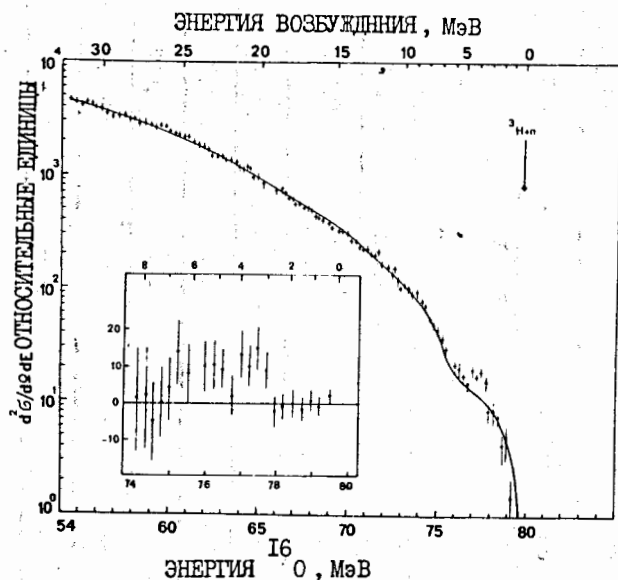


Рис.4. Энергетический спектр ионов ^{16}O в реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{16}\text{O})^4\text{He}$. Сплошной линией представлена сумма фазовых кривых от трехчастичных развалов $^{16}\text{O} + ^3\text{He} + \text{n}$, когда ^{16}O образуется в основном и первом возбужденном состоянии, четырехчастичного $^{16}\text{O} + ^2\text{He} + \text{n} + \text{n}$ и пятичастичного $^{16}\text{O} + ^1\text{He} + \text{n} + \text{n} + \text{n}$ развалов. Разница (ΔN) между экспериментальными точками и суммой фазовых кривых в линейном масштабе показана на вставке.

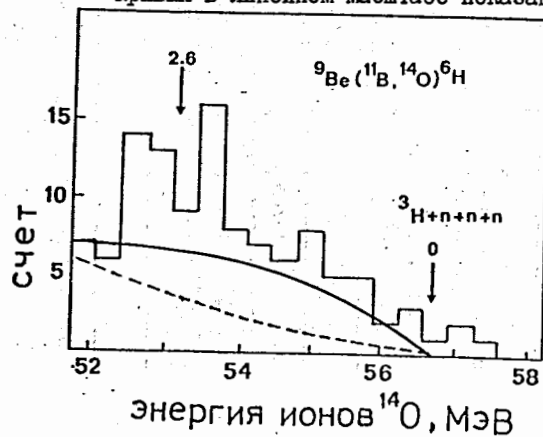


Рис.5. Энергетический спектр ионов ^{14}O в реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{14}\text{O})^6\text{He}$. Штриховой линией показано фазовое пространство для пятичастичного развала $^{14}\text{O} + ^3\text{He} + \text{n} + \text{n} + \text{n}$. Сплошная линия представляет вклад трехчастичного развала (см. текст).

Энергетический спектр ^{14}O , измеренный в реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{14}\text{O})^6\text{He}$, показан на рис.5. Правая часть спектра хорошо воспроизводится в предположении, что в выходном канале имеется только трехчастичный развал (сплошная кривая), штриховой кривой показан фазовый объем пятичастичного развала в выходном канале реакции $^{14}\text{O} + ^3\text{He} + \text{n} + \text{n} + \text{n}$. Учет возможности многоступенчатого процесса с образованием в выходном канале нестабильных к испусканию нейтронов состояний в изотопах кислорода и различной последовательности распадов также не может служить причиной превышения экспериментальных точек над кривой трехчастичного развала. Таким образом, экспериментальный результат объясняется только в предположении существования в системе ^6He квазистационарного состояния с параметрами $E(T+3\text{n})=2,6$ МэВ, $\Gamma=1,5$ МэВ. Отклонение экспериментальной гистограммы от расчетов фазового объема составляет 4,8 %

В четвертой главе дается анализ полученных экспериментальных результатов и имеющейся экспериментальной информации по тяжелым изотопам водорода в рамках оболочечной модели. В результате проведенного анализа можно указать квантовые числа основного состояния $^4\text{He} - 2^+$ и высказать предположение, что конфигурация возбужденного состояния $^4\text{He} - (1s)^2(\text{Ip})^2$, основного состояния $^6\text{He} - (1s)^2(\text{Ip})^4$, соответственно квантовые числа этих состояний 1^+ . В рамках приведенного анализа находит объяснение следующие экспериментальные факты:

явное проявление второго уровня в ^4He , заселение в наших экспериментах и его отсутствие в n-T рассеянии / г /;

становится понятным существование квазистационарного состояния в ^6He , поскольку состояние $(1s)^2(\text{Ip})^4$ более связано, чем $^4\text{He} - (1s)^2(\text{Ip})^2$ (на примере ^6He и ^8He), и отсутствие узкого состояния в ^5He .

Наличие квазистационарных состояний в ^4He и ^6He объясняется тем, что канал распада на $d + \text{nn}$ запрещен по энергии, а распад на $\text{T} + \text{nn}$ разрешен только, когда один из нейтронов переходит с p -оболочки на s ($\Delta l = 1$), тогда один из оставшихся нейтронов должен покинуть систему с $l=2$, т.е. сильно увеличивается эффективный центробежный барьер для такого распада.

Представляет интерес проверка этого анализа в дальнейших экспериментальных исследованиях. Для продолжения экспериментов разработано новое регистрирующее устройство, состоящее из пяти независимых модулей. Данное устройство позволит проводить эксперименты с уровнем чувствительности по сечению ~ 10 пб/МэВ.ср и измерять угловое распределение продуктов исследуемых реакций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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

1. Разработана и запущена установка для измерения масс ядер, образующихся в двухтелных реакциях с тяжелыми ионами. Для регистрации продуктов ядерных реакций была создана ионизационно-чувствительная камера. Установка позволила проводить эксперименты с уровнем чувствительности по сечению ~ 1 нб/МэВ.ср. Точность в измерении масс ядер составила величину $\sim 0,3$ МэВ.

2. Показана перспективность использования реакций с тяжелыми ионами для исследования нейтроноизбыточных легчайших ядер. Благодаря широким возможностям варьирования параметров входного канала, в таких реакциях можно изучать состояния системы, недоступные в других реакциях с легкими ядрами и частицами. Эти реакции позволяют также достичь большого нейтронного избытка и в перспективе провести поиски таких систем, как 6_n , 8_n , 8_n , 9_n и т.д.

3. На большом количестве энергетических спектров тяжелых фрагментов из реакций с тяжелыми ионами, приводящих к образованию нескольких тел, показано, что данные спектры хорошо описываются кривыми фазового объема многочастичного развала в выходном канале реакции. Этот факт позволил провести прецизионный анализ спектров с целью обнаружения ядерно-нестабильных состояний в изучаемых системах на фоне сплошного спектра.

4. Подтверждено наличие в системе 6_n квазистационарного состояния: $E(T+3n) = (2,6 \pm 0,5)$ МэВ, $\Gamma = (1,5 \pm 0,5)$ МэВ, обнаружен возбужденный уровень в системе 4_n , измерены его параметры: $E(T+n) = (5,8 \pm 0,5)$ МэВ, $\Gamma = (2,1 \pm 0,5)$ МэВ. Верхний предел на сечение образования мультинейтронов 3_n , 4_n , 5_n составил величину ~ 1 нб/МэВ.ср.

5. Проведен анализ полученных результатов и другой экспериментальной информации по тяжелым изотопам водорода в рамках оболочечной модели. В результате этого анализа можно указать, что квантовые числа основного состояния 4_n — 3^- , и квантовыми числами возбужденного состояния 4_n и основного состояния 6_n являются $3^- = 1^+$. В рамках данного рассмотрения находит качественное объяснение большинство имеющихся экспериментальных данных по тяжелым изотопам водорода. Представляет интерес проверка этого анализа в дальнейших экспериментальных исследованиях.

6. На основе предложенного метода исключения наложений импульсов разработано новое регистрирующее устройство для продолжения экспериментов с уровнем чувствительности по сечению порядка 10 нб/МэВ.ср.

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

1. Калинин А.М., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э. О возможности определения нуклонной стабильности ${}^{10}\text{He}$. — В кн.: Совещание по экспериментальным установкам У-400 и физической программе первоочередных экспериментов на них. Дрезден, 1982. Сборник аннотаций. Дубна, ОИЯИ, Д-7-82-891, 1982, с.41.
2. Белозеров А.В., Борча К., Длоуги З., Калинин А.М., Калпакчиева Р., Нгуен Хоай Тъяу, Пенионжкевич Ю.Э., Скобелев Н.К. Установка для измерения масс ядер, образующихся в двухчастичных реакциях с тяжелыми ионами. — Дубна, 1985. — 8 с. (Сообщение/ОИЯИ:13-85-535).
3. Belozyorov A.V., Borcea C., Dlouhy Z., Kalinin A.M., Kalpakchieva R., Nguyen Hoai Chau, Oganessian Yu.Ts., Penionshkevich Yu.E. Investigation of neutronrich hydrogen isotopes in heavy ion reactions. — In: Proc. of the 4th Int. Conf. on Nuclear Reactions Mechanisms, Varenna, 1985, Italy, 1986, p.321-325.
4. Belozyorov A.V., Borcea C., Dlouhy Z., Kalinin A.M., Kalpakchieva R., Nguyen Hoai Chau, Oganessian Yu.Ts., Penionshkevich Yu.E. Search for 4_n , 5_n and 6_n nuclei in the ${}^{11}\text{B}$ - induced reaction on ${}^9\text{Be}$. — Nucl. Phys., v.A460, N°2, 1986, p.352-360.
5. Белозеров А.В., Борча К., Длоуги З., Калинин А.М., Нгуен Хоай Тъяу, Пенионжкевич Ю.Э. Поиск 3_n и 4_n в реакции ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$. — Письма в ЭТФ, т.44, вып. II, 1986, с.498-501.
6. Белозеров А.В., Борча К., Длоуги З., Калинин А.М., Нгуен Хоай Тъяу, Пенионжкевич Ю.Э. Определение нуклонной стабильности и исследование квазистационарных состояний мультинейтронных ядер 3_n , 4_n , 4_n , 5_n , 6_n . — Известия АН СССР, сер. физ.-астр., т.50, № 10, 1986, с.1936-1942.
7. Белозеров А.В., Борча К., Длоуги З., Калинин А.М., Нгуен Хоай Тъяу, Пенионжкевич Ю.Э. Исследование нейтроноизбыточных легчайших ядер на пучках тяжелых ионов. — В кн.: Тезисы Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Дубна, Д7-86-434, 1986, с.56-59.
8. Belozyorov A.V., Borcea C., Dlouhy Z., Kalinin A.M., Nguyen Hoai Chau, Penionshkevich 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. — 12p. (Preprint/JINR: E7-87-140).
9. Band J.M., Gareev F.A., Kazacha S., Kalinin A.M. Energies and radii of p-shell nuclei. — Copenhagen, 1987. — 15p. (Preprint/Niels Bohr Institut: NBI-87-33)

Цитированная литература:

- /а/ Базь А.Н., Гольданский В.И., Гольдберг В.З., Зельдович Я.Б. Легкие и промежуточные ядра вблизи границ нуклонной стабильности.-М.: Наука, 1972. -216 с.
- /б/ Александров Д.В., Гамза Е.А., Глухов Ю.А., Новацкий Б.Г., Оглоблин А.А., Степанов Д.Н. Наблюдение сверхтяжелого изотопа водорода ${}^6\text{H}$ в реакции ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, \text{B})$.-ЯФ, т.39, вып.3, 1984, с.513-518.
- /в/ 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.
- /г/ Phillips T.W., Berman B.L., Seagrave J.D. Neutron total cross section for tritium.-Phys. Rev., v. C22, N^o1, 1980, p.384-399.
- /д/ Basargin Yu.G., Boldin N.I., Korolev L.B., Levchenko V.G., Sevorgin Yu.P., Gofman Yu.V., Maidikov V.Z. A broad-range stepped-pole magnetic spectrograph.-Nucl.Instr. Meth., v.126, N 3, 1975, p.413-416.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 марта 1988 года.