

88423



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2008-203

K-175

На правах рукописи
УДК 539.172.17+539.144.3

КАЛПАКЧИЕВА
Румяна Георгиева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ
СЛАБОСВЯЗАННЫХ И НЕСВЯЗАННЫХ ЯДЕР
В ОБЛАСТИ $1 \leq Z \leq 6$

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2008

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

Научные консультанты: д-р Х.Г. Болен, проф. д-р В. фон Оэртцен,
проф. д.ф.м.н. Ю.Э. Пенионжкевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Г.М. Тер-Акопьян

доктор физико-математических наук,
профессор

К.А. Гриднев

доктор физико-математических наук,
профессор

М.В. Жуков

Ведущая организация:

Российский научный центр "Курчатовский институт"


Защита диссертации состоится "29" мая 2009 г. в 15
часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 при
Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и Лаборатории
ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных
исследований (г. Дубна, Московская область).

С диссертацией можно ознакомиться в НТБ Объединенного института
ядерных исследований.

Автореферат разослан "15" апреля 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А.Г. Попоко



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Представленная работа посвящена изучению свойств изотопов легчайших элементов – от водорода до углерода – сильно обогатенных нейтронами и находящихся непосредственно вблизи границы нейтронной стабильности. Исследование экзотических ядерных систем с большим соотношением N/Z на протяжении многих лет представляет одно из основных направлений ядерной физики. Развитие техники получения интенсивных пучков ионов и экспериментальные исследования, проведенные на пучках тяжелых ионов, привели к обнаружению новых связанных (стабильных к испусканию нуклона/ов) ядер с большим избытком нейтронов. В области легчайших элементов была также исследована структура ряда ядер, расположенных за границей нейтронной стабильности (*neutron drip line*). Интерес к легким ядрам сильно возрос после того как в некоторых из них были обнаружены необычные свойства, ранее не проявляющиеся в ядрах, находящихся вблизи линии стабильности (нейтронное и протонное гало, новые области деформации, новые типы распада, изменения в последовательности заполнения ядерных оболочек, ослабление или даже исчезновение известных и появление новых замкнутых оболочек, и др.).

Основной интерес к исследованию легких нейтроноизбыточных ядер связан с возможностью экспериментального определения границы стабильности ядер по отношению к эмиссии нейтронов. Это непосредственно связано с экспериментальным измерением массы экзотических ядер с экстремальными значениями N/Z , что является основным методом определения энергии связи валентных нейтронов в ядрах. Постановка опытов по исследованию структуры и свойств экзотических ядер необходима, прежде всего, для определения их масс, так как расчетные значения масс ядер, полученные в различных теоретических моделях, отличаются иногда в пределах нескольких МэВ. Значение массы ядра используется также при определении энергии всех процессов в которых участвует исследуемое ядро.

Схемы уровней легких ядер (здесь и далее рассматриваются ядра с большим избытком нейтронов) дают представление об их структуре. До недавнего времени эта информация для легких ядер, даже не сильно удаленных от линии стабильности, была достаточно скудной. Сам факт существования возбужденных состояний в некоторых из них вообще не был установлен. Например, для ядерно-стабильных изотопов ^8He , ^{11}Li ,

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

^{14}Be , ^{15}B и ядерно-нестабильных – ^{10}He , ^{10}Li , ^{13}Be , ^{16}B , информация о наличии возбужденных состояний, обнаруженных в опытах, является в большинстве совершенно новой. Отметим, что экспериментальные данные об уровнях ядер позволяет определить последовательность заполнения ядерных оболочек, наличие коллективных возбуждений (например, мягкой дипольной моды), тип распада и т.д., и тем самым проверить применимость той или иной теоретической модели для предсказания свойств более тяжелых ядер.

Актуальность упомянутых выше исследований подтверждает большое количество международных конференций, посвященных исключительно экзотическим ядрам, и целый ряд обзоров по свойствам легких ядер, удаленных от линии стабильности. В настоящее время экспериментальные исследования легчайших ядер ведутся в лабораториях многих стран: в GANIL (Франция), RIKEN (Япония), NSCL-MSU (США), GSI и HMI (Германия), CERN-ISOLDE (Швейцария) и др. Широкая программа исследований в этом направлении проводится также в ЛЯР, ОИЯИ.

Основная цель работы заключалась в синтезе и изучении свойств тяжелых изотопов водорода, гелия, лития, бериллия, бора и углерода, расположенных вблизи границы нейтронной стабильности.

Научная новизна работы:

Получены новые данные для изотопов гелия с массовым числом ≥ 7 . Найдены новые состояния в ядрах ^7He , ^8He и ^9He . Впервые проведено прецизионное измерение массы и обнаружены возбужденные состояния в ^{10}He .

Впервые наблюден возбужденное состояние в ядре ^{14}Be и измерены спектры уровней ядер ^{10}Li , ^{11}Li и ^{13}Be .

Впервые измерен избыток массы ^{16}B . Впервые обнаружены возбужденные состояния в ^{15}B и ^{16}B .

Схемы уровней изотопов бора ^{13}B и ^{14}B , и изотопов углерода ^{15}C , ^{16}C и ^{17}C дополнены новыми данными.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- Более точно определена масса ядра ^{10}He и энергия отделения двух нейтронов. Впервые измерена масса ядра ^{16}B и энергия отделения одного нейтрона. Полученные результаты введены в таблицы масс

ядер [С1]. Подтверждены ранее полученные значения массы ядер ^4H и ^6H .

- Информация о ядрах ^{10}Li и ^{13}Be , полученная в данной работе, может быть использована для теоретических описаний структуры ядер ^{11}Li и ^{14}Be .
- Экспериментальные результаты, полученные для тяжелых изотопов углерода, могут быть полезными при изучении структуры ядер при переходе с *p*-оболочки на *sd*-оболочку.
- Полученная экспериментальная информация необходима для проверки применимости той или иной теоретической модели или для уточнения используемых параметров. Это ведет к более надежному предсказанию свойств еще неизвестных экзотических ядер. Характеристики уровней исследуемых ядер позволяют определить последовательность заполнения ядерных оболочек, их тип распада и др.
- Данные о свойствах ядер легчайших элементов с предельным избытком нейтронов могут быть использованы в других областях физики, например в описании процессов нуклеосинтеза, состава нейтронных звезд и др.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Измерения масс ядер ^4H , ^6H , ^{10}He и ^{16}B .
2. Спектроскопические исследования нейтроноизбыточных изотопов легчайших элементов с $1 \leq Z \leq 6$:
 - а) новые ядерные уровни в изотопах ^7He , ^8He , ^9He , ^{10}He ;
 - б) новые ядерные уровни в связанных ядрах ^{11}Li и ^{14}Be ;
 - в) новые ядерные уровни в несвязанных ядрах ^{10}Li и ^{13}Be ;
 - г) новые ядерные уровни в изотопах ^{13}B , ^{14}B , ^{15}B и ^{16}B ;
 - д) новые ядерные уровни в изотопах ^{15}C , ^{16}C и ^{17}C .

Апробация работы: Материалы диссертации опубликованы в российских и международных журналах – Ядерная Физика, ЭЧАЯ, Nuclear Physics A, Zeitschrift fuer Physik, Physics Letters B, Il Nuovo Cimento, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Progress in Particle and Nuclear Physics, European Physical Journal A, Physical Review C, Journal of Physics G, а также в препринтах ОИЯИ. По теме диссертации соискателем опубликованы три обзора в ЭЧАЯ.

Результаты докладывались на семинарах ЛЯР (ОИЯИ) и Института им. Гана-Майтнер (г. Берлин, Германия), а также на международных совещаниях и конференциях: на Международных школах-семинарах по физике тяжелых ионов (Дубна, 1993, 1997, 2002 гг.), на Совещании по мультинейтронным системам (Дубна, 1989 г.), на Международных конференциях по экзотическим ядрам (Форос-1991 и EXON-2002), на 15-ой и 16-ой Международных конференциях Отделения по ядерной физике ЕФО – “Ядерная динамика при низких энергиях” LEND-95 (г. Санкт Петербург, 1995 г.) и “Структура ядер при экстремальных условиях” SNEC-98 (Падуя, 1998 г.), на Международной конференции по физике нестабильных ядер (Вьетнам, 2002 г.), на Международной конференции по ядро-ядерным столкновениям NN2003 (Москва, 2003 г.), на Международной конференции NUSTAR (Англия, 2005), на Совещании “Ядерная физика и общество” (г. Пловдив, Болгария, 2007 г.) и др.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения. Она содержит 183 страницы и включает 73 рисунка, 29 таблиц и библиографический список литературы из 336 ссылок с 366 наименованиями.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В Введении формулируется цель представленного цикла работ и актуальность этих исследований, кратко изложено содержание диссертации и приведены основные результаты. Большинство этих результатов были получены впервые.

В Первой главе рассмотрены экспериментальные возможности синтеза и изучения свойств ядер с большим избытком нейтронов. Рассмотрены различные реакции синтеза ядер, обладающих большим избытком нейтронов: реакции фрагментации, глубоко неупругих передач, с эмиссией легких заряженных частиц, зарядово-обменные реакции, реакции передачи нескольких нуклонов. Обоснован выбор метода недостающих масс, используемого в настоящей работе. Делается вывод, что наиболее эффективными для измерения масс и спектроскопии экзотических легких ядер являются реакции, в которых энергетический спектр исследуемого ядра определяется из величины Q реакции, приводящей к образованию двух ядер в выходном канале. Подобный подход является основным в случае изучения ядер или

ядерных состояний, которые нестабильны по отношению к испусканию нуклонов. Данный метод использовался в настоящей работе.

Во второй главе описана постановка экспериментов выполненных на циклотронах У300 и У400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ с пучком ионов ^{11}B , а также на ускорительном комплексе Лаборатории ISL (ранее VICKSI) в Институте им. “Гана-Майтнер” (НМИ) в Берлине на пучках ионов $^{12,13,14}\text{C}$, $^{14,15}\text{N}$ и ^{16}O . Представлены схемы опытов с использованием магнитных спектрометров МСП-144 (в Дубне) и Q3D (в Берлине). Описаны методы обработки и анализа данных. Используемая методика позволяла надежно идентифицировать изучаемые ядра, образующиеся с малым сечением (до нескольких нб/ср) на фоне большого количества побочных продуктов реакции.

Глава третья содержит результаты экспериментов, относящихся непосредственно к свойствам тяжелых изотопов водорода $^{4,5,6}\text{H}$, полученных в реакциях с ионами ^{11}B на мишени из ^9Be при энергии 88 МэВ. Энергетические спектры сопряженных ядер – $^{16,14}\text{O}$ показаны на рис. 1. В спектре ядер ^{16}O наблюдаются два пика, соответствующие резонансам в ядре ^4H . Низколежащее состояние указывает на то, что основное состояние ^4H не связано на 3.5 ± 0.5 МэВ. Из анализа спектра ^{14}O была определена масса ^6H . Пик, расположенному при энергии $E(^{14}\text{O}) \approx 53$ МэВ соответствует состояние ядерно-нестабильного ядра ^6H , отстоящее на 2.6 ± 0.5 МэВ от порога развала $^6\text{H} \rightarrow ^3\text{H} + n + n + n$.

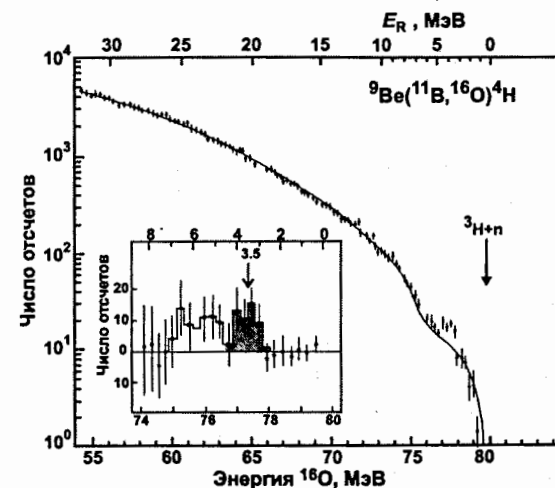
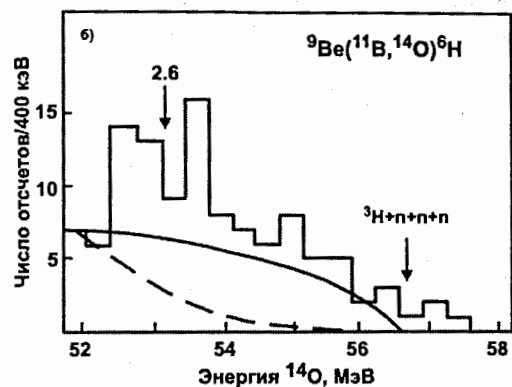


Рис. 1. Энергетические спектры ядер ^{16}O (а) и ^{14}O (б), полученные в реакциях $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{16,14}\text{O})^4\text{H}$. Указаны пороги развала ядер ^4H и ^6H на $^3\text{H}+n$ и $^3\text{H}+n+n+n$, соответственно.

а) Сплошная линия – сумма вкладов выходных каналов: $^{16}\text{O}+^3\text{H}+n$, $^{16}\text{O}+^2\text{H}+n+n$ и $^{16}\text{O}+^1\text{H}+n+n+n$. Разница между экспериментальным спектром и сплошной линией показана на вставке в рисунок.



б) Пунктир соответствует фазовому пространству 5 частиц: $^{14}\text{O} + ^3\text{H} + n + n + n$. Сплошная кривая – фазовое пространство трех-частиц $^{14}\text{O} + ^3\text{H} + n$.

Отметим, что это значение подтверждает результат ранее полученный другими авторами. В реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{14}\text{O})^6\text{H}$ изотоп ^5H не наблюдался.

Четвертая глава посвящена изучению структуры тяжелых изотопов гелия и содержит новую информацию об изотопах гелия с массовым числом $A \geq 7$. Из них, изотоп ^8He ($N/Z = 3$) – самый нейтроноизбыточный стабильный по отношению к испусканию нейтронов изотоп, когда-либо наблюдавшийся в эксперименте. Поиск другого четно-четного ядерно-стабильного изотопа ^{10}He предпринимался в течение многих лет.

Изотоп ^7He исследовался в трех экспериментах с использованием реакции подхвата двух протонов с ядра мишени $^9\text{Be}(^{15}\text{N}, ^{17}\text{F})^7\text{He}$ при различных энергиях пучка бомбардирующих ионов. На рис. 2 представлены спектры энергии возбуждения ^7He при энергиях ионов ^{15}N 240 и 318.5 МэВ. Видно, что с большой интенсивностью заселяется резонанс ^7He с характеристиками, согласующимися с известными литературными данными. В области энергии возбуждения $E^* \approx 3.0$ МэВ был обнаружен пик, который интерпретировался как состояние в ядре отдачи ^7He . Лучшее описание всего спектра ядер ^{17}F может быть достигнуто, если ввести в рассмотрение еще один уровень, при $E^* \approx 5.8$ МэВ. Интенсивность наблюдаемых пиков, соответствующих возбужденным состояниям ^7He невелика, так как в используемой реакции они могут заселяться лишь во вторичных процессах. Тем не менее, полученные данные убедительно свидетельствуют о наличии первого возбужденного состояния ^7He при $E^* \approx 3.0$ МэВ. Этот результат, а также другое состояние, при $E^* \approx 5.8$ МэВ, были позже подтверждены другими экспериментальными работами.

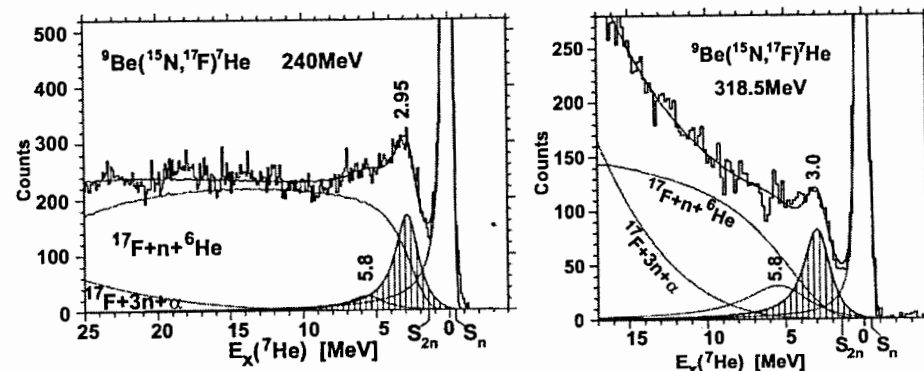


Рис. 2. Спектры ^{17}F из реакции $(^{15}\text{N}, ^{17}\text{F})$ с резонансами в сопряженном ядре ^7He . Показаны фоновые спектры от распада высоковозбужденного ядра $^{18}\text{F}^*$ и от канала реакции $^{17}\text{F} + 3n + \alpha$.

До проведения настоящих исследований был известен лишь один статистически достоверный результат для возбужденного состояния ядра ^8He . На рис. 3 представлены данные, полученные для возбужденных уровней ^8He в реакции захвата двух протонов $^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{14}\text{O})^8\text{He}$ при энергии 357 МэВ. В этой реакции с большим сечением заселяется основное состояние. При анализе полученных спектров использовались известные параметры первого 2^+ возбужденного состояния при 3.6 МэВ. Несмотря на сложность экспериментального спектра, анализ данных, проведенный в разных угловых диапазонах, позволил выявить три новых возбужденных уровня в ^8He при $E^* = 4.54, 6.03$ и 7.16 МэВ. Сравнение полученных данных с результатами других экспериментов и с теоретическими расчетами дает основания полагать, что уровень при $E^* \approx 3.6$ МэВ является самым низким. Это состояние может распадаться преимущественно испусканием двух нейтронов ($^6\text{He} + 2n$). Для уровней, лежащих выше порога развала $^8\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 4n$, наиболее вероятен канал с вылетом кластера, состоящего из четырех нейтронов (тетранейтрона). Однако, пока нет ни теоретических ни экспериментальных данных, свидетельствующих в пользу образования $4n$ -кластера; определенно, этот экзотический вид распада требует дальнейшего изучения.

В 1981 г., в реакции двойной перезарядки $^9\text{Be}(\pi^-, \pi^+)^9\text{He}$, была измерена масса ядра ^9He и показано, что это ядро более стабильно, чем считалось ранее [C2]. В настоящей работе ^9He изучался в реакции

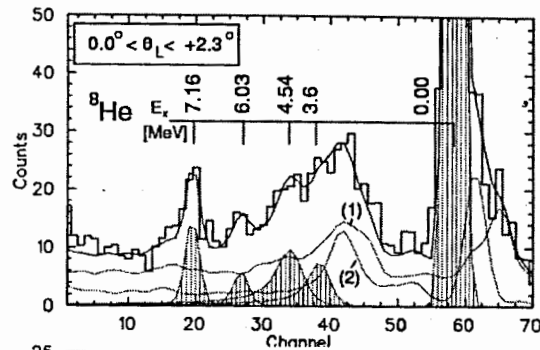
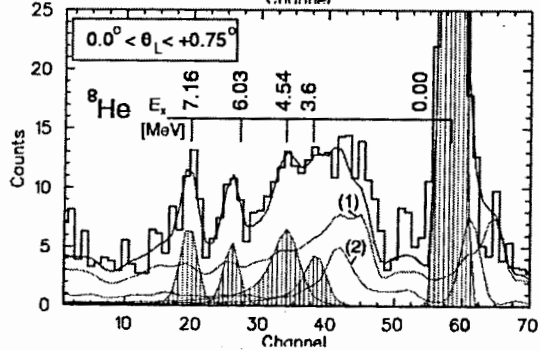


Рис. 3.
Энергетические спектры ядра ^8He , полученные в реакции $^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{14}\text{O})$ при энергии 357 МэВ в интервалах углов:

(а) $0^\circ < \theta_{\text{лаб}} < 2.3^\circ$;

(б) $0^\circ < \theta_{\text{лаб}} < 0.75^\circ$.



На рисунках показан вклад от реакций на примесях ^{16}O (1) и ^{12}C (2). Заштрихованные пики (полученные после вычета фона) соответствуют уровням ^8He : их энергии (в МэВ) указаны на шкале E^* . Сплошная кривая — сумма пиков, (1) и (2).

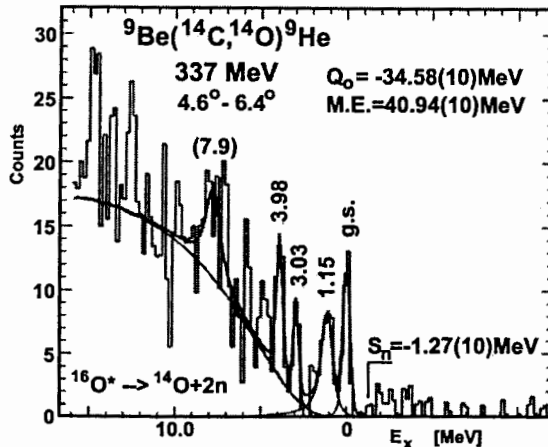


Рис. 4. Спектр энергии возбуждения ядра ^9He , полученный в реакции $^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^9\text{He}$ при энергии пучка 337 МэВ. Указаны основное состояние g.s. и энергии возбуждения, а также порог испускания одного нейтрона S_n и фон от распада $^{16}\text{O}^*$.

$^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^9\text{He}$ при энергии пучка ионов ^{14}C 337 МэВ. Результат представлен на рис. 4. Определенная нами масса ^9He оказалась равной $M.E. = 40.94(10)$ МэВ, а энергия отделения последнего нейтрона в ^9He $S_n = -1.27(10)$ МэВ. В области континуума, связанного с распадом

высоковозбужденного ядра $^{16}\text{O}^*$, которое образуется на первом этапе реакции, наблюдалось еще как минимум четыре пика при энергиях возбуждения 1.15, 3.03, 3.98 МэВ и ~ 7.9 МэВ.

Поиск сверхтяжелого изотопа гелия ^{10}He имеет почти 40-летнюю историю. Интерес к этому ядру сильно возрос после работы *К. Сета* по ^9He [C2], из которой следовало предположение о повышенной связи соседнего ядра — ^{10}He . Попытки обнаружить ^{10}He , стабильного к испусканию нейтрона, были предприняты нами в 1982 г. в ЛЯР ОИЯИ в реакции $^{232}\text{Th} + ^{11}\text{B}$ (89 МэВ) [C3]. Была получена лишь верхняя граница сечения его образования на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-34}$ см²/ср. Столь низкое сечение (по сравнению с сечениями образования более легких изотопов гелия) свидетельствовало о нестабильности ядра.

Постановка последующих двух экспериментов предполагала нестабильность ядра ^{10}He . Резонанс, соответствующий, как предполагалось, возбуждению основного состояния ядра ^{10}He был наблюден практически одновременно в работе *Коршенинникова и др.* [C4] и в наших экспериментах. Мы исследовали ядро ^{10}He в реакции двойной перезарядки $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$ при энергии пучка ионов ^{14}C 334.4 МэВ. На рис. 5 представлены спектры, измеренные в двух разных угловых диапазонах. В нашем эксперименте масса ^{10}He была измерена с более высокой точностью, $M.E. = 48.81(7)$ МэВ, и определена энергия отделения двух нейтронов равной $S_{2n} = -1.07(7)$ МэВ, а также впервые наблюдаются возбужденные состояния при $E^* = 3.24$ и 6.80 МэВ. Полученные значения $M.E.$ и S_{2n} вошли в систематику масс ядер [C1].

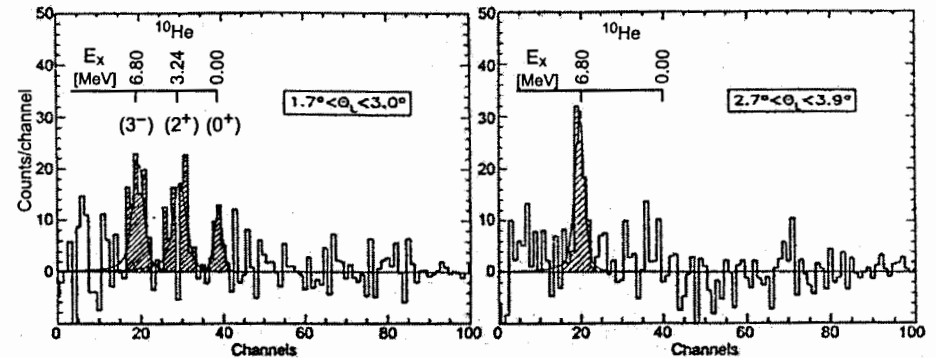


Рис. 5. Спектры реакции $(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})$ с мишенью ^{10}BeO в угловых диапазонах, указанных на рисунке, после вычета фона от реакций на примесях ^{16}O и ^{12}C в мишени. Показана шкала по энергии возбуждения E^* .

Полученные в эксперименте значения энергий возбужденных состояний ^{10}He вместе с определенными для них спинами и четностями могут служить основанием для некоторых выводов по поводу оболочечной структуры ^{10}He , и надежности предсказаний оболочечной модели вблизи границ нуклонной стабильности. На основании сравнительно низкого значения энергии возбуждения 2^+ -состояния можно было предположить, что замкнутая оболочка не появляется при числе нейтронов $N = 8$.

В Таблице 1 представлены основные результаты по изотопам гелия, полученные в настоящей работе. Многие из перечисленных возбужденных состояний изотопов $^{7,8,9,10}\text{He}$ были наблюдаемы нами впервые. Они учтены и включены в новых таблицах состояний ядер [C5,C6].

Таблица 1. Результаты измерений уровней изотопов гелия, полученных в указанных реакциях при различных энергиях пучка бомбардирующих ионов E . Столбцы: E^* – энергия возбуждения (МэВ), E_R – резонансная энергия (МэВ), Γ – ширина резонансов (МэВ), J^π – возможные значения спина и четности уровней.

Реакция	E	E^*	E_R	Γ	J^π
$^9\text{Be}(^{15}\text{N}, ^{17}\text{F})^7\text{He}$	240	0.00	0.44	0.14(2)	$3/2^-$
		2.95(10)	3.39(10)	1.9(2)	$(1/2^-, 5/2^-)$
	318.5	5.8(3)	6.2(3)	3–5	
		2.9–3.0	3.34–3.44	1.8(3)	$(1/2^-, 5/2^-)$
$^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{14}\text{O})^8\text{He}$	357	0			
		3.6		0.5	2^+
		4.54(15)		0.70(25)	
		6.03(10)		0.15(15)	(2^-)
$^9\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^9\text{He}$	337	0.00	1.27(10)	0.10(6)	$1/2^-$
		1.15(10)	3.42	0.7(2)	$(3/2^-)$
		3.03(10)	4.30	0.6(3)	$(5/2^+)$
		3.98(12)	5.25		$(5/2^+)$
		~7.9	9.17		
$^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$	334.4	0.00	1.07(7)	0.3(2)	(0^+)
		3.24(20)	4.31(20)	1.0(3)	(2^+)
		6.80(7)	7.87(6)	0.6(3)	(3^-)

Глава пятая посвящена спектроскопии ядер ^{10}Li и ^{11}Li .

Данные о структуре ядра ^{10}Li были получены нами в реакциях передачи нуклонов: $^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$, $^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$, $^{13}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})^{10}\text{Li}$ и $^9\text{Be}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{O})^{10}\text{Li}$. Спектры для первой и второй реакции показаны на рис. 6. Выбор различных реакций был обусловлен тем, что они с разной вероятностью заселяют различные уровни. Низколежащие состояния ^{10}Li можно ожидать в виде двух дублетов ($1^+ / 2^+$) и ($2^- / 1^-$) из конфигураций $[\pi 1p3/2 \otimes \nu 1p1/2]$ и $[\pi 1p3/2 \otimes \nu 2s1/2]$. В реакции $^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$ наиболее вероятно заселение состояний со спином и четностью $J^\pi = 1^+, 2^-, 3^+, 4^-$ и т.д., в то время как в реакции $^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$ возможно заселение уровней с $J^\pi = 2^+, 1^-$ и т.д.

Из измеренных спектров следует, что наиболее низкий резонанс ^{10}Li отстоит от порога развала $^{10}\text{Li} \rightarrow ^9\text{Li} + n$ на 0.24 МэВ. Соответственно $Q = -38.00$ МэВ. Тогда масса ^{10}Li равняется $M.E. = 33.264$ МэВ. Принимая этот резонанс за основное состояние, ему было

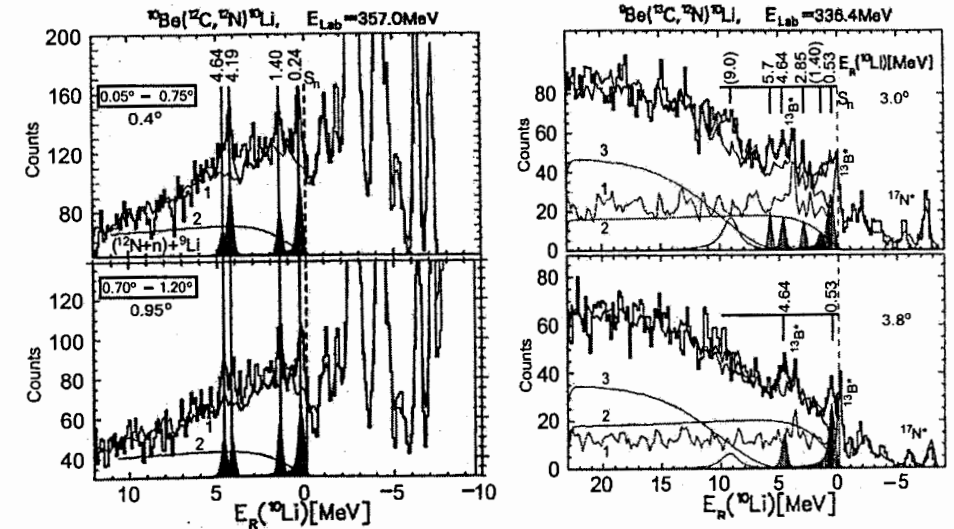


Рис. 6. Спектры ^{12}N для разных углов измерения как функция резонансной энергии E_R в ядре ^{10}Li : из реакции $^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$ при энергии пучка 357 МэВ для двух интервалов углов. Кривая 1 – сумма вкладов от реакций на примесях в мишени и от распада $^{13}\text{N}^*$ (кривая 2); и из реакции $^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$ при энергии пучка 336.4 МэВ. Через 1 обозначен вклад реакций на примесях в мишени, 2 и 3 – вклады от распада $^{13}\text{N}^*$ и $^{14}\text{N}^*$. События соответствующие уровням ^{10}Li вынесены на ось E_R в виде заштрихованных пиков. S_n – порог развала $^{10}\text{Li} \rightarrow ^9\text{Li} + n$.

приписано значение $J^\pi = 1^+$ из $[\pi 1p3/2 \otimes \nu 1p1/2]$ -конфигурации. Следующий резонанс находится при 0.54 МэВ, он был интерпретирован как состояние 2^+ из дублета ($1^+ / 2^+$). В результате наших измерений было идентифицировано 9 ранее неизвестных уровней в ядре ^{10}Li (Таблица 2). При их идентификации мы руководствовались селективностью выбранных реакций и некоторой аналогией с заселением уровней ядер ^{12}B и ^{16}N , получаемых в реакции ($^{12}\text{C}, ^{12}\text{N}$).

Два резонанса при $E_R = 2.35(10)$ МэВ с $\Gamma = 1.2(4)$ МэВ и $E_R = 2.85(7)$ МэВ с $\Gamma = 0.3(2)$ МэВ, отнесенные нами к изотопу ^{10}Li , перекрывают порог распада на $[^9\text{Li}^*(2.69 \text{ МэВ}) + n]$. По всей вероятности они соответствуют связи валентного нейтрона ^{10}Li с ядром кора ^9Li , когда последнее находится в возбужденном состоянии с $E^* = 2.69$ МэВ.

Таблица 2. Экспериментальные данные, полученные для ядра ^{10}Li в реакциях $^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$ и $^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$.

Реакция	E_R , МэВ	Γ , МэВ	Идентификация
$^9\text{Be}(^{13}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$	0.24 ± 0.04	0.10 ± 0.7	<i>g.s.</i> , $p1/2$, 1^+
$^{10}\text{Be}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{N})^{10}\text{Li}$	0.53 ± 0.06	0.35 ± 0.08	$p1/2$, 2^+
	1.40 ± 0.08	0.20 ± 0.07	$d5/2$, ($2^- + 1^-$)
	2.35 ± 0.10	1.2 ± 0.4	$p3/2$, (1^+ , 3^+)
	2.85 ± 0.07	0.3 ± 0.2	(1^- , 2^+)
	4.19 ± 0.10	0.12 ± 0.08	
	4.64 ± 0.10	0.2 ± 0.1	(3^- , 2^+)
	5.7 ± 0.1	0.2 ± 0.1	
	(9.0)		

Вывод о том, что состояния ^{10}Li при энергиях 0.24 и 0.53 МэВ могут интерпретироваться как имеющие *p*-конфигурацию был позднее подтвержден в работах других авторов.

До начала проводимых нами исследований ^{11}Li был известен лишь один возбужденный уровень этого ядра при $E^* = 1-1.2$ МэВ.

Для поиска других возбужденных состояний ^{11}Li мы использовали реакции передачи $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{13}\text{N})^{11}\text{Li}$ и $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})^{11}\text{Li}$ при энергии пучка около 24 МэВ/А. Полученные в этих реакциях спектры ядер ^{13}N и ^{17}F показаны на рис. 7. В реакции подхвата трех протонов $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})^{11}\text{Li}$ основное состояние ^{11}Li заселяется с наибольшей вероятностью. В этих экспериментах впервые обнаружены состояния

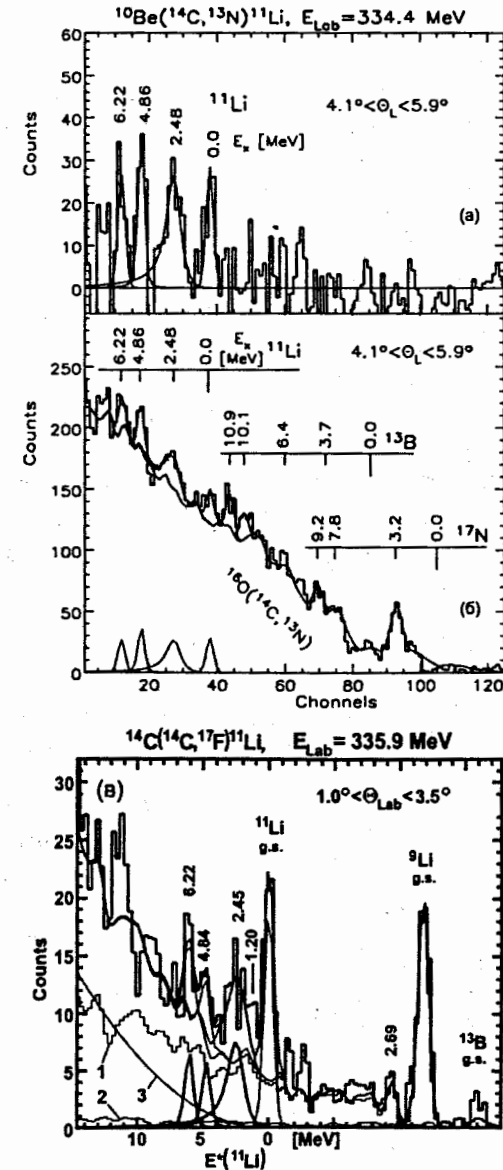


Рис. 7. а) Спектр ^{13}N в реакции $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{13}\text{N})^{11}\text{Li}$ при 334.4 МэВ после вычета из полного спектра (б) вклада от фоновых реакций. в) Спектр ^{17}F в реакции $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})^{11}\text{Li}$ при 335.9 МэВ. Указаны значения энергии уровней ^{11}Li , а также энергии состояний ядер ^{13}B и ^{17}N (б) и ^{13}B и ^9Li (в), образующихся в реакциях на примесях в мишенях.

при $E^* \approx 2.48, 4.86, 6.22$ и (с меньшей вероятностью) 11.0 МэВ. В области ранее известного уровня с $E^* \sim 1.2$ МэВ в спектре реакции $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})^{11}\text{Li}$ наблюдается некоторое количество событий, однако малая статистика не позволяет сделать окончательный вывод. Необходимо отметить, что впервые наблюдаемые нами состояния были воспроизведены также в опытах других авторов.

Шестая глава посвящена экспериментам по уточнению массы ^{13}Be и по поиску возбужденных состояний в изотопах ^{13}Be и ^{14}Be . Любой расчет структуры ядра ^{14}Be требует точного знания структуры ядра ^{13}Be . До наших экспериментов масса изотопа ^{13}Be была известна с точностью 0.5 МэВ – он считался нестабильным по отношению к распаду $^{13}\text{Be} \rightarrow ^{12}\text{Be} + n$ на 1.9 ± 0.5 МэВ.

Более точное измерение спектра ^{13}Be было проведено нами в реакции $^{13}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{13}\text{Be}$ при энергии пучка 337 МэВ. Спектр энергии возбуждения ядра ^{13}Be , измеренный в угловом диапазоне $3.3^\circ - 6.7^\circ$ представлен на рис. 8.

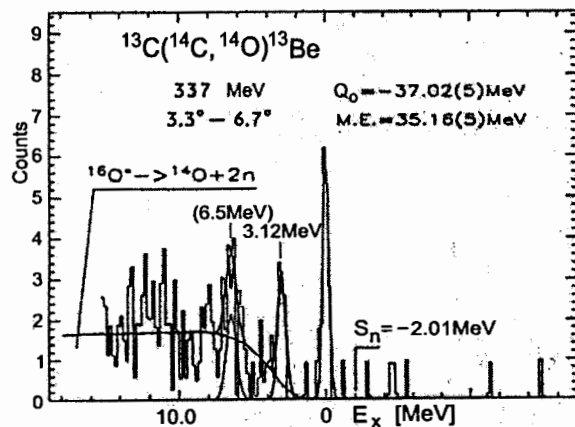


Рис. 8. Спектр энергии возбуждения ядра ^{13}Be в реакции $^{13}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{13}\text{Be}$ при энергии пучка 337 МэВ, измеренный в угловом диапазоне $3.3^\circ - 6.7^\circ$. Сплошная кривая – вклад от распада высоко-возбужденного ядра $^{16}\text{O}^*$. Символом S_n обозначен порог развала ($^{12}\text{Be} + n$).

Первому пику расположенному слева от порога развала $^{13}\text{Be} \rightarrow ^{12}\text{Be} + n$ соответствует избыток массы $M.E. = 35.16(5)$ МэВ, т.е. этот резонанс отстоит от порога на $2.01(5)$ МэВ. Его ширина составляет $0.3(2)$ МэВ. Если это состояние является основным, то ^{13}Be несвязан по отношению к испусканию одного нейтрона на 2.01 МэВ. Два других резонанса находятся на $3.12(7)$ МэВ и на $6.5(2)$ МэВ выше первого. Их ширины соответственно $\Gamma = 0.4(2)$ и $0.9(3)$ МэВ.

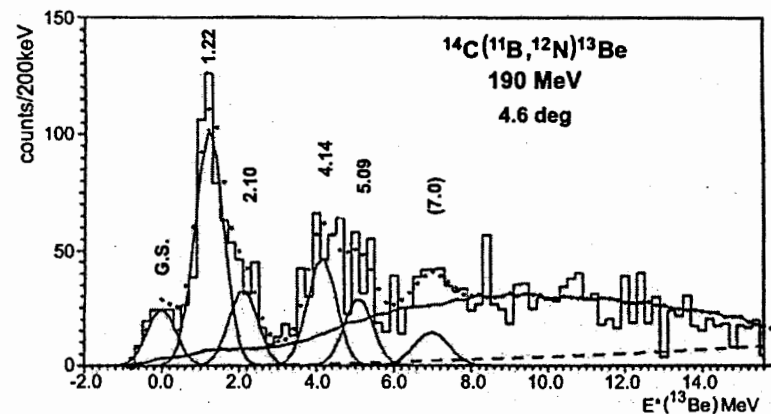


Рис. 9. Спектр энергии возбуждения ядра ^{13}Be в реакции $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{N})^{13}\text{Be}$ при энергии пучка 190 МэВ. Гистограмма – экспериментальный спектр, сплошная кривая – сумма вкладов от 3х-частичного процесса $^{12}\text{N}+^{12}\text{Be}+n$ и последовательного распада возбужденного ядра $^{13}\text{N}^* \rightarrow ^{12}\text{N}+n$, пунктир – 4х-частичное фазовое пространство $^{12}\text{N}+^{11}\text{Be}+n+n$, точки – сумма всех компонент разложения спектра.

На рис. 9 показан спектр энергии возбуждения ядра ^{13}Be в реакции $^{14}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{N})^{13}\text{Be}$ при энергии пучка 190 МэВ, измеренный под углом 4.6° к направлению пучка ионов. Здесь первый резонанс наблюдается ниже, чем в предыдущей реакции. Ему соответствует масса $M.E. = 33.95(9)$ МэВ. Этот резонанс был идентифицирован как основное состояние ^{13}Be с энергией распада $0.80(9)$ МэВ. В спектре наблюдалось еще несколько пиков, которые интерпретируются как возбужденные состояния в ^{13}Be с энергиями $1.22(10)$, $2.10(16)$, $4.14(12)$, $5.09(14)$ и $7.0(2)$ МэВ.

Наблюдаемый в наших опытах уровень при ~ 2 МэВ выше порога развала $^{13}\text{Be} \rightarrow ^{12}\text{Be} + n$ обнаружен во всех других известных экспериментах. В пределах погрешностей измерений, позже были подтверждены также резонансы, отстоящие по энергии над порогом примерно на 3 МэВ и 5 МэВ. Ситуация с уровнями, расположенными в области энергий ниже 2 МэВ, неоднозначна. В двух более поздних экспериментах резонансы при около 0.7 МэВ были приняты за основное состояние (это согласуется с нашей работой), другие авторы предполагают, что основное состояние лежит ниже 200 кэВ. Расчеты для ширины и энергии резонанса при ~ 2 МэВ, а также сравнительный анализ с ядром ^{11}Be позволили нам приписать ему спин/четность

$J^\pi = 5/2^+$. По аналогии с ^{11}Be , состоянию 0.8 МэВ можно было бы приписать спин $J = 1/2$, но тогда вопрос о четности этого уровня оставался открытым. Резонанс при ~ 5 МэВ возможно построен на 2^+ -возбужденном состоянии кора ^{12}Be и также является $5/2^+$ -уровнем.

Не развивая этот анализ более детально (это сделано в диссертации) можно прийти к заключению о том, что пока из всей совокупности данных трудно сделать определенные выводы о характеристиках, как основного, так и возбужденных состояний ^{13}Be . Очевидно, это ядро должно явиться предметом дальнейших детальных исследований, особенно актуальных при изучении структуры соседнего изотопа – ^{14}Be .

Экспериментальные исследования структуры ядра ^{14}Be весьма ограничены. До проведения нашего эксперимента не было данных о возбужденных состояниях в этом ядре. Ядро ^{14}Be исследовалось нами в реакции $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{14}\text{Be}$ при энергии ионов ^{14}C 335.9 МэВ (рис. 10). Основное состояние ^{14}Be в этой реакции не наблюдалось. Кроме линий на примесях ^{12}C и ^{16}O в мишени, в спектре регистрируемого ядра ^{14}O был наблюден узкий пик, которому соответствовал избыток массы $M.E. = 41.47(6)$ МэВ. Этот пик был интерпретирован как новое возбужденное состояние ^{14}Be . С учетом того, что $M.E.(^{14}\text{Be}) = 39.88(11)$ МэВ [С7], энергия возбуждения уровня оказалась равной

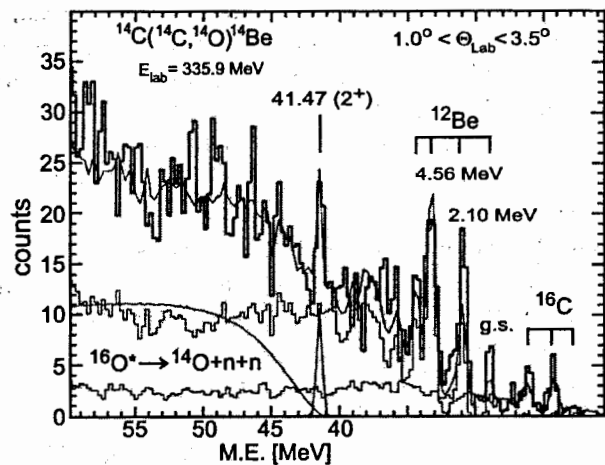


Рис. 10. Спектр энергии возбуждения ^{14}Be из реакции $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{14}\text{Be}$ при энергии пучка 335.9 МэВ в угловом диапазоне $1.0^\circ < \theta_{\text{лаб}} < 3.5^\circ$. Указаны вклады от примесей ^{12}C и ^{16}O , а также от распада высоковозбужденного $^{16}\text{O}^*$.

$E^* = 1.59(13)$ МэВ, т.е. он нестабилен по отношению к распаду $^{14}\text{Be}^* \rightarrow ^{12}\text{Be} + 2n$ на 0.25(6) МэВ (с учетом новых таблиц масс с 2003 г. [С1], где принято значение $M.E.(^{14}\text{Be}) = 39.95(13)$ МэВ, энергия возбуждения $E^* = 1.52$ МэВ). Ширина уровня составляет $\Gamma \leq 100$ кэВ.

По аналогии с первым возбужденным 2^+ -уровнем 1.77 МэВ в ^{16}C ($Z = 6, N = 10$), новое состояние в ядре ^{14}Be при $E^* = 1.59$ МэВ имеет спин и четность 2^+ с конфигурацией $(d5/2)^2$. Подобная идентификация данного уровня основывается также на расчетах других авторов, где для первого возбужденного уровня было получено $J^\pi = 2^+$ и предсказано значение $E^* \approx 1.80\text{--}2.0$ МэВ, в хорошем согласии с нашим экспериментом.

В заключение, объединяя результаты наших измерений с экспериментальными данными более поздних работ предлагаются схемы уровней изотопов ^{13}Be и ^{14}Be (рис. 11), отсчитанные от основного состояния ядра ^{12}Be .

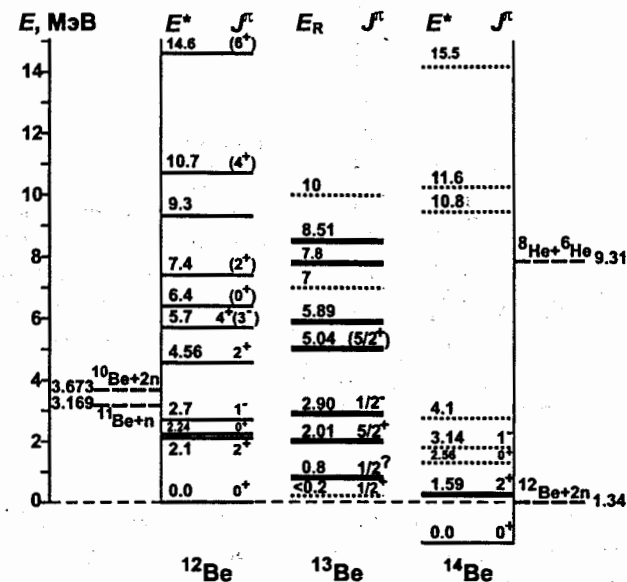


Рис. 11. Схемы уровней ^{12}Be , ^{13}Be и ^{14}Be отнесены к $^{12}\text{Be}(g.s.)$. E^* = энергии возбуждения (МэВ) ^{12}Be и ^{14}Be ; E_R = энергии резонансов ^{13}Be (МэВ). Пунктиры – пороги эмиссии одного и двух нейтронов, и $^8\text{He}+^6\text{He}$. Черные линии: тонкие – данные из литературы; жирные – впервые обнаруженные нами резонансы (0.8, 2.01, 2.90, 5.04 и 1.59 МэВ – были позже подтверждены в других работах), точки – данные других авторов.

В седьмой главе приводятся полученные нами новые результаты для массы ядра ^{16}B и для возбужденных состояний ^{13}B , ^{14}B , ^{15}B и ^{16}B . К началу наших измерений данные о структуре тяжелых ($A \geq 14$) изотопов бора были весьма ограничены.

Для получения ^{13}B мы использовали четыре реакции: $^{16}\text{O}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})$, $^{12}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{13}\text{N})$, $^{12}\text{C}(^{13}\text{C}, ^{12}\text{N})$ и $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{O})$. В указанных реакциях конечные состояния в ядре ^{13}B заселяются с разной вероятностью.

В реакции подхвата трех протонов $^{16}\text{O}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})$ наиболее интенсивно происходит заселение основного состояния ^{13}B . В спектре мы наблюдали всего еще два пика, соответствующие энергиям возбуждения 4.83 МэВ и 6.90 МэВ, они примерно в 2-3 раза менее интенсивные, чем основное состояние (рис. 12).

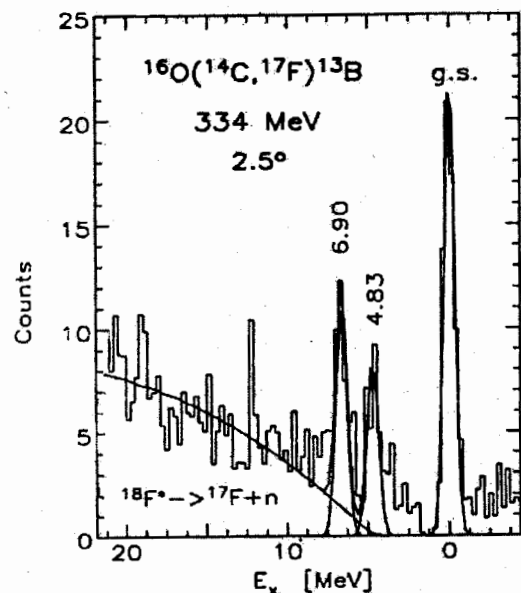


Рис. 12. Спектр энергий возбуждения ^{13}B в реакции $^{16}\text{O}(^{14}\text{C}, ^{17}\text{F})^{13}\text{B}$ при энергии пучка 334.4 МэВ и угле $\theta_{\text{лаб}} = 2.5^\circ$ (угловой захват $1.0^\circ - 4.3^\circ$). Кривая – вклад от распада высоковозбужденного ядра $^{18}\text{F}^* \rightarrow ^{17}\text{F} + n$.

В остальных реакциях в ядре ^{13}B заселяется много возбужденных состояний. Тем не менее, уровни при ≈ 4.8 МэВ и 6.9 МэВ, которые были хорошо видны в предыдущей реакции, здесь проявляются очень слабо. Основное состояние также слабо заселяется. В качестве примера на рис. 13 показаны спектры энергии возбуждения ^{13}B в реакции $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{O})^{13}\text{B}$ во всем измеряемом угловом диапазоне (а) и в угловых интервалах $2.0^\circ - 3.4^\circ$ (б) и $3.4^\circ - 5.4^\circ$ (в). Фон в этой реакции обусловлен распадом возбужденного $^{15}\text{O}^*$, образованного вместе с ^{12}B на первой

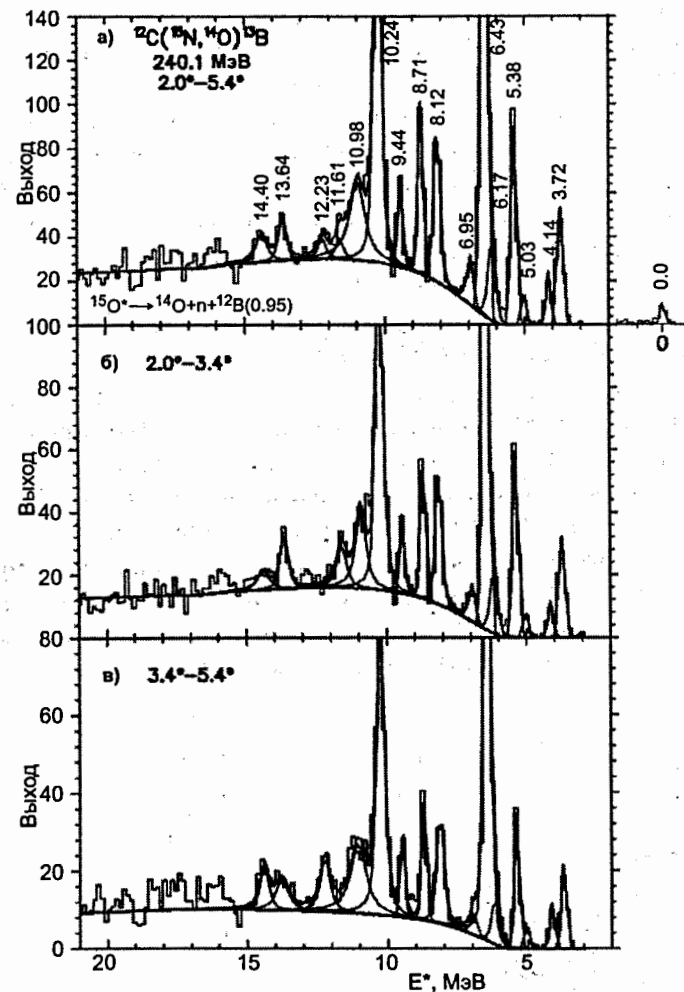


Рис. 13. Спектры энергии озбуждения ^{13}B , измеренные в различных угловых диапазонах в реакции $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{O})^{13}\text{B}$ при энергии пучка 240.1 МэВ. Распределение от распада $^{15}\text{O}^*$ показано сплошной широкой кривой. Оставшиеся над этим распределением пики соответствуют состояниям в ^{13}B .

стадии взаимодействия в реакции $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{15}\text{O})^{12}\text{B}$ и распадающегося на лету (в основном имеется вклад от 0.95-МэВ возбужденного состояния ^{12}B). Изменение высоты пиков с изменением углового интервала показывает, что соответствующие состояния характеризуются разными угловыми распределениями, что позволяет их разделить и более точно

определить их энергию. В результате анализа этого эксперимента впервые были обнаружены четыре новых уровня в ^{13}B при энергиях возбуждения $E^* = 11.61, 12.23, 13.65$ и 14.39 МэВ; все они выше порога распада через испускание двух нейтронов (8.248 МэВ). Селективность используемых реакций при получении ядра ^{13}B позволила нам впервые определить спин и четность многих из наблюдаемых состояний.

В литературе для ядра ^{14}B были известны уровни лишь до $E^* \approx 4.3$ МэВ. Была наблюдаена также (без идентификации отдельных пиков) широкая структура в области 6.7 МэВ.

Данные о высоковозбужденных состояниях в ядре ^{14}B мы получили в реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{14}\text{B}$ при энергии 334.4 МэВ в измеряемом угловом диапазоне $1.1^\circ < \theta_{\text{лаб}} < 4.5^\circ$. Полученный энергетический спектр показан на рис. 14. Механизм реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{14}\text{B}$ благоприятствует передаче большого углового момента, в связи с чем не наблюдаются низколежащие состояния (< 2 МэВ), в которых участвует $2s_{1/2}$ нечетный нейтрон. Однако при $E^* > 4$ МэВ мы обнаружили несколько узких пиков, а также широкую структуру в районе 6 МэВ которая, возможно, состоит из нескольких пиков. Энергии идентифицированных нами состояний ^{14}B показаны на рис. 14 (справа) в сравнении с данными других авторов.

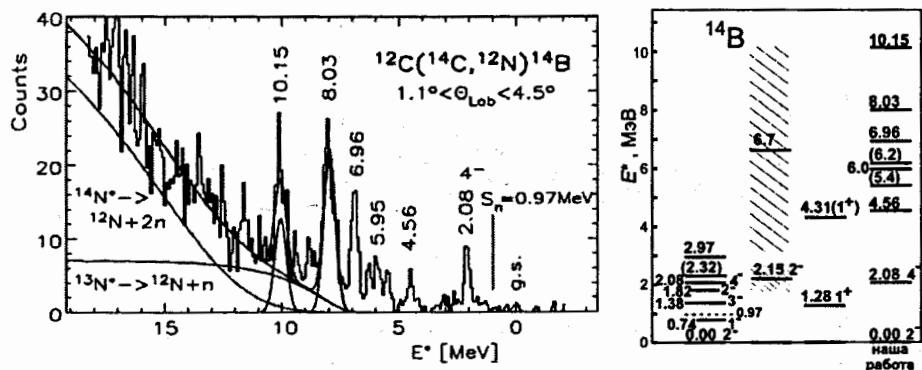


Рис. 14. Спектр энергии возбуждения ядра ^{14}B из реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{14}\text{B}$ при энергии 334.4 МэВ. Показан вклад распадов ядер $^{14}\text{N}^* \rightarrow ^{12}\text{N}+2n$ и $^{13}\text{N}^* \rightarrow ^{12}\text{N}+n$, образованных в реакции $^{12}\text{C}+^{14}\text{C}$ (ядра отдачи ^{12}B и ^{13}B образованы в основном состоянии). Указаны энергии идентифицированных состояний в МэВ. Справа – сравнение наших экспериментальных данных с результатами других работ (первые 3 колонки); позже другими авторами был подтвержден уровень 1.28 МэВ, а также обнаружено состояние при $E^* = 0.655$ МэВ. $S_n(0.97$ МэВ) – порог испускания одного нейтрона из ядра ^{14}B .

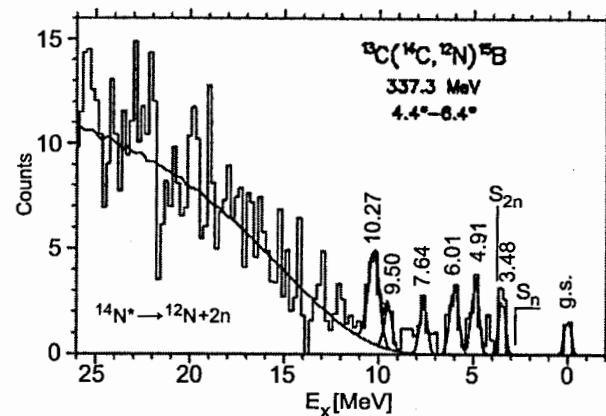


Рис. 15.

Спектр энергии возбуждения ядра ^{15}B из реакции $^{13}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{15}\text{B}$ при энергии 337.3 МэВ. Кривая – вклад от распада высоковозбужденного ядра $^{14}\text{N}^*$ с испусканием двух нейтронов. S_n и S_{2n} – пороги эмиссии одного и двух нейтронов.

Поиск возбужденных состояний ^{15}B (ранее экспериментальных сведений о таких не было) мы провели в реакции $^{13}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{15}\text{B}$ при энергии пучка 337.3 МэВ. Спектр ^{12}N , измеренный в угловом диапазоне $4.4^\circ < \theta_{\text{лаб}} < 6.4^\circ$, показан на рис. 15. Кроме основного состояния, с малым выходом, но практически без фона, мы наблюдали несколько узких пиков, которые соответствуют ранее неизвестным состояниям ^{15}B при $E^* = 3.48, 4.91, 6.01, 7.64, 9.50$ и 10.27 МэВ. Мы не наблюдали ни одного уровня ниже ~ 3.5 МэВ.

Экспериментально определено, что изотоп ^{16}B нестабилен по отношению к распаду $^{16}\text{B} \rightarrow ^{15}\text{B} + n$. Расчеты энергии отделения нейтрона варьируют от -0.164 до -1.0 МэВ.

Масса ^{16}B была впервые измерена нами в реакции $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{16}\text{B}$ при энергии пучка 336 МэВ. Спектр энергий возбуждения ^{16}B в этой реакции оказался достаточно сложным. В области ожидаемого основного состояния наблюдался значительный вклад реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{14}\text{B}$ на примеси изотопа ^{12}C ($\sim 25\%$) в мишени из ^{14}C . На основе представленных выше данных о структуре ядра ^{14}B была проведена точная калибровка для анализа спектра ядра ^{16}B , показанного на рис. 16 (верхний график). Между двумя уровнями ^{14}B с энергиями 8.03 МэВ и 10.15 МэВ найден пик, соответствующий наиболее низко расположенному по энергии состоянию ядра ^{16}B . Его местоположение соответствует значению Q -реакции равным $-48.38(6)$ МэВ, что для массы ^{16}B дает $M.E. = 37.08(6)$ МэВ (это значение введено в таблицы масс [C1]). Из этого следует, что ядро ^{16}B нестабильно по отношению к испусканию нейтрона всего на 40 кэВ. Отметим, что ошибка в определении значения Q выше этого значения. Мы приписали

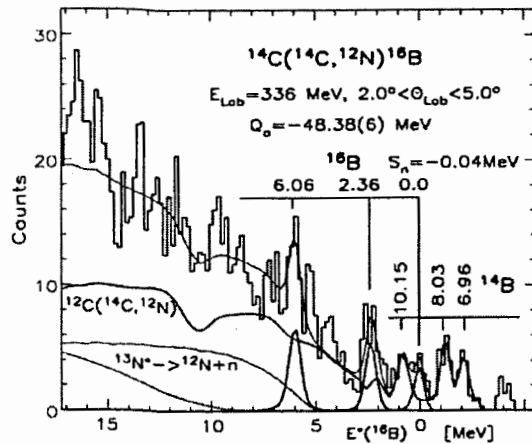
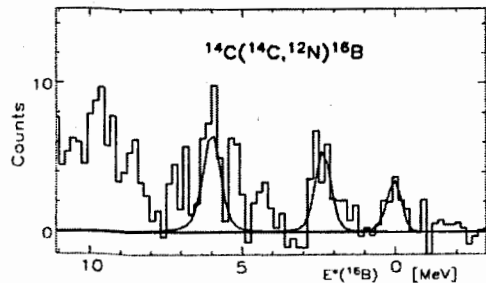


Рис. 16.
 а) Спектр энергий возбуждения ядра ^{16}B , полученного в реакции $^{14}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{16}\text{B}$ при энергии пучка 336 МэВ. Кривыми изображены фон от реакции на примеси ^{12}C и вклад от распада высоковозбужденного ядра $^{13}\text{N}^*$. Энергии возбуждения ядер ^{16}B и ^{14}B показаны на рисунке.



б) Спектр энергий возбуждения ядра ^{16}B (в увеличенном масштабе) после вычета вклада от реакции на примеси ^{12}C .

этот пик основному состоянию ^{16}B . Для ширины резонанса можно определить только верхнюю границу $\Gamma < 100$ кэВ.

В нашем эксперименте были наблюдаемы еще два резонанса ^{16}B при $E^* = 2.36(7)$ МэВ и, с несколько меньшей точностью, при $6.06(8)$ МэВ. На рис. 16 (нижний график) представлен спектр состояний ^{16}B после вычета вклада реакции $^{12}\text{C}(^{14}\text{C}, ^{12}\text{N})^{14}\text{B}$.

Согласно оболочечной модели, последний нечетный протон и последний нечетный нейтрон в ядре ^{16}B занимают соответственно $1p3/2$ - и $1d5/2$ -орбиты и спариваются в $J^\pi = 1^-, 2^-, 3^-$ и 4^- . Используя ряд аргументов и предположений о характере спектров ядер ^{16}B и ^{14}B , мы определили для наиболее низкого резонанса в ядре ^{16}B значение $J^\pi = 4^-$.

Восьмая глава посвящена спектроскопии тяжелых изотопов углерода ^{15}C , ^{16}C и ^{17}C . В ядре ^{15}C ранее были известны уровни лишь до энергии возбуждения $E^* = 11.8$ МэВ, а в ядрах ^{16}C и ^{17}C – состояния с $E^* \leq 6.1$ МэВ и до 3.8 МэВ, соответственно.

Для изучения структуры изотопов ^{15}C , ^{16}C и ^{17}C мы использовали реакцию срыва трех нейтронов с бомбардирующего иона ($^{12}\text{C}, ^9\text{C}$) на мишенях из ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C , соответственно. На рис. 17 представлены спектры энергий возбуждения изотопов ^{14}C , ^{15}C и ^{16}C . Энергии уровней и некоторые возможные значения спина и четности показаны рядом с пиками. В спектрах ^{15}C и ^{16}C не проявляются пики, соответствующие основным состояниям. Это объясняется высокой энергией пучка ионов (15 - 20 МэВ/А) при которой заселение состояний с s -компонентой в реакциях передачи мало вероятно.

В спектре ядра ^{15}C выше энергии ~ 12 МэВ (рис. 17, средний график) мы наблюдали пики при энергиях (усредненных по трем опытам) $E^* = 12.64, 13.1, 13.8, 14.57$ и 16.0 МэВ, а также два более широких распределения при энергиях 17.8 и 19.0 МэВ. Уровни с такими энергиями у ядра ^{15}C не были известны. Идентификация состояний в ядре ^{15}C была получена с привлечением данных о структуре ядра ^{14}C : добавление нейтрона на основное состояние, или на $(1p-1h)$ - и $(2p-2h)$ -конфигурации ядра ^{14}C , приводит к возникновению в ядре ^{15}C состояний типа $(1p-0h)$ и $(2p-1h)$ – они на рис. 17 соединены пунктирной и сплошными линиями. Наиболее интенсивный пик в спектре ^{15}C соответствует состоянию с $E^* = 6.84$ МэВ. Это состояние и состояние при $E^* = 7.39$ МэВ составляют дублет с конфигурацией $2p-1h$ (две частицы – одна дырка). Видно также, что уровень при $E^* = 6.84$ МэВ заселяется с наибольшей вероятностью. Это означает, что он имеет вытянутую конфигурацию (спины участвующих частиц дают максимальный угловой момент). Исходя из этого и учитывая измеренное отношение интенсивностей пиков, мы однозначно определили для состояния с $E^* = 6.84$ МэВ спин/четность $J^\pi = 9/2^-$. Состояние дублета при $E^* = 7.39$ МэВ принимает значение $J^\pi = 7/2^-$.

В ядре ^{16}C , образующегося в реакции $^{13}\text{C}(^{12}\text{C}, ^9\text{C})^{16}\text{C}$, при посадке всех трех нейтронов на (sd) -оболочку ядра мишени ^{13}C проявляются уровни с конфигурацией $3p-1h$. Спектр энергий ядра ^{16}C (рис. 17, нижний график) содержит много пиков, но из известных уровней ^{16}C в этой реакции заселены всего лишь два уровня с энергиями $E^* = 1.77$ и 4.14 МэВ. 14 ранее неизвестных состояний ^{16}C , лежащих выше ~ 7.5 МэВ вплоть до энергий возбуждения 17.4 МэВ, наблюдаемы нами в этом эксперименте впервые. Анализ данных о характеристиках уровней ^{16}C в виде нейтронных частично-дырочных структур был проведен на основе уже известных данных для ядер ^{14}C и ^{15}C . Как показано на рис. 17

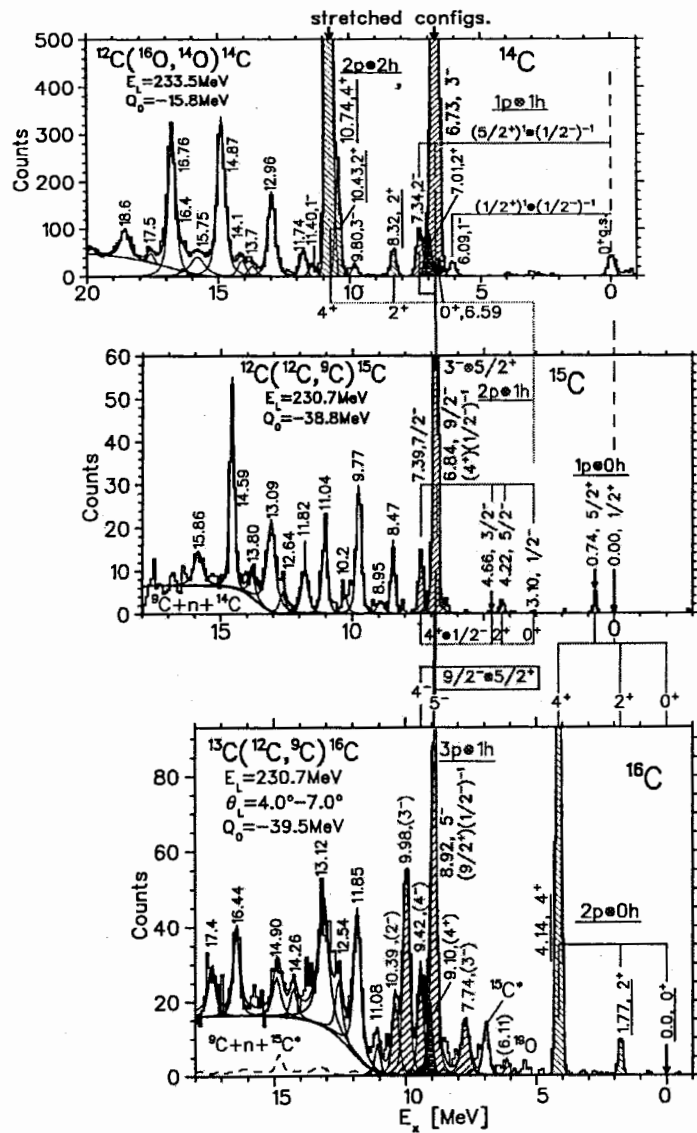


Рис. 17. Спектры энергий возбуждения ядер ^{14}C , ^{15}C и ^{16}C . Вертикальными линиями (сплошные и пунктирная) указана "родословная" этих ядер. Пунктир обозначает нормированный фон от примеси ^{12}C в мишени ^{13}C ; ^{19}O – фон от примеси ^{16}O . Широкие распределения – вклад трех-частичных каналов реакций, когда регистрируются только ^{14}O или ^9C . Энергии уровней и некоторые возможные значения спина и четности приведены рядом с пиками.

последовательная передача нейтронов на эти промежуточные ядра приводит к состояниям в ^{16}C , типа $(2p-0h)$ и $(3p-1h)$. Анализ характеристик уровней ^{14}C , а также схемы уровней ^{18}O и ^{19}O , позволили предложить возможные значения спина и четности состояний ^{16}C вплоть до энергий возбуждения 13.12 МэВ.

Нами был проведен также эксперимент для поиска высоколежащих возбужденных состояний в ядре ^{17}C . Спектр энергий возбуждения ^{17}C , измеренный в реакции $^{14}\text{C}(^{12}\text{C}, ^9\text{C})^{17}\text{C}$ показан на рис. 18 после вычета вкладов от всех фоновых процессов. В результате полного анализа спектра были наблюдаены 11 ранее неизвестных возбужденных состояний ядра ^{17}C (все они выше порога испускания одного нейтрона), вплоть до $E^* = 16.3$ МэВ.

В реакции $^{14}\text{C}(^{12}\text{C}, ^9\text{C})^{17}\text{C}$ ядро-мишень ^{14}C имеет замкнутую $1p$ -нейтронную оболочку. Поэтому при передаче трех нейтронов, основное состояние и большинство низколежащих уровней ^{17}C имеют $(2s1d)^3$ -конфигурации. При этом передача на $1d5/2$ -орбиту более вероятна и наибольший выход должна иметь конфигурация $(1d5/2)^3$. На рис. 18 видно, что основное состояние практически не заселяется (там наблюдаются всего несколько событий). В то же время хорошо виден известный первый возбужденный уровень при ~ 0.3 МэВ. Этот факт указывает на интенсивное заселение $1d5/2$ -орбиты. Поэтому ранее приписанное ему другими авторами значение $J^\pi = 5/2^+$ вполне оправдано. С наибольшей вероятностью заселяется состояние при

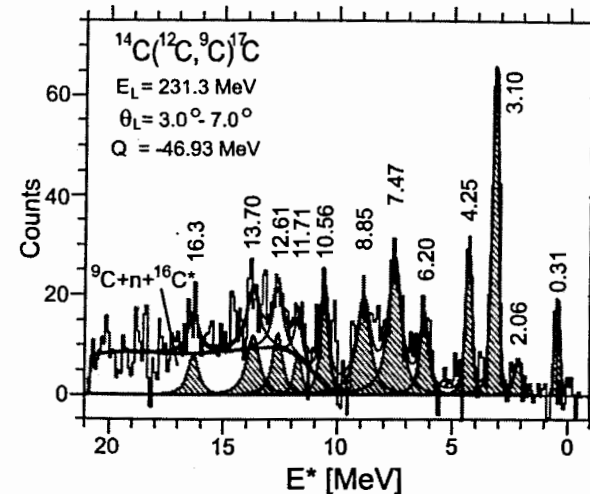


Рис. 18. Спектр энергии возбуждения ядра ^{17}C в реакции $^{14}\text{C}(^{12}\text{C}, ^9\text{C})^{17}\text{C}$ при энергии 231.3 МэВ. Широкое распределение слева соответствует трех-частичному выходному каналу $^9\text{C}+n+^{16}\text{C}^*$. Числа рядом с заштрихованными пиками (уровни ядра ^{17}C) соответствуют их энергиям E^* (МэВ).

$E^* = 3.10$ МэВ: этому состоянию соответствует выстроенная трех-нейтронная конфигурация $(1d5/2)^3$ и мы приписываем ему спин и четность $J^\pi = 9/2^+$. Лежащие более высоко по энергии уровни в ядре ^{17}C строятся на нейтронных частично-дырочных возбуждениях ^{14}C (от $E^* > 6$ МэВ), а также на протонных возбуждениях (от $E^* > 7$ МэВ).

В **Заключении** подытожены результаты диссертации по изучению легких ядер с $1 \leq Z \leq 6$ с большим избытком нейтронов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В области легчайших элементов с $1 \leq Z \leq 6$ проведены спектроскопические исследования ядер с большим избытком нейтронов и показана перспективность реакций передачи нескольких нуклонов для изучения ядер вблизи или за границей нейтронной стабильности.

2. Проведены эксперименты по изучению структуры тяжелых изотопов водорода с массой 4-6. Зарегистрировано состояние ^6H с резонансной энергией $E_R = 2.6(5)$ МэВ; подтверждено, что это ядро сильнее связано, чем предсказывалось теорией. Наблюдены два резонансных состояния в ядре ^4H . В выбранной реакции ^5H не наблюдался даже в виде резонанса.

3. Получена новая информация о ядерной структуре изотопов гелия с массовым числом ≥ 7 . Обнаружены новые возбужденные состояния в ядрах ^7He и ^8He . Подтверждены данные о структуре изотопа ^9He , и также обнаружены новые состояния. С высокой точностью определена масса сверхтяжелого ядра ^{10}He : этот нуклид не связан по отношению к эмиссии двух нейтронов на 1.07(7) МэВ. В ядре ^{10}He впервые обнаружены возбужденные состояния.

4. Измерены спектры энергий возбуждения ядер ^{10}Li и ^{11}Li . Наблюдены новые состояния: 9 – в ядре ^{10}Li , и 3 – в ядре ^{11}Li .

5. Измерен спектр уровней ядра ^{13}Be ; обнаружены ранее неизвестные состояния. Впервые наблюден возбужденный уровень в ядре ^{14}Be .

6. Проведены спектроскопические исследования тяжелых изотопов бора $^{13,14,15,16}\text{B}$. Вариация масс взаимодействующих ядер позволила обнаружить новые уровни в ядре ^{13}B . В соседнем ядре ^{14}B также были идентифицированы новые возбужденные состояния. В ядре ^{15}B впервые наблюдаются возбужденные состояния. Впервые была определена масса ^{16}B (этот нуклид нестабилен относительно эмиссии нейтрона всего на 40 кэВ) и обнаружены возбужденные состояния.

7. Для изучения структуры нейтроноизбыточных изотопов ^{15}C , ^{16}C и ^{17}C использовалась реакция передачи 3-х нейтронов с бомбардирующего иона ^{12}C ядру мишени (изотопы ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C). В ядре ^{15}C было обнаружено 7 новых состояний вплоть до $E^* = 19$ МэВ, в ядре ^{16}C – 14 состояний, от последнего известного уровня 6.1 МэВ до энергии 17.4 МэВ, и в ядре ^{17}C – 11 ранее неизвестных возбужденных состояний выше порога испускания одного нейтрона, вплоть до $E^* = 16.3$ МэВ. Для многих из них предложены значения спина и четности.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. A.V. Belozerov, C. Borcea, Z. Dlouhy, A.M. Kalinin, R. Kalpakchieva, Nguyen Hoai Chau, Yu.Ts. Oganessian, Yu.E. Penionzhkevich. *Search for ^4H , ^5H and ^6H nuclei in the ^{11}B -induced reaction on ^9Be .* a) JINR E7-85-966, Dubna 1985, 11 с.; b) Nucl. Phys. A 460 (1986) 352-360.
2. А.В. Белозеров, К. Борча, З. Длоугы, А.М. Калинин, Р. Калпакчиева, Нгуен Хоай Тьяу, Ю.Э. Пенионжкевич, Н.К. Скобелев. *Установка для измерения масс ядер, образующихся в двухчастичных реакциях с тяжелыми ионами.* Сообщение ОИЯИ 13-85-535, Дубна 1985, 8 с.
3. Yu.Ts. Oganessian, Yu.E. Penionzhkevich, R. Kalpakchieva. *Neutron-rich isotopes of the lightest elements.* a) JINR E7-89-126, Dubna 1989; б) Совещание по мультинейтронным системам, Дубна 25-27 января 1989 г. Сборник докладов P7-90-148 (Дубна 1990) с. 4-15.
4. A.V. Belozyorov, R. Kalpakchieva, Yu.E. Penionzhkevich, S. Piskor, J. Vincour, M. von Lucke-Petsch. *Study of the exotic nuclei ^{11}Li and ^{13}Be .* Proc. Int. Conference on Exotic Nuclei, Foros (Crimea), 1-5 October 1991, Eds. Yu.E. Penionzhkevich & R. Kalpakchieva (World Scientific, Singapore 1992) p. 75-83.
5. H.G. Bohlen, B. Gebauer, D. Kolbert, M. von Lucke-Petsch, W. von Oertzen, A.N. Ostrowski, M. Wilpert, Th. Wilpert, D.V. Alexandrov, A.S. Demyanova, E. Nikolskii, A.A. Korshennikov, A.A. Ogloblin, R. Kalpakchieva, Yu.E. Penionzhkevich, S. Piskor. *Mass spectroscopy of unbound light nuclei.* Proc. Int. Conference on Exotic Nuclei, Foros (Crimea), 1-5 October 1991, Eds. Yu.E. Penionzhkevich & R. Kalpakchieva (World Scientific, Singapore 1992) p. 67-74.

6. A.N. Ostrowski, H.G. Bohlen, A.S. Demyanova, B. Gebauer, **R. Kalpakchieva**, Ch. Langner, H. Lenske, M. von Lucke-Petsch, W. von Oertzen, A.A. Ogloblin, Y.E. Penionzhkevich, M. Wilpert, Th. Wilpert. *Mass spectroscopy of ^{13}Be* . Z. Physik A 343 (1992) 489-490.
7. H.G. Bohlen, B. Gebauer, M. von Lucke-Petsch, W. von Oertzen, A.N. Ostrowski, M. Wilpert, Th. Wilpert, H. Lenske, D.V. Alexandrov, A.S. Demyanova, E. Nikolskii, A.A. Korshennikov, A.A. Ogloblin, **R. Kalpakchieva**, Yu.E. Penionzhkevich, S. Piskor. *Solution of the ^{10}Li -puzzle. Mass and excited states*. Z. Physik A 344 (1993) 381-393.
8. H.G. Bohlen, D.V. Alexandrov, A.S. Demyanova, B. Gebauer, **R. Kalpakchieva**, A.A. Korshennikov, M. von Lucke-Petsch, E. Nikolskii, W. von Oertzen, A.A. Ogloblin, A.N. Ostrowski, Yu.E. Penionzhkevich, S. Piskor, M. Wilpert, Th. Wilpert. *Spectroscopy of ^8He , ^{10}Li and ^{13}Be* . Proc. 6th Int. Conf. on Nuclei far from Stability & the 9th Int. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Kues, Germany, 19-24 July 1992 (eds. R. Neugart & A. Woehr, IOP Publishing, Bristol, 1993) p. 265-270.
9. H.G. Bohlen, B. Gebauer, M. von Lucke-Petsch, W. von Oertzen, A.N. Ostrowski, M. Wilpert, Th. Wilpert, D.V. Alexandrov, A.S. Demyanova, A.A. Korshennikov, E. Nikolskii, A.A. Ogloblin, **R. Kalpakchieva**, Y.E. Penionzhkevich, S. Piskor. *Spectroscopy of neutron-rich light nuclei with multi-nucleon transfer reactions*. Proc. Int. School-Seminar on Heavy-Ion Physics, Dubna, Russia, 10-15 May 1993 (eds. Yu. Ts. Oganessian, Yu.E. Penionzhkevich, R. Kalpakchieva, JINR Publishing Department, 1993) vol. 1, p. 17-27.
10. A.N. Ostrowski, H.G. Bohlen, B. Gebauer, S.M. Grimes, **R. Kalpakchieva**, Th. Kirchner, T.N. Massey, W. von Oertzen, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert. *Spectroscopy of ^{10}He* . Phys. Lett. B 338 (1994) 13-19.
11. H.G. Bohlen, B. Gebauer, Th. Kirchner, M. von Lucke-Petsch, W. von Oertzen, A.N. Ostrowski, Ch. Seyfert, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert, S.M. Grimes, T.N. Massey, **R. Kalpakchieva**, Y.E. Penionzhkevich, D.V. Alexandrov, I. Mukha, A.A. Ogloblin, C. Detraz. *Study of light neutron-rich nuclei with ^{14}C -induced reactions*. Nucl. Phys. A 583 (1995) 775c-782c.
12. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, D.V. Alexandrov, B. Gebauer, S.M. Grimes, Th. Kirchner, M. von Lucke-Petsch, T.N. Massey, I. Mukha, W. von Oertzen, A.A. Ogloblin, A.N. Ostrowski, Ch. Seyfert, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert. *Spectroscopy of excited states of ^{11}Li* . Z. Physik A 351 (1995) 7-8.
13. W. von Oertzen, H.G. Bohlen, B. Gebauer, M. von Lucke-Petsch, A.N. Ostrowski, Ch. Seyfert, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert, D.V. Alexandrov, A.A. Korshennikov, I. Mukha, A.A. Ogloblin, **R. Kalpakchieva**, Yu.E. Penionzhkevich, S. Piskor, S.M. Grimes, T.N. Massey. *Nuclear structure studies of very neutron-rich isotopes of $^7\text{-}^{10}\text{He}$, $^9\text{-}^{11}\text{Li}$ and $^{12\text{-}14}\text{Be}$ via two-body reactions*. Nucl. Phys. A 588 (1995) 129c-134c.
14. A.V. Belozyorov, **R. Kalpakchieva**, Yu.E. Penionzhkevich, Z. Dlouhy, S. Piskor, J. Vincour, H.G. Bohlen, M. von Lucke-Petsch, A.N. Ostrowski, D.V. Alexandrov, E.Yu. Nikolskii, B.G. Novatskii, D.N. Stepanov. *Spectroscopy of ^{13}Be* . a) JINR Rapid Communications 1 (69) - 95, p. 11-19, Dubna 1995; b) Nucl. Phys. A 636 (1998) 419-426.
15. H.G. Bohlen, B. Gebauer, M. von Lucke-Petsch, W. von Oertzen, A.N. Ostrowski, Ch. Seyfert, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert, **R. Kalpakchieva**, Yu.E. Penionzhkevich, S.M. Grimes, T.N. Massey, I. Mukha, D.V. Alexandrov, A.A. Ogloblin, H. Lenske. *Spectroscopy of neutron-rich isotopes of He, Li, Be and B*. Proc. XV EPS Nucl. Phys. Divisional Conf. on Low Energy Nuclear Dynamics (LEND'95), 14-22 April, 1995, St. Petersburg, Russia, Eds. Yu. Ts. Oganessian, W. von Oertzen, R. Kalpakchieva (World Scientific, Singapore, 1995) p. 53-61.
16. H.G. Bohlen, W. von Oertzen, Th. Stolla, **R. Kalpakchieva**, B. Gebauer, M. Wilpert, Th. Wilpert, A.N. Ostrowski, S.M. Grimes, T.N. Massey. *Study of weakly bound and unbound states of exotic nuclei with binary reactions*. Nucl. Phys. A 616 (1997) 254c-261c.
17. Th. Stolla, H.G. Bohlen, B. Gebauer, **R. Kalpakchieva**, W. von Oertzen, M. Wilpert, Th. Wilpert, S.M. Grimes, T.N. Massey. *Spectroscopy of excited states of ^8He* . Z. Physik A 356 (1996) 233-234.
18. H.G. Bohlen, B. Gebauer, S.M. Grimes, **R. Kalpakchieva**, H. Lenske, T.N. Massey, W. von Oertzen, A.N. Ostrowski, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert. *Transfer reactions and the structure of light neutron-rich*

- nuclei*. Proc. of the 8th Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms, June 1997, Varenna, Italy, pp. 425-434.
19. H.G. Bohlen, W. von Oertzen, A. Blazevic, B. Gebauer, S. Thummerer, M. Wilpert, **R. Kalpakchieva**, S.M. Grimes, T.N. Massey, A. Lepine-Szily, J.M. Oliveira, W. Mittig, P. Roussel-Chomaz, A.N. Ostrowski. *Mechanism of multi-nucleon transfer reactions*. Proc. of the VI Int. School-Seminar on Heavy Ion Physics, 22-27 September 1997, Dubna, Russia, eds. Yu.Ts. Oganessian & R. Kalpakchieva (World Scientific, Singapore) pp. 134-141.
 20. H.G. Bohlen, W. von Oertzen, **R. Kalpakchieva**, A. Blazevic, B. Gebauer, S.M. Grimes, A. Lepine-Szily, T.N. Massey, W. Mittig, A.N. Ostrowski, J.M. Oliveira, P. Roussel-Chomaz, S. Thummerer, M. Wilpert. *Nuclear structure studies of bound and unbound states in drip-line nuclei*. II Nuovo Cimento 111 A, No. 6-7 (1998) 841-846.
 21. A.V. Belozyorov, J. Vincour, S. Piskor, **R. Kalpakchieva**, Yu.E. Penionzhkevich, V.S. Salamatin, V.E. Zhuchko. *A facility for the study of neutron-rich light nuclei*. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Research A 411 (1998) 343-350.
 22. **Р. Калпакчиева**, Ю.Э. Пенионжкевич, Х.Г. Болен. *Сильнонейтроноизбыточные изотопы легких элементов. Свойства ядер и их получение*. ЭЧАЯ т. 29, вып. 4 (1998) 832-890.
 23. H.G. Bohlen, A. Blazevic, B. Gebauer, W. von Oertzen, S. Thummerer, **R. Kalpakchieva**, S.M. Grimes and T.N. Massey. *Spectroscopy of exotic nuclei with multi-nucleon transfer reactions*. Progress in Particle and Nuclear Physics 42 (1999) 17-26.
 24. **Р. Калпакчиева**, Ю.Э. Пенионжкевич, Х.Г. Болен. *Сильнонейтроноизбыточные изотопы легких элементов. Структура ядер*. ЭЧАЯ т. 30, вып. 6 (1999) 1429-1513.
 25. **R. Kalpakchieva**, H.G. Bohlen, W. von Oertzen, B. Gebauer, M. von Lucke-Petsch, T.N. Massey, A.N. Ostrowski, Th. Stolla, M. Wilpert, Th. Wilpert. *Spectroscopy of ¹³B, ¹⁴B, ¹⁵B and ¹⁶B using multi-nucleon transfer reactions*. Eur. Phys. J. A 7 (2000) 451-461.
 26. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, A. Blazevic, B. Gebauer, T.N. Massey, W. von Oertzen and S. Thummerer. *Spectroscopy of ⁷He states using the (¹⁵N, ¹⁷F) reaction on ⁹Be*. Phys. Rev. C 64 (2001) 024312.
 27. **Р. Калпакчиева**, Ю.Э. Пенионжкевич. *Сильно нейтроноизбыточные изотопы элементов с $6 \leq Z \leq 10$* . ЭЧАЯ т. 33, вып. 6 (2002) 1247-1307.
 28. H.G. Bohlen, W. von Oertzen, **R. Kalpakchieva**, B. Gebauer, S.M. Grimes, T.N. Massey, H. Lenske, A. Lenz, M. Milin, Ch. Schulz, T. Kokalova, S. Torilov and S. Thummerer. *Structure studies of of neutron-rich beryllium and carbon isotopes*. Proc. of the Symposium on Nuclear Clusters (2002), Rauschholzhausen, 5-9 August 2002, Eds. R. Jolos and W. Scheid (EP Systema, Debrecen, Hungary, 2002) p. 53-58.
 29. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, W. von Oertzen, T.N. Massey, B. Gebauer, S.M. Grimes, T. Kokalova, H. Lenske, A. Lenz, M. Milin, Ch. Schulz, S. Thummerer, S. Torilov, A. Tumino. *Structure studies of neutron-rich Beryllium and Carbon isotopes*. Nucl. Phys. A 722 (2003) 3c-9c.
 30. Yu.E. Penionzhkevich, **R. Kalpakchieva**, S.M. Lukyanov. *Particle stability of very neutron-rich very light nuclei*. Nucl. Phys. A722 (2003) 170c-175c.
 31. H.G. Bohlen, W. von Oertzen, **R. Kalpakchieva**, B. Gebauer, S.M. Grimes, A. Lenz, T.N. Massey, M. Milin, Ch. Schulz, T. Kokalova, S. Torilov and S. Thummerer. *Structure of neutron-rich Be- and C-isotopes*. Ядерная физика 66, вып. 8 (2003) 1539-1545.
 32. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, B. Gebauer, S.M. Grimes, H. Lenske, K.P. Lieb, T.N. Massey, M. Milin, W. von Oertzen, Ch. Schulz, T. Kokalova, S. Torilov, and S. Thummerer. *Spectroscopy of particle-hole states of ¹⁶C*. Phys. Rev. C 68 (2003) 054606.
 33. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, W. von Oertzen, T.N. Massey, B. Gebauer, S.M. Grimes, T. Kokalova, A. Lenz, M. Milin, Ch. Schulz, S. Thummerer, S. Torilov, A. Tumino. *Particle-hole structures of neutron-rich Be- and C-isotopes*. Nucl. Phys. A 734 (2004) 345-348.
 34. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, W. von Oertzen, T.N. Massey, B. Gebauer, T. Kokalova, A.A. Ogloblin, Ch. Schulz, S. Thummerer. *Structure of neutron-rich Beryllium and Carbon isotopes*. Nucl. Phys. A 738 (2004) 333-336.
 35. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, W. von Oertzen, T.N. Massey, A.A. Ogloblin, G. de Angelis, Ch. Schulz, Tz. Kokalova and C. Wheldon.

Structure studies of excited states of ^{17}C and ^{16}C . J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31 (2005) s1461–s1464.

36. H.G. Bohlen, **R. Kalpakchieva**, W. von Oertzen, T.N. Massey, A.A. Ogloblin, G. de Angelis, Ch. Schulz, Tz. Kokalova, and C. Wheldon. *Spectroscopy of ^{17}C and $(sd)^3$ -structures in heavy carbon isotopes.* Eur. Phys. J. A 31 (2007) 279-302.

Цитированная литература:

- C1. G. Audi, A.H. Wapstra and C. Thibault, Nucl. Phys. A 729 (2003) 337.
C2. Kamal K. Seth. Proc. 4th Conf. on Nuclei far from Stability (NFFS), Helsingor, Denmark 1981, ed. L.O. Skolen (CERN, Geneva, 1981), p. 655.
C3. Ю.Ц. Оганесян и др., Письма в ЖЭТФ 36, вып.3 (1982) 104.
C4. A.A. Korshennikov et al., Phys. Lett. B 326 (1994) 31.
C5. D.R. Tilley et al., Nucl. Phys. A 708 (2002) 3.
C6. D.R. Tilley et al., Nucl. Phys. A 745 (2004) 155.
C7. G. Audi and A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A 565 (1993) 1.

Получено 29 декабря 2008 г.