

М-299

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

15-91-570

УДК 539.126.333

**МАРЦИШ Ласло**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
СПИНОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ  
МЮОННЫХ МОЛЕКУЛ ДЕЙТЕРИЯ**

**Специальность: 01.04.16 - физика ядра  
и элементарных частиц**

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

Дубна 1991

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

В. В. ФИЛЬЧЕНКОВ

старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор П. Ф. ЕРМОЛОВ

доктор физико-математических наук Л. И. МЕНЬШИКОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Московский инженерно-физический институт, г. Москва

Защита диссертации состоится в час 11<sup>00</sup> 24 I 1992 года

на заседании Специализированного совета Д-047.01.03. при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан "10" *сентября* 1992 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

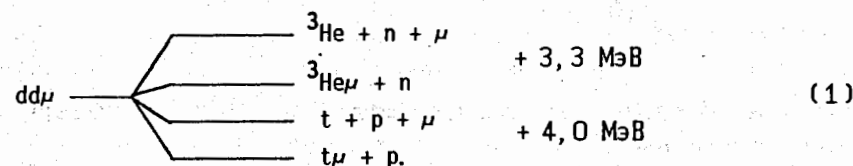
Ученый секретарь Совета -

доктор физико-математических наук

Ю. А. Батусов

## Общая характеристика работы

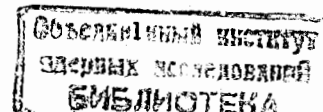
Актуальность проблемы: Процессы, вызываемые отрицательными мюонами в смеси изотопов водорода, являются предметом интенсивного экспериментального и теоретического изучения во многих лабораториях мира. В настоящее время особое внимание уделяется исследованию процессов резонансного образования мюонных молекул  $dd\mu$  и  $dt\mu$ . Проблемы, возникшие при объяснении результатов экспериментального изучения мю-катализа в смеси  $D_2+T_2$ , побудили обратиться к измерениям, которые могут быть более просто и надежно интерпретироваться. Самый яркий пример в этом отношении - изучение процесса мюонного катализа в чистом дейтерии:



Характерно, что на Международной конференции по мюонному катализу в Вене, 1990г, было представлено сразу три экспериментальные работы [1-3] по измерению скорости процесса (1) - группами Вена-PSI, ЛИАФ и ОИЯИ.

Схема мю-атомных и мю-молекулярных процессов в дейтерии показана на рис. 1. Измерение температурной зависимости скорости образования  $dd\mu$ -молекул отдельно для каждого состояния сверхтонкой структуры  $d\mu$ -атома позволяет осуществить полную проверку теории, включая прецизионное определение энергии  $\epsilon_{1,1}$  слабосвязанного уровня в системе  $dd\mu$  с точностью 1 мэВ. Другой важный аспект заключается в том, что теория предсказывает существование нетривиальных эффектов плотности в зависимости скорости образования  $dd\mu$ -молекул из верхнего спинового состояния  $d\mu$ -атома за счет ударного уширения резонанса.

Основная цель работы: провести измерения зависимости  $\lambda_{3/2}(T)$  и  $\lambda_{1/2}(T)$  при высокой плотности дейтерия ( $\phi \approx 1$ ) для независимой проверки теории, в том числе и расчетов энергии слабосвязанного уровня в  $dd\mu$ . Решено было сосредоточить особое внимание именно в той области температур и плотностей ( $T=80-120$  К,  $\phi \approx 1$ ), где ожидается наибольшее отклонение от модели Весмана за счет ударного уширения резонанса.



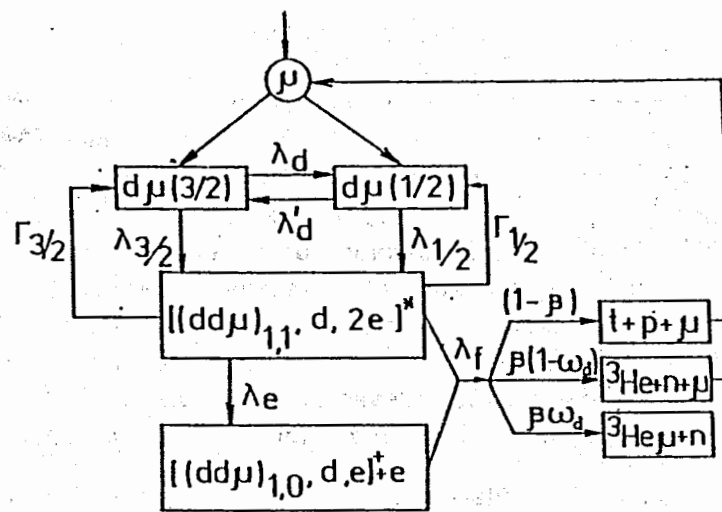


Рис. 1. Схема процессов мюонного катализа в чистом дейтерии.

Научная новизна и практическая ценность. Созданы программы моделирования процессов регистрации нейтронов спектрометром полного поглощения; разработана методика прецизионных временных измерений со спектрометром и способы обработки их результатов; впервые измерена температурная зависимость эффективной скорости образования  $dd\mu$ -молекул в дейтерии высокой плотности; впервые измерена температурная зависимость скорости образования молекул  $dd\mu$  из верхнего спинового состояния  $d\mu$ -атома в дейтерии высокой плотности; впервые измерена температурная зависимость скорости перехода между состояниями сверхтонкой структуры  $d\mu$ -атома в дейтерии высокой плотности; впервые получены экспериментальные данные о времени термализации  $d\mu$ -атомов в дейтерии.

Результаты диссертации представляют практическую ценность для планирования и проведения других экспериментов по мю-катализу и для дальнейшего развития теории.

Апробация работы. Основные результаты диссертации представлялись на Международной конференции по мюонному катализу (Вена, 1990г), докладывались на семинарах Лаборатории ядерных проблем.

Публикации. Результаты данной диссертации опубликованы в 5 работах.

Объем диссертации. Диссертация состоит из пяти глав, она содержит 88 страниц машинопечатанного текста, 30 рисунков, 7 таблиц и библиографический список из 108 названий.

### Содержание работы

В первой главе рассмотрена история вопроса, процессы, вызываемые отрицательными мюонами в дейтерии, и основные положения теории резонансного образования мюонных молекул  $dd\mu$ .

Во второй главе приводится описание экспериментального метода изучения процесса мюонного катализа с применением газовой мишени и нейтронных детекторов "полного поглощения"; результаты расчетов и измерений параметров этих детекторов.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Главные ее части - криогенная дейтериевая мишень высокого давления (1,5 кбар) и сцинтилляционный спектрометр нейтронов полного поглощения. Мишень помещалась в криостат (не показан на рис. 2), с помощью которого температура мишени могла изменяться в диапазоне  $T=20-300$  К и поддерживаться постоянной с точностью  $\pm 1.5$  К.

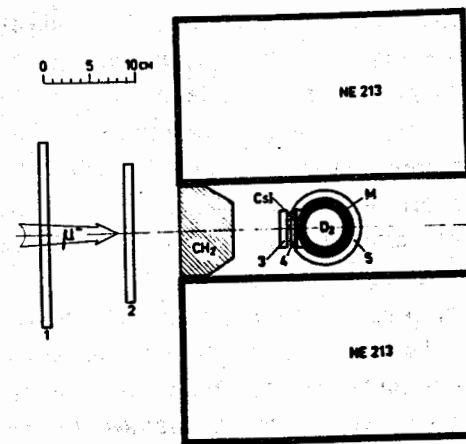


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Пучок мюонов с импульсом 130 МэВ/с и интенсивностью  $3 \times 10^4$   $s^{-1}$ , проходил через сцинтилляционные счетчики 1, 2, 3, 4, служившие для регистрации мюонов пучка, тормозной фильтр  $CH_2$  и попадал в мишень. Детектор 5 (пластический сцинтиллятор ци-



линдрической формы) служил как детектор антисовпадений для мюонов и одновременно для регистрации электронов от распада мюонов, остановившихся в мишени.

Регистрация нейтронов из реакции (1) осуществлялась с помощью двух сцинтилляционных детекторов "полного поглощения", расположенных симметрично относительно мишени. Сцинтилляционный спектрометр быстрых нейтронов с жидким сцинтиллятором NE-213 [4] отличается от обычно используемых нейтронных детекторов прежде всего своими большими размерами (общий объем сцинтиллятора  $V=24,1$  л), а от детекторов с близкими размерами - высокими спектрометрическими и временными свойствами и реализацией надежного нейтрон-гамма разделения. Основные параметры детектора были определены в измерениях с радиоактивными источниками нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Разделение нейтронов и гамма-квантов (электронов) осуществлялось по форме сцинтилляционного импульса. Порог эффективного  $n-\gamma$  разделения в единицах эквивалентной по световыходу энергии электронов составлял  $E_{ee} \approx 100$  кэВ.

Электронный триггер был организован таким образом, что для последующей обработки на ЭВМ отбирались "нейтронные события", критериями которых являлось наличие сигналов регистрации нейтрона одним из детекторов NE-213 (сигнал 5, ND) и электрона детектором 5 в интервале временных "ворот" длительностью 10 мкс после сигнала (1-4, 5) остановки мюона в мишени (задержанные  $\mu$ - $n$ - $e$  совпадения). При окончательной обработке экспериментальных данных отбирались только те события, для которых выполнялось условие  $t_e - t_n > 0$ . ( $t_e$  и  $t_n$  - времена появления электрона от распада мюона и нейтрона из реакции  $dd$ -синтеза).

При изучении спиновых эффектов в резонансном образовании мюонных молекул  $dd\mu$ , возникает задача регистрации короткоживущих (20-30 нс) компонент временного спектра нейтронов. В связи с этим были тщательно исследованы временные параметры системы регистрации нейтронов: временное разрешение и стабильность нуля времени.

Временное разрешение детектора определяется, в основном, двумя факторами. Во-первых, разбросом времени срабатывания формирователя логических импульсов, обусловленного разбросом амплитуд входных сигналов. Соответствующая функция разрешения  $f_d(t)$  была получена в прямых измерениях с  $\gamma$ -источником  $^{60}\text{Co}$ .

Ее ширина - 3,1 нс.

Конечная величина времени пролета нейтрона от мишени до детектора и разброс расстояний от точки образования нейтрона до точки его первого взаимодействия в детекторе приводят к смещению нуля времени и дополнительному временному разбросу. Эта функция разрешения  $f_n(t)$  найдена в ходе расчетов процессов взаимодействия нейтронов в сцинтилляторе. Она характеризуется сдвигом 8 нс и шириной 5,6 нс.

Наконец, система измерения времени с несинхронизированной серией генератора с частотой 100 МГц характеризуется аппаратурной линией в виде треугольника с шириной на полувысоте 10 нс.

Суммарная функция временного разрешения была получена путем свертки всех трех функций. По своей форме она оказалась близкой к гауссову распределению. Для определения нуля времени использовался временной спектр мезорентгеновских гамма-квантов, обусловленных остановками мюонов в стенках мишени. Разброс среднего значения этих распределений не превышает 0,3-0,4 нс.

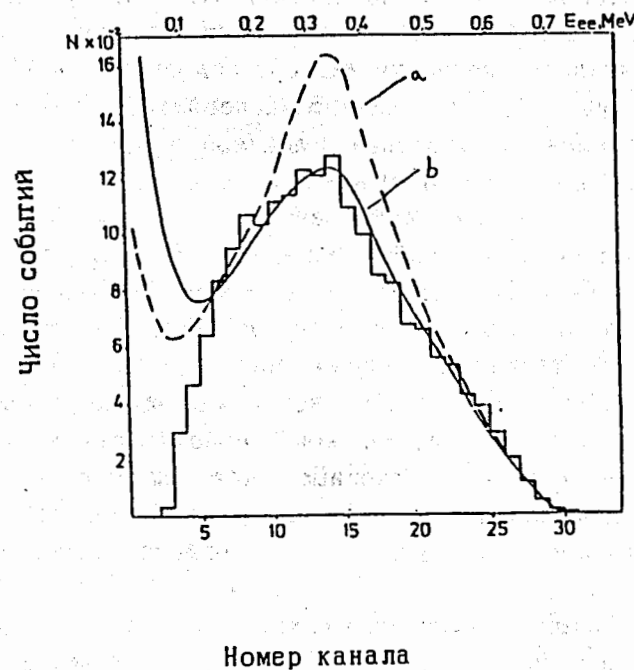


Рис 3. Аппаратурные распределения нейтронов с  $E=2,5$  МэВ. Линия - расчет для: а) "голый" детектор, б) учет дейтерия и всех промежуточных сред. Гистограмма - экспериментально измеренное распределение.

Проведены вычисления эффективности регистрации нейтронов детектором "полного поглощения" методом Монте-Карло. При прохождении нейтрона через сцинтиллятор ( $C_8H_{10}$ ) учитывались: упругие  $n$ - $p$  взаимодействия; упругие и неупругие  $n$ - $C$  взаимодействия. Всего для каждого нейтрона учитывалось до 10 последовательных  $n$ - $p$  взаимодействий. Энергия протона отдачи  $E_p = E_n - E'_n$  "преобразовывалась" в световойход ( $L$ ) с помощью задаваемых функций  $L(E_p)$ ; световойход от всех соударений для каждого нейтрона суммировался.

На рис. 3 приводятся аппаратные спектры для нейтронов с  $E_n = 2,5$  МэВ из реакции синтеза, полученные для "голого" детектора (а) и с учетом дейтерия ( $p = 1,5$  кбар) и всех стенок (б).

В третьей главе представлены результаты измерения температурной зависимости скорости образования  $dd\mu$ -молекул. К настоящему времени скорость образования молекул  $dd\mu$  ( $\lambda_{dd\mu}$ ) измерена разными группами для различных значений плотности и температуры дейтерия. Условия проведения этих экспериментов [5, 6] указаны на рисунке 4. Значения плотности дейтерия ( $\phi$ ) приведены относительно плотности жидкого водорода  $n_0 = 4,25 \times 10^{22}$  ядер/см<sup>3</sup>. Главным отличием нашего эксперимента от других работ является проведение измерений с дейтерием большой плотности, а в методическом плане - применение нейтронных детекторов большой эффективности ("полного поглощения").

Целью нашей работы являлось измерение зависимости величины  $\lambda_{dd\mu}$  от температуры дейтерия в диапазоне  $T = 20 - 300$  К при большой плотности. Решено было в одном и том же эксперименте провести измерения с дейтерием различной плотности:  $\phi = 0,883$  и  $\phi = 0,367$  - с целью проверки существования возможных эффектов плотности в образовании молекул  $dd\mu$  для широкого температурного диапазона.

Всего было выполнено 9 основных экспозиций с дейтерием. Кроме того, были проведены экспозиции с гелием - для определения фона нейтронов и с вакуумированной мишенью - для определения фона электронов.

В условиях наших опытов доля остановок мюонов в дейтерии оставляла всего лишь несколько процентов. Поэтому проблеме уменьшения фона было уделено самое серьезное внимание. Фон нейтронов обусловлен, главным образом, двумя причинами. Одна его компонента связана с остановками мюонов в стенках мишени (сигнал электрона - случайный), а вторая - с фоновой загрузкой

нейтронных детекторов (электрон от  $\mu$ -распада в дейтерии). Компактная геометрия детекторов с одной стороны, и обеспечение хороших спектрометрических свойств детектора 5 с другой, способствовали уменьшению фона. Его относительный вклад не превышал 10%.

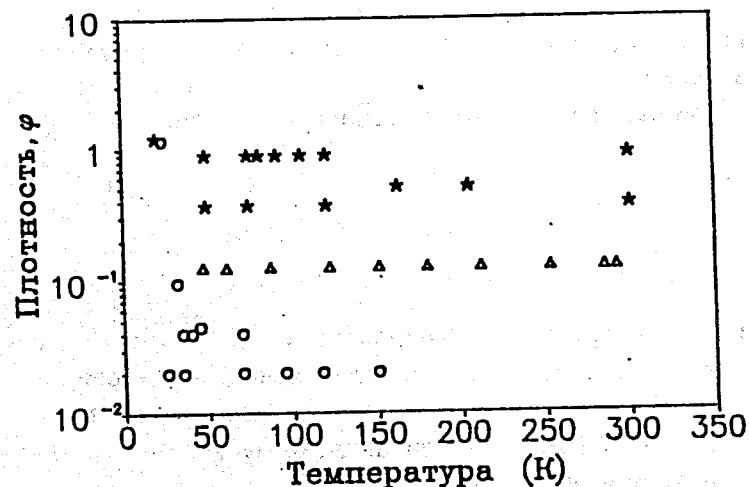


Рис 4. Условия проведения различных экспериментов по измерению скорости образования  $dd\mu$ -молекул. Символы: \* - настоящая работа;  $\Delta$  - измерения ЛИЯФ [5]; o - работы Вена-PSI [6].

Обработка данных заключалась в построении и анализе временных распределений нейтронов и электронов.

Временные спектры электронов фиксировались выражением вида

$$N_e(t) = F_e(t) + B_e(t),$$

где  $F_e(t)$  соответствует электроном от распада мюонов в дейтерии, а  $B_e(t)$  фоновым событием. Фоновые электронные события обусловлены регистрацией электронов от распада мюонов, остановившихся в стенках мишени, и случайными совпадениями. Полные числа электронных событий использовались в последующей обработке для нормировки.

В эксперименте регистрировались первые, вторые и третьи нейтроны, регистрируемые последовательно в одни и те же временные ворота, запускаемые сигналом остановки мюона. Основная информация была получена из анализа временных распределений первых зарегистрированных нейтронов. Эти распределения фиксировались функцией вида:

$$N_n(t) = F_n(t) + B_n(t),$$

где  $F_n(t) = \varepsilon \bar{\lambda}_{dd\mu} \beta \phi \exp(-\lambda t)$ ,  $\lambda = \lambda_0 + (\varepsilon + \omega_d - \varepsilon \omega_d) \beta \phi \bar{\lambda}_{dd\mu}$ , а  $B_n = B_{1n} + B_{2n}$  - временная функция, отражающая вклад двух различных компонент фона. Для критерии  $t_e > t_n$   $B_{1n} \sim \exp(-\lambda_{CT} t)$ ,  $B_{2n} \sim \exp(-\lambda_0 t)$ . ( $\lambda_{CT}$  - скорость гибели мюона в стенках ( $\lambda_{CT} \cong 5 \text{ мкс}^{-1}$ )).

Величина  $\bar{\lambda}_{dd\mu}$  определялась для каждой экспозиции, исходя из анализа данных о выходе ( $\eta$ ) и временном распределении ( $dN/dt$ ) первых зарегистрированных нейтронных событий:

$$\eta = N_n / N_e = \varepsilon \beta \phi \bar{\lambda}_{dd\mu} / \lambda,$$

$$dN_n/dt = \varepsilon \bar{\lambda}_{dd\mu} \beta \phi \exp(-\lambda t),$$

$$\lambda = \lambda_0 + (\varepsilon + \omega_d - \varepsilon \omega_d) \beta \phi \bar{\lambda}_{dd\mu},$$

где  $N_n$  и  $N_e$  - числа зарегистрированных нейтронов из реакции синтеза и электронов от распада мюонов, остановившихся в дейтерии;  $\beta$  - парциальная вероятность реакции синтеза с нейтроном;  $\omega_d$  - коэффициент прилипания мюона к  $^3\text{He}$ ,  $\varepsilon$  - эффективность регистрации нейтронов.

На данном этапе мы, также как и авторы работы [2], ограничились анализом только медленной компоненты  $t_n > 0,15 \text{ мкс}$ . Поэтому найденные нами (и измеренные в работе [2]) значения  $\bar{\lambda}_{dd\mu}$  определяются, в основном, скоростью образования  $dd\mu$ -молекул из состояния с  $F_{d\mu} = 1/2$  с некоторой добавкой (в зависимости от условий опыта до 15%) за счет вклада состояния с  $F_{d\mu} = 3/2$ .

Значения величины  $\bar{\lambda}_{dd\mu}$ , измеренные нами при двух значениях плотности дейтерия, отличающихся в 2, 4 раза, согласуются между собой в пределах погрешностей измерений во всем исследованном температурном диапазоне.

Сравнение полученных результатов с данными других работ иллюстрирует рисунок 5. Как можно видеть, имеет место совпадение наших результатов с полученными в экспериментах ЛИАФ [5] и Vienna-PSI [6] с дейтерием малой плотности и с вычислениями Меньшикова, Пономарева и др. [7]. Измеренное нами значение  $\bar{\lambda}_{dd\mu}$  в жидком дейтерии при  $T = 20 \text{ K}$  хорошо согласуется с величиной, найденной в работе группы Vienna-PSI; и результатами вычислений Пономарева и Файфмана [8] (нерезонансный механизм образования  $dd\mu$ -молекул), что устраняет существо-

вавшее ранее расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями величины  $\bar{\lambda}_{dd\mu}$  для жидкого дейтерия.

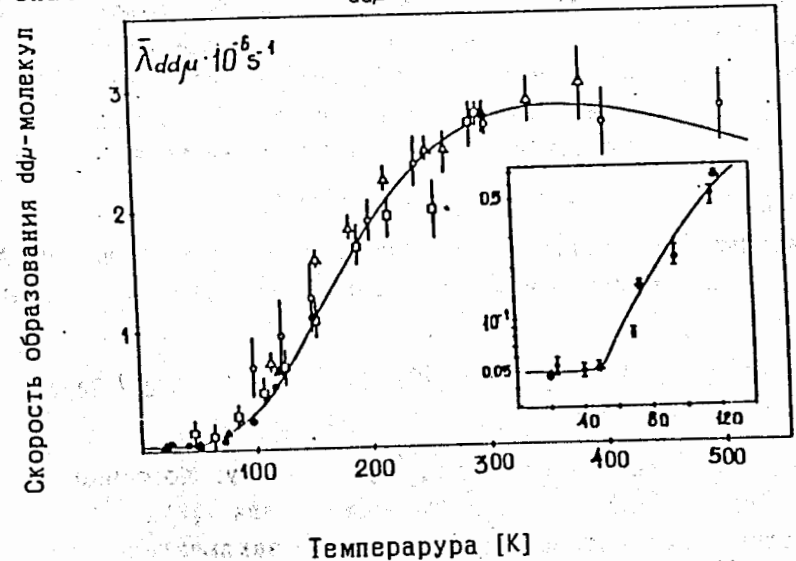


Рис. 5. Результаты измерений скорости образования  $dd\mu$ -молекул в зависимости от температуры дейтерия. Символы обозначают результаты экспериментов:  $\Delta$  - [9],  $\circ$  - [10],  $\square$  - [5],  $\blacklozenge$  - [6],  $\blacktriangle$  - настоящая работа. Линия - вычисления [7, 11].

В четвертой главе обсуждаются результаты, связанные с определением роли спиновых эффектов в резонансном образовании  $dd\mu$ -молекул при высоких давлениях. Ранее измерения зависимости  $\lambda_{3/2}(T)$  были выполнены лишь группой Vienna-PSI причем при малой плотности дейтерия  $\phi = 0,02$  и  $0,04$ , где эффекты ударного уширения резонанса не должны проявляться. Эти эффекты играют доминирующую роль в процессе образования молекул  $dt\mu$ , а в дейтерии они сказываются лишь в условиях большой плотности  $\phi \cong 1$  и только для величины  $\lambda_{3/2}$ . Всего было выполнено 8 экспозиций от  $T = 20 \text{ K}$  до  $T = 205 \text{ K}$ . Для определения фона были выполнены измерения с гелием и пустой мишенью.

Показанной схеме процессов соответствует система уравнений для функций  $N_{1/2}(t)$ ,  $N_{3/2}(t)$ , и  $\bar{N}_n(t)$ .

$$dN_{3/2}/dt = -(\lambda_0 + \lambda_d + \lambda_{3/2}) N_{3/2} + 2/3(1-\omega) \lambda_{3/2} N_{3/2} + [2/3(1-\omega) \lambda_{1/2} + \lambda_d'] N_{1/2}$$

$$dN_{1/2}/dt = -(\lambda_0 + \lambda_d + \lambda_{1/2}) N_{1/2} + 1/3(1-\omega) \lambda_{1/2} N_{1/2} + [1/3(1-\omega) \lambda_{3/2} + \lambda_d'] N_{3/2}$$

$$d\bar{N}_n/dt = (\lambda_{3/2} \beta_{3/2} N_{3/2} + \lambda_{1/2} \beta_{1/2} N_{1/2}) \phi,$$

где  $\lambda_0 = 0,455 \text{ мкс}^{-1}$  - скорость распада мюона;  $\omega = \beta \omega_d$ ,  $\beta = \beta_{3/2} = 0,58$ ,  $\omega_d = 0,12$ ,  $\beta_{1/2} = 0,53$ ;  $N_{3/2}$  и  $N_{1/2}$  - числа  $d\mu$ -атомов в верхнем и нижнем состояниях СТС;  $N_n$  - число нейтронов от всех циклов катализа, вызванных одним мюоном. Рассмотрение системы уравнений приводит к заключению, что временной спектр ( $dN_n/dt$ ) представляет собой сумму двух экспонент - "быстрой" и "медленной":

$$dN_n/dt \equiv F(t) = A_0 \exp(-\lambda_0 t) + A_M \exp(-\lambda_M t).$$

Приближенные аналитические решения системы, т.е. величины  $A_0$ ,  $\lambda_0$ ,  $A_M$ ,  $\lambda_M$  как функции искомого параметров  $\lambda_{3/2}$ ,  $\lambda_{1/2}$ ,  $\lambda_d$  были получены в работе [7].

$$\lambda_0 \cong \lambda_0 + (\lambda_d + \lambda_d' + 1/3 \lambda_{3/2} + 2/3 \lambda_{1/2}) \phi, \quad \lambda_M \cong \lambda_0 + (\omega_d + \varepsilon - \omega_d \varepsilon) \lambda_{1/2} \beta \phi,$$

$$A_0 \cong 2/3 (\lambda_{3/2} - \lambda_{1/2}) A_M / (\lambda_{1/2}), \quad A_M \equiv \lambda_s = k \lambda_{1/2} \beta \phi.$$

Величина  $\lambda_s$  представляет собой усредненную по спиновым состояниям скорость образования  $dd\mu$ -молекул для  $t > (\lambda_0)^{-1}$ .

Обработка зарегистрированных событий заключалась в разделении нейтронов от  $\gamma$ -квантов и электронов, построении и анализе отдельно для каждого сорта частиц амплитудных (энергетических) и временных распределений. При этом отбирались лишь те события, для которых выполнялось дополнительное условие между временами регистрации нейтрона и электрона:  $t_e - t_n = 0,5 - 4,5 \text{ мкс}$ .

Введение этого критерия несколько уменьшало эффективность регистрации событий по сравнению с использовавшимся ранее условием  $t_e > t_n$ , однако позволило примерно в два раза уменьшить фон от стенок, случайно совпадающий с загрузкой детектора 5.

Примеры временных распределений нейтронов для двух "крайних" значений температур  $T=22 \text{ К}$  и  $T=205 \text{ К}$  приведены на рис. 6. Можно видеть, что распределения представляют собой суперпозицию двух экспонент ("быстрой" и "медленной") с существенно различными показателями.

Параметры исследуемого процесса определялись из анализа временных распределений нейтронов. Эти распределения фитировались зависимостью вида

$$dN_n/dt = C F(t) + B(t),$$

"свернутой" с функцией временного разрешения детектора. Здесь  $F(t) = A_0 \exp(-\lambda_0 t) + A_M \exp(-\lambda_M t)$ , временной спектр нейтронов от реакции синтеза,  $B(t)$  - временная зависимость фона. Параметр

$C$  - нормировочный множитель, учитывающий зарегистрированное число электронов от мю-распада и эффективность регистрации нейтронов. В ходе анализа варьировались с целью нахождения их оптимальных значений параметры  $A_0$ ,  $A_M$ ,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_M$ , а также положение  $t_0$  нуля времени в спектре и величина временного разрешения детектора.

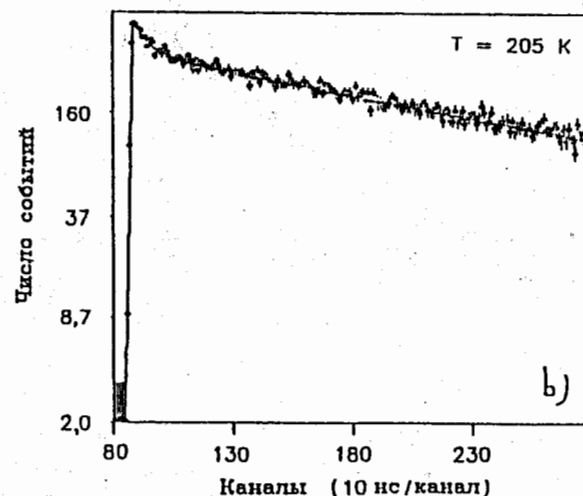
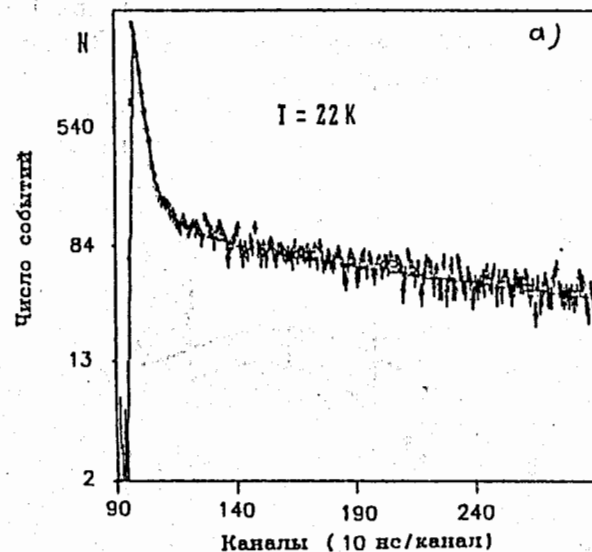


Рис 6. Примеры временного распределения первых, зарегистрированных нейтронов для экспозиции  $T=22 \text{ К}$  и  $T=205 \text{ К}$ .

Найденные в результате анализа значения величин  $\lambda_{3/2}$  и  $\lambda_{1/2}$  приведены на рис. 7. Как можно видеть, для зависимости  $\lambda_{1/2}(T)$  имеет место хорошее согласие наших данных как с измерениями группы Vienna-PSI, [6] выполненными с дейтерием малой плотности ( $\phi=0,02$  и  $0,04$ ), так и с расчетами Меньшикова, Файфмана и др. [7, 11, 12]. Что же касается зависимости  $\lambda_{3/2}(T)$ , то наблюдается некоторое расхождение наших результатов с экспериментальными данными группы Vienna-PSI. Для шести наших точек при  $T=80-205$  К отклонение от оптимальной зависимости  $\lambda_{3/2}(T)$ , найденной этой группой соответствует величине  $\chi^2=16$ .

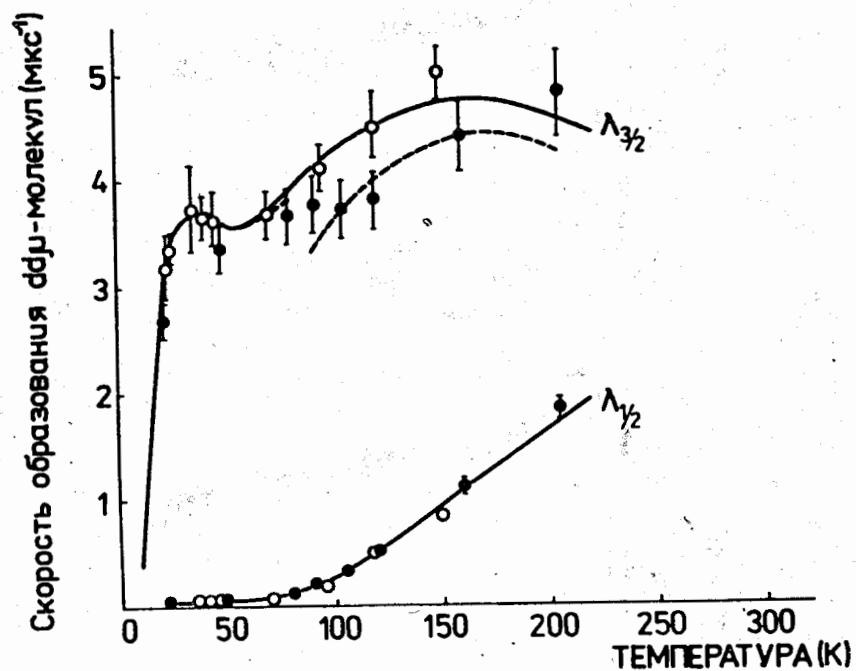


Рис 7. Зависимости  $\lambda_{3/2}(T)$  и  $\lambda_{1/2}(T)$ , измеренные нами и в опытах [6]. Точки: ● - наши данные, ○ - измерения Вена-PSI. Сплошная линия - расчеты [11] на основе модели Весмана, штриховая линия - вычисления [11], учитывающие уширение резонанса в образовании молекул  $dd\mu$ .

Расхождение проявляется более четко, если представить данные измерений в виде отношений  $\alpha=\lambda_{3/2}/\lambda_{1/2}$  и тем самым практически исключить систематические погрешности, связанные с неточным знанием величин  $\epsilon_n$  и  $\phi$ , одинаковые для  $\lambda_{3/2}$  и  $\lambda_{1/2}$ .

В то же время наши значения  $\lambda_{3/2}(T)$  неплохо согласуются с расчетами, основанными на современной теории (Петров, Файфман, Меньшиков) [14, 11-13], учитывающей уширение резонанса в соударениях комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]^*$  с молекулами  $D_2$ . На рис. 7 штриховой линией обозначены соответствующие вычисления Файфмана для  $\phi=1,2$  [11]. Наличие разрыва в области температур, где "упругая" ширина примерно равна резонансной энергии, является свидетельством несовершенства расчетов, основанных на определенных моделях, однако характер изменения скорости  $\lambda_{3/2}$  при увеличении плотности до  $\phi \approx 1$  проявляется достаточно отчетливо и, по крайней мере качественно, согласуется с экспериментом.

Таким образом, оба набора экспериментальных данных для  $\lambda_{3/2}(T)$  - наших, измеренных при высокой плотности дейтерия  $\phi \approx 1$ , и полученных в работах [6] группы PSI для малой плотности  $\phi \ll 1$ , удастся согласовать между собой в рамках теории, учитывающей зависимость  $\lambda_{3/2}$  от плотности за счет ударного уширения резонанса. Это позволяет сделать заключение о возможном существовании эффекта плотности в образовании мюонных молекул  $dd\mu$  из верхнего спинового состояния  $d\mu$ -атома.

Полученные в результате анализа экспериментальных временных распределений нейтронов значения скорости  $\lambda_d$  переходов  $F=3/2 \rightarrow 1/2$  между спиновыми состояниями  $d\mu$ -атома приведены на рис. 8. Они представляют собой "эффективные" значения, обусловленные изменением спина  $d\mu$ -атомов не только в соударениях  $d\mu+d$ , но также и за счет обратного распада комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]^*$ .

Наши значения  $\lambda_d$ , полученные при  $\phi \approx 1$ , хорошо согласуются с результатами измерений PSI при  $\phi=0,02$  и  $0,04$  [6] и с усредненной по температуре величиной  $\bar{\lambda}_d = 37,3 \pm 1,5 \text{ мкс}^{-1}$ , найденной в ЛИЯФ, при  $\phi=0,1$  [2,5]. В то же время экспериментальные данные по  $\lambda_d$  плохо согласуются с результатами вычислений [15], если учесть увеличение скорости переходов  $3/2 \rightarrow 1/2$  за счет распада комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]^*$ . Этот вопрос требует дополнительного теоретического рассмотрения.



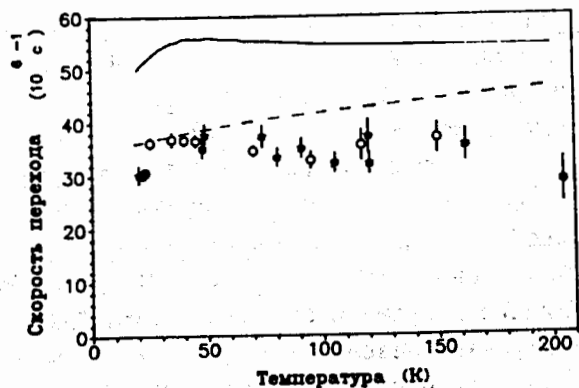


Рис 8. Значения скорости перехода между состояниями сверхтонкой структуры  $\mu$ -атома в зависимости от температуры дейтерия. Символы: ● - данные настоящей работы, ○ - измерения [6]. Штриховая линия - расчеты [15] для скорости перехода  $3/2 \rightarrow 1/2$  в соударениях  $\mu$ -атома с атомами (молекулами) дейтерия, сплошная линия - то же с учетом изменения заселенности состояний с  $F=3/2$  и  $F=1/2$  при обратном распаде комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]$  [7, 12, 16].

Характер зависимости величины  $\lambda_{dd\mu}$  от энергии  $\mu$ -атомов обуславливает уникальную возможность оценить время термализации  $\mu$ -атома из времени задержки начала нейтронного спектра  $t_{no}$  относительно момента остановки мюона  $t_{\mu 0}$ . Сравнение измеренной разности  $\Delta = t_{no} - t_{\mu 0}$  с расчетным временем пролета нейтронов от мишени до детектора приводит к заключению, что время термализации  $\mu$ -атомов в дейтерии в наших условиях не превышает 2 нс. Это находится в согласии с расчетами сечения рассеяния  $\mu + d$ .

Наконец, в пятой главе суммируются результаты диссертации, обсуждается современное состояние проблемы мюонного катализа и основные направления дальнейших исследований.

#### Основные результаты и выводы:

1. Созданы программы моделирования процессов регистрации нейтронов спектрометром полного поглощения и их взаимодействий в дейтериевой мишени и веществе стенок для экспериментов с медленными мюонами. Они использованы для определения временных и амплитудных характеристик спектрометра и в расчетах эффективности регистрации нейтронов из катализируемой мю-

оном реакции синтеза  $d+d$  в экспериментах по изучению мю-катализа  $d-d$  и  $p-d$  циклов и перехвата мюонов от дейтерия к гелию.

2. Разработана методика прецизионных временных измерений со спектрометром нейтронов полного поглощения и способы обработки их результатов.
3. Впервые измерена температурная зависимость эффективной скорости образования  $dd\mu$ -молекул в дейтерии высокой плотности при двух ее значений  $\phi=0,883$  и  $0,367$  от плотности жидкого водорода. Результаты совпадают с данными других авторов, полученными при малой плотности, а также с современными теоретическими расчетами.
4. Впервые измерена температурная зависимость скорости образования молекул  $dd\mu$  из верхнего спинового состояния  $\mu$ -атома в дейтерии высокой плотности. Результаты измерений удается согласовать с данными, полученными при малой плотности, и с теоретическими вычислениями, если допустить существование предсказываемого теорией эффекта плотности в резонансном образовании  $dd\mu$ -молекул. Результаты подтверждают теоретическое значение энергии слабосвязанного уровня в системе  $dd\mu$  с точностью 1 мэВ.
5. Впервые измерена температурная зависимость скорости перехода между состояниями сверхтонкой структуры  $\mu$ -атома в дейтерии высокой плотности ( $\phi \approx 1$ ). Полученные результаты хорошо согласуются с данными других авторов при малой плотности ( $\phi \leq 0,1$ ), но расходятся с результатами вычислений, учитывающими увеличение эффективной скорости переходов  $3/2 \rightarrow 1/2$  за счет распада комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]^*$ .
6. Впервые получены экспериментальные данные о времени термализации  $\mu$ -атомов в дейтерии. Они согласуются с результатами современных вычислений сечений упругого рассеяния  $\mu$ -атомов на дейтронах.

#### Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Быстрицкий В. М., Желелов В. П., Зинов В. Г., Илиева-Соколина Н., Конин А. Д., Марциш Л., Меркулов Д. М., Руденко А. И., Сомов Л. Н., Столупин В. А., Фильченков В. В., Хан Дон Ир, Измерение температурной зависимости скорости образования  $dd\mu$ -молекул в газообразном дейтерии при давлении 1,5 и 0,4 кбар,

- Препринт ОИЯИ Е1-90-322; in Proc. Int. Conf. on Muon Catalyzed Fusion, Vienna, 1990, Muon Catalyzed Fusion, 1990/1991, V.5/6, P.141.
2. Фильченков В. В., Марциш Л.,  
Возможности экспериментального исследования спиновых эффектов в образовании  $dd\mu$ -молекул при давлении дейтерия 1,5 кбар. Первые результаты, Препринт ОИЯИ Е1-90-321; in Proc. Int. Conf. on Muon Catalyzed Fusion, Vienna, 1990. Muon Catalyzed Fusion, 1990/1991, V.5/6, P.499.
  3. Желепов В. П., Зинов В. Г., Ивановский С. А., Карпов С. Б., Конин А. Д., Марциш Л., Мальшев А. И., Меркулов Д. М., Руденко А. И., Фильченков В. В., Юрин О. А.,  
Экспериментальное исследование спиновых эффектов в образовании мюонных молекул дейтерия, Препринт ОИЯИ Е15-91-181; Письма в ЖЭТФ, 1991, Т. 53, С. 581.
  4. В. В. Фильченков, Л. Марциш,  
Эффективность регистрации нейтронов спектрометра полного поглощения, Сообщение ОИЯИ Е-13-88-566.
  5. Зинов В. Г., Конин А. Д., Фильченков В. В., Руденко А. И., Марциш Л.,  
Временные измерения с нейтронным спектрометром полного поглощения, Препринт ОИЯИ Е-13-91-182; ПТЭ, в печати.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Breunlich W.H. et al., Proc.Int.Conf. on Muon Catalyzed Fusion, Vienna, 1990, Muon Catalyzed Fusion, 1990/1991, V.5/6, P.149.
2. Balin D.V., Muon Catalyzed Fusion, 1990/1991, V.5/6, P.163.
3. Быстрицкий В. М., Желепов В. П., Зинов В. Г., Илиева-Соколина Н., Конин А. Д., Марциш Л., Меркулов Д. М., Руденко А. И., Сомов Л. Н., Столупин В. А., Фильченков В. В., Хан Дон Ир,  
Muon Catalyzed Fusion, 1990/1991, V.5/6, P.141.
4. Dzhelapov V.P. et al., Nucl.Instr.and Meth., 1988, V.A269, P.634; Препринт ОИЯИ, 13-87-476, Дубна, 1987;  
Конин А. Д., Руденко А. И., Фильченков В. В., Препринт ОИЯИ, 13-88-567, Дубна, 1988; Nucl.Instr.and Meth.,1990, V.A294, P.504.
5. Балин Д. В. и др., Письма в ЖЭТФ, 1984, Т. 40, С. 318.  
Balin D.V., et al., Phys.Lett., 1984, V.141B, P.173.  
Balin D.V. et al., Muon Catalyzed Fusion, 1988, V.2, P.241.
6. Zmeskal J. et al., Muon Catalyzed Fusion, 1987, V.1, P.109.  
Nagele N et al., Nucl. Phys.,1989, V.A493, P.397.

7. Меньшиков Л. И., Пономарев Л. И., Стриж Т. А., Файфман М. П., ЖЭТФ, 1987, Т. 92, С. 1173.
8. Пономарев Л. И., Файфман М. П., ЖЭТФ, 1976, Т. 71, С. 1689.
9. Быстрицкий В. М., Желепов В. П., Петрухин В. И., Руденко А. И., Сомов Л. Н., Суворов В. М., Фильченков В. В., Хемниц Г., Хованский Н. Н., Хоменко Б. А., Хорват Д., ЖЭТФ, 1979, Т. 76, С. 460.
10. Jones S.E. et al., Phys Lett.,1986, V.56, P.588.
11. Faifman M.P., Muon Catalyzed Fusion, 1988, V.2, P.247.
12. Faifman M.P., Menshikov L.I., Strih T.A., Muon Catalyzed Fusion, 1989, V.4, P.1.
13. Menshikov L.I., Muon Catalyzed Fusion, 1988, V.2, P.273; Физ. ЭЧАЯ, 1988, Т. 19, С. 1349.
14. Petrov Yu.V., Phys Lett., 1985, V.163B, P.588.
15. Adamchak A., Melezhik V.S., Muon Catalyzed Fusion, 1989, V.4, P.303;  
Muon Catalyzed Fusion, 1990/1991, V.5/6, P.65.
16. Leon M., Phys.Rev., 1986, V.A33, P.4434.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 декабря 1991 года.