

На правах рукописи

Короткова Лариса Юрьевна

ПОИСК И СПЕКТРОСКОПИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ ЛИТИЯ ¹⁰⁻¹²Li

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва, 2015

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: Гуров Юрий Борисович
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: Зарубин Павел Игоревич
доктор физико-математических наук,
начальник сектора ОИЯИ, г. Дубна

Конобеевский Евгений Сергеевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией ИЯИ РАН, г. Москва

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», г. Москва

Защита состоится «06» апреля 2016 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, телефон: 8 (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Улин С.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время изучение экзотических легких ядер вблизи границ нуклонной стабильности является областью повышенной экспериментальной активности [1]. Кроме естественного стремления обнаружить новые ядра, интерес к этой проблеме обусловлен следующими причинами. Характеристики нейтронно-избыточных ядер в значительной степени определяются теми составляющими нуклон-нуклонного потенциала, которые подавлены в ядрах, лежащих в долине нуклонной стабильности. Эффекты чередования ядерно-стабильных и нестабильных состояний, образование «гало» слабосвязанных нуклонов, аномальная четность низколежащих состояний могут служить тестом корректности теоретических расчетов. Характеристики ядер вблизи границы нуклонной стабильности важны для понимания свойств и природы образования экзотических ядерных состояний.

Интерес к исследованию тяжелых изотопов лития обусловлен особыми свойствами этих ядер. Граница нуклонной стабильности проходит через изотоп ^{11}Li , соседние с ним ядра $^{10,12}\text{Li}$ являются квазистационарными состояниями. Направление ядерной физики, связанное с исследованием экзотических ядерных систем вблизи границ нуклонной стабильности, начало активно развиваться после обнаружения у ядра ^{11}Li аномально большого радиуса в экспериментах на пучках радиоактивных ионов [1].

Для объяснения этого явления была предложена гипотеза о наличии нейтронного гало. В рамках этого предположения ядро ^{11}Li рассматривается как система из «кора» ^9Li , окруженного двумя нейтронами, волновая функция которых характеризуется аномально большим радиусом. Для описания ^{11}Li как трехчастичной системы необходима информация о двухчастичных подсистемах $n + n$ и $^9\text{Li} + n$. Свойства последней подсистемы тесно связаны с параметрами низколежащих состояний ^{10}Li , основное состояние, которого является нуклонно-нестабильным. Важным свойством изотопа ^{10}Li , необходимым для понимания характеристик ^{11}Li , является аномальная четность $^{10}\text{Li}_{g.s.}$. Это является прямым указанием на возникновение новых магических чисел взамен традиционных и как следствие приводит к смешиванию нейтронных оболочек в ^{11}Li . Стоит отметить, что ^{11}Li является борромиевским ядром, т.е. связанной трехчастичной системой, в которой каждая двухчастичная подсистема – несвязанна.

Для изучения экзотических ядер на границе нейтронной стабильности также необходимы знания о свойствах более тяжелых изотопов лития. Изотоп ^{12}Li , который представляет собой резонанс в системе $^{11}\text{Li} + n$, был обнаружен недавно и вопрос о структуре его уровней остается открытым.

К настоящему времени выполнено большое число экспериментов по поиску и спектроскопии тяжелых изотопов лития. Однако в области низких энергий возбуждений (0.5 – 2.5 МэВ) экспериментальная информация по структуре уровней изотопов ^{10}Li и ^{11}Li требует уточнения и разрешения

имеющихся неопределенностей в параметрах резонансных состояний. Для ^{12}Li и высоковозбужденных (> 4 МэВ) уровней ^{10}Li , ^{11}Li данные практически отсутствуют. Поэтому любой новый экспериментальный результат для таких ядер представляет самостоятельный интерес, а также является важным источником для совершенствования теоретических моделей.

В настоящей работе для исследования $^{10-12}\text{Li}$ использовались реакции поглощения остановившихся отрицательных π^- -мезонов ядрами ^{11}B и $^{12,14}\text{C}$. Важное преимущество этого метода обусловлено практически фиксированной энергией начального состояния, независимо от энергетического разрешения пучка. Образование в конечном состоянии ядер с большим избытком нейтронов и эмиссия быстрых заряженных частиц дают широкие возможности для определения структуры уровней возбуждения.

Цель работы:

Экспериментальный поиск и спектроскопия изотопов лития $^{10-12}\text{Li}$ в каналах реакции поглощения пионов ядрами бора ^{11}B и углерода $^{12,14}\text{C}$:

1. Исследование структуры уровней ^{10}Li в реакциях $^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$, $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$, $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$ и $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$.
2. Поиск и исследование структуры уровней ^{11}Li в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pd)\text{X}$.
3. Поиск уровней ^{12}Li в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$.
4. Разработка метода учета фона от примесных атомов ^{12}C в спектрах недостающих масс, измеренных на радиоактивной мишени ^{14}C .

Научная новизна:

Впервые в рамках единой методики получены приоритетные данные о структуре уровней тяжелых изотопов лития $^{10-12}\text{Li}$:

– впервые обнаружены высоковозбужденные состояния ^{10}Li со следующими резонансными параметрами (E_r – резонансная энергия уровня, Γ – ширина уровня):

$$E_r = 2.2 \text{ МэВ}, \Gamma \approx 1 \text{ МэВ};$$

$$E_r = 6.1 \text{ МэВ}, \Gamma \approx 1 \text{ МэВ};$$

$$E_r = 7.9 \text{ МэВ}, \Gamma \approx 2 \text{ МэВ};$$

$$E_r = 10.1 \text{ МэВ}, \Gamma \approx 0.5 \text{ МэВ};$$

– впервые обнаружено возбужденное состояние ^{11}Li с $E_x = 3.9$ МэВ, $\Gamma < 0.2$ МэВ;

– впервые обнаружено возбужденное состояние ^{12}Li с $E_r = 4.0$ МэВ, $\Gamma \approx 1$ МэВ.

Достоверность:

Достоверность результатов по обнаружению новых состояний изотопов $^{10-12}\text{Li}$ основывается на совпадении в пределах погрешности измерений известных уровней этих ядер с модельными расчетами и данными других экспериментов. Обоснованность точности представления резонансных парамет-

ров изотопов $^{10-12}\text{Li}$ обеспечивается высоким энергетическим разрешением экспериментальной установки и большой статистикой измерений.

Вклад автора:

Автору принадлежит определяющая роль в обработке экспериментальной информации, корректном учете фона примесных атомов и моделировании многочастичных фазовых объемов. Автором усовершенствованы алгоритмы программ обработки и анализа экспериментальных данных. Автором получены систематические данные по основным и возбужденным состояниям исследуемых тяжелых изотопов лития, и выполнен их анализ. Автор внес определяющий вклад в новые результаты, изложенные в диссертации. Автором выполнена основная работа по апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Практическая значимость работы:

- Показана возможность использования реакций поглощения остановившихся пионов для исследования нейтронно-избыточных ядер в диапазоне возбуждения $0 \text{ МэВ} < E_r < 30 \text{ МэВ}$;
- Обнаружены новые возбужденные состояния изотопов $^{10-12}\text{Li}$ с энергией $E_r > 3 \text{ МэВ}$;
- Полученная систематическая информация по резонансным параметрам исследуемых ядер позволяет совершенствовать теоретические модели, описывающие ядерные состояния с большим избытком нейтронов.

Автор защищает:

1. Экспериментальные результаты по определению параметров высоковозбужденных состояний изотопа ^{10}Li .
2. Экспериментальные результаты по обнаружению и измерению параметров возбужденных состояний ^{11}Li .
3. Экспериментальные результаты по обнаружению возбужденного состояния изотопа ^{12}Li .
4. Метод учета фона от примеси изотопа ^{12}C в мишени ^{14}C для корректного определения параметров возбужденных состояний тяжелых изотопов лития.

Апробация работы:

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и докладывались на Научных конференциях НИЯУ МИФИ (2010-2015), на Международной сессии-конференции СЯФ ОФН РАН (2013, Протвино), на Международном симпозиуме «Экзотические ядра EXON-2014» (2014, Калининград), на Международной конференции «Ядро 2015» (2015, Санкт-Петербург), Международном симпозиуме по экзотическим ядрам «ISEN-2015» (2015, Болгария), а также на научных семинарах в ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ МИФИ.

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 работах, входящие в список перечня ВАК. Из них 2 статьи входят в базу данных Web of Science и Scopus, 1 статья – в Scopus и 1 статья – в РИНЦ.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Содержит 98 страниц печатного текста, 36 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 96 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность научной проблемы, изучению которой посвящена работа. Сформулированы цели и задачи исследования, изложена научная новизна и достоверность полученных результатов, раскрыта практическая значимость. Описан личный вклад автора, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание экспериментальной установки, с помощью которой были получены данные по спектроскопии изотопов $^{10-12}\text{Li}$, а также приводятся результаты по определению примесей в используемых мишенях.

Эксперимент был выполнен на пучке пионов низких энергий ускорителя LANL (Лос Аламос, США) с помощью двухплечевого полупроводникового спектрометра, созданного в НИЯУ МИФИ. Схема и конструкция экспериментальной установки представлены на рис. 1.

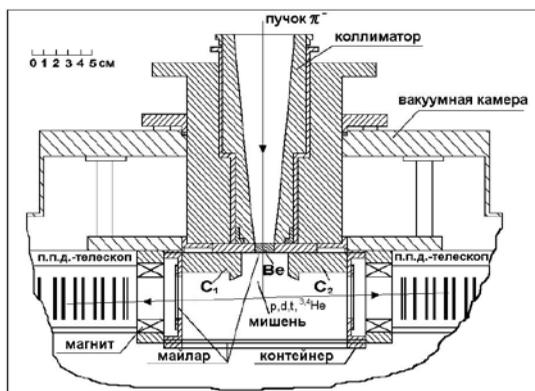


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Пучок π^- -мезонов с энергией 30 МэВ проходил через бериллиевый замедлитель и затем останавливался в мишени. Скорость остановок пионов в ми-

шени составила $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. В эксперименте использовались мишени ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$ и ${}^{12,14}\text{C}$, которые были изготовлены в виде дисков диаметром 26 мм и толщиной $24 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$. Они располагались на расстоянии 4.5 см от замедлителя и под углом 22° к пучку, что уменьшило энергетические потери вторичных частиц в мишени и, следовательно, улучшало энергетическое разрешение установки. Образующиеся в мишени вторичные заряженные частицы p , d , t , ${}^3\text{He}$ регистрировались двумя полупроводниковыми телескопами, расположенными под углом 180° друг к другу. Каждый из телескопов, которые состояли из набора кремниевых поверхностно-барьерных $\text{Si}(\text{Au})$ и литий-дрейфовых $\text{Si}(\text{Li})$ детекторов, позволял идентифицировать регистрируемые частицы и определять их энергию с точностью до 0.5 МэВ (при регистрации p , d , t) вплоть до кинематических границ реакции (~ 100 МэВ).

Каждый телескоп комплектовался двумя $\text{Si}(\text{Au})$ -ППД с толщинами 100 и 450 мкм и четырнадцатью $\text{Si}(\text{Li})$ -ППД с толщинами ~ 3 мм. Площадь чувствительной области всех детекторов составляла 8 см^2 ($\varnothing=32$ мм). $\text{Si}(\text{Au})$ -ППД работали в режиме растяжки обедненной области на полную толщину детектора, т.е. не имели нечувствительных слоев. Толщина нечувствительного («мертвого») слоя в $\text{Si}(\text{Li})$ -ППД составляла ~ 100 мкм. Суммарная толщина детекторов каждого телескопа составляла 43 мм, что обеспечивало остановку наиболее длиннопробежных частиц, к которым относятся протоны с энергиями ~ 100 МэВ. Нижние пороги идентификации частиц: 5.5 МэВ – для протонов, 7 МэВ – для дейтронов, 10 МэВ – для тритонов. Угловой захват каждого телескопа при регистрации частиц: $d\Omega(p) = 55 \div 15 \text{ мср}$, $d\Omega(d) = 55 \div 17 \text{ мср}$, $d\Omega(t) = 55 \div 26 \text{ мср}$.

Для исследования изотопов лития ${}^{10-12}\text{Li}$ использовались экспериментальные результаты, полученные на мишенях ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12,14}\text{C}$. При обработке измеренных спектров важной задачей является учет вклада примесей в исходное распределение. Решение этой проблемы упрощается, если в эксперименте были выполнены измерения на ядрах, которые являются возможной примесью для других мишеней.

Ранее выполненные исследования показали, что используемая мишень ${}^{12}\text{C}$ является изотопно-чистой (неконтролируемые примеси $<1\%$), а для мишени ${}^{11}\text{B}$ основной примесью является изотоп ${}^{12}\text{C}$, содержание которого $\approx 8\%$.

Тестовые измерения показали, что для радиоактивной мишени ${}^{14}\text{C}$ основной примесью является изотоп ${}^{12}\text{C}$. Для точного количественного определения этой примеси в мишени ${}^{14}\text{C}$ был использован подход, основанный на выделении пиков, наблюдаемых в трехчастичных каналах реакции на примесных ядрах ${}^{12}\text{C}$. Методика учёта вклада известной примеси в мишени ${}^{14}\text{C}$ при анализе спектров недостающих масс (*ММ*) для коррелированных событий основана на использовании распределений, полученных при измерениях на мишени ${}^{12}\text{C}$, выполненных в тех же экспериментальных условиях, что и на радиоактивной мишени ${}^{14}\text{C}$. Особенностью при использовании этой процедуры для мишени ${}^{14}\text{C}$, является то, что распределения по *ММ* для ядер ${}^{12}\text{C}$, рас-

считанным по гипотезе взаимодействия с ядрами ^{14}C , оказываются смещёнными в нефизическую область ($MM < 0$).

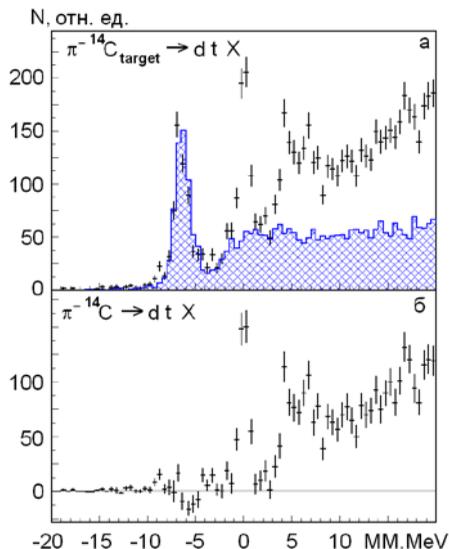


Рис. 2. *а* – фрагмент спектра недостающих масс, измеренного для реакции (π^-, dt) на мишени ^{14}C (точки с погрешностями) и мишени ^{12}C (гистограмма, с нормировкой на количество примеси ^{12}C в мишени ^{14}C). Спектры рассчитаны в рамках гипотезы реакции на ядрах ^{14}C . *б* – спектр для реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, dt)X$ после вычитания фона.

Во второй главе представлены результаты по спектроскопии изотопа лития ^{10}Li , полученные в инклюзивных и корреляционных измерениях реакции поглощения остановившихся пионов.

Выполнен анализ современных теоретических и экспериментальных данных по структуре уровней ^{10}Li . Анализ показал, что ^{10}Li является нуклонно-нестабильным ядром [2-5], основное состояние которого представляет резонанс со значением спина-четности $J^P = 2^-$ в системе нейтрона и основного состояния ^9Li . В то же время, вопрос о точном значении резонансных параметров низколежащих состояний с $E_x < 1.6$ МэВ, как и с количеством этих состояний, остается открытым. Кроме того экспериментальная информация

Для количественного определения примеси в мишени ^{14}C использовались следующие реакции: $^{14}\text{C}_{\text{target}} [^{12}\text{C}] (\pi^-, dt) ^9\text{Li} [^7\text{Li}]$, $^{14}\text{C}_{\text{target}} [^{12}\text{C}] (\pi^-, dd) ^{10}\text{Li} [^8\text{Li}]$, $^{14}\text{C}_{\text{target}} [^{12}\text{C}] (\pi^-, pd) ^{11}\text{Li} [^9\text{Li}]$. В качестве примера на рис. 2. показан фрагмент спектра MM , измеренного в реакции $^{14}\text{C}_{\text{target}}(\pi^-, dt)X$. На рис. 2а точки с погрешностями представляют экспериментальный спектр, измеренный на радиоактивной мишени ^{14}C , гистограмма – вклад примеси от реакции $^{12}\text{C}(\pi^-, dt)X$. Нормировка выполнена по числу событий в пике, отвечающему основному состоянию ^7Li . Рис. 2б показывает спектр за вычетом вклада примеси ^{12}C в мишени ^{14}C .

Представленные данные демонстрируют корректность разработанной методики определения фона от примеси ^{12}C в измерениях на радиоактивной мишени ^{14}C . Анализ результатов вычитания фона по различным каналам реакции показал, что содержание изотопа ^{12}C в используемой мишени ^{14}C составляет 23%.

по спектроскопии ^{10}Li при энергиях возбуждения превышающих 4 МэВ весьма ограничена, а при $E_x > 10$ МэВ полностью отсутствует.

В работе структура уровней ^{10}Li исследовалась в двухчастичном $^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$ и трехчастичных $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$, $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$ и $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$ каналах реакции поглощения остановившихся пионов.

На рис. 2 показан спектр недостающих масс для реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$. За начало отсчета принята сумма масс нейтрона и основного состояния ^9Li .

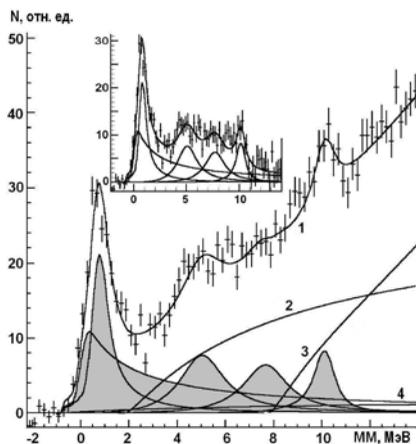


Рис.2. Спектр недостающих масс для реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$. Точки с ошибками – экспериментальные данные. Кривые: 1 – полное описание, 2 и 3 – распределения по фазовым объемам для каналов $rp^9\text{Li}$ и $p^7\text{He}$ соответственно, 4 – фон случайных совпадений. Заштрихованные области – распределения Брейт-Вигнера для двухчастичных каналов с образованием ^{10}Li . Врезка - спектр, полученный после вычитания распределений по фазовым объемам и фона случайных совпадений.

Для выделения состояний ^{10}Li и определения их параметров использовался метод наименьших квадратов при описании спектра суммой брейт-вигнеровских распределений, n -частичных распределений по фазовому объему ($n \geq 3$) и фоном случайных совпадений. Основное и первое возбужденное состояние были описаны пороговым распределением Брейт-Вигнера для s - и p -волновых состояний соответственно.

Пик, наблюдаемый вблизи $MM \approx 0$ МэВ, наилучшим образом описывается как суперпозиция s -волнового и p -волнового состояний. При использовании брейт-вигнеровского формализма для описания состояний были получены следующие параметры: $E_r = 0.1 \pm 0.1$ МэВ, $\Gamma < 0.1$ МэВ (основное состояние) и $E_r = 0.6 \pm 0.1$ МэВ, $\Gamma \approx 1$ МэВ (первое возбужденное состояние). Также в измеренном спектре наблюдаются еще три уровня со следующими значениями резонансных параметров (E_r, Γ): (4.8 ± 0.1 МэВ, ≈ 2 МэВ), (7.7 ± 0.1 МэВ,

≈ 2 МэВ) и $(10.1 \pm 0.1$ МэВ, ≈ 0.5 МэВ), при этом два последних состояния наблюдались впервые.

На мишени ^{12}C поиск образования ^{10}Li проводился в реакции $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)X$. Измеренный спектр MM представлен на рис. 3. Выделение трехчастичных каналов реакции с образованием ^{10}Li проводилось аналогично случаю инклюзивных измерений. При этом в качестве физического фона рассчитывались многочастичные распределения ($n \geq 4$) по фазовым объемам.

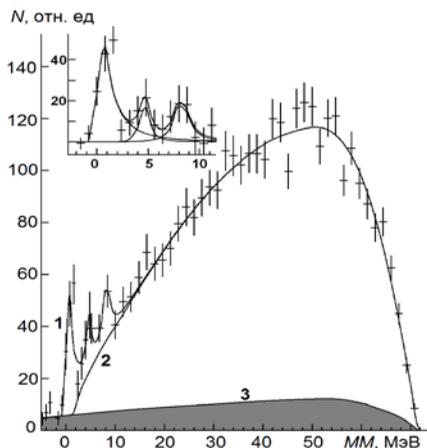


Рис.3. Спектр недостающих масс для реакции $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)X$. Кривые: 1 – полное описание, 2 – суммарное распределение по фазовым объемам для многочастичных каналов, 3 – фон случайных совпадений. Врезка - спектр, полученный после вычета распределений по фазовым объемам и фона случайных совпадений.

Удовлетворительное описание пика в спектре при $MM \approx 0$ МэВ достигается с помощью p -волнового резонанса со следующими параметрами $E_r = 0.3 \pm 0.1$ МэВ, $\Gamma \approx 1$ МэВ. Полученное значение резонансной энергии лежит ниже значения для первого возбужденного уровня, что может указывать на вклад в этот наблюдаемый пик основного s -состояния ^{10}Li . Однако недостаточная статистическая обеспеченность данных не позволяет проверить гипотезу о суперпозиции двух состояний. В спектре наблюдается еще два уровня с (E_r, Γ) : $(4.7 \pm 0.1$ МэВ, ≈ 0.7 МэВ) и $(7.9 \pm 0.2$ МэВ, ≈ 2 МэВ), при этом последнее состояние обнаружено впервые, и его параметры совпадают с результатом, полученным в реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, p)X$.

На рис. 4 показан спектр MM , полученный в измерениях dd -пар на радиоактивной мишени ^{14}C после вычета вклада примеси ^{12}C . Небольшой фон в области отрицательных значений MM обусловлен статистическими погрешностями процедуры вычитания и фоном случайных совпадений.

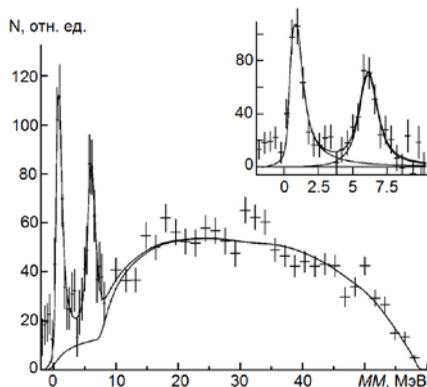


Рис.4. Спектр ММ реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$. Точки с погрешностями - экспериментальные данные. Сплошные линии – полное описание и суммарное распределение по фазовым объемам. На врезке показан спектр, полученный после вычитания вклада распределений по фазовым объемам, сплошные линии – вклады двух состояний ^{10}Li и фона случайных совпадений.

Удовлетворительное описание спектра на рис. 4 достигается при включении двух возбужденных состояний ^{10}Li со следующими резонансными параметрами: (E_r, Γ) : $(0.8 \pm 0.1 \text{ МэВ}, \approx 0.5 \text{ МэВ})$ и $(6.1 \pm 0.1 \text{ МэВ}, \approx 1.3 \text{ МэВ})$. Второй уровень наблюдался впервые.

Аналогичным образом обрабатывался и анализировался спектр ММ, полученный в корреляционных измерениях рт-пар на радиоактивной мишени ^{14}C . На рис. 5 показан спектр за вычетом вклада от примеси ^{12}C . Статистически достоверное описание спектра достигается при включении трех возбужденных состояний ^{10}Li со следующими резонансными параметрами: (E_r, Γ) : $(0.7 \pm 0.1 \text{ МэВ}, \approx 0.2 \text{ МэВ})$, $(2.2 \pm 0.1 \text{ МэВ}, \approx 1 \text{ МэВ})$ и $(6.1 \pm 0.1 \text{ МэВ}, \approx 2 \text{ МэВ})$. Два последних возбужденных уровня наблюдаются впервые, параметры состояния с $E_r = 6.1 \text{ МэВ}$ совпадают с величинами, полученными в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$.

Значения параметров состояний ^{10}Li , полученные в различных каналах реакции поглощения, не противоречат друг другу в пределах ошибок измерений. Средневзвешенные величины этих параметров представлены в табл. 1.

Отсутствие уровня с $E_r = 2.2 \text{ МэВ}$ в измерениях реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$, по-видимому, обусловлен разницей в механизмах (π^-, dd) и (π^-, pt) реакций. Поглощение на внутриядерных кластерах ^3He и ^4He играет важную роль в реакциях на легких ядрах [6]. Поэтому (π^-, pt) реакция может возникать в процессах (n, p) перезарядки после поглощения на внутриядерном кластере $\pi^- + ^4\text{He} \rightarrow n + t$. В свою очередь (π^-, dd) реакция может возникать в результате подхвата (n, d) после поглощения $\pi^- + ^3\text{He} \rightarrow n + d$.

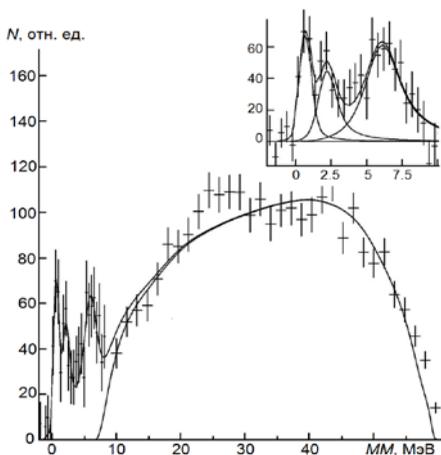


Рис. 5. Спектр ММ реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$. Точки с погрешностями - экспериментальные данные. Сплошные линии – полное описание и суммарное распределение по фазовым объемам. На врезке показан спектр, полученный после вычитания вклада распределений по фазовым объемам, сплошные линии – вклады трех состояний ^{10}Li и фона случайных совпадений.

Таблица 1. Резонансные параметры возбужденных состояний изотопа ^{10}Li .

E_r , МэВ	Γ , МэВ	Реакция
0.7 ± 0.1	≈ 0.5	$^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$, $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$, $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$, $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$
2.2 ± 0.1	≈ 1	$^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$
4.8 ± 0.1	≈ 1	$^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$, $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$
6.1 ± 0.1	≈ 1	$^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$, $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$
7.8 ± 0.2	≈ 2	$^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$, $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$
10.1 ± 0.1	≈ 0.5	$^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$

Следует отметить, что значение резонансной энергии первого возбужденного состояния (измерения на мишени ^{11}B), находятся в хорошем согласии с мировыми данными из компиляции [2], и незначительно превышает данные, полученные на пучках радиоактивных ядер [3-5].

В отличие от эксперимента [7] в настоящей работе не наблюдается значительного числа узких уровней с энергией $E_r > 1$ МэВ. Также эти состояния не наблюдались в работах [3, 4].

В третьей главе представлены результаты по спектроскопии изотопа лития ^{11}Li , полученные в корреляционных измерениях реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pd)\text{X}$. Эта информация сравнивается с данными других экспериментов и теоретическими расчетами.

Основное состояние изотопа ^{11}Li является β^- -радиоактивным и имеет период полураспада $\tau = 8.75 \pm 0.14$ мс [8]. Так как ^{11}Li является нуклонно-стабильным ядром, в настоящей работе его возбужденные уровни описываются с помощью параметра E_x , который связан с E_r соотношением

$$E_x = E_r - S_{2n}, \quad (1)$$

где $S_{2n} = 0.3693 \pm 0.0006$ МэВ [8] – энергия отделения двух нейтронов.

Для первого возбужденного состояния ^{11}Li , измеренные величины энергии заметно различаются: $0.6 \text{ МэВ} \leq E_r \leq 1.3 \text{ МэВ}$ [8]. Также имеются заметные расхождения и ширине Γ этих состояний: от 0.26 до 0.75 МэВ, при этом в нескольких работах ширины уровня не были определены [8]. По-видимому, можно считать установленным существование уровня при $E_x \approx 2.5$ МэВ, наблюдаемого в нескольких реакциях [8]. Более возбужденные уровни наблюдались только в двух экспериментах, представленных в обзоре [8], однако статистическая обеспеченность данных в этих измерениях довольно низкая. Таким образом, вопрос о точном положении возбужденных уровней ^{11}Li и их ширинах остается открытым.

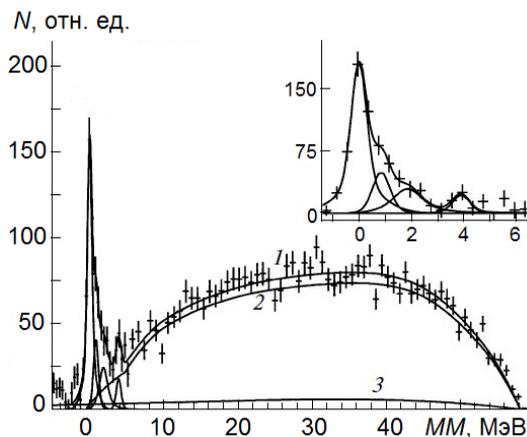


Рис. 6. Спектр недостающих масс для реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pd)X$. Точки с погрешностями получены после вычитания фона от ^{12}C . 1 – полное описание, 2 – сумма распределений по фазовому объему, 3 – фон случайных совпадений. Врезка – спектр, полученный после вычитания из исходного спектра суммарного распределение по фазовым объемам.

На рис. 6 показан спектр MM для реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pd)X$, полученный после вычитания примеси ^{12}C . Небольшое число событий в области отрицательных значений MM обусловлено несколькими причинами: фоном случайных совпадений, вкладом неконтролируемых примесей и статистическими погрешностями процедуры вычитания.

Аналогично процедуре при обработке и анализе спектров с образованием ^{10}Li , для выделения возбужденных состояний ^{11}Li и определения их резонансных параметров использовался метод наименьших квадратов при описании экспериментальных спектров суммой n -частичных распределений по фазовому объему, Брейт-Вигнеровских распределений и вклада фона случайных совпадений. При этом в распределениях по фазовому объему учитывались все возможные многочастичные каналы реакции, в том числе с образованием синглетных нейтронных пар.

Статистически удовлетворительное описание спектра достигается при включении основного и трех возбужденных состояний со следующими резонансными параметрами (E_x , Γ): (0.9 ± 0.1 , ≈ 0.3 МэВ), (2.3 ± 0.3 , ≈ 0.7 МэВ) и (3.9 ± 0.3 , < 0.2 МэВ). При этом последнее состояние наблюдается впервые. Полученные результаты по положению первого возбужденного уровня близки к данным, полученным в реакциях фрагментации [8].

Для второго возбужденного состояния полученное значение $E_x = 2.3 \pm 0.3$ МэВ совпадает с результатами, полученными в эксперименте на тяжелых ионах: 2.47 ± 0.07 МэВ [8] и реакции фрагментации: 2.45 ± 0.27 МэВ [8]. Однако наблюдаемые в этих работах ширины этого уровня заметно больше: 1.2 МэВ и 2.9 МэВ соответственно [8].

В четвертой главе представлены результаты по спектроскопии изотопа лития ^{12}Li , полученные в корреляционных измерениях реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)X$. Эта информация сравнивается с мировыми данными теоретических и экспериментальных исследований ^{12}Li .

Основное состояние ^{12}Li является нуклонно-нестабильным [9]. Впервые указание на образование резонансного состояния ^{12}Li с $E_r = 4.9 \pm 1.5$ МэВ и $\Gamma \approx 0.7$ МэВ было получено в работе [10]. Недавно появились еще два указания на обнаружение ^{12}Li [4, 11]. В реакции фрагментации пучка ^{14}Be с энергией 304 МэВ/нуклон, в спектре эффективных масс ($^{11}\text{Li} + n$) наблюдался пик с максимумом ≈ 0.2 МэВ (s -состояние с $a_s = 13.7(1.6)$ фм). В реакции выбивания двух протонов из мишени ^{14}B [11] были обнаружены: s -состояние ^{12}Li , совпадающее с данными [4], и два d -состояния с $E_r \approx 130$ и 435 кэВ.

Поиск образования ^{12}Li в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)X$ проводился аналогично случаю ^{11}Li . В спектре MM , представленном на рис.7, проявляется пик, обусловленный нуклонно-нестабильным состоянием ^{12}Li со следующими значениями резонансных параметров: $E_r = 4.0 \pm 0.2$ МэВ, $\Gamma \approx 1$ МэВ. Этот пик, после вычитания из спектра многочастичных распределений по фазовому объему и фона случайных совпадений представлен на врезке рис.7. Заметим, что существенный вклад в ошибку возникает в результате вычитания вклада примеси ^{12}C . Недостаточная статистическая обеспеченность данных не позволяет идентифицировать наблюдаемую при $MM \approx 7$ МэВ структуру как резонансное состояние ^{12}Li .

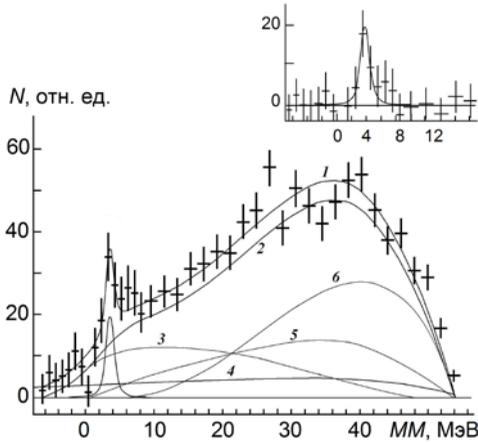


Рис. 7. Спектр недостающих масс реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$. Точки с погрешностями получены после вычитания примеси ^{12}C . Кривыми показан результат фитирования и распределения Брейта-Вигнера. 1 – общее описание. Распределения фазовых объемов: 2 – суммарный, 4 – вклад от $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)^{11}\text{Li}n$, 5 – $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)^{10}\text{Li}2n$, 6 – $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)^{10}\text{Li}3n$. 3 – вклад от случайных совпадений. Врезка – спектр, полученный после вычитания из исходного спектра суммарного распределения по фазовым объемам.

На рис. 7 вблизи $MM \approx 0$ МэВ отсутствуют какие-либо указания на проявление виртуального s -состояния с длиной рассеяния 13.7(1.6) фм, наблюдаемого в работе [4]. Одна из причин может быть связана с заметной селективностью заселенности уровней в реакции $A(\pi^-, pp)\text{X}$ [12]. Следует отметить, что в измеренном в работе [4] спектре эффективных масс системы $^{11}\text{Li} + n$ при $E_r > 3$ МэВ наблюдается некоторое усиление. Однако представленные данные ограничены значением $E_r = 4$ МэВ, что не позволяет связать это усиление с наблюдаемым нами состоянием ^{12}Li .

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Изотоп ^{10}Li

- Данные о резонансных параметрах основного и возбужденных состояний изотопа ^{10}Li получены в двух- и трехчастичных каналах реакции: $^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$, $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)\text{X}$, $^{14}\text{C}(\pi^-, dd)\text{X}$ и $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$.
- Определены резонансные параметры следующих известных уровней: основное состояние $E_r = 0.1 \pm 0.1$ МэВ – в реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, p)\text{X}$; первое возбужденное состояние $E_r = 0.7 \pm 0.2$ МэВ – во всех исследуемых каналах реакции; состояние $E_r = 4.8 \pm 0.1$ МэВ в реакциях на мишенях ^{11}B и ^{12}C .
- Впервые в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pt)\text{X}$ обнаружено состояние с $E_r = 2.2 \pm 0.1$ МэВ.
- Впервые в двух каналах реакции на мишени ^{14}C обнаружено резонансное состояние с $E_r = 6.1 \pm 0.1$ МэВ.

- Впервые в реакциях $^{12}\text{C}(\pi^-, pp)X$ и $^{11}\text{B}(\pi^-, p)X$ обнаружен высоковозбужденный уровень с $E_r = 7.9 \pm 0.2$ МэВ.
 - Впервые в реакции $^{11}\text{B}(\pi^-, p)X$ обнаружено наиболее высоковозбужденное состояние с $E_r = 10.1 \pm 0.1$ МэВ.
2. *Изотоп ^{11}Li*
- Информация об основном и возбужденных состояниях изотопа ^{11}Li получена в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pd)X$.
 - Определены резонансные параметры первых двух возбужденных состояний с $E_x = 0.9 \pm 0.1$ МэВ и $E_x = 2.3 \pm 0.3$ МэВ.
 - Впервые обнаружен уровень с $E_x = 3.9 \pm 0.3$ МэВ.
3. *Изотоп ^{12}Li*
- Поиск изотопа ^{12}Li выполнен в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, pp)X$.
 - Впервые обнаружено возбужденное состояние с резонансной энергией $E_r = 4.0 \pm 0.2$ МэВ.
 - Получено указание на существование уровня с энергией возбуждения $E_r \approx 7$ МэВ.
4. Реализован метод корректного учета фона (точность 1%) от примеси изотопа ^{12}C в радиоактивной мишени ^{14}C : содержание ^{12}C в ^{14}C составляет 23%.

Публикации по теме диссертации:

1. Гуров Ю.Б., Калинин Е.М., Карпухин В.С., Короткова Л.Ю. и др. Спектроскопия изотопа ^{10}Li в реакциях поглощения остановившихся пионов на радиоактивной мишени ^{14}C // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75 (4). С. 495 - 498; *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2011, V. 75 (4). P. 459 – 462. DOI:10.3103/S1062873811040198 (индексируется в базе данных Scopus).
2. Гуров Ю.Б., Гребенев В.Н., Карпухин В.С., Короткова Л.Ю. и др. Спектроскопия тяжелых изотопов лития // Вестник НИЯУ МИФИ. 2012. Т. 1. № 1. С. 18 – 25 (индексируется в РИНЦ).
3. Chernyshev B.A., Gurov Yu.B., Karpukhin V.S., Korotkova L.Yu. et al. Spectroscopy of the heavy lithium isotopes $^{10-12}\text{Li}$ // *European Physics Journal A (EPJA)*. 2013. V. 49. P. 68 (1–7). DOI:10.1140/epja/i2013-13068-9; индексируется в Scopus и Web of Science.
4. Chernyshev B.A., Gurov Yu.B., Korotkova L.Yu. et al. Study of the level structure of the lithium isotope ^{10}Li in stopped pion absorption // *International Journal of Modern Physics E (IJMPE)*. 2015. V. 24. P.1550004 (1–9). DOI:10.1142/S0218301315500044; индексируется в Scopus и Web of Science.

5. *Гуров Ю.Б., Калинин Е.М., Карпухин В.С., Короткова Л.Ю. и др.* Поиск экзотического изотопа лития ^{12}Li в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, \text{pp})\text{X}$. // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. М., НИЯУ МИФИ. 2010. Т.4. С. 41 - 43.
6. *Короткова Л.Ю.* Исследование тяжелых изотопов лития в реакциях поглощения остановившихся отрицательных пионов. // Сборник аннотаций. VIII Курчатовская молодежная научная школа. М., 2010. С.185.
7. *Гуров Ю.Б., Калинин Е.М., Карпухин В.С., Короткова Л.Ю. и др.* Спектроскопия тяжелого изотопа лития ^{11}Li в реакции $^{14}\text{C}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Аннотация докладов. М., НИЯУ МИФИ. 2011. Т.2. С. 128.
8. *Короткова Л.Ю., Лапушкин С.В., Щуренкова Т.Д.* Образование возбужденных состояний изотопов Li и He в реакциях поглощения остановившихся π^- -мезонов. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012, М., 2012. Т.2. С. 159.
9. *Короткова Л.Ю., Гуров Ю.Б., Лапушкин С.В.* Спектроскопия тяжелых изотопов $^{11,12}\text{Li}$ // Сборник трудов. V Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. ФИАН 2013. М., 2013. С. 47.
10. *Гуров Ю.Б., Короткова Л.Ю., Лапушкин С.В., Притула Р.В., Чернышев Б.А.* Спектроскопия тяжелого изотопа ^{10}Li // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014, М., 2014. Т.1. С. 63.
11. *Гуров Ю.Б., Короткова Л.Ю., Лапушкин С.В. и др.* Спектроскопия тяжелых изотопов лития $^{10-12}\text{Li}$ // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015, М., 2015. Т.1. С. 62.
12. *Chernyshev B.A., Gurov Yu.B., Korotkova L.Yu. et al.* Search for rare cluster configurations in the nucleus ^{14}C in the reaction $^{14}\text{C}(\pi^-, \text{pd})\text{X}$ // Book of abstracts. LXV Meeting on nuclear spectroscopy and nuclear structure (Nucleus-2015). Saint-Petersburg, 2015. p. 67.
13. *Korotkova L.Yu., Chernyshev B.A., Gurov Yu.B. et al.* Search for the excited states of the lithium isotopes $^{10-12}\text{Li}$ // XXI International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Applications & International Symposium on exotic nuclei. Book of Abstracts, Varna (Bulgaria), 2015. p. 45.

Список цитируемой литературы:

1. *Tanihata I. et al.* Recent experimental progress in nuclear halo structure studies // Prog. Part. and Nucl. Phys. 2013. V. 68. P. 215. DOI:10.1016/j.pnpnp.2012.07.001.
2. *Tilley D. R. et al.* Energy levels of light nuclei $A = 8, 9, 10$ // Nucl. Phys. A. 2004. V. 745. P. 155. DOI:10.1016/j.nuclphysa.2004.09.059.
3. *Simon H. et al.* Systematic investigation of the drip-line nuclei ^{11}Li and ^{14}Be and their unbound subsystems ^{10}Li and ^{13}Be // Nucl. Phys. A. 2007. V. 791. P. 267. DOI 10.1016/j.nuclphysa.2007.04.021.

4. *Aksyutina Yu. et al.* Lithium isotopes beyond the drip line // *Phys. Lett. B.* 2008. V. 666. P. 430. DOI:10.1016/j.physletb.2008.07.093.
5. *Jeppesen H.B. et al.* Study of ^{10}Li via the $^9\text{Li}(^2\text{H}, p)$ reaction at REX-ISOLDE // *Phys. Lett. B.* 2006. V. 642. P. 449. DOI:10.1016/j.physletb.2006.09.060.
6. *Гуров Ю.Б. и др.* Поиск сверхтяжелых изотопов водорода в реакциях поглощения пионов // *ЭЧАЯ.* 2009. Т. 40 (4). С.1063.
7. *Bohlen H.G. et al.* Study of weakly bound and unbound states of exotic nuclei with binary reactions // *Nucl. Phys. A.* 1997. V. 616 P. 254. DOI:10.1016/S0375-9474(97)00096-1.
8. *Kelley J.H. et al.* Energy levels of light nuclei $A = 11$ // *Nucl. Phys. A.* 2012. V. 880. P. 88. DOI:10.1016 /j.nuclphysa.2012.01.010.
9. *Bowman J.D. et al.* Detection of neutron-excess isotopes of low-Z elements produced in high-energy nuclear reactions // *Phys. Rev. C.* 1974. V. 9. P. 836. DOI:10.1103/PhysRevC.9.836
10. *Gornov M.G.* Experimental search for ^{12}Li // *15th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC 99)*, Uppsala, Sweden (University Press, Uppsala).1999. P. 216.
11. *Hall C.C. et al.* First observation of excited states in ^{12}Li // *Phys. Rev. C.* 2010. V. 81. P. 021302. DOI:10.1103/PhysRevC.81.021302.
12. *Гуров Ю.Б. и др.* // *Ядерная Физика.* 2006. Т. 69. С. 1448.