

Б - 955



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-92-476

БЫСТРИЦКИЙ
Вячеслав Михайлович

УДК 539.126.333

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, ИССЛЕДОВАНИЕ
МЮ-АТОМНЫХ И МЮ-МОЛЕКУЛЯРНЫХ
ПРОЦЕССОВ В СМЕСЯХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА**

**Специальность: 01.04.16 - физика ядра и элементар-
ных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1992

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

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор

ГЕРШТЕЙН
Семен Соломонович

доктор физико-математических наук

СЕЛИВАНОВ
Владимир Иванович

доктор технических наук

ФИЛИППОВ
Анатолий Иванович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Петербургский институт ядерной физики

Защита диссертации состоится " января 1993 года
в " " часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан " 24 ноября 1992 г.

Ученый секретарь Специализированного
совета

БАТУСОВ Ю. А.

Общая характеристика работы

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию мю-атомных и мю-молекулярных процессов, происходящих в смесях изотопов водорода, а также разработке и созданию экспериментального комплекса, предназначенного для проведения данных исследований. Диссертация включает в себя работы, выполненные в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Актуальность работы

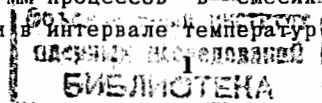
Исследование мю-атомных (МА) и мю-молекулярных (ММ) процессов, а также ядерных реакций синтеза в "холодном" водороде представляет самостоятельный раздел физики экзотических атомов. Интерес к изучению этой области явлений связан со следующими обстоятельствами. Во-первых, МА- и ММ-процессы в веществе существенным образом определяют эффективность мюонного катализа реакций ядерного синтеза в мюонных молекулах (μCF) и последующие стадии захвата отрицательных мюонов ядрами изотопов водорода. Во-вторых, анализ временных и энергетических распределений продуктов реакций ядерного синтеза в мюонных молекулах позволяет получить информацию как о характеристиках сильного взаимодействия между ядрами изотопов водорода в области энергий, близких к нулю, так и об энергии уровней мюонных молекул. В-третьих, исследование рентгеновского излучения мю-атомов дает информацию не только о структуре ядра, но и о величине лэмбовского сдвига уровней энергии мю-атомов, что является тестом по проверке методов квантовой электродинамики.

С теоретической точки зрения интерес к изучению всех стадий мюонного катализа обусловлен тем обстоятельством, что в столкновениях мю-атомов с ядрами изотопов водорода в чистом виде реализуется квантово-механическая задача трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

К настоящему времени резко возрос интерес к всестороннему исследованию всех стадий мю-катализа в смесях изотопов водорода, т.к. согласно последним результатам открывается вполне реальная возможность практического использования этого явления для производства энергии.

Цель работы

1) Разработка и создание экспериментального комплекса для исследования МА- и ММ-процессов в смесях изотопов водорода при давлениях до 1500 ат и в интервале температур $20,4 \text{ K} \leq T \leq 1050 \text{ K}$;



- 2) Создание методик для проведения такого рода исследований;
- 3) Экспериментальное исследование явления перезарядки μ - и $d\mu$ -атомов на ядрах ${}^4\text{He}$;
- 4) Исследование процесса рассеяния μ -атомов в водороде;
- 5) Детальное рассмотрение кинетики МА- и ММ-процессов как в однокомпонентной среде (D_2 ; T_2), так и в смесях изотопов водорода и гелия;
- 6) Оптимизация и планирование экспериментов по измерению характеристик МА- и ММ-процессов в чистом тритии и в смесях изотопов водорода и гелия.
- 7) Создание комплекса программ для вычисления методом Монте-Карло эффективностей регистрации нейтронов и электронов в экспериментах с мюонами.

Научная новизна

1. Экспериментально обнаружено новое явление молекулярной перезарядки μ -атомов на ядрах He . Измерены основные характеристики процесса перехвата мюонов от μ - и $d\mu$ -атомов, находящихся в основном состоянии, к ядрам ${}^4\text{He}$.
2. Впервые получены экспериментальные оценки скоростей перехвата мюонов от μ -атомов, находящихся в возбужденном состоянии, к ядрам ${}^4\text{He}$.
3. Выполнен эксперимент по измерению сечения рассеяния μ -атомов в водороде, результат которого позволил устранить существовавшее ранее различие между экспериментальными значениями данной величины, полученными в ОИЯИ и ЦЕРНе.
4. Впервые выполнен общий анализ цепи последовательных циклов мюонного катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода как в однокомпонентной среде (D_2 ; T_2), так и в смесях изотопов водорода и гелия.
5. Впервые расчетным путем с помощью метода Монте-Карло получен полный набор характеристик нейтронных детекторов с большим объемом жидкого сцинтиллятора.
6. Впервые в области высоких давлений и температур выполнены исследования взаимодействия изотопов водорода с различными сталями и жаропрочными сплавами.
7. Впервые в экстремальных условиях исследовано влияние "защитных" покрытий на проникновение водорода через стенки мишени.

Научная и практическая ценность

Результаты эксперимента по исследованию процесса перехвата мюонов от μ -атомов водорода к ядрам ${}^4\text{He}$ существенным образом изменили представление о механизме протекания данного процесса - обнаружено новое явление молекулярной перезарядки μ -атомов изотопов водорода в основном состоянии на ядрах He .

Формулы кинетики, полученные в общем виде при рассмотрении цепи последовательных циклов мюонного катализа ядерных реакций синтеза в однокомпонентной среде (D_2 ; T_2) и в смесях изотопов водорода и гелия, широко используются для обработки экспериментальных данных с целью однозначного определения характеристик МА- и ММ-процессов.

На основании анализа полученных формул предложены методы определения параметров МА- и ММ-процессов в чистом тритии и в смесях изотопов водорода и гелия.

Полученные расчетным путем характеристики нейтронных детекторов с большим объемом жидкого сцинтиллятора NE-213 свидетельствуют о том, что такого типа детекторы могут эффективно использоваться не только для исследования МА- и ММ-процессов, но и для изучения редких процессов.

Разработанная и созданная установка для получения водорода (дейтерия) особой чистоты (содержание примесей в нем не более $10^{-6}\%$) при давлениях до 50 ат может быть использована в практике физического эксперимента.

Разработанные и созданные мишени и вентили высокого давления в виду своей надежности и простоты конструкций могут найти применение в технике высоких давлений.

Использование разработанных и созданных "защитных" покрытий жаропрочных сплавов и технологий их нанесения поможет решить ряд проблем, возникающих при конструировании сосудов, предназначенных для работы с изотопами водорода при высоких давлениях и температурах.

Полученная информация о характеристиках процессов взаимодействия изотопов водорода в области высоких давлений и температур для сталей аустенитного и феррито-мартенситного классов может быть использована при выборе конструкционного материала первой стенки термоядерных реакторов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на III Международном симпозиуме по физике высоких энергий и элементарных частиц (Синая, СРР, 1973 г), VI Международной конференции по физике

высоких энергий и структуре ядра (Санта-Фэ, США, 1975 г), Международном симпозиуме по проблемам мезонной химии и молекулярных процессов в веществе (Дубна, 1977 г), IX Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Версаль, Франция, 1979 г), X Европейской конференции по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы (Москва, 1981 г), Международном совещании по проблемам мюонного катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода (Флорида, США, 1988 г), Международной конференции по мюонному катализу ядерных реакций синтеза "μCF 90" (Вена, Австрия, 1990 г), Международном совещании по проблемам мюонного катализа ядерных реакций синтеза "μCF 92" (Уппсала, Швеция, 1992 г).

По теме диссертации опубликовано 34 печатных работы, список которых приведен в конце автореферата.

Объем диссертации

Работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 267 страниц, включая 72 рисунка, 12 таблиц и список литературных ссылок из 236 наименований.

На защиту выносятся:

1. Экспериментальное обнаружение нового явления образования зарядово-несимметричных мюонных молекул типа μHe и результаты измерения скорости перехвата мюонов от μH -атомов, находящихся в основном состоянии, к ядрам ^4He .

2. Экспериментальное обнаружение явления перехвата мюонов от мю-атомов изотопов водорода, находящихся в возбужденном состоянии, к ядрам ^4He и результаты анализа данных с целью определения значений парциальных скоростей перехвата мюонов от μH -атомов, находящихся в возбужденных состояниях с $n \leq 5$, к ядрам ^4He .

3. Результаты эксперимента по измерению скорости перехвата мюонов от μH -атомов к ядрам ^4He и заселенности основного состояния μH -атомов при давлении смеси $\text{D}_2 + ^4\text{He}$ равном 1350 ат и концентрациях гелия от 5×10^{-4} до 10^{-2} .

4. Результаты эксперимента по измерению сечения рассеяния μH -атомов в газообразном водороде.

5. Общий анализ цепи последовательных циклов мюонного катализа ядерных реакций синтеза изотопов водорода в однокомпонентной среде ($\text{D}_2; \text{T}_2$).

6. Рассмотрение кинетики МА- и ММ-процессов, происходящих в смеси изотопов водорода и гелия, и метод определения параметров процесса перехвата мюонов от μH -, μD -, μT -атомов к ядрам He .

7. Оптимизация и планирование экспериментов по измерению характеристик МА- и ММ-процессов в чистом тритии и в смесях изотопов водорода и гелия.

8. Алгоритмы программ и результаты вычисления эффективностей регистрации нейтронов и электронов с использованием разнообразных детекторов на основе органических сцинтилляторов в экспериментах по исследованию МА- и ММ-процессов.

9. Разработка, создание и исследование характеристик установки диффузионной очистки водорода (дейтерия) при давлениях до 50 ат, гарантирующей получение сверхчистых изотопов водорода (суммарное содержание примесей N_2 , O_2 , CO_2 и т.д. в водороде не более 10^{-8} об. долей).

10. Создание и исследование характеристик мембранного фильтра для диффузионного выделения и получения изотопов водорода особой чистоты.

11. Разработка и создание ряда систем газообеспечения мишеней в экспериментах по исследованию МА- и ММ-процессов в широком диапазоне давлений (до 1500 ат) и температур ($20,4 \text{ K} \leq T \leq 1050 \text{ K}$).

12. Результаты исследования процессов взаимодействия изотопов водорода с жаропрочными сплавами и сталями разных классов в широком диапазоне давлений и температур ($p \leq 1000 \text{ ат}$, $T \leq 1050 \text{ K}$).

13. Результаты исследования влияния широкого класса "защитных" покрытий на проникновение изотопов водорода через стенки мишеней в экстремальных условиях ($p \approx 1000 \text{ ат}$, $T \approx 1050 \text{ K}$).

14. Разработка и создание серии газовых и криогенных мишеней, предназначенных для проведения исследований МА- и ММ-процессов как в чистых изотопах водорода, так и в их смесях.

Содержание диссертации

Во введении приводится краткое описание совокупности МА- и ММ-процессов, происходящих при остановке отрицательных мюонов в водороде и в смесях изотопов водорода с небольшой примесью тяжелых элементов с $Z > 1$. Дан краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, выполненных по этой тематике и сформулированы программа и обоснование исследований, нашедших отражение в диссертации. Указаны положения и основные результаты этих исследований, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание традиционной постановки экспериментов по исследованию МА- и ММ-процессов в смесях изотопов

водорода. Приведены конструкции целого ряда мишеней: а) газовой мишени с внутренними сцинтилляторами^{1/1}; б) мишени высокого давления для экспериментов с тритием^{2/2}; в) криогенных мишеней^{3-4/}.

При изучении МА- и ММ-процессов в водороде предъявляются очень высокие требования к его чистоте - концентрация примесей (N_2 , O_2 , CO_2 и т.д.) не более 10^{-8} об. долей в случае исследования фундаментальных процессов слабого взаимодействия



и не более 10^{-7} об. долей в остальных случаях. Это требование обусловлено необходимостью предельно уменьшить нейтронный фон от захвата мюонов ядрами примеси (вероятность захвата мюонов ядрами с $Z > 1$ на несколько порядков превышает вероятность захвата мюонов в водороде) и исключить ошибки в определении параметров исследуемых МА- и ММ-процессов, связанные с большой скоростью конкурирующего канала - канала перехвата мюонов от мюонных атомов водорода к ядрам примеси.

В связи с этим возникает задача не только получения сверхчистых изотопов водорода, но и создания мишеней и систем их газообеспечения, гарантирующих сохранение требуемой по условиям эксперимента степени чистоты водорода в течение длительных экспозиций (≈ 300 ч.) на пучке мюонов.

Для измерения скорости захвата мюона в газообразном водороде (реакция (1)) и исследования МА- и ММ-процессов необходимо было разработать и создать газовую водородную мишень, рассчитанную на рабочее давление 50 ат. Учитывая то, что вероятность реакции (1) мала, требовалось предельно уменьшить нейтронный фон, обусловленный остановками мюонов в стенках мишени. Эта проблема была решена путем размещения внутри мишени сцинтилляторов, ограничивающих объем водорода, в котором происходят остановки мюонов.

На рис.1 приведен схематический чертеж экспериментальной установки, использованной в экспериментах^{5-7/} и в работах (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 70 (1976) 1167; ЖЭТФ 71 (1976) 1680). Основным элементом установки являлась созданная газовая мишень М с внутренними сцинтилляторами^{1/1}. Корпус мишени был изготовлен в виде цилиндра из нержавеющей стали длиной 540 мм и внутренним диаметром 140 мм. Толщина стенок мишени составляла 3 мм. В качестве вещества сцинтилляторов 4 и 5

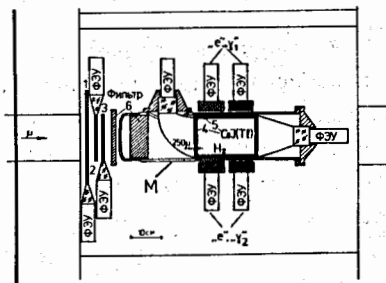
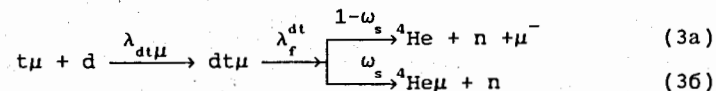


Рис. 1. Схематический чертеж экспериментальной установки.

для выделения остановок мюонов в водороде был выбран CsI(Tl). Этот выбор был обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, время жизни мюона в CsI(Tl) существенно меньше времени жизни свободного мюона (это дает возможность проводить корректное разделение по времени "полезных" и фоновых событий), а, во-вторых, использование неорганического сцинтиллятора позволяет сохранять в мишени требуемый уровень чистоты водорода в течение длительных экспозиций ее на пучке мюонов (из-за низкого давления упругих паров CsI(Tl)). Сцинтиллятор 5 был изготовлен в виде полого цилиндра длиной 205 мм, внутренним диаметром 120 мм и с толщиной стенок 5 мм, а сцинтиллятор 4 - в виде диска диаметром 120 мм и толщиной 250 мкм. Светосбор на фотокатоды ФЭУ со сцинтилляторов 4 и 5 осуществлялся с помощью полых световодов.

С использованием данной мишени нами был выполнен целый ряд экспериментов: ^{5-7/} и (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 66 (1974) 43; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 66 (1974) 61; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 70 (1976) 1167; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 71 (1976) 1680; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 76 (1979) 460; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 80 (1981) 839).

Для проведения эксперимента (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 80 (1981) 1700) по исследованию мюонного катализа реакции синтеза ядер дейтерия и трития



$$(3b)$$

($\lambda_{dt\mu}$ - скорость образования $dt\mu$ -молекул; λ_f^{dt} - скорость ядерного dt -синтеза в $dt\mu$ -молекуле; ω_s - вероятность "прилипания" мюона к ядру 4He) нами была разработана и создана газовая мишень^{2/2}, рассчитанная на работу со смесью $D_2 + T_2$ в диапазоне температур $77 \text{ K} \leq T \leq 650 \text{ K}$ и давлений до 55 ат. Наличие в мишени по условиям эксперимента трития ($A \approx 5000$ ки) требовало создания

специальной нестандартной аппаратуры, обеспечивающей безопасную работу персонала на установке. Чертеж мишени приведен на рис.2. Мишень 1 представляла собой цилиндрический сосуд объемом 3,25 л, изготовленный из нержавеющей стали. Диаметр сосуда 130 мм, длина 250 мм, толщина стенок 3 мм. В целях радиационной безопасности при случайной разгерметизации мишени 1, она и непосредственно связанные с ней манометр 3 и сильфонный вентиль 13 были распо-

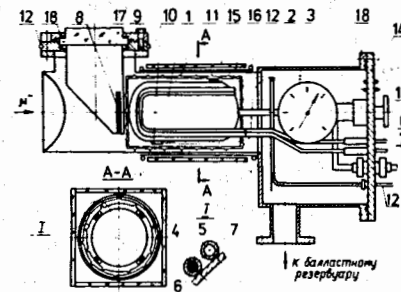


Рис. 2. Схематический чертеж газовой мишени для экспериментов со смесью $D_2 + T_2$.

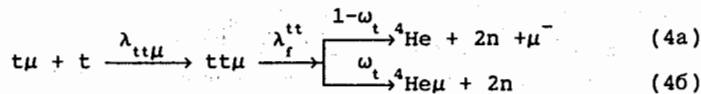
ложены внутри вакуумно-плотного кожуха 2, который был соединен с балластным резервуаром объемом 130 л.

В качестве нагревателя мишени использовалась проволока 4 из высокоомного сплава ЭИ 626, пропущенная в бусах 5 внутри медной трубки 6. Охлаждение мишени производилось путем продува паров азота через медную трубку 7.

Температура мишени измерялась с помощью двух хромель-копелевых термопар 10. Для уменьшения теплоотвода от мишени она окружалась четырехслойным экраном 11 из полированных гофрированных фольг толщиной 80 мкм.

С использованием созданной нами мишени^{/2/} было впервые экспериментально обнаружено явление мюонного катализа реакции синтеза ядер дейтерия и трития.

Для исследования МА- и ММ-процессов, происходящих в тритии, были разработаны два типа криогенных мишеней: одна - для работы при постоянной температуре (20,6 К)^{/3/}, другая - с вариацией температуры в диапазоне $20,4 \text{ К} \leq T \leq 40 \text{ К}$ ^{/4/}. Необходимость создания криогенной мишени с вариацией температуры была обусловлена тем, что корректное определение характеристик процесса мюонного катализа ядерной реакции синтеза в $t\mu$ -молекуле



($\lambda_{t\mu}$ - скорость образования $t\mu$ -молекул; λ_f - скорость ядерного синтеза в $t\mu$ -молекуле; ω_t - коэффициент "прилипания" мюона к ядру ${}^4\text{He}$) возможно лишь путем проведения измерений при двух, по крайней мере, значениях плотности трития, отличающихся между собой на 20 + 40%^{/8/}. Указанный диапазон изменения плотности трития может быть достигнут за счет вариации температуры мишени в выбранном интервале. На рис. 3, в качестве примера, приведен принципиальный чертёж криостат-мишени^{/4/} с вариацией температуры. Основными узлами ее являются:

- 1) жидкотритиевая мишень 1 объемом 35 см³ (цилиндрический сосуд из нержавеющей стали диаметром 24 мм, длиной 76 мм и с толщиной стенок 0,3 мм), рассчитанная на рабочее давление 30 ат (максимально допустимая активность трития в мишени составляет $A \approx 8,5 \times 10^4$ Ки);
- 2) водородный бачок ВБ1 объемом 8,5 л;
- 3) конденсационная трубка 2, проходящая через ВБ1;
- 4) водородный бачок ВБ2 с трубкой охлаждения 4, которая заполняется жидким водородом и может перемещаться внутри ВБ1 (количество жидкого водорода в ВБ2 контролируется с помощью конденсационного указателя

уровня КУУ);

- 5) балластный объем БО, в котором расположены манометр и мановакуумметр МВ для измерения давления паров трития в мишени;
- 6) система термометрического контроля;
- 7) система дозированного напуска (выпуска) газообразного водорода в ВБ1.

Принцип работы криостат-мишени основан на отводе тепла от мишени, заполненной тритием, к резервуару с жидким водородом с помощью теплообменного газа - водорода. Процесс охлаждения мишени в настоящей конструкции может осуществляться двумя альтернативными путями:

- а) при фиксированном положении трубки 4 путем изменения количества газообразного водорода, находящегося в ВБ1;
- б) при фиксированном количестве газообразного водорода, находящегося в ВБ1, путем изменения глубины погружения трубки 4 в бачок ВБ1.

Определение стабильности поддержания температуры мишени в указанном диапазоне температур проводилось в имитационных опытах с водородом и дейтерием. Флуктуации температуры дейтерия в криостат-мишени в течение суток не превышали 0,2 К при определенных ее значениях (25 К, 32 К, 37 К).

Следует отметить, что созданные два варианта жидкотритиевой мишени могут быть использованы также и в экспериментах по исследованию МА- и ММ-процессов как в чистых изотопах водорода, так и в их смесях.

Во второй главе приведены результаты исследований процессов проникновения и диффузии изотопов водорода через различные материалы и "защитные" покрытия при высоких давлениях и температурах, а также дано описание конструкций модифицированных мишеней с экстремальными параметрами.

В связи с тем, что намеченная экспериментальная программа включает в себя исследование μCF в чистом дейтерии, смесях $\text{H}_2 + \text{D}_2$ и $\text{D}_2 + \text{T}_2$ в широких диапазонах давлений и температур, нами были созданы две установки. Одна из них^{/9/} для исследования МА- и ММ-процессов в водороде, дейтерии и их смесях при давлениях до 1500 ат и температурах от 20,4 К до 300 К, другая^{/10/} - для исследования μCF в смеси $\text{D}_2 + \text{T}_2$ в диапазоне температур от 300 К до 1050 К и при давлениях до 1000 ат.

Установка^{/9/} (см. рис. 4) состоит из мишени М, вентиля высокого давления ВВД^{/11/} и криостата. Получение высоких давлений ($p \leq 1500$ ат при $T = 300$ К) осуществляется криогенным методом путем ожигения

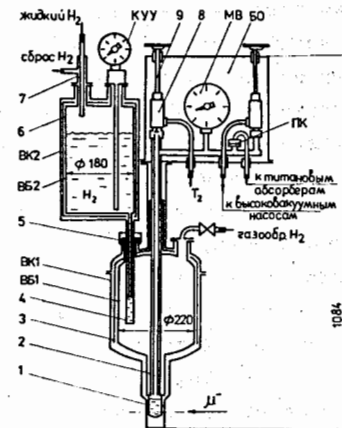


Рис. 3. Принципиальный чертёж криостат-мишени.

газообразных изотопов водорода в объеме мишени с последующим ее нагревом. Такой способ получения высоких давлений гарантирует сохранение высокой чистоты изотопов водорода. Мишень высокого давления М представляет собой толстостенный цилиндр, изготовленный из сплава ЭИ 437Б. Внутренний диаметр мишени 42 мм, толщина стенок 9 мм, а объем мишени равен 120 см³. Охлаждение и термостатирование мишени производится с помощью криостата, который состоит из вакуумного кожуха ВК, водородного бачка ВБ и сосуда С, стенки которого охлаждаются жидким водородом или азотом.

При работе с мишенью^{9/} в диапазоне температур 20,4 + 77 К в качестве хладагента используется жидкий водород, а в диапазоне 78 + 300 К - жидкий азот. Необходимая температура мишени во всем диапазоне достигается путем вариации давления гелия в сосуде С и мощности нагревателя Н. Давление газа в мишени М контролируется по показаниям манометра высокого давления МВД.

С использованием этой мишени был выполнен эксперимент^{12/}, а также проведено исследование зависимости скорости образования $\mu\mu$ -молекул от температуры дейтерия (V.M. Bystritsky et al. AIP Conference Proceedings, 181 (1991) 17; V.M. Bystritsky et al. Muon Catalyzed Fusion, 5/6 (1991) 141).

Основная трудность, возникающая при создании мишеней для работы с изотопами водорода при высоких давлениях ($P \leq 1000$ ат) и температурах ($T \leq 1050$ К), связана с так называемой водородной коррозией стенок мишени, что приводит к потере требуемой механической прочности. В связи с тем, что в литературе до начала создания нами мишеней практически отсутствовала информация о характеристиках процессов взаимодействия водорода с жаропрочными сплавами и сталями в указанных диапазонах давлений и температур, необходимо было выполнить исследования, с целью:

- а) выбора сплава, обладающего высокими прочностными характеристиками при высоких температурах;
- б) выбора "защитного" покрытия сплава и технологии его нанесения для существенного уменьшения проникновения водорода через стенки мишени.

Реализация пункта б) особенно важна при работе с радиоактивным изотопом водорода - тритием. В результате проведенных исследований взаимодействия изотопов водорода с жаропрочным сплавом ЭИ 698^{13/} и

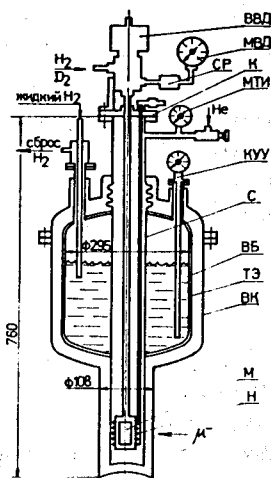


Рис. 4. Схематический чертеж установки.

сталями аустенитного (X18H10T) и феррито-мартенситного (X13M2BF) классов^{14/} в качестве материала корпуса мишеней был выбран сплав ЭИ 698. Впервые получены основные характеристики процессов проникновения, диффузии и растворимости изотопов водорода для данных материалов. Выполнены исследования влияния "защитных" покрытий (золото, алитирование поверхности металла, оксидные покрытия) сплава ЭИ 698 на проникновение изотопов водорода через стенки при высоких давлениях и температурах^{15-17/}. Разработана технология их нанесения. Идея использования многослойных "защитных" покрытий жаропрочного сплава ЭИ 698 легла в основу разработанной и созданной мишени^{10/}. На рис. 5 приведен чертеж мишени, корпус которой изготовлен из сплава ЭИ 698. Рабочий объем мишени составляет 18 см³, а внутренний ее диаметр 18 мм. Корпус мишени представляет собой толстостенный цилиндр 1 в который помещен вкладыш 2 из того же материала. Вкладыш 2 вставлен внутрь ампулы из золота 3 с толщиной стенки 0,4 мм. Уплотнение между оболочкой из золота 3 и корпусом 1, а также между вкладышем 2 и корпусом 1 осуществляется с помощью медных прокладок 4 и 5. Перед сборкой мишени производилось алитирование внутренних поверхностей корпуса мишени 1 и вкладыша 2.

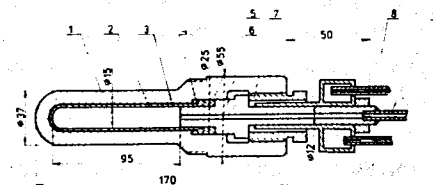


Рис. 5. Чертеж мишени.

Для обеспечения радиационной безопасности мишень, вентиль высокого давления и емкостной датчик помещены внутри объема, ограниченного вакуумным кожухом. На данной установке были проведены имитационные опыты с дейтерием. Результаты этих экспериментов свидетельствуют о том, что поток дейтерия через многослойную стенку мишени при температуре $T = 1050$ К и давлении $p = 1000$ ат уменьшился более чем на два порядка по сравнению с потоком дейтерия через стенку мишени, изготовленной из сплава ЭИ 698. Созданная мишень позволяет в течение длительных экспозиций на пучке мюонов проводить исследования μCF в смесях изотопов водорода при давлениях до 1000 ат и температурах до 1050 К.

В третьей главе рассматриваются созданные системы газообеспечения мишеней, описание которых приведено в главах I и II. Системы газообеспечения можно разбить на два класса. Первый класс - системы газообеспечения мишеней работающих с водородом и дейтерием^{11/}, второй^{18,19/} - для работы с радиоактивным изотопом водорода - тритием высокой радиоактивности ($\approx 8,5 \times 10^4$ Ки). Системы газообеспечения I и II классов включают в себя следующие основные узлы: 1) систему

высоковакуумной откачки; 2) систему очистки изотопов водорода; 3) систему заполнения мишени водородом. Системы II-го класса кроме перечисленных узлов снабжены специальной аппаратурой дозиметрического контроля и устройствами, обеспечивающими безопасность работы персонала.

В системах I-го класса очистка водорода (дейтерия) осуществлялась с помощью разработанного и созданного диффузионного аппарата^{/20/}, либо с помощью последовательно соединенных цеолитовых адсорберов, обеспечивающих чистоту водорода на уровне 2×10^{-7} об. долей (эксперименты^{/5-7,11/} и работы (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 70 (1976) 1167; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 71 (1976) 1680; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 76 (1979) 460; В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 80 (1981) 839; V.M.Bystritsky et al. AIP Conference Proceedings, 181 (1991) 17; V.M.Bystritsky et al. Muon Catalyzed Fusion, 5/6 (1991) 141)).

В системах II-го класса очистка дейтерия производится с помощью трех последовательно соединенных адсорберов, а в качестве источника трития используется тритид титана TiT_2 , применение которого позволяет осуществлять дозированный напуск трития в мишень^{/21/} (эксперимент - В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 80 (1981) 1700). Следует отметить, что в данных системах очистка дейтерия и трития может осуществляться также путем использования созданного нами в коллаборации с ВНИИМ (г. Москва) и ДонМИ (г. Донецк) мембранного фильтра диффузионной очистки водорода^{/22/}.

Многократно проведенные анализы водорода (находящегося в мишени в течение длительных экспозиций) на сумму примесей свидетельствовали о том, что содержание их в опыте (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 66 (1974) 43) не превышало $\sim 1,5 \times 10^{-8}$ об. долей, а в опытах^{/2-4/} не более 2×10^{-7} об. долей, что, в свою очередь, вполне удовлетворяло требованиям экспериментов.

В четвертой главе приводятся результаты вычислений с помощью метода Монте-Карло эффективностей регистрации нейтронов и электронов в экспериментах по исследованию МА- и ММ-процессов.

Знание эффективностей регистрации нейтронов и электронов экспериментальной установкой необходимо для определения выходов продуктов реакций ядерного синтеза в мюонных молекулах на основании которых извлекается информация о характеристиках МА- и ММ-процессов. Задача об определении эффективности регистрации указанных частиц при наличии разнообразных веществ между мишенью и детектором наилучшим образом решается с помощью метода Монте-Карло. При моделировании взаимодействия нейтронов со сцинтиллятором NE-213 учитывались следующие возможные процессы: а) упругое рассеяние нейтронов на

протонах; б) упругое рассеяние нейтронов на ядрах углерода; в) неупругое рассеяние нейтронов на углероде $^{12}C(n, n' \gamma)^{12}C$ (если энергия нейтронов $E_n > 4,5$ МэВ); г) реакции $^{12}C(n, \alpha)^9Be$, $^{12}C(n, n')^{12}C^*$ (3α), $^{12}C(n, \alpha)^9Be^*(n')^8Be$ (если энергия нейтронов $E_n > 9$ МэВ). Нами были выполнены расчеты^{/23/} эффективностей регистрации нейтронов в опытах по измерению скорости захвата мюона протоном, скорости образования $dd\mu$ -молекул (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 66 (1974) 61; V.M.Bystritsky et al. AIP Conference Proceedings, 181 (1991) 17; V.M.Bystritsky et al. Muon Catalyzed Fusion, 5/6 (1991) 141) и скорости образования $dt\mu$ -молекул (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 80 (1981) 1700), а электронов - в опыте^{/5/} и в работе (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 66 (1974) 43). Кроме этого были проведены расчеты эффективности регистрации нейтронов экспериментальными установками, созданными для исследования МА- и ММ-процессов в тритии и смеси $D_2 + T_2$ ^{/24/}. Выполнены также расчеты эффективностей регистрации нейтронов реакций синтеза в $dd\mu$ -, $dt\mu$ - и $tt\mu$ -молекулах ($E_n = 2,5$ МэВ; $E_n = 14,1$ МэВ; $E_n^{max} = 9,5$ МэВ) детекторами с большим объемом (≈ 200 л) жидкого сцинтиллятора NE-213^{/25/}.

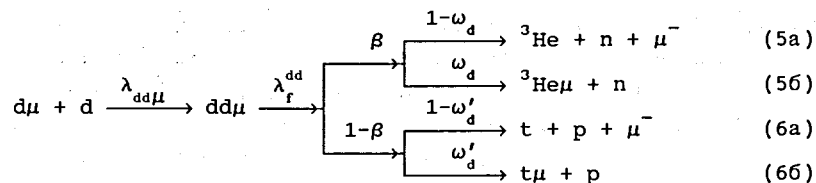
Из результатов вычислений^{/25/} следует, что применение калибровки спектрометрических каналов нейтронных детекторов с большим объемом сцинтиллятора с помощью стандартных γ -источников полностью исключает необходимость учета эффектов поглощения света в веществе самого сцинтиллятора, что, в свою очередь, повышает достоверность расчетных значений эффективности регистрации нейтронов.

На основании выполненных вычислений эффективности регистрации нейтронов реакции синтеза в $tt\mu$ -молекуле (реакция (4)) предложен метод^{/26/} определения вкладов $(n-n)$ - и $(\alpha-n)$ -взаимодействий в конечном состоянии, заключающийся в сравнении амплитудных спектров зарегистрированных нейтронов с расчетными распределениями, полученными для различных матричных элементов, описывающих реакцию tt -синтеза.

Следует отметить, что детекторы с большим объемом сцинтиллятора (80 - 200 л), обладая высокой эффективностью регистрации нейтронов 60% - 80% и хорошим временным разрешением (≈ 6 нс), могут эффективно использоваться не только для исследования МА- и ММ-процессов, происходящих при малых плотностях изотопов водорода, но и для изучения редких процессов.

В пятой главе рассмотрена кинетика мю-атомных и мю-молекулярных процессов, происходящих в однокомпонентной среде (D_2 ; T_2)^{/27,28/}.

Приводится анализ последовательных циклов мюонного катализа реакций ядерного синтеза (иницируемых одним мюоном) в тритии (реакции (4а), (4б)) и в дейтерии



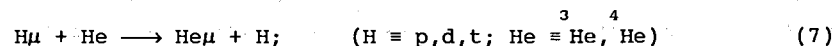
($\lambda_{dd\mu}$ - скорость образования $dd\mu$ -молекул; λ_r^{dd} - скорость реакции ядерного синтеза в $dd\mu$ -молекуле; β - относительная вероятность реакции ядерного синтеза в $dd\mu$ -молекуле с образованием нейтрона; ω_d - вероятность "прилипания" мюона к ядру ${}^3\text{He}$; ω'_d - вероятность "прилипания" мюона к тритону) с учетом любого числа промежуточных узлов в его цепочке - учитываются переходы между уровнями энергии $d\mu(t\mu)$ -атомов и $dd\mu(tt\mu)$ -молекул, а также возможные переходы мюонов от $d\mu(t\mu)$ -атомов к ядрам примесей с зарядом $Z > 1$.

Получены в общем виде выражения, описывающие выходы и временные распределения продуктов реакций ядерного синтеза, образующихся в конце каждого из циклов мю-катализа, с учетом эффективности их регистрации и мертвого времени регистрирующей аппаратуры^{29/}.

На основе полученных выражений нами проведен их анализ с целью выбора оптимальных экспериментальных условий для определения характеристик μCF в чистом тритии^{8/}, таких как: скорость образования $tt\mu$ -молекул, скорость ядерного синтеза в них, коэффициент "прилипания" мюонов к ядрам ${}^4\text{He}$. Показано, что для однозначного определения характеристик μCF в чистом тритии необходимо и достаточно проведение экспериментов при двух значениях плотности трития в мишени, отличающихся между собой более, чем на 20%.

В шестой главе представлены результаты исследования процессов перехвата мюонов от $p\mu$ - и $d\mu$ -атомов к ядрам He , а также рассмотрены вопросы связанные с оптимизацией экспериментов по измерению характеристик этих процессов.

Согласно ранним теретическим вычислениям полагалось, что скорость перехвата мюонов от мю-атомов водорода, находящихся в основном состоянии, к ядрам He

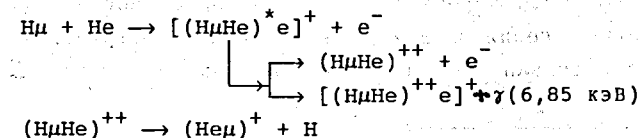


мала в связи с отсутствием пересечений и псевдопересечений между молекулярными термами систем $H\mu + He$ и $He\mu + H$. Подтверждением этому являлись результаты ряда экспериментальных работ (Займидорого О.А. и др. ЖЭТФ 44 (1963) 1852; Vertin A. et al. Nuovo Cim. 52A (1967) 1274).

В 1977 году нами был выполнен эксперимент^{5/}, целью которого являлось обнаружение возможного перехвата мюонов от $p\mu$ -атомов, находящихся в возбужденном состоянии, к ядрам ${}^4\text{He}$. Методика

определения скорости перехвата мюонов от $p\mu$ -атомов была основана на анализе выходов и временных распределений электронов от распада мюонов и γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{He}\mu$ -атомов с энергией $E_\gamma = 3,8$ МэВ (возникающих в результате перехвата мюонов от $p\mu$ -атомов к ядрам He , используемого в качестве небольшой добавки, $C_{\text{He}} \sim 10^{-5}$), измеренных в экспозициях с чистым водородом и со смесями $\text{H}_2 + \text{He}$, $\text{H}_2 + \text{He} + \text{He}$. Эксперимент был выполнен на мюонном пучке синхротрона ОИЯИ. Схема установки приведена на рис. 1. Пучок мюонов с импульсом 130 МэВ/с и интенсивностью $I = 2 \times 10^4 \text{ c}^{-1}$ проходил через сцинтилляторы детекторов 1, 2, 3, тормозился фильтром 6 и попадал в объем мишени, ограниченный сцинтилляторами 4 и 5 из CsI(Tl) . Регистрация γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{He}\mu$ -атомов и электронов от распада мюонов осуществлялась двумя детекторами " γ_1 " и " γ_2 " с кристаллами NaI(Tl) $\varnothing 150 \times 100 \text{ мм}^2$ и пятью счетчиками e1 - e5 с кристаллами стибьбена $\varnothing 70 \times 30 \text{ мм}^2$, расположенными вокруг мишени. Система отбора и регистрации событий описана в работе^{30/}, а система очистки и заполнения мишени водородом в работе^{1/}. В эксперименте были выполнены три серии измерений, различающихся между собой начальным давлением водорода и относительной концентрацией гелия ($C_{\text{He}} = n_{\text{He}}/n_{\text{H}}$, где n_{He} и n_{H} - числа атомов гелия и водорода в см^3). Начальное давление водорода изменялось от 16,5 ат до 24,6 ат, а концентрация гелия C_{He} от 0,05 до 2,14.

Результаты, полученные в предположении отсутствия процесса (7), свидетельствовали о существовании перехвата из возбужденных состояний $p\mu$ -атомов к ядрам ${}^4\text{He}$. Однако, совместный анализ выходов и временных распределений γ -квантов и электронов от распада мюонов приводил к отсутствию самосогласованности результатов. В начале 80-х годов в работе (Ю.А.Аристов и др. ЯФ, 33 (1981) 1066) был рассмотрен новый механизм перехвата мюонов от мю-атомов изотопов водорода (находящихся в основном состоянии) к ядрам гелия - механизм молекулярной перезарядки



В связи с этим нами была проведена детальная обработка^{6/} данных эксперимента^{5/} с учетом возможного существования явления молекулярной перезарядки. В результате совместной обработки временных распределений γ -квантов мезорентгеновского излучения $\text{He}\mu$ -атомов и электронов от распада мюонов найдено значение скорости перехвата мюонов из основного состояния $p\mu$ -атомов к ядрам ${}^4\text{He}$:

$$\lambda_{\text{He}}^p = (3,6 \pm 1,0) \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$$

Измеренное значение λ_{He}^p находится в хорошем согласии с расчетной величиной. Этот факт является непосредственным свидетельством обнаружения в наших опытах нового механизма молекулярной перезарядки μ -атомов на ядрах гелия.

Кроме этого, нами исследована зависимость величины $W = W_H W_0$ (W_H - вероятность прямой посадки мюона на водород в смеси $H_2 + He$; W_0 - вероятность перехода μ -атома из возбужденного состояния в основное) от концентрации гелия, указывающая на наличие перехвата мюонов из возбужденных состояний μ -атомов к ядрам гелия. На рис. 6 представлена зависимость W от концентрации гелия, свидетельствующая о том, что перехват мюонов из возбужденных состояний μ -атомов более вероятен, чем в случае μ -атомов. Причина такого различия, по всей видимости, связана с существованием интенсивного ядерного захвата пионов из ps -состояний ($n = 1 + 5$) μ -мезоатомов, конкурирующего с процессом перехвата мюонов к ядрам гелия.

После экспериментального обнаружения^{/5,6/} теоретически предсказанного явления молекулярной перезарядки μ -атомов изотопов водорода на ядрах гелия, а также обнаружения перехвата мюонов из возбужденных состояний μ -атомов резко возрос интерес к исследованию таких процессов. Знание параметров процесса перехвата мюонов необходимо для правильной интерпретации опытов по исследованию мюонного катализа в смеси $D_2 + T_2$, корректного описания кинетики каскадных переходов μ -атомов в смеси изотопов водорода с гелием, а также для выбора оптимальных условий в плане осуществления эффективного мюонного катализа реакции dt -синтеза (можно произвести оценку периодичности и степени необходимой очистки смеси $D_2 + T_2$ от накопившегося в ней гелия за счет естественного распада трития и в результате протекания ядерных реакций dd -, dt - и tt -синтеза).

Целью следующего эксперимента^{/12/}, выполненного нами, являлось изучение процесса перехвата мюонов от $d\mu$ -атомов к ядрам 4He при малых концентрациях гелия и давлении смеси $D_2 + {}^4He$ равном 1350 ат. Метод измерения основан на анализе выходов и временных распределений

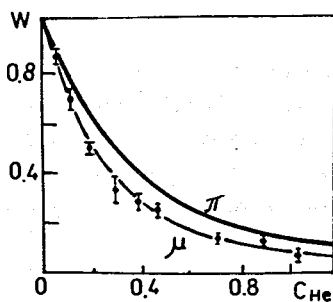


Рис. 6. Зависимость величины W от концентрации гелия в смеси $H_2 + {}^4He$:

μ - данные настоящей работы^{/16/};

π - результат эксперимента по исследованию перехвата пионов от μ -атомов к ядрам 4He (Петрухин В.И., Суворов В.М. ЖЭТФ 70 (1976) 1145).

последовательно зарегистрированных нейтронов dd -синтеза в чистом дейтерии и смеси дейтерия с гелием. В работах^{/31,32/} нами подробно рассмотрены идеология проведения экспериментов по исследованию данного процесса и алгоритм анализа экспериментальных данных.

Эксперимент проводился на мюонном канале фазатрона ОИЯИ. На рис. 7 приведена схема экспериментальной установки. Пучок мюонов с импульсом 130 МэВ/с и интенсивностью $2 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ проходил через сцинтилляционные детекторы 1 - 4, тормозной фильтр CH_2 и попадал в мишень высокого давления^{/9/}. Для регистрации электронов от распада мюонов и выделения акта остановки мюона в объеме мишени вокруг нее располагался сцинтилляционный детектор 5 (пластический сцинтиллятор цилиндрической формы $\varnothing 100 \text{ мм}$, $l = 150 \text{ мм}$, $d = 5 \text{ мм}$). Регистрация нейтронов осуществлялась с помощью двух нейтронных детекторов с жидким сцинтиллятором NE-213, расположенных симметрично относительно мишени. Кюветы для сцинтиллятора NE-213 имели размеры: $\varnothing 310 \times 160 \text{ мм}^2$.

Эксперимент включал в себя восемь опытов: а - с чистым дейтерием ($p = 1350 \text{ ат}$, $T = 300 \text{ К}$); б - пять экспозиций со смесью $D_2 + {}^4He$ при различных концентрациях гелия ($p = 1350 \text{ атм}$, $T = 300 \text{ К}$; $C_{He} = (0,50 \pm 0,15) \times 10^{-3}$, $(0,13 \pm 0,03) \times 10^{-2}$, $(0,31 \pm 0,06) \times 10^{-2}$, $(0,64 \pm 0,09) \times 10^{-2}$, $(1,00 \pm 0,10) \times 10^{-2}$; в - с чистым гелием ($p = 1050 \text{ атм}$); г - с вакуумированной мишенью. Экспозиции в и г являлись фоновыми. На рис. 8, в качестве примера, приведены временные распределения первых зарегистрированных нейтронов dd -синтеза, измеренные в опытах с чистым дейтерием и со смесью $D_2 + {}^4He$ ($C_{He} = 0,31\%$).

На рис. 9 приведены значения λ_{He}^d , полученные в экспозициях со смесью $D_2 + {}^4He$ при изменении концентрации от $0,5 \times 10^{-3}$ до $1,0 \times 10^{-2}$. В результате обработки всей совокупности экспериментальных данных найдено значение λ_{He}^d , а также на 90% уровне достоверности граничные значения величины W_0 : $\lambda_{He}^d = (2,75 \pm 0,22) \times 10^8 \text{ с}^{-1}$; $W_0(C_{He} = 5 \times 10^{-4}) \geq 0,96$; $W_0(C_{He} = 10^{-2}) \geq 0,9$.

Полученное значение скорости перезарядки $d\mu$ -атомов на ядрах 4He при давлении смеси $D_2 + {}^4He$ равном 1350 атм меньше величины λ_{He}^d , измеренной при давлении $\approx 100 \text{ атм}$ (Д.В.Балин и др. Письма в ЖЭТФ, 42 (1985) 236), но существенно больше граничного значения данной

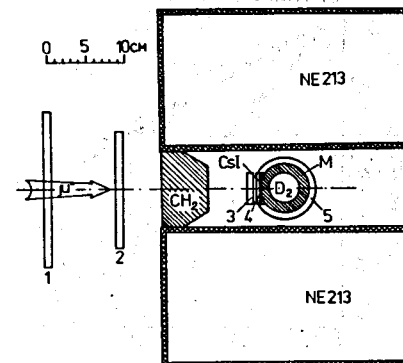


Рис. 7. Схема экспериментальной установки.

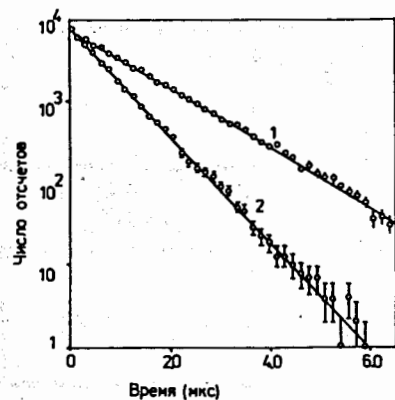


Рис. 8. Временные распределения:
1 - опыт с чистым дейтерием;
2 - опыт со смесью $D_2 + 0,31\% He$;
сплошные линии - результат
фитирования.

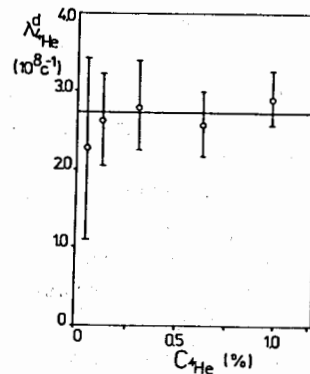


Рис. 9. Значения скорости перехвата
мюонов из основного состояния
 μ^- -атомов к ядрам 4He .
Прямая - результат фитирования
экспериментальных данных.

величины, найденного в опыте (A. Bertin et al. Lett. Nuovo Cim., 18 (1977) 381) при давлении смеси 10 атм. Причина такого расхождения пока не ясна. При сравнении измеренного нами значения λ_{He}^d с результатами вычислений (В.К. Иванов и др. ЖЭТФ, 91 (1986) 358) наблюдается хорошее согласие.

В этой же главе достаточно детально изложена кинетика процессов, происходящих в водород-гелиевой смеси и предложена экспериментальная программа дальнейших исследований МА- и ММ-процессов в смесях $H_2 + He$, $D_2 + He$, $T_2 + He^{31-33}$. На основании рассмотрения кинетики возбужденного мезоводорода предложен метод определения скоростей перехвата мюонов из возбужденных состояний мю-атомов изотопов водорода к ядрам гелия. Для проверки корректности предложенного метода нами проведена обработка данных эксперимента¹⁶. Полученные оценки¹³⁴ скоростей перехвата мюонов из возбужденных состояний μ^- -атомов с $n \leq 5$ (n - главное квантовое число) свидетельствуют о правомерности предложенного метода.

В седьмой главе представлены результаты эксперимента по изучению процесса рассеяния μ^- -атомов в водороде.



Интерес к изучению данного процесса связан со следующими обстоятельствами.

Знание сечений реакции (8) необходимо не только для правильной интерпретации опытов по измерению скорости ядерного захвата мюона протоном, но и для корректной проверки алгоритма решения задачи трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

К моменту выполнения настоящей работы существовало заметное расхождение между значениями сечения рассеяния, найденными в опытах с диффузионной камерой (В.П. Желепов и др. ЖЭТФ, 49 (1965) 393) и с использованием электронной методики (A. Quaranta et al. Nuovo Cim., 47B (1967) 72). Результаты теоретических работ (Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. УФН, 71 (1960) 581; Матвеев А.В., Пономарев Л.И. ЖЭТФ, 59 (1970) 1953; Cohen S. et al. Phys. Rev., 119 (1960) 384; Пономарев Л.И. и др. ЯФ, 29 (1979) 133) также не согласовывались друг с другом, причем наблюдалась заметная чувствительность их к используемым моделям. Для устранения существовавшей неопределенности в экспериментальных результатах нами был проведен эксперимент¹⁷ по измерению сечения процесса (8). Эксперимент был выполнен с использованием установки, описание которой приведено в Главе VI (опыт по изучению процесса перехвата мюонов от μ^- -атомов к ядрам 4He). Метод измерения основан на использовании связи длины диффузии μ^- -атома в газообразном водороде с сечением рассеяния. В процессе эксперимента были проведены следующие экспозиции.

1. Мишень заполнялась изотопически чистым водородом с содержанием дейтерия не более 2×10^{-6} об. долей. В данной экспозиции определялся выход γ -квантов мезорентгеновского излучения $S\mu^-$ и $I\mu^-$ -атомов, возникающих в результате диффузии μ^- -атомов к стенкам сцинтилляторов детекторов 4 и 5 и последующего перехвата мюонов от μ^- -атомов к ядрам S и I .

2. Опыт со смесью $H_2 + He$ для экспериментального определения эффективности регистрации γ -квантов мезорентгеновского излучения $S\mu^-$ и $I\mu^-$ -атомов (выбор He в качестве добавки на уровне $\sim 10^{-4}$ был обусловлен тем, что характеристики мезорентгеновского излучения $He\mu^-$, $S\mu^-$ и $I\mu^-$ -атомов весьма близки).

3. Опыт с гелием (фоновый). Число остановок мюонов в опытах с чистым водородом и гелием определялось по числу электронов, зарегистрированных детекторами "е".

4. Вспомогательные опыты, целью которых являлось измерение распределения плотности остановок мюонов по объему мишени.

5. Опыт с вакуумированной мишенью, который являлся фоновым для экспозиций 2 + 4.

В каждой экспозиции проводилось измерение временных распределений γ -квантов, зарегистрированных " γ_1 "- и " γ_2 "-детекторами во временном интервале 0,38 - 7,6 мкс (см. рис. 10). Чтобы определить взаимосвязь

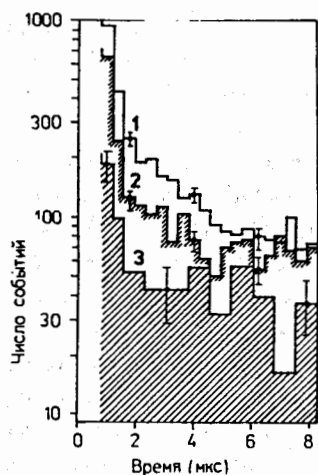


Рис.10. Временные распределения событий, зарегистрированных "γ"-детекторами в экспозициях с чистым водородом (1), гелием (2) и с вакуумированной мишенью (3). Распределения (2) и (3) нормированы к условиям опыта (1).

между сечением рассеяния рμ-атомов в водороде и измеренным выходом γ-квантов, а также для выяснения чувствительности результата к различным предположениям о характере процесса (8), проводилось численное моделирование методом Монте-Карло процессов, происходящих после

остановки мюонов в водороде. Алгоритм программы включал в качестве исходных параметров начальную энергию рμ-атомов, сечение рассеяния и эффективную массу молекулы водорода.

С целью определения эффективной массы молекулы H_2 было проведено моделирование процесса столкновения рμ-атомов с молекулами водорода, участвующими в тепловом движении с пятью степенями свободы (в этом случае классическим аналогом молекулы H_2 являлась "гантелька" в виде двух атомов водорода, расположенных на оси с фиксированным расстоянием между ними). Результаты моделирования свидетельствовали о том, что средние характеристики процесса рассеяния рμ-атомов (средние длины пробегов рμ-атомов по "прямой" и "ломаной" траекториям, число соударений, средний конус угла рассеяния) эквивалентны соответствующим характеристикам процесса соударения мю-атомов водорода с частицами, имеющими массу $M = 1,25 m_p$ (m_p - масса протона).

Используя измеренное значение выхода γ-квантов мезорентгеновского излучения Csμ- и Iμ-атомов и полученную расчетным путем зависимость выхода γ-квантов от сечения рассеяния рμ-атомов на частицах массой M, нами найдено эффективное сечение рассеяния рμ-атомов на молекулах H_2 равное

$$\sigma(\text{р}\mu + H_2) = (42,0 \pm 8,0) \times 10^{-21} \text{ см}^2.$$

На рис. 11 приведено измеренное в экспозиции с чистым водородом временное распределение γ-квантов мезорентгеновского излучения Csμ- и Iμ-атомов и наигранное распределение (результат моделирования при $\sigma(\text{р}\mu + H_2) = 42,0 \times 10^{-21} \text{ см}^2$). Как видно, данные распределения не различаются между собой в пределах статистических ошибок.

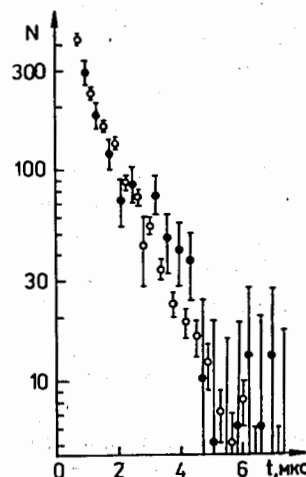


Рис.11. Временные спектры:

- - эксперимент,
- - результат моделирования.

Найденное нами сечение рассеяния рμ-атомов в водороде и в работе (A.Bertin et al. Nuovo Cim., 72A (1982) 225) согласуются не только между собой, но и с результатами вычислений (В.С.Мележик и др. ЖЭТФ 85 (1983) 434). Расчетные же значения сечения рассеяния рμ-атомов на молекулах водорода, полученные с учетом спиновых эффектов и влияния электронной оболочки молекулы водорода (A.Adamczak, V.S.Melezhik MCF 5/6 (1991) 65), существенно отличаются от экспериментально

найденных значений сечения. В настоящее время проводится анализ данных эксперимента, выполненного в PSI (J.V.Kraiman et al. MCF 5/6 (1991) 43) по измерению сечения процесса (8) при низких давлениях водорода (0,047 ат и 0,75 ат). Не исключено, что совместный анализ всего набора экспериментальных и расчетных значений сечения процесса (8), полученных к настоящему времени, сможет прояснить природу существующего различия между результатами этих работ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Быстрицкий В.М. и др. Система с газовой мишенью для опытов со сверхчистым водородом. - Дубна. - 1973. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: 13-7246).
2. Быстрицкий В.М. и др. Газовая мишень высокого давления для экспериментов с газообразным тритием.//ПТЭ. - 1982. - № 2. - С.21.
3. Быстрицкий В.М. и др. Жидкотритиевая мишень для исследования мезоатомных и мезомолекулярных процессов.//ПТЭ. - 1983. - № 3. - С.42.
4. Быстрицкий В.М., Возняк Я., Гула А. и др. Жидкотритиевая мишень с изменением рабочей температуры в диапазоне от 20,6 К до 40 К.//ПТЭ. - 1985. - Вып.1. - С.46.

5. Быстрицкий В.М. и др. Наблюдение перехвата мюонов в столкновениях $\mu + \text{He}$ //Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе. - Дубна. - 1977. - С.220.
6. Быстрицкий В.М., Дзепелов В.П., Петрухин В.И. и др. Перехват мюонов с водорода на гелий.//ЖЭТФ. - 1983. - Т.84. - С.1257.
7. Быстрицкий В.М., Дзепелов В.П., Петрухин В.И. и др. Измерение сечения рассеяния μ -атомов в газообразном водороде.//ЖЭТФ. - 1984. - Т.87. - С.384.
8. Bystritsky V.M. et al. Determination of optimal conditions for the experimental investigation of muon catalysis of nuclear reaction: $t + t \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$.//Acta Phys. Polonica. - 1984. - V. B15. - P.699.
9. Быстрицкий В.М. и др. Мишень для работы с изотопами водорода при давлениях до 150 МПа в диапазоне температур от 20,4 К до 300 К. //ПТЭ. - 1989. - № 1. - С.50.
10. Артюхов А.П., Быстрицкий В.М. и др. Мишень для работы с тяжелыми изотопами водорода при температурах до 1050 К и давлениях до 1000 ат.//ПТЭ. - 1989. - Т.6. - С.47.
11. Быстрицкий В.М. и др. Сильфонный вентиль высокого давления.//ПТЭ. - 1989. - № 4. - С.212.
12. Быстрицкий В.М. и др. Изучение процесса перехвата мюонов от μ -атомов к ядрам ${}^4\text{He}$ в дейтерий-гелиевой смеси при давлении 1350 ат.//ЖЭТФ. - 1990. - Т.98. - С.1514.
13. Быстрицкий В.М. и др. Проникновение изотопов водорода через жаропрочный сплав ЭИ-698 при высоких давлениях и температурах.//АЭ. - 1988. - Т.65. - С.395.
14. Быстрицкий В.М. и др. Исследование проникновения изотопов водорода через нержавеющие стали X18N10T и X13M2BF.//АЭ. - 1989. - Т.66. - С.413.
15. Быстрицкий В.М., Возняк Я., Грановский В.Б. и др. Исследование проникновения водорода и дейтерия через двойную оболочку Au + сплав ЭИ-698 при высоких значениях температуры и давления.//Атомная энергия. - 1988. - Т.65. - С.422.
16. Быстрицкий В.М. и др. Исследование влияния алитирования поверхности на проникновение водорода через стенку мишени при высоких значениях давлениях и температурах.//АЭ. - 1990. - Т.69. - С.101.101.
17. Быстрицкий В.М. и др. Исследование проникновения изотопов водорода через "защитные" покрытия жаропрочного сплава ЭИ 698. - Дубна. - 1991. (Препринт/Объед. ин-т. ядерн. исслед.: P13-91-128).

18. Быстрицкий В.М. и др. Система газообеспечения мишени в эксперименте по исследованию мюонного катализа ядерной реакции синтеза (d+t).//ПТЭ. - 1981. - № 6. - С.27.
19. Быстрицкий В.М. и др. Система газообеспечения жидкотритиевой мишени с рабочим объемом 35 см³.//ПТЭ. - 1984. - № 4. - С.46.
20. Быстрицкий В.М. и др. Установка диффузионной очистки водорода до 50 ат.//ПТЭ. - 1972. - Т.2. - С.226.
21. Борисова А.А., Быстрицкий В.М. и др. Исследование возможности использования тритида титана для дозированного напуска трития в газовую мишень. - Дубна. - 1980. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: 13-80-344).
22. Быстрицкий В.М. и др. Мембранный фильтр для диффузионного выделения и получения изотопов водорода особой чистоты.//ПТЭ. - 1991. - Т.1. - С.216.
23. Быстрицкий В.М. и др. Расчет эффективностей регистрации нейтронов и электронов в экспериментах с мюонами. - Дубна. - 1973. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: 1-7527).
24. Bystritsky V.M. et al. Calculation of neutron registration efficiency for experimental investigation of $t\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu^-$ and $d\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$ muon-catalyzed fusion reactions.//Acta Phys. Polonica. - 1984. - V. B15. - P.689.
25. Bystritsky V.M. et al. Characteristics of the large-volume NE-213 neutron counters for muon catalyzed fusion investigation.//NIM. - 1985. - V. A241. - P.532.
26. Bystritsky V.M. et al. Use of a large-volume NE-213 scintillator for investigations of the $t\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu$ reaction. //Acta Phys. Polonica. - 1986. - V. B17. - P.309.
27. Bystritsky V.M. et al. Cycle-by-cycle analysis of muon-catalyzed fusion in a one-component medium.//Atomkernenergie-Kerntechnik. - 1984. - V.45. - P.197.
28. Bubak M., Bystritsky V.M. et al. Kinetic formulae for (D+D) μ and (T+T) μ muon-catalyzed nuclear synthesis.//Acta Phys. Polonica. - 1985. - V. B16. - P.575.
29. Bubak M., Bystritsky V.M. Cycle-by-cycle time distributions of muon catalyzed fusion registered omitting events with signatures in deadtime intervals.//Kerntechnik. - 1991. - V.6. - P.37.
30. Быстрицкий В.М. и др. Отбор событий в экспериментах по исследованию мю-атомных и мю-молекулярных процессов.//ПТЭ. - 1983. - № 4. - С.48.
31. Быстрицкий В.М. и др. Кинетика возбужденного мезоводорода в смесях водорода и гелия.//ЖЭТФ. - 1990. - Т.97. - С.73.

32. Быстрицкий В.М., Столупин В.А. К вопросу об экспериментальном определении параметров процесса перезарядки μ -атомов изотопов водорода на ядрах He. // ЯФ. - 1991. - Т.53. - С.1005.
33. Bubak M., Bystritsky V.M. Evaluation of the possibility for determining the parameters of $t\mu$ -atoms charge exchange on helium. - Dubna. - 1986. (Preprint/Joint.Inst.Nucl. Research: E1-86-107).
34. Bystritsky V.M. et al. Experimental estimates for muon transfer rates from excited $p\mu$ -atoms to ^4He nuclei. - Dubna. - 1992. (Preprint/Joint Institute for Nuclear Research: E4- 92-61); Submitted to "Kerntechnik".

Рукопись поступила в издательский отдел
18 ноября 1992 года.