

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

15-2000-284

На правах рукописи  
УДК 539.126.333

Д-306

**ДЕМИН**  
Дмитрий Львович

**РАЗРАБОТКА КРИОГЕННЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ  
С ТЯЖЕЛЫМИ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
МЮОННОГО КАТАЛИЗА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА  
ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ  $6 \div 30$  К**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2000

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

В.Г. Зинов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корр. РАН

С.С. Герштейн

доктор физико-математических наук, профессор

В.И. Лушиков

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Российский научный центр «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита состоится « 1 » апрель 2001 на заседании  
Специализированного диссертационного совета Д-720.001.03 при Лаборатории  
ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « 1 » марта 2001.

Ученый секретарь диссертационного Совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ю.А. Багусов

## Общая характеристика работы

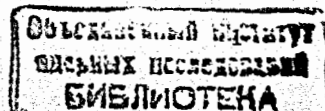
**Актуальность проблемы:** После открытия в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ в 1966 г. явления резонансного образования мюонных молекул  $dd\mu$  и высокой эффективности мюонного катализа (МК) ядерных реакций синтеза в системе  $dt\mu$  (1979) многие лаборатории мира, имеющие ускорители протонов промежуточных энергий, ПИЯФ (Россия), LAMPF (США), PSI (Швейцария), RAL (Великобритания), TRIUMF (Канада) проводили исследования по проблеме мюонного катализа. В настоящее время они идут в ОИЯИ, КЕК (Япония), RIKEN-RAL (Великобритания), TRIUMF (Канада). МК выделился как независимое направление, имеющее много приложений в ядерной физике и физике слабых взаимодействий.

С точки зрения фундаментальных исследований изучение процессов МК в чистом дейтерии имеет важное преимущество перед реакциями МК в двойных D/T и тройных H/D/T смесях изотопов водорода, т.к. в этом случае легче интерпретировать экспериментальные данные. Реакции мюонного катализа в чистом дейтерии имеют простую кинетику и поэтому привлекательны для проверки теории образования мезомолекул.

Тщательное изучение явления мюонного катализа ядерных реакций синтеза в дейтерий-тритиевых (D/T) смесях началось с момента теоретического предсказания высокой скорости образования мезомолекулы  $dt\mu$  [1] и экспериментального подтверждения этого факта [2]. Экспериментальные данные показали высокий выход нейтронов катализа  $Y_c$  реакций МК для dt-синтеза ( $Y_c > 150$ ). Появился интерес к возможному применению реакций МК для создания интенсивного 14 МэВ-ного нейтронного источника [3].

**Цель диссертационной работы:** Целью настоящего исследования стало систематическое измерение скорости образования мезомолекулы  $dd\mu$  из различных состояний сверхтонкого расщепления  $d\mu$  атома  $\lambda_{3/2}$  и  $\lambda_{1/2}$  и скорости переворота спина мезоатома дейтерия  $\lambda_d$  в температурном интервале 5,5 ÷ 30 К и первое прямое измерение основных параметров реакций цикла МК в жидкой D/T смеси при температуре 22 К - множественности нейтронов в цикле  $\lambda_c$  и коэффициента эффективных потерь мюонов в цикле  $w$ .

**Направление исследований:** В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с участием автора была разработана и создана твердо-дейте-



риевая мишень (ТДМ), способная работать в интервале температур  $5,5 \div 30$  К. Результаты эксперимента с применением ТДМ согласуются с результатами [4] и превосходят их по широте исследований.

В течение 1995-98 годов с участием автора была создана экспериментальная установка ТРИТОН, в состав которой вошла компактная жидко-третиевая мишень (ЖТМ). Важной задачей при эксплуатации установки ТРИТОН являлось обеспечение радиационной безопасности персонала при работе с тритий-содержащими смесями. На этой установке в середине 1997 г. впервые были выполнены прямые измерения основных параметров цикла мюонного катализа (скорость цикла и коэффициент потерь мюонов) в зависимости от концентрации изотопов в жидкой дейтерий-третиевой смеси при температуре 22 К. Экспериментальные результаты, полученные на установке ТРИТОН, согласуются с результатами [5] коллаборации RIKEN-RAL, которые проводились с применением другой экспериментальной методики и были опубликованы одновременно с нашими.

**Методы исследований:** Разработанная в ЛЯП ОИЯИ экспериментальная методика, включающая применение компактной мишени и новые методы анализа регистрируемых экспериментальных событий [6, 7], позволили получить данные, сопоставимые с мировым уровнем исследований в области МК. Важная особенность эксперимента с дейтерием - проведение измерений в жидком и твердом дейтерии с применением одной мишени. Методика эксперимента и меры безопасности при работе с тритием позволили провести эксперименты по проблеме МК в жидкой смеси тяжелых изотопов водорода в диапазоне третиевых концентраций  $19 \div 88\%$ .

**На защиту выносятся:**

1. Создание твердо-дейтериевой мишени для обеспечения эксперимента по измерению параметров реакций МК в жидком и твердом дейтерии.
2. Результаты эксперимента по исследованию температурной и спиновой зависимости скорости образования мезомолекул в жидком и твердом дейтерии.
3. Создание жидко-третиевой мишени для обеспечения эксперимента по измерению параметров реакций МК в жидкой смеси D/T.
4. Результаты эксперимента по исследованию параметров МК в жидкой смеси дейтерия и трития при различных концентрациях трития.

**Научная новизна и практическая полезность:** С применением криогенных мишеней впервые выполнены систематические исследования спиновой и температурной зависимостей скорости образования мезомолекулы  $dd\mu$  в жидком и твердом дейтерии. Впервые проведено прямое измерение основных параметров реакций МК в жидкой D/T смеси. Полученные результаты имеют важное значение для выяснения перспектив развития мюонного катализа как научного направления и возможности практического применения этого явления (использование реакций МК для отработки технологии производства ядерной энергии и создание нейтронного МК источника [3]).

**Апробация работы:** Результаты диссертации, представленной к защите, докладывались на семинарах Лаборатории ядерных проблем, на Международном симпозиуме в Дубне в 1995 г. и на Международном симпозиуме EXAT-98 по проблеме МК в Асконе (Швейцария) в 1998 г., где вызвали большой интерес научной общественности и получили высокую оценку лидеров исследований по проблеме мюонного катализа [8].

**Публикации:** Основу диссертации составил цикл из 4 работ, выполненных автором в течение 1993-98 годов.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, она содержит 90 страниц, 23 рисунка, 3 таблицы и библиографический список из 55 наименований.

### Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность проблемы МК, проведен краткий обзор экспериментов и теоретических предположений, важных для оценки предлагаемых к защите результатов.

**В первой главе** описана конструкция твердо-дейтериевой мишени для измерения спиновой и температурной зависимости скорости образования мезомолекулы дейтерия в твердом и жидком дейтерии, принципы работы мишени, результаты ее тестов и эксплуатации.

При проектировании ТДМ была решена задача равномерного заполнения рабочего объема мишени твердым дейтерием и поддержания его температуры с точностью 0,3 К. По условиям эксперимента измерения проводились с твердым дейтерием внутри ампулы мишени (рис. 1) при температурах  $5,5 \div 17,7$  К и с жидким дейтерием в диапазоне температур  $19,0 \div 30,5$  К.

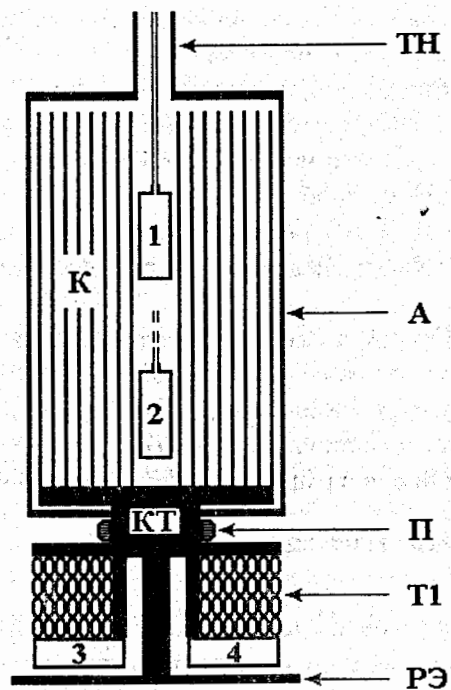


Рис. 1. Схема ампулы ТДМ: 1-4 - ампулы газовых термометров; А - ампула ТДМ; К - проволочный кондуктор; КТ - коллектор теплообменника; П - нагреватель; РЭ - радиационный экран; Т1 - теплообменник; ТН - трубка напуска дейтерия

При проведении экспозиции для определения фона нейтронов ампула мишени должна была заполняться газообразным гелием под давлением 40 атм при температуре 15 К.

Особенность мишени заключалась в том, что для уменьшения градиента температуры по всему объему в ампулу ТДМ (рис. 1) был встроены кондуктор К, состоящий из 500 медных проволок диаметром 0,4 мм. Диаметр проволок и расстояние между ними были рассчитаны таким образом, чтобы при кристаллизации не образовывались каверны в твердом дейтерии. Для работы мишени были созданы системы газообеспечения, охлаждения, термометрии и термостатирования. Измерение температуры дейтерия внутри ампулы мишени проводилось газовыми термометрами с гелиевым заполнением 1, 2 (рис. 1). Температура теплообменника Т1 контролировалась газовыми термометрами 3, 4. Выбор газовых термометров был связан с требованиями к чистоте дейтерия внутри ампулы ТДМ, простотой их калибровки и размещения. Для термометров 1-3 отношение полного объема  $V_h$  к холодному  $V_c$  было выбрано равным 30. Это обеспечивало максимальную чувствительность термометров в диапазоне температур  $5 \div 20$  К.

Результаты калибровки термометров хорошо описывались классической формулой при введении только одного поправочного множителя  $z(T)$ , который учитывал влияние эффективного холодного объема соединительных капилляров и неидеальность газообразного гелия, проявляющуюся при водородных температурах:

$$P(T) = z(T)V_h P_i / ([V_c T_i / T] + [z(T)V_h - V_c]), \quad (1)$$

$$z(T) = 1 - 0,56/T. \quad (2)$$

Здесь  $P$  - давление в термометре;  $T$  - абсолютная температура холодного объема термометра;  $V_h$  - полный объем термометра;  $V_c$  - холодный объем термометра;  $P_i$  - начальное давление в термометре (давление, установившееся при заполнении термометра);  $T_i$  - начальная температура термометра при заполнении.

Для управления температурой мишени применялась электрическая схема с газовым термометром 4 (рис. 1) в качестве чувствительного

элемента. Исполнительным элементом системы термостатирования ампулы ТДМ был нагреватель П.

В течение всего времени испытаний и сеанса на фазотроне ЛЯП ОИЯИ длительностью 150 часов все узлы ТДМ показали свою надежную работу. При этом было проведено несколько экспозиций дейтерия на пучке отрицательных мюонов в диапазоне температур  $5,5 \div 30$  К.

Во второй главе диссертации описано создание экспериментальной установки ТРИТОН, центральной частью которой являлась жидкостригетивная мишень, для проведения эксперимента по прямому измерению параметров реакций МК в жидкой смеси дейтерия и трития.

Отличительная черта нашей установки - компактность, что позволяло обеспечить регистрацию нейтронов от dt-синтеза и электронов от распада мюонов в условиях близких к  $4\pi$  геометрии. ЖТМ (рис. 2) представляла собой комплекс устройств, в который входила ампула А с системой заполнения ее рабочим газом, системы вакуумирования, охлаждения, термостатирования и система протоколирования экспериментальных параметров.

Система охлаждения ЖТМ предназначалась для сжижения изотопов водорода в ампуле мишени и длительного (10 часов) поддержания фиксированной температуры ампулы мишени с точностью 0,1 К. Метод криостатирования потоком холодного гелия с промежуточным хладагентом (жидкий дейтерий) был выбран для обеспечения радиационной безопасности ЖТМ при эксплуатации.

Важными особенностями мишени являлись: термометрия дна ампулы ЖТМ с помощью конденсационного термометра с водородным заполнением; термостабилизация промежуточного хладагента; использование нагревателя для ускоренной эвакуации рабочей смеси из ампулы. Влияние теплового эффекта растворения изотопов водорода на температуру смеси в ампуле ЖТМ учитывалось при планировании экспозиций мишени на пучке.

ЖТМ была присоединена к комплексу подготовки газовой смеси (КПГС) [9], входившему в состав установки ТРИТОН. КПГС имел многоуровневую систему радиационной защиты. Он был разработан, создан и эксплуатировался сотрудниками РФЯЦ ВНИИЭФ во время экспериментов на фазотроне ЛЯП. Требования радиационной безопасности в ряде случаев принципиально влияли на конструкцию мишени.

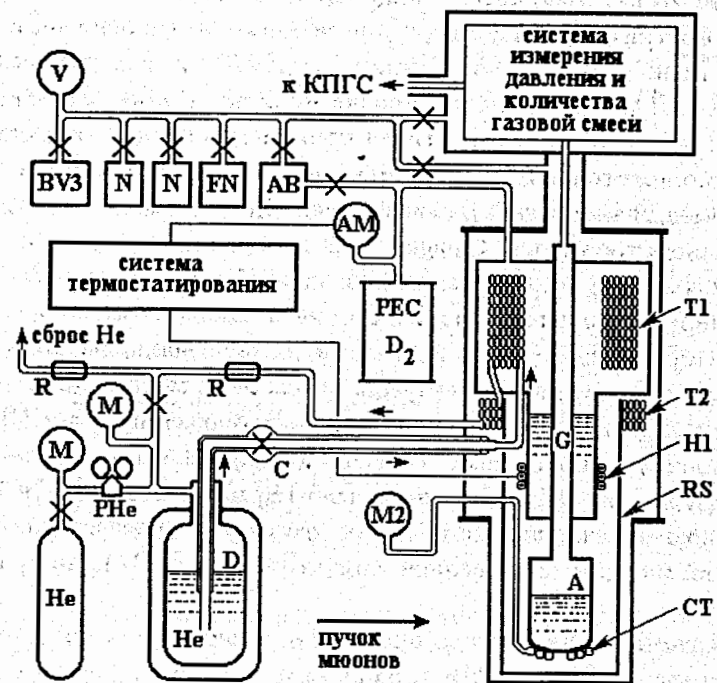


Рис. 2. Схема ЖТМ: А - ампула ЖТМ; АВ - абсорбер; АМ - абсолютный манометр; BV3 - буферная вакуумная емкость; С - сифон; СТ - конденсационный термометр; D - дьюар; FN - форвакуумный насос; G - конденсационная трубка; H1 - нагреватель; М - манометры; М2 - тензометрический преобразователь конденсационного термометра; N - высоковакуумные насосы; PEC - ресивер промежуточного хладагента; PHe - редуктор; R - расходомеры; RS - радиационный экран; T1, T2 - теплообменники; V - вакуумметр

По условиям эксперимента в ампулу мишени было необходимо подавать смеси изотопов водорода, содержащие тритий. Допустимая суммарная активность трития в ампуле ЖТМ, буферных объемах системы измерения давления ЖТМ и газовых магистралях мишени могла достигать 10 кКи. Обеспечение тритиевой безопасности при эксплуатации ЖТМ требовало исключения возможности попадания газообразного трития в атмосферу при экспозиции мишени на пучке и при всех технологических операциях с тритий-содержащими смесями. Для этого ЖТМ содержала два уровня защиты от возможного проникновения трития в атмосферу. Была применена схема охлаждения мишени с промежуточным хладагентом (дейтерием) и наличием буферных объемов хладагента и рабочей смеси. Использование тензометрических манометров типа "Салфир" для измерения параметров (давление, температура) жидкой смеси повышало безопасность работы при обеспечении высокой точности измерений и давало возможность вести автоматизированную запись показаний на персональный компьютер. Контроль за состоянием атмосферы на рабочих местах производился приборами дозиметрического контроля, расположенными в КППС.

В течение тренировочных "сеансов" без пучка и всего времени сеанса на фазотроне ЛЯП длительностью 150 часов все узлы ЖТМ показали свою надежную работу. При этом было проведено несколько экспозиций мишени, заполненной жидкими смесями D/T, на пучке мюонов.

В третьей главе описано проведение эксперимента по исследованию параметров реакций МК в жидком и твердом дейтерии с применением ТДМ.

В 1994 г. с этой мишенью была впервые систематически измерена спиновая зависимость скорости образования мезомолекулы дейтерия в реакциях мюонного катализа в твердом и жидком дейтерии. Измерялись временные спектры электронов от распада мюонов и временные спектры нейтронов от реакций МК в дейтерии при семи различных значениях температуры в диапазоне 5,5 ÷ 30 К. Выход нейтронов нормировался на число зарегистрированных электронов от распада мюонов, остановившихся в дейтерии. Наибольшая статистика была набрана при самой низкой температуре и в двух точках выше и ниже температуры плавления дейтерия 18,7 К, при этом фазовое состояние дейтерия было разным (твердое и жидкое). Экспозиция с гелием была выполнена для независимого определения фона нейтронов во вре-

менном спектре нейтронов. Экспозиция с пустой мишенью позволила измерить число остановок мюонов в стенках мишени.

Основные результаты эксперимента - скорость образования мезомолекулы дейтерия  $\lambda_{1/2}$ ,  $\lambda_{3/2}$  с участием мезоатома дейтерия в спиновых состояниях 1/2, 3/2 и скорость переворота спина мезоатома  $\lambda_d$ . Они получены из анализа временного распределения нейтронов по отношению к времени влета мюона. Результаты представлены в таблице. Анализ случаев с жидким и твердым дейтерием не выявил изменения скорости образования мезомолекулы  $dd\mu$  в зависимости от фазового состояния дейтерия.

Таблица. Результаты эксперимента с ТДМ

Температура (К)	Скорость образования мезомолекулы $dd\mu$ и скорость переворота спина $d\mu$ -мезоатома ( $\text{мкс}^{-1}$ )			
	$\lambda_{1/2}$	$\lambda_{3/2}$	$\lambda_{3/2}/\lambda_{1/2}$	$\lambda_d$
5,5	0,0448(18)	2,48(13)	58,8(18)	31,2(11)
9,9	0,0403(20)	2,11(14)	57,0(18)	30,4(11)
15,1	0,0424(20)	2,27(16)	58,1(24)	31,6(13)
17,7	0,0419(18)	2,24(11)	61,7(17)	32,2(12)
19,0	0,0407(21)	2,27(14)	60,1(19)	29,4(11)
26,3	0,0389(20)	3,03(20)	77,9(32)	32,6(12)
30,5	0,0428(26)	3,20(21)	72,9(28)	31,4(12)

Величины в скобках включают в себя статистические ошибки. В ошибки не входят неопределенности в плотности дейтерия  $\varphi$  (3%) и эффективности регистрации нейтронов  $\epsilon_n$  (8%).

Измерения  $\lambda_{1/2}$  находятся в согласии как с предыдущими данными группы ЛЯП ОИЯИ для жидкого дейтерия при  $T = 22$  К [10], так и с данными группы PSI при  $T = 23$  К. Главным результатом, полученным с использованием ТДМ, было измерение скорости образования мезомолекулы  $dd\mu$  из верхнего спинового состояния  $F = 3/2$  мезоатома  $d\mu$  в твердом дейтерии. Наряду с результатом группы TRIUMF [4] он резко противоречит "стандартной" теории, согласно которой только нерезонансный механизм образования мезомолекулы дейтерия может быть обнаружен при низких температурах. Возможные механизмы, объясняющие результаты измерения скорости образования мезомолекулы  $dd\mu$  в твердом дейтерии, пока еще находятся в стадии обсуждения.

Необходимо подчеркнуть, что уникальная экспериментальная методика (детекторы нейтронов полного поглощения, криогенная твердодейтериевая мишень, многоимпульсная система ( $n-\gamma$ )-разделения, близкая к 4 $\pi$  геометрия установки) позволила впервые провести систематические измерения спиновых эффектов в твердом и жидком дейтерии и получить данные, не уступающие по точности измерениям на мезонных фабриках и превосходящие их по широте исследований.

В четвертой главе диссертации дано физическое обоснование и описание эксперимента по исследованию параметров реакций МК в жидкой смеси дейтерия и трития при температуре 22 K.

В 1997 г. был проведен эксперимент по исследованию реакций МК в жидкой D/T смеси с применением ЖТМ на мюонном канале фазотрона ЛЯП ОИЯИ. В настоящем исследовании была реализована новая постановка эксперимента - измерение временной зависимости тока фотоумножителей нейтронного спектрометра, регистрирующего вылет нейтронов от реакций МК в жидкой D/T смеси, и измерение времени вылета электрона от распада мюона при условии, что это событие было инициировано одиночным мюоном, остановившимся в смеси изотопов водорода [6, 7, 11]. Она позволила впервые провести независимое прямое определение эффективного коэффициента потерь мюонов в цикле  $w$  и скорости цикла  $\lambda_c$  в жидкой равновесной по молекулярному составу D/T смеси в широком диапазоне концентраций трития.

Был проведен ряд экспозиций мишени, заполненной жидкой смесью D/T, на пучке отрицательных мюонов фазотрона ЛЯП. Экспозиция с  $D_2$  была проведена для получения фона нейтронов в "чистых" условиях без нейтронов от реакции  $d+t$ . Экспозиция с пустой мишенью проведена для определения фона во временном спектре электронов распада. Тритиевая концентрация и молекулярный состав измерялись в каждой экспозиции хроматографическим методом при заправке смеси в ампулу мишени и при эвакуации смеси в КППС. Были сделаны поправки на криогенное разделение изотопов в ампуле ЖТМ при экспозициях на пучке мюонов.

На рис. 3 изображена зависимость результатов измерений скорости цикла  $\lambda_c$  от концентрации трития в жидкой D/T смеси, нормированная на плотность жидкого водорода, наряду с данными других групп.

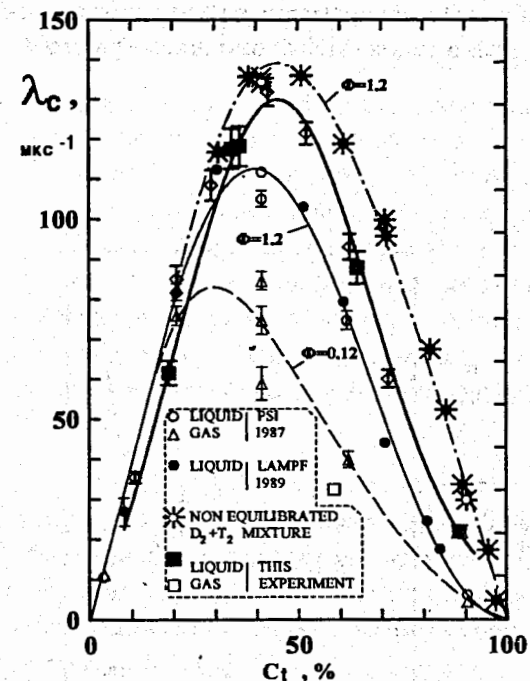


Рис. 3. Экспериментальная зависимость скорости цикла реакций МК в жидкой смеси дейтерия и трития от концентрации трития: квадраты - данные нашего эксперимента; ромбы - данные [5]; остальные точки - данные обзора [12].  
Примечание: линии проведены для объединения точек

На рис. 4 изображена зависимость результатов измерений эффективных потерь мюонов в цикле МК  $w$  от концентрации трития в жидкой D/T смеси.

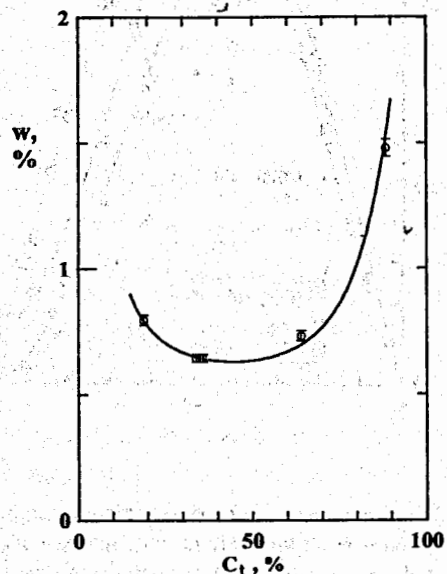


Рис. 4. Экспериментальная зависимость коэффициента потерь мюонов в цикле МК в жидкой смеси дейтерия и трития от концентрации трития

## Заключение

### Основные результаты и выводы:

1. Для обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза разработана и создана надежная компактная твердодейтериевая мишень объемом  $280 \text{ см}^3$ , которая позволяла работать как с твердым, так и с жидким дейтерием. Медный кондуктор из 500 проволочек обеспечил градиент температуры внутри ампулы мишени не более  $0,1 \text{ К}$ . Система термостабилизации мишени поддерживала стабильную температуру жидкого и твердого дейтерия с точностью  $\pm 0,3 \text{ К}$ . Мишень позволила провести измерения ядерно-физических параметров реакций мюонного катализа в чистом дейтерии в диапазоне температур  $5,5 \div 30 \text{ К}$ .

2. На установке с ТДМ впервые выполнено систематическое исследование скоростей образования мезомолекул  $dd\mu$  из различных спиновых состояний сверхтонкой структуры  $d\mu$  мезоатома  $F = 3/2, F = 1/2$  ( $\lambda_{3/2}, \lambda_{1/2}$  соответственно) и скорости перехода  $\lambda_d$  мезоатома дейтерия между уровнями сверхтонкой структуры в твердом и жидком дейтерии в диапазоне температур  $5,5 \div 30 \text{ К}$ .

Полученные результаты (для твердого дейтерия) на порядок превышают теоретические предсказания скорости образования мезомолекулы дейтерия  $\lambda_{3/2}$ .

3. Для обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза разработана и создана безопасная компактная жидко-тритиевая мишень объемом  $30 \text{ см}^3$ , которая позволяла работать с жидкими смесями изотопов водорода (H, D, T). Двухуровневая система радиационной безопасности допускала работу при активности трития внутри мишени до  $10 \text{ кКи}$ . Система термостабилизации мишени поддерживала стабильную температуру жидкой смеси с точностью  $\pm 0,1 \text{ К}$  внутри мишени. Мишень позволила провести измерения физических параметров реакций мюонного катализа в смеси изотопов водорода при температуре  $20 \div 40 \text{ К}$ .

4. На установке с ЖТМ впервые выполнен эксперимент по прямому измерению коэффициента эффективных потерь мюонов и скорости цикла мюонного катализа с образованием  $dt\mu$  молекул в жидкой дейтерий-тритиевой смеси. Измерены  $\lambda_c$  и эффективный коэффициент



потерь мюонов в цикле  $w$  при различных концентрациях изотопов в молекулярно-равновесной жидкой смеси дейтерия и трития при температуре 22 К в диапазоне тритиевых концентраций  $19 \div 88\%$ .

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. D.L.Demin, V.P.Dzheleпов, N.N.Grafov, V.G.Grebinnik, A.D.Konin, A.I.Rudenko, Yu.A.Sorokina, Yu.G.Zhestkov, V.G.Zinov, *Solid deuterium target*, Hyperfine Interactions 101/102(1996)583-589; Preprint JINR P13-95-179, Dubna, 1995.

2. D.L.Demin, V.P.Dzheleпов, V.V.Filchenkov, N.N.Grafov, V.G.Grebinnik, D.V.Migachev, A.D.Konin, A.I.Rudenko, V.T.Sidorov, Yu.G.Zhestkov, V.G.Zinov, J.D.Davies, V.R.Bom, C.W.E. van Eijk, *Measurement of the spin and temperature dependence of  $dd\mu$  molecule formation rate in solid and liquid deuterium*, Hyperfine Interactions 101/102(1996)13-19; Preprint JINR E15-96-207, Dubna, 1996; ЖЭТФ 111, Вып.4(1997)1163-1173.

3. Н.Н.Графов, В.Г.Гребинник, Д.Л.Демин, В.П.Джелепов, В.Г.Зинов, С.В.Медведь, В.И.Пряничников, В.А.Уткин, *Жидкотритиевая мишень*, ПТЭ 1(1999)21-27; Hyperfine Interactions 119(1999)349-351; Препринт ОИЯИ P13-97-243, Дубна, 1997.

4. Yu.P.Averin, D.V.Balin, V.R.Bom, J.N.Bradbury, J.D.Davies, A.M.Demin, D.L.Demin, A.E.Drebushko, V.P.Dzheleпов, C.W.E.van Eijk, V.V.Filchenkov, A.N.Golubkov, N.N.Grafov, V.G.Grebinnik, S.K.Grishechkin, V.G.Klevtsov, A.D.Konin, A.A.Kukolkin, S.V.Medved', A.B.Modenov, V.A.Nazarov, V.V.Perevozchikov, V.I.Pryanichnikov, V.Ya.Rozhkov, A.I.Rudenko, S.M.Sadetsky, G.G.Semenchuk, V.T.Sidorov, Yu.V.Smirenin, I.I.Sukhoi, V.V.Travkin, N.I.Voropaev, A.A.Yukhimchuk, V.G.Zinov, S.V.Zlatoustovskii, *Novel method for MCF study in a dense D/T mixture, first experimental results*, Hyperfine Interactions 118(1999)111-119; Preprint JINR E15-98-337, Dubna, 1998.

## Литература

- [1] S.S.Gerstein, L.I.Ponomarev, Phys. Lett. B 72(1977)80; С.И.Виницкий, Л.И.Пономарев, И.В.Пузынин и др., ЖЭТФ 74, Вып.3(1978)849.
- [2] В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, З.В.Ершова и др., Phys. Lett. B 94, No.4(1980)476; Письма ЖЭТФ 31, Вып.4(1980)249; ЖЭТФ 80(1981)1700.
- [3] C.Petitjean, F.Atchinson, G.Heidenreich et al., Fusion Technology 25(1994)437; V.V.Anisimov, E.Cavalleri, F.I.Karmanov et al., Hyperfine Interactions 119(1999)329.
- [4] P.E.Knowles, J.M.Bailey, G.A.Beer et al., Hyperfine Interactions 101/102(1996)21; P.E.Knowles, G.A.Beer, G.R.Mason et al., Phys. Rev. A 56(1997)1970.
- [5] K.Ishida, K.Nagamine, T.Matsuzaki et al., Hyperfine Interactions 118(1999)203.
- [6] V.G.Zinov, Muon Cat. Fusion 7(1992)419.
- [7] V.V.Filchenkov, Muon Cat. Fusion 7(1992)409.
- [8] E.A.Armour, J.Bradbury, J.Cohen et al., Hyperfine Interactions 101/102(1996)699.
- [9] A.A.Yukhimchuk, V.N.Lobanov, Hyperfine Interactions 101/102(1996)661; A.A.Yukhimchuk, V.A.Apasov, Yu.I.Vinogradov et al., Hyperfine Interactions 119(1999)341.
- [10] В.П.Джелепов, В.Г.Зинов, С.А.Ивановский и др., ЖЭТФ 101, Вып.4(1992)1105; Sov. Phys. JETP 74(1992)589; V.P.Dzheleпов, V.V.Filchenkov, S.I.Ivanovsky et al., Muon Cat. Fusion 7, No.4(1992)387.
- [11] D.L.Demin, V.P.Dzheleпов, V.V.Filchenkov et al., Hyperfine Interactions 101/102(1996)591.
- [12] C.Petitjean, Nuclear Physics A 543(1992)79c.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 ноября 2000 года.