

C-814

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-89-571

СТОЛУПИН

Владимир Александрович

УДК 539.1.07:539.126.333

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА
МЮОННОГО КАТАЛИЗА РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА
В СМЕСЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

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

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук В.М. Быстрицкий

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук Г.Я. Коренман
доктор физико-математических наук В.И. Селиванов

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ленинградский институт ядерной физики им. Б.П. Конрадинова.

Защита диссертации состоится "____" _____ 1989 года
в _____ час. на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан "____" _____ 1989 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного Совета
доктор физико-математических наук

Ю.А. Батусов

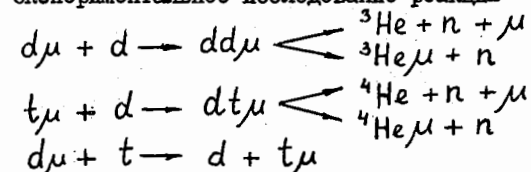
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Экспериментальное исследование явления мюонного катализа синтеза ядер изотопов водорода связано с широким кругом физических проблем. Во-первых, знание характеристик процесса мюонного катализа необходимо для правильной интерпретации опытов по захвату отрицательных мюонов ядрами изотопов водорода с целью определения параметров слабого взаимодействия. Во-вторых, экспериментальное определение параметров мюонного катализа позволяет проверить с высокой точностью ($\sim 10^{-7}$ от.ед.) правильность алгоритмов решения квантово-механической задачи трех тел, взаимодействующих по закону Кулона. В-третьих, актуальность экспериментального изучения явления мюонного катализа реакций синтеза ядер изотопов водорода связана с возможностью использования этого уникального явления для получения энергии. Кроме того, анализ временных и энергетических распределений продуктов реакций синтеза ядер в мезомолекулах изотопов водорода дает информацию о параметрах сильного взаимодействия между ядрами в области энергий, близких к нулю.

Цель работы

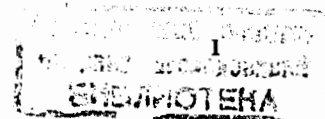
Экспериментальное исследование реакций



в смесях тяжелых изотопов водорода.

Научная новизна

Впервые в мире измерена скорость образования $dd\mu$ -молекул $\lambda_{dd\mu}$ в дейтерии при $T \approx 300$ K в диапазоне давлений $0,4$ кбар $\leq p \leq 1,5$ кбар. На основании полученных результатов сделан вывод: в диапазоне изменения плотности дейтерия $0 < \varphi \leq 0,88$ ($\varphi = N/N_0$, где N - плотность ядер среды, $N_0 = 4,25 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$ - плотность ядер жидкого



СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

водорода при $T = 20,4$ К) вклад квазирезонансного механизма в образование $dd\mu$ -молекул не превышает 3%.

С помощью разработанного и созданного комплекса аппаратуры впервые в мире (1979 г.) обнаружен процесс мюонного катализа ядерной реакции синтеза ($d+t$) и определены его основные характеристики.

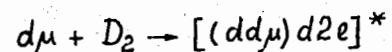
Практическая ценность

Разработаны и созданы экспериментальные комплексы для исследования мю-атомных и мю-молекулярных процессов в смесях изотопов водорода в диапазоне температур $20,4 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ и давлений до 1500 ат.

Разработана оригинальная методика дозированного напуска трития в мишень.

Автор защищает:

1. Эксперимент по измерению $\lambda_{dd\mu}$ - скорости процесса



при температуре $T \approx 300 \text{ К}$ и давлении дейтерия $0,4 \text{ кбар} \leq p \leq 1,5 \text{ кбар}$.

2. Результаты разработки, создания и использования в эксперименте дейтерий-тритиевой мишени и системы ее газообеспечения, позволившие впервые в мире обнаружить процесс мюонного катализа реакции синтеза ядер ($d+t$).

3. Результаты разработки, создания и испытания в имитационных опытах жидкотритиевых мишеней.

4. Методику дозированного напуска трития в мишень.

Апробация работы

Результаты исследований, положенных в основу диссертации, докладывались на X Европейской конференции по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы (Москва, 1981 г.), на рабочем совещании по проблемам мюонного катализа ядерных реакций синтеза (Флорида, США, 1988 г.) и на семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Публикации

В диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в период 1978-1988 гг. Основные результаты изложены в 9 публикациях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации - 116 страниц текста, в том числе 23 рисунка и 6 таблиц. Список литературы насчитывает 158 наименований.

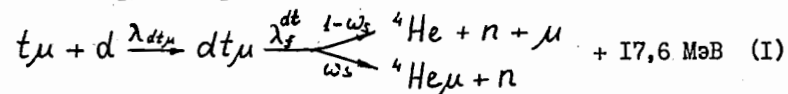
Во введении сформулированы цель, научная новизна и актуальность исследований, приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе описывается созданная экспериментальная установка, условия проведения опытов по исследованию мюонного катализа ядерной реакции синтеза ($d+t$) в газообразной дейтерий-тритиевой смеси при давлении до 60 ат и в диапазоне температур от 93 К до 613 К, а также обсуждаются результаты исследований^{1/1}, приводятся выводы.

К моменту подготовки данного эксперимента уже было обнаружено и теоретически объяснено новое явление - резонансное (по энергии $d\mu$ -атома) образование $dd\mu$ -молекулы (Джелепов В.П. и др. ЖЭТФ, 1966, т. 50, с. 1235; Весман Э. Письма в ЖЭТФ, 1967, т. 5, с. 113; Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1979, т. 76, с. 460). Выполненные в то время теоретические расчеты (Виницкий С.И., Пономарев Л.И. и др. ЖЭТФ, 1978, т. 74, с. 849) предсказывали существование аналогичного механизма и в случае образования $dt\mu$ -молекулы и свидетельствовали о том, что скорость образования $dt\mu$ -молекулы может достигать значений $\lambda_{dt\mu} \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, т.е. примерно на два порядка превышать скорости распада мюона ($\lambda_0 = 0,455 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$) и образования $dd\mu$ -молекулы ($\lambda_{dd\mu} \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$).

Экспериментальная проверка этого вывода, несомненно, представляла значительный интерес с точки зрения выяснения возможности использования явления мю-катализа реакции ($d+t$) для энергетических целей (Петров Ю.В.. Труды XIX Зимней школы ЛИЯФ, 1979, с. 249).

В связи с этим нами был выполнен эксперимент, целью которого являлось обнаружение реакции



и измерение ее выхода в зависимости от температуры среды. Эксперимент основывался на регистрации нейтронов ($E_n = 14,1 \text{ МэВ}$) реакции синтеза (1) после остановки отрицательного мюона в дейтерий-тритиевой смеси.

Схема процессов, происходящих при попадании отрицательных мюонов в (D_2+T_2)-смесь, приведена на рис. 1.

При замедлении мюонов происходит образование $d\mu$ - и $t\mu$ -атомов со скоростями $\lambda_a C_d$ и $\lambda_a C_t$, соответственно (λ_a - скорость образования мю-атомов; C_d и C_t - относительные концентрации дей-

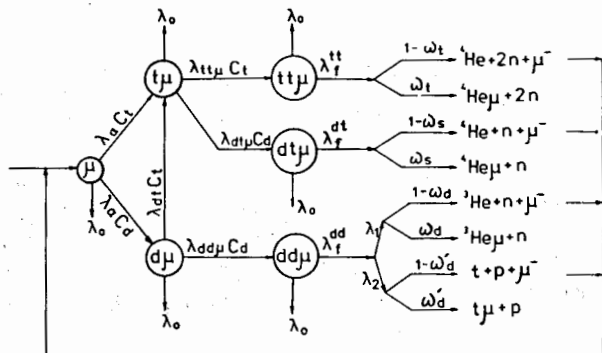


Рис. 1. Схема процессов, инициируемых отрицательными мюонами в смеси дейтерия и трития.

терия и трития, $C_d + C_t = 1$). Кроме прямого канала образования $t\mu$ -атомов они могут также образовываться в результате реакций изотопного обмена (энергия отдачи $t\mu$ -атома равна 19 эВ).

$$d\mu + t \xrightarrow{\lambda_{dt}} d + t\mu, \quad (2)$$

протекающей со скоростью λ_{dt} , которую также необходимо было экспериментально определить.

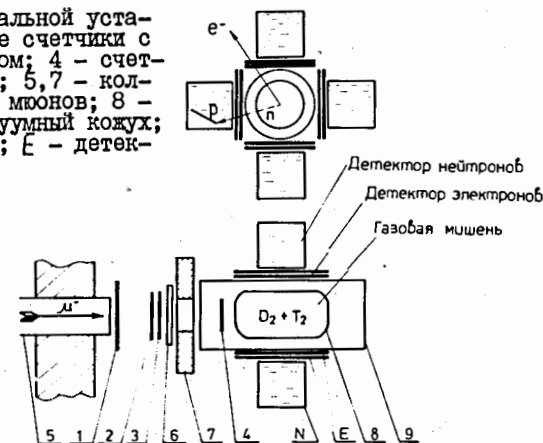
При давлении ($D_2 + T_2$)-смеси $p = 5 + 100$ ат и концентрации трития $C_t < 0,5$ выход (количество нейтронов, генерируемых одним мюоном) и временное распределение нейтронов реакции (I) имеют вид:

$$Y_n = \frac{(\lambda_0 + \lambda_{dt}) \lambda_{dt\mu} C_d C_t}{\lambda_0 (\lambda_0 + \lambda_{dt} C_t + \lambda_{dt\mu} C_d^2)} \quad (3)$$

$$\frac{dY_n}{dt} = \frac{\lambda_{dt\mu} C_d C_t}{\lambda_{dt} C_t + \lambda_{dt\mu} C_d^2} \{ \lambda_{dt} e^{-\lambda_1 t} + C_d (\lambda_{dt\mu} C_d - \lambda_{dt}) e^{-\lambda_2 t} \}, \quad (3a)$$

где $\lambda_1 \sim \lambda_0$, $\lambda_2 = \lambda_0 + \lambda_{dt} C_t + \lambda_{dt\mu} C_d^2$. Эксперимент проводился на мюонном пучке синхротронного ОИЯИ. Пучок мюонов с начальным импульсом 130 МэВ/с выводился в малофононую лабораторию, где располагалась газовая мишень, система ее газообеспечения и детекторы. Схема расположения мишени и детекторов приведена на рис. 2. Регистрация нейтронов от реакции ядерного синтеза (I) производилась четырьмя высокоэффективными детекторами N с жидким сцинтиллятором NE-213, а электронов - детекторами E с пластическим сцинтиллятором. Для выделения остановок мюонов в мишени использовались "быстрые" (100 нс) антисовпадения $2 \cdot 3 \cdot (\Sigma E + \Sigma N)$. Для анализа отбирались события, когда

Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1, 2, 3 - мониторные счетчики с пластическим сцинтиллятором; 4 - счетчик с кристаллом $CsI(Tl)$; 5, 7 - коллиматоры; 6 - замедлитель мюонов; 8 - газовая мишень; 9 - вакуумный кожух; N - детекторы нейтронов; E - детекторы электронов.



в течение интервала 10 мкс ("ворота") после влета мюона в мишень регистрировались последовательно нейтрон из реакции (I) и электрон от распада мюона. Это позволило значительно уменьшить фон случайных совпадений и фон, связанный с остановками мюонов в стенках мишени.

В таблице I указаны основные условия проведения опытов.

Таблица I

№ пп	p, ат (293 К)	Состав газа	C_t	T, К	N_n	$N_e \cdot 10^{-3}$
I	21,0	$D_2 + T_2$	$3 \cdot 10^{-2}$	293	2762	566,1
2	"	"	"	443	1996	384,3
3	"	"	"	563	2003	382,5
4	"	"	"	613	2107	407,6
5	10,5	"	"	293	1452	696,9
6	21,0	"	$1,57 \cdot 10^{-2}$	293	1250	467,6
7	21,0	D_2	0	293	152	297,3
8	10^{-5} мм	вакуум	0	293	24	42,9
9	6,6	$D_2 + T_2$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	93	98	52,0
10	"	"	"	143	236	129,3
11	"	"	"	193	207	93,6
12	"	"	"	243	472	240,3
13	"	"	"	293	273	135,9
14	66,2	"	$0,81 \cdot 10^{-2}$	93	8765	1734,5

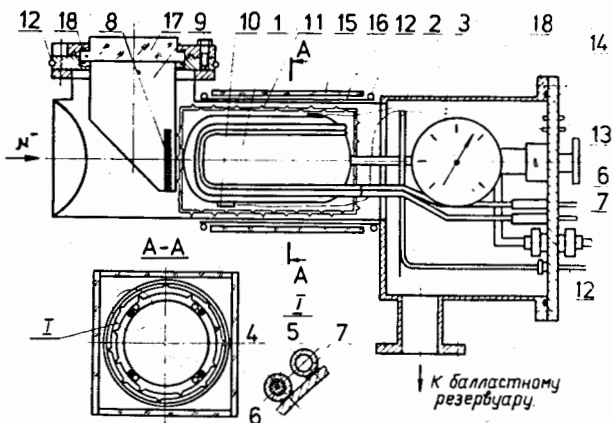


Рис. 3. Схематический чертеж газовой мишени для экспериментов со смесью ($D_2 + T_2$).

Одну из основных частей экспериментальной установки составляла газовая мишень^{2/}. Общий вид мишени приведен на рис. 3. С целью обеспечения необходимой безопасности сама мишень, а также непосредственно соединенные с ней манометр 3 и вентиль 13 были заключены внутри вакуумно-плотного кожуха 2, который соединялся с балластным резервуаром. Общий объем кожуха и резервуара был выбран равным 130 л, так что при случайной разгерметизации мишени общее давление газовой смеси в нем не превышало 0,6 ат.

Заполнение мишени смесью ($D_2 + T_2$) осуществлялось с использованием системы газообеспечения^{3/}. Очистка дейтерия от примесей (N_2 , O_2 , CO_2 и т.д.) до уровня $\sim 10^{-7}$ об.д. производилась с помощью трех соединенных последовательно цеолитовых (CaA) адсорберов, помещенных в жидкий азот. В качестве источника трития использовался тритид титана TiT_2 ^{4/}, помещенный внутри ампулы из нержавеющей стали. Напуск трития в мишень производился путем диссоциации TiT_2 при нагреве его до температуры $750+800^\circ C$.

Применение тритида титана в качестве источника трития позволяло одновременно производить очистку трития от примесей (N_2 , O_2 , CO_2 и т.д.) до уровня $\sim 10^{-5}$ об.д. и осуществлять дозированный напуск трития в мишень.

Для уменьшения газовыделения с внутренних поверхностей стенок мишени предварительно проводилась ее вакуум-термическая тренировка, что гарантировало сохранение чистоты дейтерий-тритиевой смеси на уровне $< 10^{-6}$ об.д. в течение длительных экспозиций (~ 200 ч).

На рис. 4 приведено временное распределение нейтронов, просуммированное по всем N -детекторам для экспозиции I2 (см. табл. I).

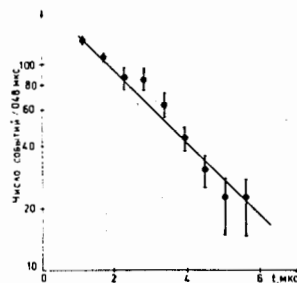


Рис. 4. Временное распределение нейтроновых событий, зарегистрированных в экспозиции I2.

Эффективность регистрации нейтронов составляла $\epsilon_n = 0,0110 \pm 0,0012$ (энергетический порог 3 МэВ). Для дискриминации фона от γ -квантов, регистрируемых N -детекторами, осуществлялось $n-\gamma$ -разделение по форме сцинтилляционного импульса. При отборе "нейтроновых" событий с целью подавления фона от реакции синтеза

$dd\mu \rightarrow {}^3He + n + \mu$ (энергия нейтронов $E_n = 2,5$ МэВ) использовался критерий $E_n > 3$ МэВ. Калибровка спектрометрического канала регистрации нейтронов проводилась с использованием источников ${}^{60}Co$, $Po-Be$ (границы спектров комптоновских электронов соответственно 0,98; 1,12; 4,19 МэВ).

На рис. 5 приведена зависимость относительного выхода нейтронов от температуры смеси ($D_2 + T_2$).

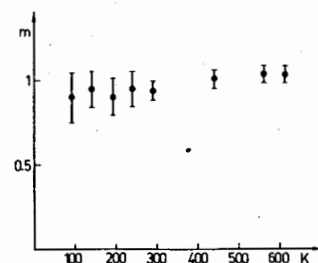


Рис. 5. Зависимость относительного выхода нейтронов из реакции (I) от температуры газовой смеси ($D_2 + T_2$).

Анализ экспериментальных данных заключался в сравнении по методу наименьших квадратов значений выхода и параметров временного распределения нейтронов реакции (I), полученных в каждой экспозиции, с ожидаемыми теоретическими выражениями (3) и (3а).

В результате анализа экспериментальных данных получены оптимальные значения скорости образования $dt\mu$ -молекул $\lambda_{dt\mu} > 10^8 \text{ с}^{-1}$ (на 90%-ном уровне достоверности) и скорости изотопного обмена в реакции (2) $\lambda_{dt} = (2,9 \pm 0,4) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ (значения $\lambda_{dt\mu}$

и λ_{dt} приведены к плотности ядер жидкого водорода $N_0 = 4,25 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$). Ошибка величины λ_{dt} определяется статистикой набора событий и неопределенностью расчетного значения величины ϵ_n .

Найденное экспериментальное значение скорости перехвата мюона с дейтона на тритон λ_{dt} находится в хорошем согласии с результатами вычислений ($\lambda_{dt} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ в работе Матвеевко А.В., Пономарев Л.И., ЖТФ, 1970, т. 59, с. 1593). Что касается величины $\lambda_{dt\mu}$, то нами получена лишь нижняя оценка. Это объясняется тем, что, согласно выражению (3), выход нейтронов из реакции (I) мало чувствителен к величине $\lambda_{dt\mu}$ при значениях $\lambda_{dt\mu} \text{ Cd} \gg \lambda_0$.

Указанные результаты были получены впервые. Они свидетельствовали о выполнении двух важных условий, необходимых для осуществления высокоэффективного мюонного катализа реакции синтеза ядер дейтерия и трития - скорости $\lambda_{dt\mu}$ и λ_{dt} оказались достаточно большими.

Установленное экспериментально граничное значение скорости образования $dt\mu$ -молекул объясняется только с привлечением резонансного механизма образования мюонных молекул, т.е. существование резонансного механизма, установленного ранее для $dd\mu$ -молекул, подтверждается и для $dt\mu$ -молекул.

Во второй главе приводится описание экспериментального комплекса, созданного для работы с изотопами водорода в диапазоне температур $20,4 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ и давлений до 1500 ат.

Для исследования мю-атомных и мю-молекулярных процессов, происходящих в тритии, созданы жидкотритиевая мишень^{5/} и жидкотритиевая мишень с вариацией температуры в диапазоне $20,6 \text{ K} < T < 40 \text{ K}$ ^{6/}.

Корпус мишеней изготовлен из нержавеющей стали. В качестве хладагента используется жидкий водород. Максимально возможное количество трития в мишени $\sim 8,5 \cdot 10^4$ Ки. Мишени включают в себя устройства (в том числе предохранительные клапаны), которые обеспечивают радиационную безопасность при ее эксплуатации.

На рис. 6 приведен принципиальный чертеж мишени с вариацией температуры^{6/}, созданной на базе жидкотритиевой мишени без вариации температуры^{5/}. Объем мишени I равен 34 см^3 . Жидкий водород заливается в водородный бачок ВБ2. Водородный бачок ВБ1 (объемом 8,5 л) заполняется газобразным водородом в количестве ~ 100 л.ат. Нагрев мишени происходит за счет тепла, выделяющегося при распаде трития. Изменяя количество водорода в ВБ1 и глубину погружения трубки 4 (см. рис. 6), можно изменить условия теплообмена между содержимым мишени I и жидким водородом, находящимся в ВБ2. Определение стабильности

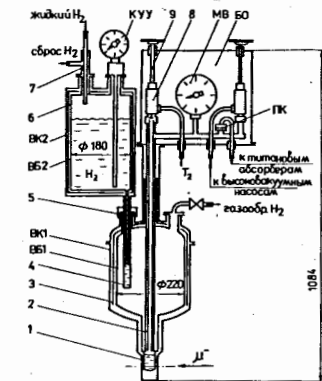
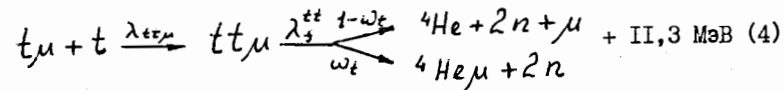


Рис. 6. Принципиальный чертеж жидкотритиевой мишени с вариацией температуры.

поддержания температуры мишени проводилось в имитационных опытах. Для этого мишень I заполнялась дейтерием в количестве ~ 20 л.ат. Имитация нагрева мишени за счет естественного распада трития, находящегося в ней, осуществлялось с помощью электрического нагревателя, помещенного внутри мишени. Флуктуации температуры дейтерия в криостат-

мишени в течение суток не превышали 0,2 К при определенных ее значениях (25 К, 32 К, 37 К).

Использование криостат-мишени с вариацией температуры необходимо^{7/} для однозначного определения скорости образования $tt\mu$ -молекул $\lambda_{tt\mu}$, скорости ядерного синтеза в них λ_{tt}^{tt} и коэффициента прилипания (ω_t) мюона к ядру ${}^4\text{He}$, образующемуся в реакции



Созданные мишени могут быть использованы в экспериментах как с чистыми изотопами водорода, так и с их смесями.

В запланированных нами экспериментах предполагается использование трития - радиоактивного изотопа водорода, активность которого может достигать величины $8,5 \cdot 10^4$ Ки. Использование трития в таких больших количествах определяет повышенные требования к системам газообеспечения. Кроме высокой герметичности и надежности всех ее узлов, должны быть предусмотрены дополнительные специальные устройства, гарантирующие безопасность при работе персонала на установке.

На рис. 7 изображена принципиальная схема специально созданной системы газообеспечения мишени^{8/}. Она состоит из следующих узлов: 1) системы высоковакуумной откачки (Н, ДН, ФН); 2) жидкотритиевой мишени (М); 3) системы заполнения мишени тритием (ИТ1, ИТ2); 4) сис-

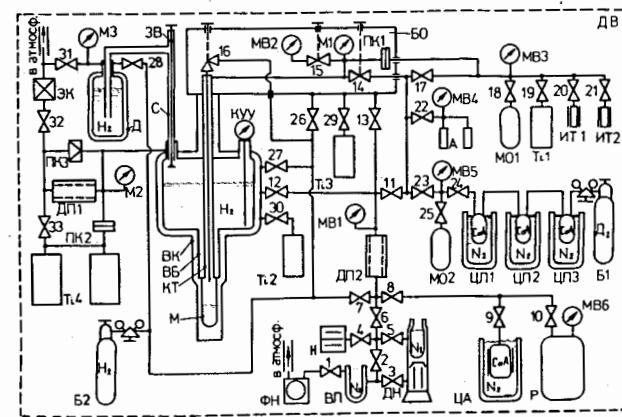


Рис. 7. Принципиальная схема системы газообеспечения жидкотритиевой мишени.

темы очистки дейтерия (ЦП+ЦЛЗ); 5) аппаратуры дозиметрического контроля (ДП, ДП2); 6) системы устройств, обеспечивающих безопасность работы персонала в аварийных ситуациях. При создании системы газообеспечения мишеней приняты меры по предотвращению последствий следующих аварийных ситуаций: а) нарушение герметичности вакуумного кожуха (ВК); б) разрыв стенок мишени М; в) разрушение конденсационной трубки (КТ); г) разгерметизация мест уплотнения коммутационных и измерительных элементов, соединенных с внутренним объемом мишени М; д) натекание воздуха в тритиевые магистрали; е) появление трития в атмосфере.

Для исследования мюонного катализа в чистом дейтерии и смеси ($H_2 + D_2$) в широком диапазоне температур ($20,4 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$) и давлений до 1500 ат разработана и создана установка, включающая в себя мишень, криостат и вентиль высокого давления (Быстрицкий В.М. и др. ПТЭ, 1989, № 1, с. 50). Охлаждение и термостатирование мишени осуществляется с помощью криостата, схематический чертеж которого приведен на рис. 8.

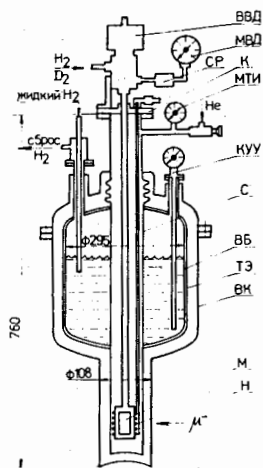


Рис. 8. Схема криостата.

Получение высоких давлений ($p \leq 1500 \text{ ат}$) осуществляется криогенным методом путем охлаждения газообразных изотопов водорода в объеме мишени с последующим ее нагревом. Такой способ получения высокого давления гарантирует сохранение высокой чистоты изотопов водорода (суммарное содержание примесей не превышает $10^{-5}\%$). Необходимая температура мишени во всем диапазоне достигается путем вариации давления гелия в сосуде С (см. рис. 8) и мощности нагревателя Н. Точность поддержания температуры не превышает 1 К.

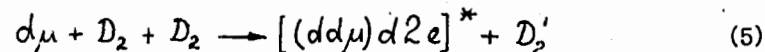
С помощью созданной установки проведены эксперименты по исследованию зависимостей скорости образования $dd\mu$ -молекул от плотности ($0,36 \leq \varphi \leq 1,2$) и температуры ($20,4 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$) дейтерия^{9/}. Кроме этого на данной установке выполнен эксперимент по измерению

скорости перехвата мюонов от $d\mu$ -атомов к ядрам He (в настоящее время проводится обработка полученных экспериментальных данных).

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул от плотности дейтерия при температуре $T \approx 300 \text{ K}$ в диапазоне давлений $0,4 \text{ кбар} \leq p \leq 1,5 \text{ кбар}$.

Проведение данных исследований было продиктовано следующими обстоятельствами: во-первых, необходимостью знания абсолютных значений скорости образования $dd\mu$ -молекул в условиях эффективного про-

текания мюонного катализа реакций синтеза ядер дейтерия и трития, происходящего в дейтерий-тритиевой смеси; во-вторых, определением вклада квазирезонансного механизма (Menshikov L.I., Ponomarev L.I., Phys.Lett., 1986, v. 167B, p. 141) в образование $dd\mu$ -молекул в реакциях типа



Кроме того, точные измерения $\lambda_{dd\mu}$ в широком диапазоне температур и плотностей дейтерия необходимы для проверки правильности теоретических расчетов и прецизионного измерения энергии уровня $dd\mu$ -молекулы в состоянии $J = \nu = 1$.

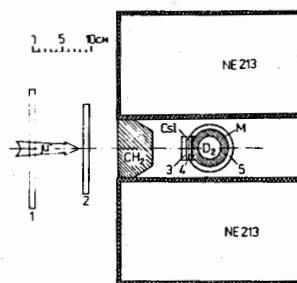
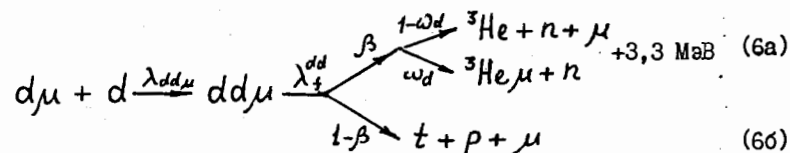


Рис. 9. Схема экспериментальной установки для изучения мюонного катализа в дейтерии: 1, 2, 3, 4, 5 - сцинтилляционные детекторы; CH_2 - тормозной фильтр; М - мишень; NE 213 - нейтронный детектор.

На рис. 9 приведена схема экспериментальной установки. Пучок отрицательных мюонов с импульсом 130 МэВ/с и интенсивностью $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ проходил через сцинтилляционные детекторы 1, 2, 3, 4, тормозной фильтр CH_2 и попадал в мишень М. Мишень представляла собой толстостенный цилиндр внутренним диаметром 42 мм, наружным диаметром 60 мм и длиной 100 мм, изготовленный из сплава ЗИ437Б. Мишень помещалась внутри криостата (см. рис. 8), в качестве хладагента использовался либо жидкий водород, либо жидкий азот. Очистка изотопически чистого дейтерия (концентрация против $< 3 \cdot 10^{-3}$ об.д.) производилась с помощью цеолитовых адсорберов (суммарное содержание примесей N_2, O_2, CO_2 и т.д. $< 5 \cdot 10^{-7}$ об.д.). Дейтерий охлаждался в объеме мишени при температуре $T \approx 20,4 \text{ K}$. При нагреве мишени нагревателем Н до $T \approx 300 \text{ K}$ давление дейтерия достигало $p \sim 1500 \text{ ат}$. Для регистрации электронов от распада мюонов и выделения акта останова мюона в объеме мишени (см. рис. 9) вокруг нее располагался сцинтилляционный детектор 5 (пластический сцинтиллятор цилиндрической формы $\phi 100 \text{ мм}$, $l = 150 \text{ мм}$, $\delta = 5 \text{ мм}$). Нейтроны реакции синтеза ядер дейтерия



регистрировались двумя нейтронными детекторами с жидким сцинтиллятором NE-213.

Сигнал остановки мюона в мишени 2.3.4.5 запускал "ворота" длительностью 10 мкс, в течение которых производилась регистрация нейтронов реакции синтеза и электронов от распада мюона. Анализ событий и передача информации в ЭВМ производилась при наличии только лишь одного сигнала с детектора 5 в течение "ворот" и отсутствии сигнала с детектора I в течение 5 мкс до и 10 мкс после остановки мюона в мишени. Использование при обработке экспериментальных данных задержанных совпадений "мюон-нейтрон-электрон" позволило существенно уменьшить фон, связанный с остановками мюонов в стенках мишени M (в наших условиях число остановок мюонов в стенках мишени было в десятки раз больше, чем в дейтерии). Дискриминация фона от γ -квантов, регистрируемых нейтронными детекторами, осуществлялась с помощью схемы n - γ разделения по форме сцинтилляционного импульса (использовалось соотношение быстрой БК и медленной МК компонент импульса).

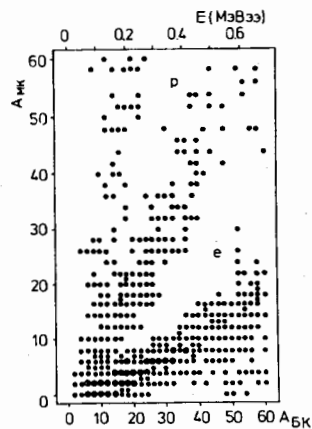


Рис. 10. Двумерное распределение амплитуд сигналов БК (быстрой компоненты) и МК (медленной компоненты).

На рис. 10 приведено характерное двумерное распределение сигналов БК и МК компонент, полученное без каких-либо критериев отбора. Для подавления "мгновенного" фона, связанного с остановками мюона в сцинтилляторе нейтронных детекторов и в стенках мишени, использовались "быстрые" (≈ 50 нс) антисовпадения 2.3.5. С введением дополнительных критериев отбора

событий степень n - γ разделения составляла $\leq 10^{-3}$. Энергетическая калибровка нейтронного детектора производилась с использованием γ -источников ^{137}Cs , ^{60}Co и нейтронного источника $^{239}\text{Pu-Be}$.

Условия проведения эксперимента приведены в таблице 2. Всего было проведено 12 опытов. В диссертации приводятся результаты анализа экспериментальных данных, полученных в I, VI и X опытах.

В каждом опыте производилось измерение временного распределения электронов от распада мюона, выхода и временного распределения 1-х, 2-х, 3-х, 4-х последовательно зарегистрированных нейтронов реакции (6а), инициируемых одним мюоном. Опыты XI и XII являются фоновыми.

Таблица 2

Опыт	Газ	p, ат	T, К	Плотность, φ
I	D ₂ (газообр.)	1490	296	0,88
II	"-	650	120	0,96
III	"-	390	74	0,98
IV	"-	175	49	0,99
V	D ₂ (жидкий)	0,44	21	1,2
VI	D ₂ (газообр.)	390	296	0,36
VII	"-	150	120	0,41
VIII	"-	80	74	0,42
IX	"-	35	49	0,43
X	"-	830	296	0,63
XI	вакуум	10 ⁻⁷	296	
XII	гелий	100	21	

Временные распределения 1-х, 2-х и 3-х нейтронов, зарегистрированных с момента остановки в мишени мюона, аппроксимировались выражениями

$$\frac{dN_1}{dt} = A_1 e^{-\lambda t} + B, \quad (7)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = A_2 (t-\Delta) e^{-\lambda(t-\Delta)} + C, \quad (8)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = A_3 (t-\Delta)^2 e^{-\lambda(t-2\Delta)} + D, \quad (9)$$

где: A_1 , A_2 и A_3 - нормировочные константы; B , C и D - фон случайных совпадений; $\Delta = 0,28$ мкс - "мертвое" время схемы n - γ разделения; $\lambda = \lambda_0 + (\epsilon_n + \omega_d - \epsilon_n \omega_d) \varphi \beta \lambda_{d\mu} + \lambda_x$; $\lambda_0 = 4,55 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ - скорость распада мюона; ϵ_n - эффективность регистрации нейтронов детекторами; $\omega_d = 0,122 \pm 0,003$ - коэффициент "прилипания" мюона к ядру ^3He в реакции (6а), измеренный в ЛИЯФ (Балин Д.В., Воробьев А.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 318) и $\beta = 0,582 \pm 0,017$ - относительная вероятность реакции (6а); φ - относительная плотность ядер дейтерия ($\varphi = 1$ при плотности ядер $N_0 = 4,25 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$); λ_x - скорость перехвата мюонов от $d\mu$ -атомов к ядрам примесей в дейтерии.

На рис. II приведены временные распределения последовательно зарегистрированных нейтронов, полученные в опыте I при $\varphi = 0,88$.

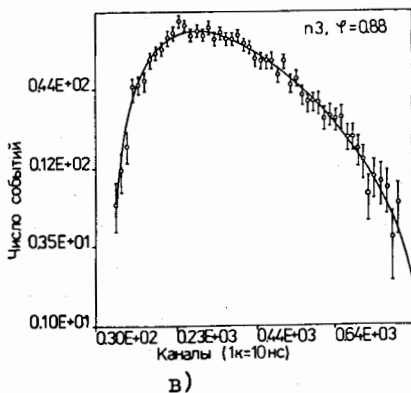
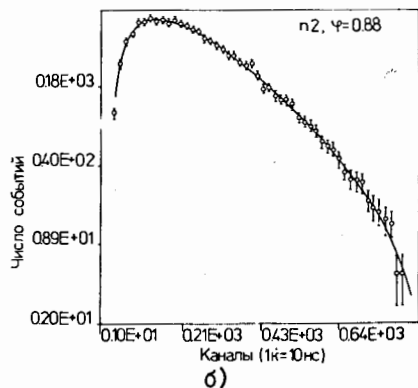
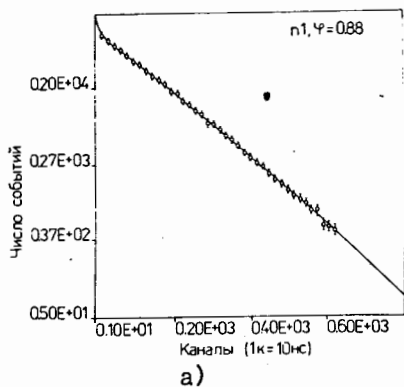


Рис. II. Временные распределения 1-х, 2-х и 3-х зарегистрированных нейтронов. Сплошная линия - результат фитирования.

В результате аппроксимации экспериментальных данных выражениями (7)-(9) найдены значения величины λ и выходы последовательно зарегистрированных нейтронов N_1 , N_2 и N_3 .

Величина λ_x определялась из анализа временного распределения электронов от распада мюонов. Временное распределение электронов, зарегистрированных детектором 5 в опыте У1, приведено на рис. 12. На этом же рисунке показан уровень фона, измеренного в опыте XI с вакуумированной мишенью. В результате анализа временного распределения электронов найдено, что $\lambda_x = (0,05 \pm 0,01) \cdot \varphi \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Определение величины $\lambda_{dd\mu}$ из результатов аппроксимации проводилось двумя способами. Первый способ позволял с учетом найденной величины λ_x определить значения ϵ_n и $\lambda_{dd\mu}$, а второй - λ_x и $\lambda_{dd\mu}$. При определении величины $\lambda_{dd\mu}$ вторым способом использовалось расчетное значение эффективности регистрации нейтронов ϵ_n .

На рис. 13 приведено экспериментальное амплитудное распределение для 1-х зарегистрированных нейтронов, полученное в опыте I (сплошная линия - расчетное амплитудное распределение).

Оба способа определения величины $\lambda_{dd\mu}$ дали практически совпадающие в пределах ошибок измерений результаты.

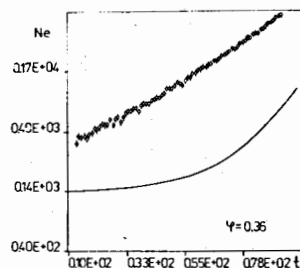


Рис. 12. Временное распределение электронов, полученное в опыте У1 ($\varphi = 0,36$).

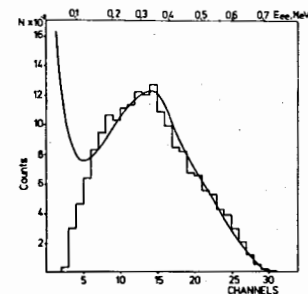


Рис. 13. Амплитудное распределение (БК) 1-х зарегистрированных нейтронов для $\varphi = 0,88$ (сплошная линия - расчетное амплитудное распределение).

Полученные при $T = 296 \text{ K}$ значения $\lambda_{dd\mu}$ (приведенные к плотности $\varphi = 1$) оказались равными:

$$\begin{aligned} \lambda_{dd\mu} &= (2,53 \pm 0,33) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} & \rho &= 1,49 \text{ кбар} (\varphi = 0,88) \\ \lambda_{dd\mu} &= (2,48 \pm 0,32) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} & \rho &= 0,83 \text{ кбар} (\varphi = 0,63) \\ \lambda_{dd\mu} &= (2,40 \pm 0,31) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} & \rho &= 0,39 \text{ кбар} (\varphi = 0,36) \end{aligned}$$

и находятся в хорошем согласии с результатами теоретических вычислений и со значением $\lambda_{dd\mu} = (2,76 \pm 0,08) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, полученным в работе (Балин Д.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 698) при плотности дейтерия $\varphi \sim 0,1$.

Результаты аппроксимации найденных значений величины $\alpha = \lambda - \lambda_0$ выражением вида $\alpha(\varphi) = A\varphi + B\varphi^2$, учитывающего возможный вклад тройных столкновений (квазирезонансный механизм), свидетельствуют о том, что скорость образования $dd\mu$ -молекул не зависит от плотности дейтерия с относительной точностью $\sim 3\%$ в диапазоне $0,36 < \varphi < 0,88$.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

I. Впервые в мире выполнен эксперимент по измерению скорости образования $dd\mu$ -молекул при температуре $T = 296 \text{ K}$ в широком диапазоне давлений дейтерия $0,4 \text{ кбар} \leq \rho \leq 1,5 \text{ кбар}$.

Получены следующие значения скорости образования $dd\mu$ -молекул,

$$\begin{aligned} \lambda_{dd\mu} &: & \text{при } \rho &= 1,49 \text{ кбар} \\ & (2,53 \pm 0,33) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} & \text{при } \rho &= 0,83 \text{ кбар} \\ & (2,48 \pm 0,32) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} & \text{при } \rho &= 0,39 \text{ кбар} \\ & (2,40 \pm 0,31) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \end{aligned}$$

Из результатов эксперимента следует, что вклад в образование $dd\mu$ -молекул за счет квазирезонансного механизма (тройные столкновения) не превышает 3% в исследованном диапазоне плотности дейтерия.

2. Разработана и создана газовая дейтерий-тритиевая мишень объемом 3,25 л на рабочее давление 55 ат, с помощью которой были выполнены исследования процесса мюонного катализа реакции синтеза ядер дейтерия и трития в диапазоне температур от 93 К до 613 К. Созданная мишень обеспечивала безопасность работ с большими количествами радиоактивного изотопа водорода - трития (до 5.000 Ки) и гарантировала сохранение требуемой по условиям эксперимента высокой чистоты дейтерий-тритиевой смеси (суммарное содержание примесей не более 10^{-6} об.д.) в течение 200 ч. экспозиции при максимальной рабочей температуре 613 К.

3. Разработана и создана система газообеспечения дейтерий-тритиевой мишени, использование которой позволяло проводить эксперименты с большим количеством трития (15.000 Ки), а также осуществлять очистку дейтерия и трития от примесей до уровня $2 \cdot 10^{-7}$ об.д. и 10^{-5} об.д., соответственно.

4. Разработана, создана и исследована оригинальная методика дозированного напуска трития в газовую мишень.

5. Разработанная аппаратура входила в состав экспериментальной установки, с помощью которой впервые в мире был экспериментально обнаружен процесс мюонного катализа ядерной реакции синтеза ($d+t$) и измерены его основные характеристики:

скорость процесса изотопного обмена $\lambda_{dt} (d_{\mu} + t \rightarrow d + t_{\mu})$,
скорость образования мезомолекул $d t_{\mu}$.

6. Впервые в СССР (1982 г.) разработаны, созданы и испытаны в имитационных опытах жидкотритиевые мишени (включая устройства, обеспечивающие радиационную безопасность при их эксплуатации) для работ с большими количествами радиоактивного изотопа водорода - трития (~ 50.000 Ки) как при постоянной температуре, так и с вариацией температуры в диапазоне $20,6 \text{ K} < T < 40 \text{ K}$ (стабильность поддержания температуры $\pm 0,2 \text{ K}$). Использование мишени с вариацией температуры необходимо для однозначного определения характеристик процесса мюонного катализа реакций синтеза ядер трития.

7. Созданы криостат и система термостатирования газовой мишени высокого давления ($p \leq 1,5$ кбар) для проведения исследований процесса мюонного катализа реакций синтеза ядер дейтерия в широком диапазоне давлений при температурах от 20,4 К до 300 К. Предложенный способ заполнения мишени изотопами водорода путем их ожижения в объеме мишени с последующим ее нагревом позволяет получить высокое давление газа в мишени с сохранением его высокой чистоты (суммарное содержание примесей не превышает 10^{-7} об.д.).

8. Разработана и создана универсальная система газообеспечения всех типов мишеней, используемых в экспериментах по исследованию

явления мюонного катализа в смесях изотопов водорода при давлениях до 1,5 кбар в диапазоне температур $20,4 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Быстрицкий В.М., Желепов В.П., Ершова З.В., Зинов В.Г., Капышев В.К., Мухамет-Галеева С.Ш., Надеждин В.С., Ривкис Л.А., Руденко А.И., Сатаров В.И., Сергеева Н.В., Сомов Л.Н., Столупин В.А., Фильченков В.В. Экспериментальное обнаружение и исследование мюонного катализа ядерной реакции синтеза ($d+t$). - Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 31, с. 249-253; ЖЭТФ, 1981, т. 80, с. 1700-1714.
2. Быстрицкий В.М., Желепов В.П., Зинов В.Г., Романов В.М., Сатаров В.И., Столупин В.А., Шамсутдинов Ш.Г. Газовая мишень высокого давления для экспериментов с газообразным тритием. - ПТЭ, 1982, № 2, с. 21-23.
3. Быстрицкий В.М., Капышев В.К., Мухамет-Галеева С.Ш., Ривкис Л.А., Сатаров В.И., Столупин В.А. Система газообеспечения мишени в эксперименте по исследованию мюонного катализа ядерной реакции синтеза ($d+t$). - ПТЭ, 1981, № 6, с. 27-29.
4. Борисова А.А., Быстрицкий В.М., Капышев В.К., Мухамет-Галеева С.Ш., Ривкис Л.А., Сатаров В.И., Старшина Л.Н., Столупин В.А. Исследование возможности использования тритида титана для дозированного напуска трития в газовую мишень. - Сообщение ОИЯИ, Г3-80-344, Дубна, 1980.
5. Быстрицкий В.М., Желепов В.П., Зинов В.Г., Конин А.Д., Столупин В.А., Уткин В.А., Шамсутдинов Ш.Г. Жидкотритиевая мишень для исследования мезоатомных и мезомолекулярных процессов. - ПТЭ, 1983, № 3, с. 42-44.
6. Быстрицкий В.М., Возняк Я., Гула А., Желепов В.П., Зинов В.Г., Лончки Э., Столупин В.А., Шамсутдинов Ш.Г. Жидкотритиевая мишень с вариацией температуры в диапазоне $20,6 < T < 40 \text{ K}$. - ПТЭ, 1985, № 1, с. 46-47.
7. Bystritsky V.M., Dzhelapov V.P., Gula A., Stolupin V.A., Wozniak J. 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.699-713.
8. Быстрицкий В.М., Возняк Я., Гула А., Желепов В.П., Капышев В.К., Малек М.П., Мухамет-Галеева С.Ш., Ривкис Л.А., Столупин В.А., Уткин В.А., Шамсутдинов Ш.Г. Система газообес-

печения жидкотриггивой мишени с рабочим объемом 35 см³. -
ПТЭ, 1984, № 4, с. 46-49.

9. Bystriisky V.M., Dzheleпов V.P., Filchenkov V.V., Gilev A.I.,
Granovsky V.B., Han Don Ir, Ilieva-Sokolina N., Konin A.D.,
Marcsis L., Merkulov D.G., Rudenko A.I., Selikov A.V.,
Somov L.N., Stolupin V.A., Zinov V.G. The measurement of
dd_μ-molecule formation rate of high deuterium pressure
(0.4 - 1.5 kbar). - AIP Conference Proceedings, 1988,
No. 181, p. 17-22.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1989 года.