

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2004-127

На правах рукописи
УДК 539.172.13 + 539.172.17

СИДОРЧУК
Сергей Иванович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА $^4,5,7\text{H}$ В РЕАКЦИЯХ
НА ПУЧКАХ ЯДЕР ^3H И ^8He**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2004

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Головков М.С.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Карнаузов
доктор физико-математических наук,
профессор Б.В. Данилин

Ведущее предприятие: НИИ физики СПбУ (г. С-Петербург)

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2004 года в « _____ » 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 обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2004 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А.Г. Попеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Работа была выполнена в рамках исследований свойств ядер вблизи границы нуклонной стабильности, которые проводятся в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. В настоящее время благодаря развитию техники радиоактивных вторичных пучков и методической базы эксперимента появились новые возможности для исследований свойств легких нейтроноизбыточных ядер. Важное место в этой группе ядер занимают нуклонно-нестабильные изотопы водорода. Несмотря на почти сорокалетнюю историю исследований, на сегодняшний день экспериментальные данные о свойствах этих изотопов противоречивы, а в случае ${}^7\text{H}$ практически полностью отсутствуют.

Использование радиоактивных пучков позволяет получать экзотические ядра в реакциях передачи одного или двух нуклонов, которые характеризуются большими сечениями по сравнению с реакциями на пучках стабильных ядер, поскольку механизм реакций со стабильными ядрами во входном канале и экзотическими ядерными системами в выходном канале, как правило, связан со сложной перестройкой исходной системы.

Применение систем регистрации с большим акцептансом позволяет изучать эти ядра в широких диапазонах кинематических параметров, благодаря чему стала возможной более надежная идентификация и разделение различных процессов. Высокая эффективность регистрации, характерная для таких систем, в сочетании с использованием в качестве мишеней сжиженных газов, таких как тритий и дейтерий, позволяет проводить исследования процессов, для которых характерен уровень сечения порядка нескольких десятков $\mu\text{б/ср}$.

Целью работ, вошедших в диссертацию, является:

- Изучение свойств резонансного состояния ${}^4\text{H}$ в реакциях однейтронной передачи ${}^2\text{H}(t,p){}^4\text{H}$ и ${}^3\text{H}(t,d){}^4\text{H}$. Выбор оптимальных условий для выделения резонанса и определение его параметров;

- Изучение свойств тяжелого изотопа водорода ^5H в реакции передачи двух нейтронов $^3\text{H}(t,p)^5\text{H}$. Определение энергии и ширины основного состояния ^5H .
- Исследование механизма квазисвободного рассеяния налетающего тритона на протоне, связанном в дейтроне, и на дейтроне, связанном в мишенном тритоне. Сравнение характеристик этих процессов.
- Определение верхнего предела времени жизни метастабильного состояния ^7H в реакции $^2\text{H}(^8\text{He}, ^7\text{H})$ методом прямой регистрации.

В связи с указанными целями в диссертационной работе **ставятся и решаются следующие задачи:**

- Проведение экспериментального исследования реакции передачи нейтрона $^2\text{H}(t,p)^4\text{H}$ с использованием первичного пучка тритонов с энергией 58 МэВ, жидкой дейтериевой мишени и системы регистрации продуктов реакции, позволяющей измерять кинематические характеристики как заряженных частиц, так и нейтронов. Для определения энергии в системе тритон – нейтрон использовался метод недостающей массы, в качестве дополнительных признаков использовались два типа совпадений: совпадения двух заряженных частиц и совпадения заряженной частицы с нейтроном. По результатам измерений выполнен комплексный анализ процессов и механизмов реакций в выходном канале p-t-n. Найдены кинематические параметры, позволяющие оптимальным образом идентифицировать и разделить все процессы в данном выходном канале: реакцию передачи нейтрона с образованием резонанса ^4H , квазисвободное рассеяние налетающего тритона на протоне, связанном в дейтроне, развал дейтрона с взаимодействием в конечном состоянии протон – нейтрон и реакцию передачи протона с образованием нуклонно-нестабильных возбужденных состояний α -частицы. Определены кинематические области, наиболее оптимальные с точки зрения выделения определенных процессов и минимизации вклада конкурирующих реакций. Определены параметры резонанса ^4H , включая полюс S-матрицы, а также характеристики квазисвободного рассеяния.

- Проведение экспериментального исследования реакции передачи нейтрона ${}^3\text{H}(t,d){}^4\text{H}$ методом недостающей массы с использованием первичного пучка тритонов с энергией 58 МэВ и жидкой тритиевой мишени. Задачи, аналогичные упомянутым в предыдущем пункте, решаются для выходного канала d-t-n. Идентификация процессов и механизмов реакций, возможных в данном выходном канале: реакция передачи нейтрона с образованием ${}^4\text{H}$, реакция передачи дейтрона с образованием возбужденного состояния ${}^5\text{He}$, а также квазисвободного рассеяния налетающего/мишенного тритона на дейтроне, связанном в мишенном/налетающем тритоне. Определение параметров резонанса ${}^4\text{H}$ и характеристик квазисвободного рассеяния тритона на дейтроне, связанном в мишенном тритоне.
- Проведение экспериментального исследования реакции передачи двух нейтронов ${}^3\text{H}(t,p){}^5\text{H}$ на первичном пучке тритонов с энергией 58 МэВ с использованием жидкой тритиевой мишени. Получение спектров энергии ${}^5\text{H}$ методом недостающей массы при условии регистрации ядер отдачи (инклюзивный спектр протонов), совпадений протонов с тритонами из распада ${}^5\text{H}$, а также тройных совпадений протон – тритон – нейтрон. Проведение компьютерных симуляций вероятных процессов в выходном канале p-t-n-n. Результаты симуляций использовались при подгонке экспериментального спектра энергии ${}^5\text{H}$, полученного в результате регистрации совпадений трех частиц. Выделение резонансов в системе ${}^5\text{H}$ и определение их параметров.
- Оптимизация эксперимента по поиску долгоживущего ${}^7\text{H}$ методом его прямой регистрации в реакции выбивания протона из ядра ${}^8\text{He}$ ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^7\text{H})$. Проведение эксперимента на вторичном пучке ядер ${}^8\text{He}$ с использованием жидкой дейтериевой мишени. Определение и исключение фоновых процессов, способных имитировать регистрацию ${}^7\text{H}$.
- Разработка и создание многопроволочных пропорциональных камер с высокой эффективностью, предназначенных для измерения траекторий ядер вторичных радиоактивных пучков с малой ионизирующей способностью.

Научная новизна работ, вошедших в диссертацию, заключается в следующем:

1. Впервые в эксперименте получен спектр энергии ${}^4\text{H}$, практически не содержащий вклада конкурирующих процессов. При анализе результатов эксперимента использован оригинальный метод представления данных, позволяющий разделять области локализации процессов с широкими распределениями кинематических переменных. Результатом измерений является практически полное, в пределах экспериментальных ошибок, совпадение значений энергии и ширины основного состояния ${}^4\text{H}$, с параметрами, полученными принципиально независимым способом, в результате анализа фазовых сдвигов упругого рассеяния в системе изоспин-аналогового состояния ${}^4\text{Li}$.
2. Впервые в результате эксперимента получены значения энергии и ширины основного состояния ${}^4\text{H}$, соответствующие полюсу S-матрицы.
3. Впервые проведено детальное исследование квазисвободного рассеяния тритона на заряженных частицах, связанных в дейтроне и тритоне, в области малых энергий. Близкие значения энергии в системе цм для двух процессов дают возможность сравнить характеристики квазисвободного рассеяния на частицах, связанных в ядрах, значительно отличающихся энергией связи.
4. Впервые предпринята попытка получения сверхтяжелого изотопа водорода ${}^7\text{H}$ в реакции выбивания протона из ядра ${}^8\text{He}$ (${}^8\text{He}, {}^7\text{H}$). Толщина жидкой дейтериевой мишени обеспечивала полную остановку ядер пучка, таким образом измерения были проведены в широком диапазоне энергий налетающих ядер от начальной энергии пучка (153 МэВ) до энергии, соответствующей порогу реакции (87 МэВ). В результате эксперимента определен верхний предел времени жизни ${}^7\text{H}$. Установлен верхний предел сечения образования ${}^7\text{H}$ в реакции ${}^8\text{He}({}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^7\text{H})) - 3 \text{ нб/ср}$.

Практическая ценность.

- В работе показано, что задача определения параметров широких состояний требует достоверной идентификации и описания конкурирующих процессов. Кроме этого, показано, что к ошибкам при определении параметров широких

состояний может приводить использование приближенной формы записи формулы Брейта-Вигнера, а также пренебрежение фактором фазового объема, который существенным образом влияет на значения параметров широких состояний при малых энергиях в системе центра масс.

- Поскольку теоретическое описание структуры ${}^5\text{H}$ базируется на свойствах резонанса ${}^4\text{H}$, результаты экспериментов по изучению ${}^4\text{H}$ могут использоваться для построения теоретических моделей более тяжелого изотопа водорода ${}^5\text{H}$.
- Диапазон энергии основного состояния ${}^7\text{H}$ 0.1 – 1.8 МэВ, определенный в настоящей работе, может быть использован как в теории, так и при планировании новых экспериментов по изучению структуры ${}^7\text{H}$.
- Многопроволочные пропорциональные камеры, созданные в рамках диссертационной работы, могут быть использованы в экспериментах с использованием вторичных пучков. Камеры испытаны на вторичных пучках частиц с малой ионизирующей способностью ${}^{6,8}\text{He}$ с энергией в диапазоне от 150 МэВ до 200 МэВ. Эффективность регистрации камер составляет около 90%. Предельная интенсивность пучка, отвечающая данной эффективности, составляет $5 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ и может быть увеличена при использовании соответствующих газовых смесей.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на следующих совещаниях и конференциях:

- Международный симпозиум EXON-2001 (Байкал, Россия, 24-28 июля 2001 г.)
- 17 Международная конференция Nuclear Physics in Astrophysics (Дебрецен, 30 сентября – 4 октября 2002 г.)
- VIII Международная конференция Nucleus – Nucleus Collisions (Москва, Россия, 17-21 июля 2003 г.)
- Международный симпозиум EXON-2004 (Петергоф, Россия, 5-12 июля 2004 г.)

Публикации. По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 6 работ. Результаты, вошедшие в эти работы, были получены автором в период 1999 – 2004 гг.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и изложена на 100 страницах машинописного текста, включая 36 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленных задач, содержится обзор литературных данных по теме диссертации, сформулирована цель работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, и приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе приведено описание экспериментальных методик, включающее описание масс-сепаратора АКУЛИНА и характеристики первичного пучка тритонов и вторичного пучка ^8He . Приведено описание криогенного мишенного устройства, предназначенного для получения жидких дейтериевой и тритиевой мишеней, которые использовались в экспериментах. Кроме этого, в первой главе содержится описание детекторов, входивших в систему регистрации продуктов реакций, а также описание и характеристики многопроволочных пропорциональных камер, предназначенных для измерения траекторий частиц пучка.

Вторая глава посвящена результатам эксперимента по изучению ^4H в реакциях передачи одного нейтрона $^2\text{H}(t,p)^4\text{H}$ и $^3\text{H}(t,d)^4\text{H}$. В этой главе приводится описание схем экспериментов и результатов, полученных в различных измерениях, включая измерения совпадений заряженных частиц $^2\text{H}(t,pt)$ и $^3\text{H}(t,dt)$, а также совпадений заряженной частицы с нейтроном $^2\text{H}(t,pn)$ и $^3\text{H}(t,dn)$. Для измерения углов и энергий заряженных частиц в эксперименте использовались два телескопа, состоявших из различных наборов кремниевых детекторов. Нейтроны регистрировались с помощью нейтронного спектрометра DEMON. Частицы, отвечающие выходному каналу p-t-n, благодаря большому акцептансу системы регистрации регистрировались в широком диапазоне кинематических параметров.

Регистрация парных совпадений частиц из трехтельного выходного канала обеспечивала условия кинематически полного измерения.

Был проведен детальный анализ конкурирующих процессов и показано, что все возможные парные взаимодействия продуктов реакций в конечном состоянии и механизмы реакций дают вклад в изучаемые выходные каналы.

В случае реакции ${}^2\text{H}(t,p){}^4\text{H}$ для выходного канала p-t-n идентифицированы взаимодействия в конечном состоянии тритон-нейтрон (реакция передачи нейтрона с образованием ${}^4\text{H}$), протон-нейтрон (виртуальное состояние синглетного дейтрона) и квазисвободное рассеяние тритона на протоне, связанном в дейтроне. Показано, что имеются признаки наличия взаимодействия в конечном состоянии протон - тритон (реакция передачи протона с образованием нуклонно - нестабильного возбужденного состояния α -частицы). Последняя реакция имеет максимум энергетического распределения сечения ниже порога регистрации. Перечисленные процессы, за исключением квазисвободного рассеяния налетающего тритона на нейтроне, связанном в дейтроне, кинематика которого не согласуется с аксептансом системы регистрации, полностью исчерпывают возможные взаимодействия в выходном канале p-t-n. Результаты измерений наиболее полно и наглядно могут быть представлены с помощью распределения проекций импульсов нейтрона на плоскость реакции. На рис. 1 показано такое распределение для зарегистрированных p-t совпадений. В этом случае нейтрон является ненаблюдаемым и его кинематические характеристики вычисляются. Поскольку основным предметом исследования является ${}^4\text{H}$, импульс нейтрона вычисляется в системе цм ${}^4\text{H}$. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены, соответственно, начала систем цм t-n, p-t-n и лабораторной системы. Направления вылета протона и ${}^4\text{H}$ в системе цм t-n показаны стрелками. В данном представлении волна, расходящаяся от нуля системы координат, соответствует распаду основного состояния ${}^4\text{H}$. В окрестности области 3 сосредоточены события, отвечающие квазисвободному рассеянию налетающего тритона на протоне, связанном в мишенном дейтроне. События, локализованные в левой части рисунка, соответствуют взаимодействию в конечном состоянии протона и нейтрона.

Наиболее благоприятные условия для изучения ${}^4\text{H}$, с точки зрения минимизации вклада конкурирующих процессов, реализуются в случае

регистрации p-n совпадений. На рис. 1 эта область соответствует угловому диапазону $0^\circ < \varphi_n < 120^\circ$. Спектр недостающей массы ${}^4\text{H}$, полученный в этих условиях, показан на рис. 2.

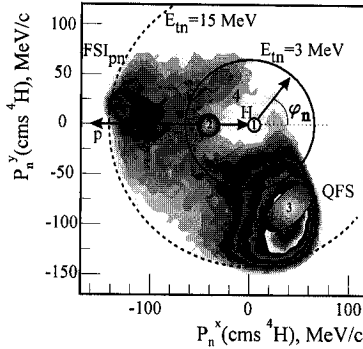


Рис. 1. Импульсное распределение нейтронов в системе цм t-n, спроецированное на плоскость реакции ${}^2\text{H}(t,p){}^4\text{H}$, полученное при условии p-t совпадений.

Аналогичный анализ экспериментальных данных был сделан для случая реакции ${}^3\text{H}(t,d){}^4\text{H}$. Окончательным результатом измерений являются три спектра недостающей массы ${}^4\text{H}$, полученных в измерениях ${}^2\text{H}(t,pt)$, ${}^2\text{H}(t,pn)$ и ${}^3\text{H}(t,dn)$. При подгонке спектров использовались энергетические зависимости сечений для

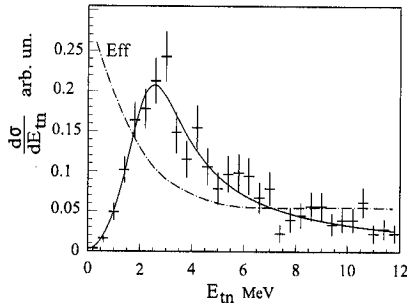


Рис. 2. Спектр энергии ${}^4\text{H}$, измеренный в реакции ${}^2\text{H}(t,pn)$. Штрих-пунктирной линией показана эффективность регистрации в зависимости от энергии E_{tn} .

идентифицированных процессов, полученные в результате соответствующих симуляций. Для описания резонанса ${}^4\text{H}$ использовалась формула Брейта-Вигнера

$$d\sigma \sim \frac{1}{k_{in}} \frac{\Gamma(E_{in})}{[E_{in} - E_{res} - \Delta_r(E_{in})]^2 + [\Gamma(E_{in})/2]^2} k_{in}^2 k_{in-p}^2 dk_{in} dk_{in-p} \delta_{\Sigma E},$$

в которой учитывался фактор фазового объема, что существенно при относительно невысокой энергии в системе цм $E_{cm} = 21$ МэВ.

Параметры основного состояния ${}^4\text{H } 2'$, полученные в результате одновременной подгонки трех спектров, приведены в таблице 1. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами фазового анализа данных по упругому рассеянию в изоспин-аналоговой системе p - ${}^3\text{He}$.

Таблица 1. Параметры резонанса ${}^4\text{H}$, полученные в различных работах.

	E_{res} , МэВ	γ^2 , МэВ	Γ_{res} , МэВ	Γ_{obs} , МэВ	E_0 , МэВ	Γ_0 , МэВ
[Sid04]	3.05 ± 0.19	3.03 ± 0.65	5.14 ± 1.38	4.18 ± 1.02	1.99 ± 0.37	2.85 ± 0.30
[Bla91]	3.1 ± 0.3	2.3				
[Til92]	3.19 (2)		5.42 (2)			
[Ara03]					1.52 (2)	4.11 (2)

[Sid04] - S.I. Sidorchuk et al., Phys. Lett. **B594** (2004) 54-60.

[Bla91] - S. Blagus et al., Phys. Rev. **C44** (1991) 325-328.

[Til92] - D.R. Tilley et al., Nucl. Phys. **A541** (1992) 1-104.

[Ara03] - K. Arai, Phys. Rev. **C68** (2003) 034303-1 – 7.

В работе [Sid04] опубликованы результаты экспериментов, вошедшие в настоящую диссертационную работу. В работах [Bla91] и [Sid04] изучалась реакция ${}^2\text{H}(t,p){}^2\text{H}$. В работе [Til92] содержатся результаты зарядово-симметричного отражения R-матрицы ${}^4\text{Li}$, этот результат по ряду причин можно считать наиболее надежным из всей совокупности экспериментальных данных. Из таблицы видно, что в пределах экспериментальных ошибок результаты работ [Til92] и [Sid04] можно считать совпадающими.

В двух последних колонках таблицы 1 приведены энергия и ширина основного состояния ${}^4\text{H } E_0$ и Γ_0 , соответствующие полюсу S-матрицы $E = E_0 - i\Gamma_0/2$. Эти параметры отличаются от E_{res} и Γ_{obs} . В частности, именно Γ_0 определяет время жизни системы. Комплексная энергия $E = E_0 - i\Gamma_0/2$ является решением уравнения

$$[E - E_{res} - \Delta(E)]^2 + [\Gamma(E)/2]^2 = 0$$

при условии $k = \sqrt{2\mu E} / \hbar = k_1 - ik_2$, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$. В последней строке таблицы 1 приведены результаты теоретической работы [Ага03].

Поскольку в реакции однонуклонной передачи кроме основного состояния $J^\pi = 2^-$ может заселяться возбужденное состояние 1^- , вполне вероятно, что полученный результат $E_{\text{res}} = 3.05 \pm 0.19$ МэВ может характеризовать сумму двух состояний, которые вследствие большой ширины не могут быть разделены экспериментально. С другой стороны, можно предположить, что благодаря статистическому фактору $2J+1$ преимущественно заселяется состояние 2^- . Это предположение хорошо согласуется с результатами, полученными путем зарядово-симметричного отражения R-матрицы ${}^4\text{Li}$ для основного состояния ${}^4\text{H} 2^-$: $E_{\text{res}} = 3.19$ МэВ и $\Gamma_{\text{res}} = 5.4$ МэВ.

Третья глава посвящена анализу результатов эксперимента по изучению ${}^5\text{H}$ в реакции передачи двух нейтронов ${}^3\text{H}(t,p){}^5\text{H}$. Увеличение числа частиц в выходном канале до четырех радикально усложняет анализ в сравнении с трехтелным каналом d-t-n, который приводит к образованию ${}^4\text{H}$. Большое количество конкурирующих процессов выходном канале реакции, а также меньшее сечение образования не позволяют выделить резонанс ${}^5\text{H}$ с такой же степенью наглядности, как это было сделано в случае ${}^4\text{H}$. Регистрация протона отдачи и тритона из распада ${}^5\text{H}$ позволяет отделить процессы, протекающие с участием мишенного трития, от фоновых реакций. Основной процесс в выходном канале p-t-n-p, идущий с наибольшим сечением в лабораторной системе координат, характеризуется малой лабораторной энергией обоих нейтронов, что дает основания полагать, что этим процессом является квазисвободное рассеяние налетающего тритона на протоне, связанном в мишенном тритоне. При этом два нейтрона являются зрителями. Наиболее благоприятные условия с точки зрения минимизации конкурирующих процессов обеспечиваются при условии регистрации тройных совпадений p-t-n и ограничений по лабораторной энергии нейтронов, позволяющих уменьшить вклад квазисвободного рассеяния. Полученный в этих условиях спектр недостающей массы ${}^5\text{H}$ показан на рис. 3.

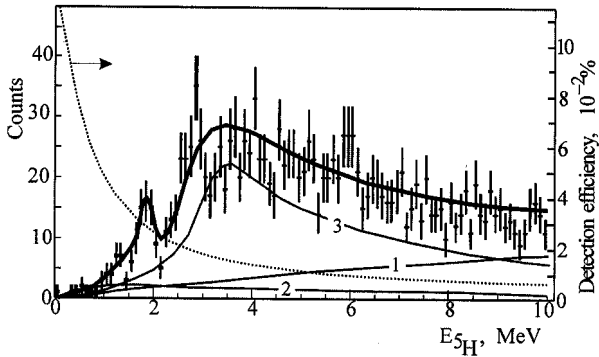


Рис. 3. Спектр недостающей массы ${}^5\text{H}$, полученный в реакции ${}^3\text{H}(t, \text{ptn})$. Точечная соответствует эффективности регистрации. Кривые 1, 2 и 3 получены в результате симуляций конкурирующих процессов.

Полученный спектр описывается при помощи суммы вкладов различных процессов. Зависимости сечений от энергии ${}^5\text{H}$ для этих процессов были получены в результате симуляций. Кривые 1, 2 и 3 отвечают вкладам, соответственно, четырехтельного фазового объема и взаимодействий в конечном состоянии n-p и t-p. Для описания взаимодействия t-p были использованы результаты наших экспериментов, посвященных изучению ${}^4\text{H}$. Возможно также альтернативное описание спектра, согласно которому основной вклад в спектр (кривая 3) дает возбужденное состояние ${}^5\text{H}$, принадлежащее к дублету $3/2^+$ и $5/2^+$. Точечная кривая показывает зависимость эффективности регистрации от энергии ${}^5\text{H}$.

Пик при энергии 1.8 МэВ интерпретируется как проявление основного состояния ${}^5\text{H}$ с $J^\pi = 1/2^+$. Ширина пика является необычно малой, относительно небольшая статистика позволяет определить только верхнюю границу ширины на уровне 0.5 МэВ. Малая ширина пика может быть результатом интерференции основного и возбужденного состояний ${}^5\text{H}$. Статистическая достоверность этого пика составляет около двух стандартных отклонений.

В четвертой главе содержится обоснование эксперимента реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^7\text{H})$ по поиску долгоживущего изотопа водорода ${}^7\text{H}$ в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^7\text{H})$ методом прямой регистрации, описание эксперимента и его результаты. Обоснование базируется на зависимости времени жизни ${}^7\text{H}$ от энергии его распада, полученной методом гиперсферических гармоник в рамках модели с источником. Эта зависимость предполагает ширину основного состояния, соответствующую

времени жизни ${}^7\text{H}$ 1 нс, при энергии распада ниже 100 кэВ. Энергия распада основного состояния ${}^7\text{H}$, равно как и его ширина, в настоящее время не известны, однако результаты всех без исключения теоретических расчетов говорят о том, что распад ${}^7\text{H}$ должен быть сильно замедлен благодаря отсутствию промежуточных резонансов, в результате чего ${}^7\text{H}$ должен распадаться сразу на пять частиц. Результаты единственного на сегодняшний день эксперимента по измерению энергии резонанса в системе ${}^7\text{H}$ дают основания предполагать, что эта энергия может быть весьма малой. Таким образом, эксперимент, ориентированный на прямую регистрацию ${}^7\text{H}$, позволяет определить верхнюю границу времени его жизни и, соответственно, нижнюю границу ширины основного состояния. Выбранная для эксперимента реакция выбивания протона из ядра ${}^8\text{He}$ предполагает селективное заселение основного состояния ${}^7\text{H}$, «заготовленного» в исходном ядре.

В эксперименте использовался вторичный пучок ядер ${}^8\text{He}$ и жидкая дейтериевая мишень. Идентификация зарегистрированных частиц проводилась по стандартной ΔE - E методике. Телескоп, предназначенный для регистрации продуктов реакции, включал четыре ΔE – детектора и основным признаком регистрации ${}^7\text{H}$ являлись соответствующие корреляции в четырех ΔE - E матрицах. Толщина мишени выбиралась исходя из условия максимальной дискриминации выхода из мишени частиц с атомным номером $Z = 2$. Благодаря большой толщине мишени реакция могла проходить в широком диапазоне энергий налетающих частиц: от начальной энергии пучка (153 МэВ) до порога реакции (87 МэВ). При этом энергия ${}^7\text{H}$, вылетевшего из мишени, могла изменяться в диапазоне от 55 до 105 МэВ, что позволяло зарегистрировать его в E - детекторе. Инверсная кинематика реакции обеспечивала высокую эффективность регистрации ${}^7\text{H}$.

В результате эксперимента не было обнаружено событий, которые могли бы быть ассоциированы с регистрацией ${}^7\text{H}$. Верхний предел сечения образования ${}^7\text{H}$, достигнутый в измерении, составляет 3 нб/ср при полном интеграле ядер пучка, прошедших через мишень, $3.3 \cdot 10^9$. Таким образом, верхний предел времени жизни метастабильного ${}^7\text{H}$, отвечающий среднему времени пролета от точки образования до E – детектора, составляет менее 1 нс, что соответствует, согласно оценкам,

сделанным рамках модели «с источником», нижнему пределу энергии распада ${}^7\text{H}$ 50 – 100 кэВ.

В пятой главе приводятся результаты изучения процесса квазисвободного рассеяния тритона на протоне и дейтроне, связанных, соответственно, в дейтроне и тритоне. Квазисвободные процессы являлись фоновыми в экспериментах, посвященных исследованиям резонансов в системах ${}^{4,5}\text{H}$, однако результаты наших измерений, а также литературные данные свидетельствуют о том, что эти процессы доминируют в реакциях с участием малонуклонных ядер в области малых энергий и, следовательно, их вклад в спектры энергии изучаемых состояний может в некоторых случаях быть определяющим. Свойства этих процессов, особенно при малых энергиях, таковы, что в определенных случаях они могут имитировать резонансы в изучаемых ядерных системах. Кроме этого, квазисвободные процессы предоставляют уникальные возможности для изучения ядерной структуры и механизмов реакций. В связи с этим изучение квазисвободных процессов приобретает высокую степень актуальности. В настоящее время современные системы регистрации позволяют исследовать механизм таких процессов на качественно новом уровне, в значительно более широких диапазонах измеряемых параметров.

В пятой главе содержатся результаты измерений угловых и импульсных распределений нейтрона в окрестности начала лабораторной системы координат, полученных в реакциях ${}^2\text{H}(t,pt)$ и ${}^3\text{H}(t,dt)$. В передней, по направлению пучка, полусфере вылета нейтрона угловые распределения нейтронов являются изотропными. В задней полусфере форма импульсного распределения в нашем случае не может быть определена из-за ограничений аксептанса системы регистрации. Показано, что импульсные распределения нейтрона в случае обеих реакций хорошо описываются модифицированной волновой функцией ядра мишени в импульсном представлении (см. рис. 4). Модификация волновой функции заключается во введении радиуса обрезания, в результате чего Фурье-преобразование волновой функции с радиусом обрезания R_C в качестве нижнего предела интегрирования приводит к следующему виду волновой функции в импульсном представлении

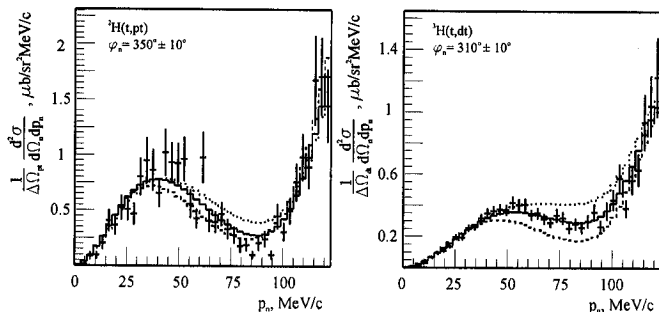


Рис. 4. Импульсные распределения нейтронов для реакций ${}^2\text{H}(t,pt)$ и ${}^3\text{H}(t,dt)$. Точечная, сплошная и пунктирная линии соответствуют сумме вкладов ВКС_{пр}, ${}^4\text{H}$ и КСР с радиусами обрезания, соответственно, 2, 3 и 4 фм.

$$|\phi(k)|^2 \sim \left[\frac{e^{-\gamma R_c}}{k^2 + \gamma^2} \left(\frac{\gamma}{k} \sin kR_c + \cos kR_c \right) - \frac{e^{-\beta R_c}}{k^2 + \beta^2} \left(\frac{\beta}{k} \sin kR_c + \cos kR_c \right) \right]^2$$

Радиус обрезания исключает из процесса КСР внутреннюю область исходного ядра. Подгонка экспериментальных распределений импульсов спектатора с использованием этого выражения и R_c в качестве одного из подгоночных параметров дает значение радиуса обрезания для квазисвободного рассеяния тритона на протоне, связанном в дейтроне $R_c = 4 \pm 1$ фм и для квазисвободного рассеяния налетающего тритона на дейтроне, связанном в мишенном тритоне $R_c = 2.9 \pm 0.5$ фм. Полученные значения радиусов пределах экспериментальных ошибок являются совпадающими, несмотря на значительные различия в энергиях отделения нейтрона от исходных ядер. Вместе с тем можно отметить, что средние значения радиусов согласуются с соответствующими величинами характерной длины $R = \hbar/\gamma = \hbar/\sqrt{2\mu S_s}$ (S_s – энергия отделения спектатора), характеризующей скорость убывания волновой функции в точке сшивки внутреннего и внешнего решений уравнения Шредингера. Характерная длина принимает значения 4.3 фм в случае дейтрона и 2.2 фм в случае тритона. Введение радиуса обрезания свидетельствует о том, что процесс КСР при энергии в системе цм порядка нескольких десятков МэВ носит периферийный характер.

Значения двойных дифференциальных сечений КСР, проинтегрированных по импульсу спектатора, с учетом соответствующих радиусов обрезания, составляют $d^2\sigma/d\Omega_p d\Omega_n = 16.3 \pm 4.9$ $\mu\text{b}/\text{sr}^2$ и $d^2\sigma/d\Omega_d d\Omega_n = 14.4 \pm 4.3$ $\mu\text{b}/\text{sr}^2$ для

реакций ${}^2\text{H}(t,pt)$ и ${}^3\text{H}(t,dt)$ соответственно. В передней полусфере лабораторных углов нейтрона импульсные распределения нейтрона являются идентичными и не зависят от угла его вылета. В задней полусфере импульсные распределения нейтрона не установлены из-за ограничений аксептанса системы регистрации. Интегрирование приведенных выше двойных дифференциальных сечений по телесному углу Ω_{pt} в передней полусфере лабораторных углов нейтрона дает равномерные угловые распределения $d\sigma/d\Omega_{pt}$ и $d\sigma/d\Omega_{dt}$ в диапазоне углов КСР ϑ_{pt} и ϑ_{dt} от 105° до 145° . Угловое распределение КСР тритона на протоне радикально отличается от углового распределения свободного рассеяния как по форме, так и по абсолютным значениям сечений.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- По результатам экспериментов, в которых изучалось резонансное состояние ${}^4\text{H}$ в реакциях передачи ${}^2\text{H}(t,p){}^4\text{H}$ и ${}^3\text{H}(t,d){}^4\text{H}$, впервые был проведен комплексный анализ основных процессов в зарегистрированном выходном канале. В результате были определены наиболее оптимальные условия выделения резонанса и получены параметры основного состояния $J^\pi = 2^-$, $E_{\text{res}} = 3.05$ МэВ и $\gamma^2 = 3.03$ МэВ;
- Впервые экспериментально установлены энергия и ширина полюса S-матрицы, соответствующие основному состоянию ${}^4\text{H}$: $E_0 = 1.99$ МэВ и $\Gamma_0 = 2.85$ МэВ;
- В результате эксперимента по изучению реакции передачи двух нейтронов ${}^3\text{H}(t,p){}^5\text{H}$ получено значение энергии основного ($J^\pi = 1/2^+$) состояния ${}^5\text{H}$ 1.8 МэВ. Также получены данные, указывающие на возможность существования возбужденного состояния, принадлежащего к дублету $3/2^+$, $5/2^+$ с энергией около 3.5 МэВ;
- В реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^7\text{H})$ получена оценка верхнего предела времени жизни ядра ${}^7\text{H}$ – 1 нс. Измерения были проведены на уровне сечения, рекордном для экспериментов с использованием вторичных пучков. Установленный в результате эксперимента верхний предел сечения образования долгоживущего изотопа водорода ${}^7\text{H}$ составляет 3 нб/ср. Полученный верхний предел времени жизни, согласно оценкам, сделанным в рамках

«модели с источником» (L.V. Grigorenko et al., Eur. Phys. J. **A19** (2004) 187-201), соответствует нижнему пределу энергии распада ${}^7\text{H}$ 50 - 100 кэВ;

- Впервые проведено детальное изучение процессов квазисвободного рассеяния тритона на протоне и дейтроне, связанных, соответственно, в дейтроне и тритоне при энергии в системе цм около 20 МэВ. Получены значения радиусов взаимодействия и показано, что при этих энергиях квазисвободное рассеяние является периферийным процессом. Получены значения сечений квазисвободного рассеяния тритона на связанных протоне и дейтроне;
- Созданы многопроволочные пропорциональные камеры с эффективностью регистрации 90%, предназначенные для трекинга вторичных пучков легких ядер с малой ионизирующей способностью;

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. S.I. Sidorchuk, D.D. Bogdanov, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, A.A. Yuhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, F. Hanappe, T. Materna, L. Stuttge, A.H. Ninane, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, *Experimental Study of ${}^4\text{H}$ in Reactions ${}^2\text{H}(t,p)$ and ${}^3\text{H}(t,d)$* , Phys. Lett **B594** (2004) 54-60.
2. M.S. Golovkov, L.V. Grigorenko, A.S. Fomichev, Yu.Ts. Oganessian, Yu. I. Orlov, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, *Estimates of the ${}^7\text{H}$ width and lower decay energy limit*, Phys. Lett. **B588** (2004) 163-171.
3. S.I. Sidorchuk, D.D. Bogdanov, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, V.A. Gorshkov, M.L. Chelnokov, M.G. Itkis, E.M. Kozulin, A.A. Bogatchev, N.A. Kondratiev, I.V. Korzyukov, A.A. Korshennikov,

- E.Yu. Nikolskii, I. Tanihata, *Resonance States of Hydrogen Nuclei ^4H and ^5H Obtained in Transfer Reactions with Exotic Beams*,
Nucl. Phys. **A719** (2003) 229c-232c.
4. M.S. Golovkov, Yu.Ts. Oganessian, D.D. Bogdanov, A.S. Fomichev, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, G.M. Ter-Akopian, R. Wolski, V.A. Gorshkov, M.L. Chelnokov, M.G. Itkis, E.M. Kozulin, A.A. Bogatchev, N.A. Kondratiev, I.V. Korzyukov, A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, S.K. Grishechkin, A.M. Demin, S.V. Zlatoustovskiy, A.V. Kuryakin,, S.V. Fil'chagin, R.I. Il'kaev, F. Hanappe, T. Materna, L. Stuttge, A.H. Ninane, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, I. Tanihata, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, N. Alamanos, V. Lapoux, E.C. Polacco, L. Nalpas, *Evidence for Resonance States in ^5H* ,
Phys. Lett. **B566** (2003) 70-75.
5. G.M. Ter-Akopian, D.D. Bogdanov, A.S. Fomichev, M.S. Golovkov, Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, V.A. Gorshkov, M.L. Chelnokov, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, I. Tanihata, F. Hanappe, T. Materna, L. Stuttge, A.H. Ninane, *Resonance States of Hydrogen Nuclei ^4H and ^5H Obtained in Transfer Reactions with Exotic Beams*,
Ядерная Физика **66** (2003) стр. 1587-1594.
6. M.S. Golovkov, Yu.Ts. Oganessian, G.M. Ter-Akopian, D.D. Bogdanov, A.S. Fomichev, A.M. Rodin, S.I. Sidorchuk, R.S. Slepnev, S.V. Stepantsov, R. Wolski, V.A. Gorshkov, M.L. Chelnokov, E.M. Kozulin, A.A. Bogatchev, N.A. Kondratiev, I.V. Korzyukov, A.A. Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, Yu.I. Vinogradov, S.K. Grishechkin, A.M. Demin, S.V. Zlatoustovskiy, A.V. Kuryakin,, S.V. Fil'chagin, R.I. Il'kaev, F. Hanappe, T. Materna, L. Stuttge, A.H. Ninane, A.A. Korshennikov, E.Yu. Nikolskii, I. Tanihata, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, N. Alamanos, V. Lapoux, E.C. Polacco, L. Nalpas, *Super-Heavy Hydrogen Isotopes Studied with 58 MeV Triton Beam*,
In Proc. Int. Symposium on Exotic Nuclei EXON-2001, lake Baikal, Russia, 24-28 July 2001, 334-347.

Получено 9 августа 2004 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 10.08.2004.

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

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 54556.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/