

Ф-577



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На правах рукописи

15-92-462

**ФИЛЬЧЕНКОВ**  
Владимир Владимирович

УДК 539.126.333

**ОБНАРУЖЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ МЕЗОМОЛЕКУЛ ДЕЙТЕРИЯ  
И КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МЮ-КАТАЛИЗА  
В ДЕЙТЕРИИ**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра и  
элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1992

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
доктор физико-математических наук  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Кириллов-Угрюмов В.Г.  
Мухин А.И.

Пономарев Л.И.

**Ведущая организация:**  
НИИЯФ МГУ, г. Москва

Автореферат разослан

1992 г.

Защита диссертации состоится  
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 Лаборатории  
ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований  
г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ю.А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Физика процессов, вызываемых отрицательными мюонами в водороде, представляет собой интересный раздел современной науки. Рассматриваемые в нем процессы обусловлены своеобразным сочетанием атомных, мю-атомных и мю-молекулярных явлений, ядерных реакций и ядерного мю-захвата. Наиболее интересным из этих процессов представляется мю-катализ реакций синтеза ядер изотопов водорода. В настоящее время исследования по этой проблеме включены в программу многих ведущих научных центров мира, эксперименты проводятся на всех мезонных фабриках. Регулярно проходят международные конференции и симпозиумы, издается специальный журнал "Muon Catalyzed Fusion".

Следует указать, что актуальность тематики в значительной степени обусловлена нашими работами, составившими содержание диссертации, в ходе которых было установлено существование нового явления - резонансного образования мюонных молекул дейтерия. Результаты этих работ стимулировали развитие теории. Более того, в последующих работах групп теоретиков и математиков ОИЯИ была предсказана высокая интенсивность мюонного катализа в смеси дейтерия и трития. Эти выводы, нашедшие экспериментальное подтверждение в дальнейших работах нашей группы, а затем - и в работах зарубежных лабораторий, легли в основу рассмотрения вопроса о возможности использования мю-катализа в качестве альтернативного источника энергии и быстрых нейтронов. Важным аспектом проблемы является возможность проверки прецизионных расчетов энергии слабосвязанного уровня в системе  $dd\mu$ .

Актуальность вошедших в диссертацию результатов экспериментального исследования ядерного захвата мюонов протонами (из состояния  $p\mu$ -атома) связана с доказательством справедливости теории универсального слабого взаимодействия.

### Основная цель работы

Целью работы было:

- 1) измерение параметров процесса мю-катализа в дейтерии, включая спиновые эффекты, при различных значениях плотности дейтерия и в широком диапазоне температур;
- 2) определение скорости ядерного захвата отрицательных мюонов протонами;
- 3) разработка необходимой методики (включая аппаратуру для проведения указанных выше экспериментов, математическое и программное обеспечение).

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

## Научная новизна

Экспериментально обнаружено и изучено новое явление - резонансное образование мезомолекул дейтерия, что официально зарегистрировано как открытие. Работы получили мировое признание.

Впервые экспериментально найдена оценка эффекта плотности в образовании  $dd\mu$  - молекул, обусловленного ударным уширением резонанса. Впервые измерена скорость переходов между состояниями сверхтонкой структуры  $d\mu$  - атомов в дейтерии высокой плотности. Исследование мю-катализа в газообразном дейтерии высокой плотности остаются единственным в мире.

## Практическая ценность

Результаты диссертации по установлению явления резонансного образования мюонных молекул дейтерия послужили основой для последующих интенсивных исследований процесса мю-катализа. Разработанный в наших работах метод исследований, основанный на использовании газовой мишени и детекторов нейтронов, получил наибольшее распространение в других лабораториях мира. Результаты диссертации необходимы для дальнейшего развития теории, для планирования и интерпретации других экспериментов по мю-катализу. Найденные нами характеристики мю-катализа в дейтерии высокой плотности будут использоваться совместно с данными для  $dt$  и  $tt$  катализа при определении параметров мезокаталитического реактора - возможного источника энергии.

## Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на Международных конференциях:

- по физике элементарных частиц и структуре ядра (Цюрих, Швейцария, 1977 г.),

- по малонуклонным системам (Ванкувер, Канада, 1989 г.),

- по слабым и электромагнитным взаимодействиям в ядрах (Дубна, 1992 г.);

на Международном симпозиуме "Взаимодействие мюонов и пионов с веществом" (Дубна, 1977 г.);

на Международных симпозиумах по мюонному катализу (Флорида, США, 1988 г., Вена, Австрия, 1990 г., Уппсала, Швеция, 1992 г.);

на сессиях Ученого совета ОИЯИ, научных семинарах ЛЯП и ЛВЭ ОИЯИ, МИФИ.

## Публикации

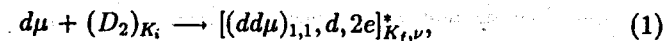
Основное содержание диссертации отражено в 24 публикациях, которые приведены в списке литературы.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Она содержит 128 страниц текста, 54 рисунка и список литературы из 194 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены история вопроса и основные положения теории мю-атомных и мю-молекулярных процессов в смеси водорода и дейтерия. Подчеркнута роль автора в обнаружении [1], а затем и в прямом доказательстве [3] существования нового явления - резонансного образования мюонных молекул дейтерия и значение этого открытия как мощного стимула для развертывания интенсивного изучения указанных процессов во многих лабораториях мира. Особое внимание в диссертации уделено выводам теории резонансного образования молекул  $dd\mu$  в слабосвязанном состоянии  $J = v = 1$  ( $J, v$  - вращательное и колебательное квантовые числа состояния), построенной на основе механизма Весмана (Весман Э.А., Письма в ЖЭТФ, 1967, т. 5, с. 113) Согласно этому механизму, энергия  $\epsilon_{dd\mu}$ , выделяемая при образовании  $dd\mu$ -молекул, вместе с энергией движения  $\epsilon_{d\mu}$   $d\mu$  - атома, передается на возбуждение молекулярного комплекса (М), состоящего из  $dd\mu$  - молекулы, дейтрона и электронов



где  $K_{i,f}, \nu$  - вращательные и колебательные квантовые числа. При расчете скорости  $\Lambda_{dd\mu}$  образования комплекса следует учитывать сверхтонкую структуру (СТС) уровней  $d\mu$  - атома, спин которого может принимать значения  $F = 3/2, 1/2$  (см. рис.1) и  $dd\mu$  - молекулы (спин  $S = 3/2, 1/2$ ).

После образования комплекса М происходит либо его распад на  $d\mu$ -атом и молекулу  $D_2$ , либо реакция синтеза в молекуле  $dd\mu$ :



Из-за того, что скорость обратного распада  $\Gamma_b = 1,5 \times 10^9 \text{ c}^{-1}$  больше скорости синтеза  $\lambda_f^{dd} = 0,42 \times 10^9 \text{ c}^{-1}$ , наблюдаемая (по продуктам реакций синтеза) скорость образования  $dd\mu$ -молекул  $\lambda_{dd\mu} = \Lambda_{dd\mu} \cdot \lambda_f^{dd} / (\lambda_f^{dd} + \Gamma_b)$  в несколько раз меньше скорости образования комплекса.

Из теории следует, что скорость образования  $dd\mu$ -молекул из состояния с  $F = 3/2$  ( $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$ ) для области температур  $T = 20 - 100$  K крайне чувствительна к энергии слабосвязанного уровня в системе  $dd\mu$ . Оказывается, достаточно измерить ( $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$ ) с погрешностью  $< 10 - 15\%$ , чтобы определить указанную энергию с точностью  $0,5$  мэВ. Это обстоятельство представляется очень важным, если учесть, что вклад в энергию уровня, обусловленный поляризацией вакуума, ожидается равным  $8,7$  мэВ.

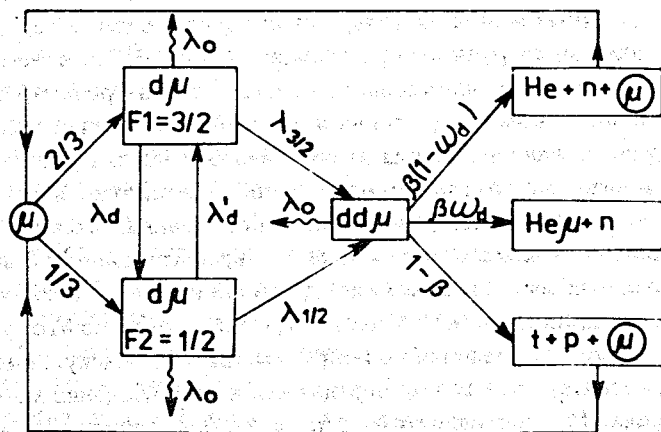


Рис.1. Схема процесса мюонного катализа в дейтерии.

Современное развитие теории резонансного образования мюонных молекул связано с учетом ширины резонанса (Petrov Y.V., Phys. Lett., 1985, v. 163B, p. 588; Menshikov L.I., Muon Catalyzed Fusion, 1988, v. 2, p. 273 и Фюжика ЭЧАЯ, 1988, т. 19, с. 1349.) Полная ширина складывается из вакуумной, определяемой временем жизни комплекса, и столкновительной (ударной), обусловленной изменением внутреннего состояния комплекса в его соударениях с молекулами  $D_2$ . Ударная ширина пропорциональна плотности дейтерия и растет с температурой. Учет ширины резонанса приводит к изменению скорости образования  $dd\mu$ -молекул по сравнению с найденной на основе модели Весмана и нетривиальной зависимости ее от плотности дейтерия. Согласно расчетам, величина эффекта оценивается в  $10-15\%$ , что намного меньше, чем для  $dt\mu$ -молекул, где эффекты плотности доминируют, однако вполне доступна для экспериментальной проверки.

Вторая глава посвящена основам экспериментального метода, использованного для измерения [7] скорости фундаментальной реакции сла-

бого взаимодействия - захвата мюона протоном



и примененного ватем (с необходимой модификацией) для изучения различных процессов мюонного катализа. Исследование реакции (5) в газообразном водороде связано с большими экспериментальными трудностями, обусловленными: 1)- малой вероятностью реакции, составляющей всего  $\cong 1/700$  от скорости  $\lambda_0 = 4,55 \times 10^5$  с<sup>-1</sup> распада мюона; 2)- наличием всего одной доступной для регистрации, и притом нейтральной, частицы в конечном состоянии; 3)- исключительно большим влиянием фона, связанного с остановками мюонов в веществе стенок мишени, где вероятность мю-захвата на три порядка больше, чем в водороде, а число самих остановок в десятки раз больше, чем в газе; 4)- необходимостью обеспечить чистоту водорода на уровне  $10^{-8}$  и сохранить ее в течение длительных сеансов измерений.

При разработке методики были учтены эти трудности. Мы старались обеспечить достаточно малое влияние различных фоновых процессов. В принципе постановка опытов сводилась к следующему (рис.2). Мюоны останавливаются в газовой водородной мишени. Нейтроны от мю-захвата регистрируются детекторами в течение временных ворот  $T \cong 1/\lambda_0 =$  несколько мкс, запускаемых сигналом остановки мюона. Ниже перечислены основные особенности методики.

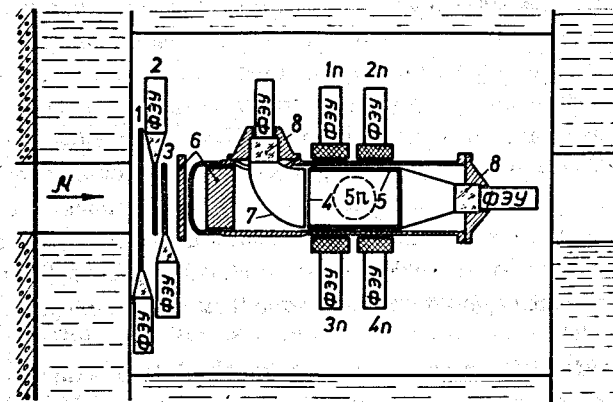


Рис.2. Экспериментальная установка для исследования мю-захвата в газообразном водороде [7]. 1-5 - сцинтилляционные детекторы, 6 - замедлитель, 7 - полые световоды, 8 - прозрачные уплотнения.

1. Принципиально важным было использование мишени "без стенок" для регистрации остановок мюонов именно в водороде [4],[5]. С этой

целью мы применили детекторы, скintилляторы которых располагались внутри мишени. Это позволило дискриминировать фон от мю-захвата в стенках мишени и резко подавить фон случайных совпадений за счет дискриминации большого числа ложных запусков. В качестве "внутреннего" скintиллятора использовался  $CsJ(Tl)$ . Время жизни мюонов в нем составляет 0,1 мкс, что позволило дискриминировать (по времени) фон от остановок мюонов в самом скintилляторе. В то же время, его уровень гажения допустимо мал с точки зрения соблюдения необходимой высокой степени чистоты водорода.

2. Для уменьшения "внешнего" фона случайных совпадений установка располагалась в специально оборудованной малофоновой лаборатории и окружалась дополнительной водяной защитой.

3. С целью дискриминации релятивистской составляющей оставшейся фоновой загрузки, а также для дополнительного уменьшения фона электронов от мю-распада и от фотонов их тормозного излучения было реализовано разделение нейтронов и гамма-квантов по форме светового импульса в специально выбранном для этого скintилляторе (стильбен) нейтронного детектора.

4. Фон от мю-захвата ядрами содержащихся в водороде примесей был сведен практически к нулю при использовании сверхчистого водорода, получаемого с помощью установки с палладиевым фильтром.

В последующем рассмотренная методика была использована для изучения целого ряда мю-атомных и мю-молекулярных процессов - нами были измерены скорости образования молекул  $pp\mu$  и  $pd\mu$ , выход реакции синтеза  $p + d$  в системе  $pd\mu$ , поляризация мюонов в водороде, скорость перехвата мюонов от водорода к гелию и, главное, - впервые измерена температурная зависимость скорости образования  $dd\mu$ -молекул. В наших последующих исследованиях процесса мю-катализа основы метода - регистрация нейтронов и использование газовой мишени - были сохранены, т.к. они дают возможность проводить измерения со всеми изотопами водорода (включая тритий) при больших давлениях (свыше 1 кбар) и при любой концентрации трития в широком температурном интервале (20-1000 K).

Относительная простота и универсальность методики, основанной на регистрации нейтронов, обеспечили ей наибольшее распространение. В настоящее время она используется экспериментальными группами LAMPF, PSI, KEK, Bologna.

В третьей главе рассматривается эксперимент [7] по измерению скорости  $\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu}$  мю-захвата (5) в газообразном водороде. Его актуаль-

ность определялась необходимостью проверки основных положений теории слабого взаимодействия: универсальности, V-A характера, сохранения векторного тока, влияния индуцированных взаимодействий, которые в мю-захвате (в отличие от бета распада) должны заметно проявляться. К моменту начала наших опытов измерения скорости процесса (5) были выполнены лишь в жидком водороде. Однако, в этом случае, как было показано в ходе предшествующих исследований, мю-захват реализуется из состояния  $pp\mu$ -молекулы. В связи с этим, возникли проблемы определения спинового состояния системы протон-мюон и величины перекрытия волновых функций этих частиц. Эти задачи, как относящиеся к проблеме трех тел, могли быть решены лишь приближенно. Отсюда вытекала необходимость измерений величины  $\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu}$  в газообразном водороде (где мю-захват реализуется из синглетного спинового состояния  $p\mu$ -атома), хотя экспериментальные трудности многократно возрастают по сравнению с опытами с жидким водородом.

Для исследования мю-захвата в водороде нами была использована методика, описанная во второй главе. В диссертации рассмотрены вопросы организации измерений, методов определения различных компонент фона, способы отбора и анализа зарегистрированных событий. Всего в экспозициях с водородом общей продолжительности 300-400 часов было зарегистрировано  $N_n = 278 \pm 33$  событий исследуемого процесса. Скорость мю-захвата определялась с помощью выражения  $\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu} = \lambda_0(N_n \epsilon_n) / (N_e \epsilon_e)$ , где величины  $\epsilon_n$  и  $\epsilon_e$  - эффективности регистрации нейтронов и электронов. Они были рассчитаны на ЭВМ с использованием известных данных о сечениях взаимодействия нейтронов и электронов с веществом. Величина  $N_e$  означает нормированное число электронов, зарегистрированное нейтронными детекторами в том же временном интервале, что и нейтронные события. Найденное значение скорости мю-захвата составило

$$\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu} = (686 \pm 88) \text{ c}^{-1} \quad (6)$$

Оно согласуется с теоретическим значением  $\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu} = 654 \text{ c}^{-1}$ , вычисленным с использованием парциальных констант  $g_V^{\mu}$  и  $g_A^{\mu}$ , найденных исходя из измерений величин векторного и аксиально-векторного взаимодействий  $g_V^{\beta}$  и  $g_A^{\beta}/g_A^{\beta}$  в  $\beta$ -распаде и для значения константы индуцированного псевдоскалярного взаимодействия  $g_p^{\mu} \cong -8$ , полученного в рамках гипотезы "частично сохраняющегося аксиального тока" (PCAC).

Из теории следует, что (для синглетного состояния  $p\mu$ -атома!) при  $g_V = 0$   $\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu} \cong 200 \text{ c}^{-1}$ , а при  $g_V = +g_A$  -  $\lambda_{\text{св}}^{\mu\mu} \cong 400 \text{ c}^{-1}$ . Сравнение этих значений с результатом (7) позволяет сделать важные заключения: - о безусловном наличии векторного взаимодействия в мю-захвате,

- о реализации а этом процессе  $V - A$  варианта взаимодействия. Измеренное нами значение (6) хорошо согласуется с результатами другого эксперимента (A. Alberigi Quaranta et al., Phys. Rev., 1969, v.177, p. 2118) по измерению скорости мю-захвата в газообразном водороде  $\lambda_{\text{зах}}^{\mu} = (651 \pm 57) \text{ с}^{-1}$ , выполненного другой методикой. На рис.3 приведены результаты наших вычислений величины  $\lambda_{\text{зах}}^{\mu}$  для различных значений отношений констант  $g_A^{\mu}/g_V^{\mu}$  и  $g_B^{\mu}/g_V^{\mu}$ . Сплошная линия на этом рисунке соответствует усредненному по двум измерениям экспериментальному результату, а штриховые - коридору ошибок усредненной величины.

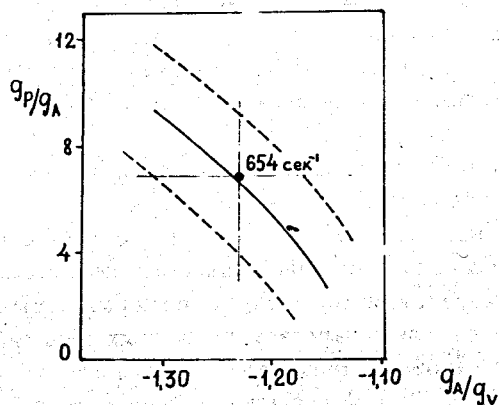


Рис.3. Ожидаемые значения констант слабого взаимодействия в мю-захвате, вычисленные на основании усредненного экспериментального значения скорости этого процесса.

Четвертая глава посвящена вопросам детектирования нейтронов в наших опытах по исследованию процессов мю-захвата и мю-катализа. Во всех экспериментах были использованы сцинтилляционные детекторы нейтронов, как обладающие большой эффективностью, форма аппаратурной линии для которых широко изучалась, и с помощью которых можно осуществить разделение нейтронов (протонов) и гамма-квантов (электронов) по форме сцинтилляционного сигнала. В диссертации рассмотрены вопросы определения амплитудных и временных характеристик детекторов, их калибровки, реализации  $n - \gamma$  разделения.

Первый цикл наших экспериментов (до 1979 г.) был выполнен с детекторами нейтронов на основе кристалла стиблена ( $\phi 70 \times 30$  мм [6]). Методы работы с детекторами (калибровка, контроль  $n - \gamma$  разделения и отбор нейтронных событий, способы анализа данных измерений) сохранили свое значение и используются нами до настоящего времени.

При поведении эксперимента, в ходе которого нам впервые удалось

зарегистрировать процесс мю-катализа реакции синтеза  $d + t$  и определить его параметры, было решено использовать детекторы большей эффективности (с объемом сцинтиллятора  $V = 1$  л каждый) на основе жидкого сцинтиллятора NE-213 [8]. Для этих детекторов впервые в мировой практике была применена фторпластовая кювета, в которой ФЭУ непосредственно граничит с сцинтиллятором. Такое решение позволило радикально улучшить энергетическое разрешение детектора по сравнению с обычно используемыми стеклянными кюветами и получить высокие параметры  $n - \gamma$  разделения. Из наших данных следует, что разрешение составляло  $\sigma = 0,12 / (E_e, \text{МэВ})^{1/2}$ .

Дальнейшим шагом в развитии методики регистрации нейтронов было создание нами сцинтилляционного спектрометра полного поглощения [10], [13], [11], [12] на основе сцинтиллятора NE-213. Спектрометр состоит из двух идентичных детекторов, располагаемых симметрично относительно мишени (рис.4). Кювета для сцинтиллятора изготовлена из нержавеющей стали и выложена изнутри отражателем: 4 мм тефлона + алюминизированный майлар. Внутренние размеры каждой кюветы составляют  $\phi 310 \times 160$  мм (объем 12 л). При этих размерах достигается высокая эффективность регистрации быстрых нейтронов. Так, для нейтронов с энергией  $E_n = 2,5$  МэВ из реакций (2,3) "внутренняя" эффективность детектора составляет  $\approx 80\%$ , а для нейтронов с  $E_n = 5,12$  МэВ из реакции мю-захвата (5) - 65%. При столь большой эффективности форма аппаратурной линии радикально изменяется (по сравнению с детекторами малых размеров) - происходит значительное обогащение в области больших амплитуд (пик полного поглощения). Это приводит к дополнительному возрастанию эффективности за счет уменьшения фактора порога.

Спектрометр нейтронов полного поглощения (СНПП) применялся нами в опытах по изучению мю-катализа реакции синтеза  $d + d$  при высокой плотности дейтерия (схема установки - на рис. 4). Его преимущества - высокая скорость набора событий, возможность использования явления множественности процесса мю-катализа, уменьшение неопределенности, связанной с пороговым фактором.

В диссертации рассмотрены вопросы выбора оптимальных размеров, методики определения параметров прибора и его калибровки. Важное значение имеет впервые выполненное нами корректное определение прозрачности сцинтиллятора NE-213 и отражательной способности тефлона. Для энергетической калибровки измерялись и анализировались спектры от  $\gamma$ -источников и нейтронов определенных энергий (выделяемых из непрерывного спектра Pu-Be источника по времени пролета). Энергетическое разрешение детектора оказалось равным

$\sigma_A = 0,09(1 + 1/E_c(\text{МэВ}))^{1/2}$ , что не уступает результатам, достигнутым другими авторами для детекторов малых размеров. Высокие параметры светосбора обеспечили надежное  $n - \gamma$  разделение для энергий  $E_c \geq 50 \text{ кэВ}$ .

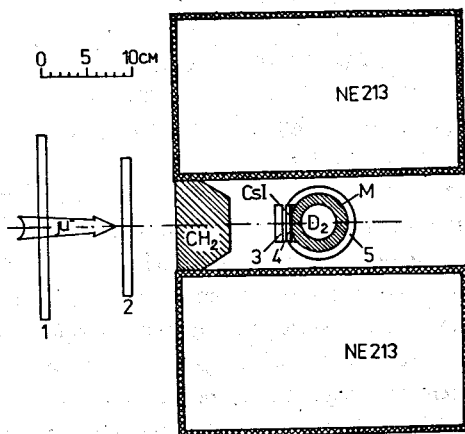


Рис.4. Схема экспериментальной установки для исследования мю-катализа в дейтерии большой плотности. 1-5 - сцинтилляционные детекторы, М - газовая криогенная мишень.

Временное разрешение собственно СНПП было найдено в специальных измерениях. Оно определяется разбросом амплитуд сигналов на входе соответствующего формирователя и описывается функцией разрешения с шириной (FWHM)  $\sigma_t = 3,4 \text{ нс}$ . Конечное время пролета нейтрона от мишени до детектора и его разброс приводят к сдвигу нуля времени и дополнительному уширению функции разрешения на величину  $\sigma_n = 5,6 \text{ нс}$ . Таким образом, суммарное разрешение составляет  $\approx 7 \text{ нс}$ , что оказалось вполне достаточным для надежного определения параметров мю-катализа реакции синтеза  $d + d$  при высокой плотности дейтерия [18], [19], [21].

В пятой главе рассмотрены некоторые вопросы кинетики мю-катализа, исследованные автором в работах [14], [15], [16], [17]. Совместно с В.Г. Зиновым и Л.Н. Сомовым был впервые учтен эффект влияния величины эффективности регистрации ( $\epsilon$ ) продуктов реакций синтеза многоциклового катализа на характер их временных распределений. В частности, для случая, характеризуемого лишь скоростью образования мю-молекул ( $\lambda_m$ ) и вероятностью прилипания мюона к продуктам реакции синтеза ( $\omega$ ) временное распределение первых зарегистрированных

событий реакции имеет вид

$$f_1^{\text{экс}}(t) = \epsilon \sum_{k=1}^{\infty} (1-\epsilon)^{k-1} f_k(t) = \epsilon \lambda_m / (\lambda_0 + \lambda_m(\epsilon + \omega - \epsilon\omega)) \quad (7)$$

где  $f_k(t)$  - временное распределение для реакции  $k$ -го цикла. Формула (7) получена независимо автором диссертации и Л.Н. Сомовым. Она широко используется другими группами при обработке экспериментальных данных, а выражение для "свертки" по эффективности регистрации - в независимых исследованиях вопросов кинетики мю-катализа.

Как видно из формулы (7), для нахождения вида зависимости  $f_1^{\text{экс}}(t)$  необходимо иметь выражения для  $f_k(t)$ , что в общем случае требует громоздких вычислений, связанных с решением системы дифференциальных уравнений для чисел мю-атомов, сохраняющихся к  $k$ -му циклу. Автор предложил более простой и эффективный путь. Именно - воспользоваться выражением для временного распределения всех зарегистрированных событий  $F(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t)$  (оно не зависит от  $\epsilon$ ) и сделать в нем замену  $\omega \rightarrow \eta = \epsilon + \omega - \epsilon\omega$ :

$$f_1^{\text{экс}}(t) = \epsilon F(\omega \rightarrow \eta; t) \quad (8)$$

Заметим, что выражение для  $F(t)$  получается при решении относительно простой (за счет "замыкания" по регенерации) системы дифференциальных уравнений, и, к тому же, для многих конкретных случаев оно содержится в соответствующих теоретических работах. Процедура (8) была использована нами в работе [16] для описания кинетики процесса мю-катализа реакции синтеза  $d + t$  с учетом сопутствующих реакций  $d + d$  и  $t + t$  и перехвата на примеси с  $Z > 1$ .

С помощью этого же метода автором получено точное решение для функции временного распределения нейтронов из реакций  $d + d$  катализа в дейтерии с учетом спиновых эффектов [17]. При теоретическом рассмотрении этой задачи (Л.И. Меньшиков, Л.И. Пономарев, Т.А. Стриж, М.П. Файфман, ЖЭТФ, 1987, т. 92, с. 1173) было получено лишь приближенное выражение для временного распределения нейтронов от всех циклов, в то время как в опытах различных групп обычно анализировались спектры  $f_1^{\text{экс}}(t)$ . Это обстоятельство затрудняло корректное сравнение теории и эксперимента.

Из полученных автором результатов следует, что искомое распределение выражается, как и в указанной работе, в виде суммы двух экспонент

$$f_1^{\text{экс}}(t) = A_6 \exp(-\lambda_6 t) + A_m \exp(-\lambda_m t) \quad (9)$$

и что учет эффективности приводит к изменению амплитуд экспонент на величину до 10%. Найденные автором выражения для параметров временного распределения нейтронов были проверены с использованием созданной автором универсальной программы моделирования процессов мю-катализа и использовались в наших работах [18], [19], [21] при анализе экспериментальных данных.

Шестая глава диссертации является ключевой - в ней содержатся результаты исследований процесса резонансного образования мюонных молекул дейтерия. В начале 60-х годов в ходе цикла исследований мю-атомных и мю-молекулярных процессов методом диффузионной камеры мы измерили выход реакций синтеза (2-4) в дейтерии малой плотности ( $\phi = 0,01 - 0,02$ ) при  $T = 240 K$  и на его основании нашли скорость образования  $dd\mu$ -молекул [2], [1]. Оказалось, что полученный нами результат на порядок величины превышает значение, найденное ранее в опытах с пузырьковыми камерами ( $T = 20 K, \phi = 1$ ) (J. Fetkovich et al., Phys. Rev. Lett., v. 4, p. 570; J. Doede, Phys. Rev., 1963, v. 132, p. 1782) и примерно в 20 раз - теоретическое значение, вычисленное в рамках "стандартного" оже-механизма. В ходе дальнейшего изучения проблемы мы, проанализировав распределения по "пробегам"  $d\mu$ -атомов, нашли сечения их упругого рассеяния на дейтронах и установили, что в условиях всех рассматриваемых опытов происходит быстрая ( $\ll 1$  мкс) термализация  $d\mu$ -атомов. Отсюда следовало, что для жидкодейтериевых камер средняя энергия  $d\mu$ -атомов составляла  $\epsilon_{d\mu} = 0,003 eV$ , а для наших опытов -  $\epsilon_{d\mu} = 0,03 eV$ . Анализ ситуации привел нас к заключению о возможном существовании неизвестного ранее, резонансного по энергии  $d\mu$ -атомов механизма образования  $dd\mu$ -молекул. Вскоре Э. Весману удалось найти схему такого механизма, а затем было надежно установлено (С.И. Винацкий, Л.И. Пономарев, И.В. Пузынин и др., ЖЭТФ, 1978, т. 78, с. 349) необходимое условие для этого механизма - существование в системе  $dd\mu$  слабосвязанного уровня ( $J=V=1$ ). После этого проблема прямой проверки существования резонансного механизма путем измерения зависимости  $\lambda_{dd\mu}(T)$  стала остро актуальной. Такие измерения были выполнены нами [3] на основе методики (рис. 2), созданной для измерения скорости мю-захвата в водороде. Регистрировались нейтроны с энергией  $E_n = 2,5$  МэВ из реакций (2,3). Установка модифицировалась для обеспечения возможности ее использования в широком температурном интервале ( $T \approx 100 - 400 K$ ). В частности, в области низких температур в качестве "внутренних" сцинтилляторов нам пришлось применить органический сцинтиллятор из-за резкого уменьшения световыхода  $CsJ(Tl)$  при его охлаждении. Кроме

того, в триггере не требовалось отсутствие электрона от мю-распада. Было проведено два опыта: 1) с пластическим сцинтиллятором - при  $T = 120 - 250 K$  и 2) с сцинтиллятором  $CsJ(Tl)$  - при  $T = 210 - 380 K$ . Температурные диапазоны специально были взяты перекрывающимися для проверки возможных систематических погрешностей, связанных с использованием пластического сцинтиллятора внутри мишени. В каждом опыте было проведено по пять экспозиций с изотопически чистым дейтерием с плотностью  $\phi \approx 0,1$ . Примеры двумерных распределений "быстрая" компонента - полный заряд, характеризующие надежность интерпретации событий исследуемого процесса, приведены на рис. 5. Они даны для одного из нейтронных детекторов и двух "крайних" значений температур в опыте 1.

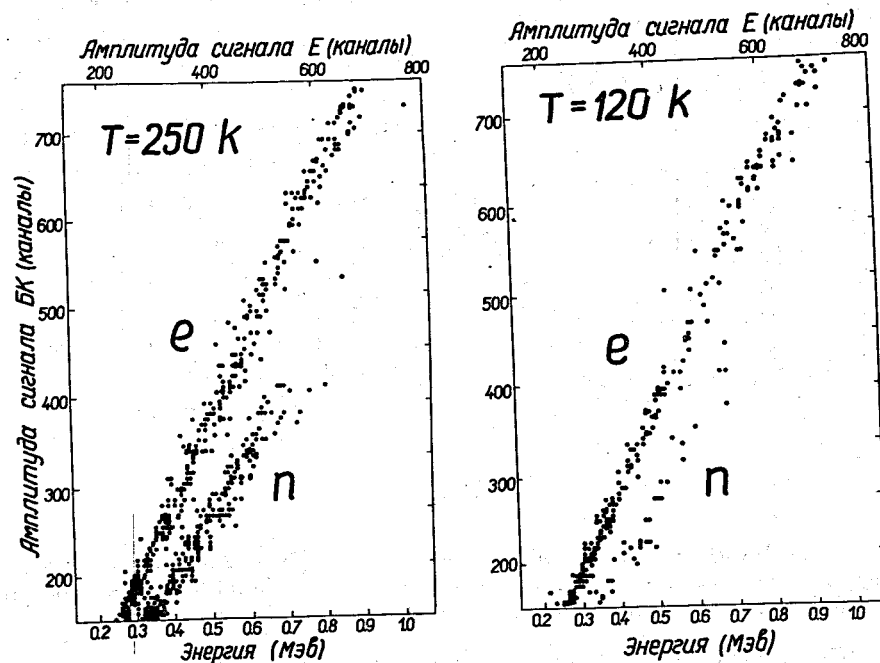


Рис.5. Нейтрон - гамма распределения, измеренные в различных экспозициях эксперимента [3].

Как и в измерениях скорости мю-захвата, нормировка нейтронных событий осуществлялась на соответствующее число электронов от распада мюонов, остановившихся в мишени, что повышает надежность данных для относительной зависимости  $\lambda_{dd\mu}(T)$ . Абсолютные значения  $\lambda_{dd\mu}$  были получены с использованием расчетного значения эффективности



регистрации нейтронов и с учетом потерь за счет используемых критериев отбора.

Результаты измерений зависимости  $\lambda_{dd\mu}(T)$  приведены на рис. 6 (с соответствующей поправкой на фактор калибровки). Как можно видеть, они хорошо согласуются с предсказаниями теории, основанной на рассмотрении резонансного механизма образования  $dd\mu$ -молекул и тем самым подтверждают его существование. Они совпадают также и с данными последующих многочисленных измерений.

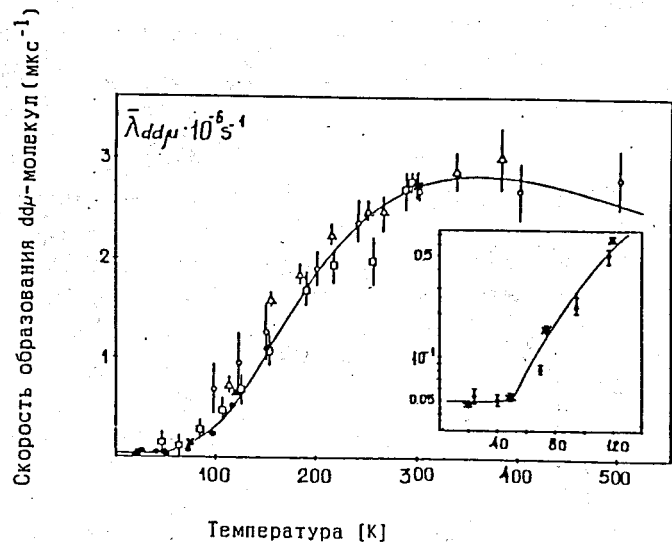


Рис.6. Температурная зависимость скорости образования  $dd\mu$ -молекул. Наши результаты представлены символами:  $\Delta$  - измерения [3] и  $\times$  - опыты [19]. Другие данные:  $\square$  - СПИЯФ,  $\bullet$  - ПСИ,  $\circ$  - Лос-Аламос. Линия - теоретическая зависимость.

Следующий цикл исследований процесса резонансного образования  $dd\mu$ -молекул был выполнен с использованием криогенных мишеней высокого давления (1,5 кбар). Актуальность измерений с дейтерием высокой плотности ( $\phi \approx 1$ ) определялась необходимостью проверки существования возможных эффектов плотности в резонансном образовании молекул  $dd\mu$ . Как оказалось, указанные эффекты доминируют при образовании  $dt\mu$ -молекул, и для их объяснения привлечены три эффекта (ширина резонанса, вклад тройных соударений и интенсивный перехват мюона на третий из возбужденных состояний  $d\mu$ -атома), однако согласия теории с опытом пока не достигнуто. Для дейтерия ожидается влияние

лишь одного фактора - ударного уширения резонанса, что существенно упрощает интерпретацию. Кроме того, для определения эффективности мюонного катализа реакции  $d+t$  в смеси  $D_2+T_2$  высокой плотности, т.е. в реальных условиях мезокаталитического реактора - возможного источника энергии - важно было найти непосредственно из опыта параметры сопутствующего процесса  $d+d$  катализа.

Схема установки представлена на рис. 4. Мюоны регистрируются детекторами 1,2 тормозятся замедлителем из полиэтилена, затем регистрируются детекторами 3,4 и попадают в мишень (М). Детектор 5 с пластическим скintиллятором цилиндрической формы, окружающим мишень, предназначен для регистрации мюонов (в канале регистрации остановок) и одновременно - для регистрации электронов от мю-распада. Его высокие спектрометрические свойства позволили - путем введения порога в канале регистрации электронов - дискриминировать регистрацию им нейтронов от мю-катализа и резко снизить фон за счет уменьшения случайной загрузки детектора.

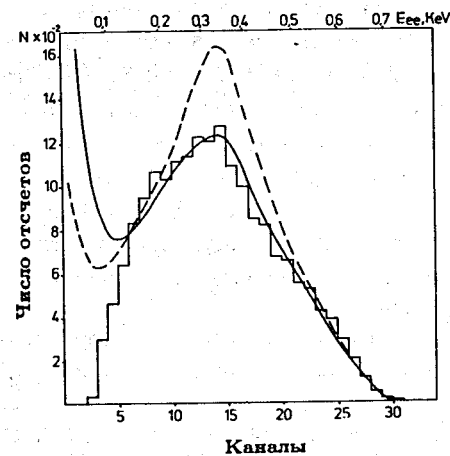


Рис.7. Аппаратурное распределение для нейтронов с энергией  $E_n = 2,5$  МэВ по реакции синтеза  $d+d$ , измеренное в экспозиции с жидким дейтерием. Сплошная линия - наши расчеты [17] для конкретных условий опытов [18], [19], штриховая линия - вычисления [17] для "голого" детектора (без учета дейтерия и стенок мишени).

Основу детектирующей системы составлял спектрометр нейтронов полного поглощения. На рис. 7 показан амплитудный спектр нейтронов из реакций (2,3), зарегистрированный спектрометром нейтронов в одной

из экспозиций с дейтерием высокой плотности. Компактная геометрия опыта (телесный угол детектора  $\Omega \approx 70\%$ ) имела своим преимуществом относительно малый вклад фона, обусловленного случайной загрузкой нейтронного спектрометра. В качестве триггера использовалось условие наличия сигналов от нейтронного (n) и электронного (e) детекторов в течение временных ворот 10 мкс, запускаемых сигналом остановки мюона. Параметры мю-катализа находились из анализа временных спектров нейтронов из реакций (2,3).

Целью первой серии опытов [18], [19] было измерение скорости образования  $dd\mu$ -молекул из нижнего состояния СТС  $d\mu$ -атома -  $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$ . Для этого достаточно было регистрировать только медленную ( $\approx 1$  мкс) компоненту спектра (9), амплитуда которой определяется "steady state" скоростью образования  $dd\mu$ -молекул -  $\lambda_{dd\mu}$ :

$$dN_n/dt = \epsilon_n \beta \phi \lambda_{dd\mu} \exp(-\lambda t), \quad (10)$$

где  $\lambda = \lambda_0 + \lambda_{dd\mu} \beta \phi (\epsilon_n + \omega_d - \epsilon_n \omega_d)$ . Переход от измеренного значения  $\lambda_{dd\mu}$  к величине  $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$  осуществлялся на основе анализа, проведенного автором в работе [17] (глава V диссертации). Измерения были выполнены с жидким дейтерием ( $\phi = 1, 2, T = 20$  K) и с газообразным дейтерием ( $\phi = 0, 367, 0, 884$ ) при  $T = 49, 74, 120$  и  $300$  K. Точность измерений составила 5-7%. В этих пределах значения  $\lambda_{dd\mu}(T)$ , найденные нами при двух значениях плотности, отличающихся в 2,4 раза, согласуются между собой во всем исследованном интервале температур. Результаты представлены на рис. 6 вместе с данными PSI ( $\phi = 0, 02$  и  $0, 04$ ) и СПИЯФ ( $\phi = 0, 1$ ). Можно видеть, что все они хорошо согласуются между собой и с вычислениями, выполненными на основе теории резонансного образования молекул  $dd\mu$ .

Среди параметров мю-катализа в дейтерии скорость образования  $dd\mu$ -молекул из состояния  $d\mu$ -атома со спином  $F = 3/2$  ( $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$ ) представляет особый интерес. Именно она крайне чувствительна к значению энергии уровня в системе  $dd\mu$ , и именно для нее ожидается проявление ударного уширения резонанса. Поэтому нами были предприняты специальные усилия для определения зависимости  $\lambda_{dd\mu}^{3/2}(T)$ . Методически это означало - надежно регистрировать быструю компоненту временного спектра (9). Путем оптимального применения критериев отбора событий нам удалось выделить указанную компоненту и с хорошей точностью (5% для низких температур) определить ее наклон [20] уже для данных измерений [18], [19]. Результатом последующего анализа проблемы было внесение необходимых изменений в постановку эксперимента, с которыми и были проведены специальные измерения [21]. Они были выполнены при температурах  $T = 22$  K ( $\phi = 1, 18$ ),  $T = 48, 80, 91, 105, 120$ , K ( $\phi = 0, 88$ ) и  $T = 162, 205$  K ( $\phi = 0, 50$ ). Пример временного распределения нейтро-

нов, измеренный в экспозиции с жидким дейтерием ( $T = 22$  K), показан на рис. 8. Можно видеть отчетливо выраженную двухкомпонентную структуру этого спектра в соответствии с его ожидаемым характером согласно формуле (9).

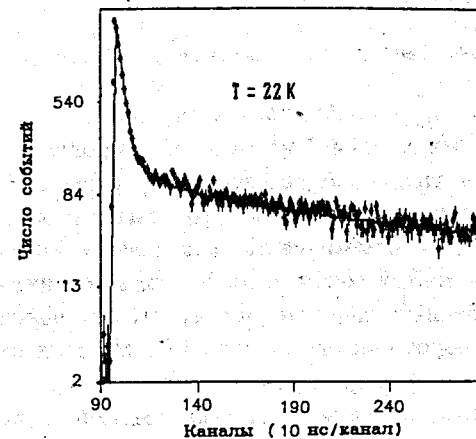


Рис.8. Временное распределение нейтронов из реакции синтеза  $d + d$ , измеренное в экспозиции с жидким дейтерием в опытах [21]. Линия - зависимость вида (9) с оптимальными параметрами, найденными из фита.

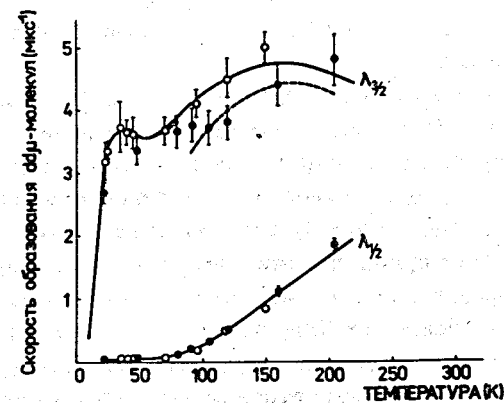


Рис.9. Результаты измерений величин  $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$  и  $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$  в зависимости от температуры дейтерия. Точки: ● - наши данные [21], ○ - измерения группы Вена-ПСИ.

Данные о величинах  $\lambda_{dd\mu}^{3/2}$  и  $\lambda_{dd\mu}^{1/2}$  были получены из анализа нейтрон-

ных временных спектров, проведенного в соответствии с нашей работой [17]. Результаты представлены на рис. 9 вместе с данными измерений группы Вена-ПСИ, выполненными при существенно меньших значениях плотности дейтерия ( $\phi = 0,02$  и  $\phi = 0,04$ ). Как видно из рисунка, для зависимости  $\lambda_{d\mu}^{1/2}(T)$  имеет место прекрасное совпадение этих двух наборов данных как между собой, так и теорией (Faifman M.P., Muon Catalyzed Fusion, 1988, v. 2, p. 247; Faifman M.P., Menshikov L.I., Strizh T.A. Muon Catalyzed Fusion, 1989, v. 4, p. 1.).

Для зависимости  $\lambda_{d\mu}^{3/2}(T)$  наблюдается некоторое расхождение наших данных с результатами группы Вена-ПСИ. Оно проявляется более отчетливо, если представить оба набора в виде отношений  $\lambda^{3/2}/\lambda^{1/2}$  и тем самым практически полностью исключить систематические погрешности. Однако, оба набора данных измерений - для малой и большой плотности удается согласовать между собой, если принять во внимание эффекты плотности, обусловленные ударным уширением резонанса. Результаты соответствующих теоретических оценок (Л.И. Меньшиков и М.П. Файфман) показаны на рис. 9 штриховой линией.

Из других результатов анализа отметим следующие два.

- 1) Из сравнения экспериментальных временных спектров с аппроксимирующей функцией, в которой варьировалась скорость реакции синтеза  $d+d$ , следует, что время жизни комплекса не превышает 1 нс.
- 2) Абсолютная калибровка нуля времени нейтронного детектора путем регистрации мезорентгеновского излучения из стенок мишени дала нам возможность оценить время термализации  $d\mu$ -атомов от начальной энергии  $E \approx 1$  eV до энергий  $E \approx 0,02 - 0,03$  эВ. Согласно нашим оценкам, это время не превышает 2 нс.

Седьмая глава посвящена изучению спиновых состояний мюонных атомов и молекул. Обосновано применение нетрадиционного метода - измерения поляризации отрицательных мюонов в водороде ( $P_\mu$ ). Его преимущество - возможность получения независимой информации о спиновых состояниях мю-атомов. Измерения поляризации мюонов в смесях изотопов водорода в принципе позволяет определить скорость перехвата мюона из возбужденных состояний мю-атомов от более легкого изотопа водорода к атому более тяжелого изотопа [23], что важно для решения проблемы заселенности основных состояний этих атомов (т.н. проблема  $q_{1s}$  в мю-катализе). Из оценок автора следует, что в смеси  $0,2 D_2 + 0,8 H_2$  при давлении смеси 80 бар за счет указанного процесса перехвата ожидается трехкратное увеличение поляризации по сравнению с ее "парциальным" значением  $0,2 P_\mu(D_2)$  (здесь  $P_\mu(D_2)$  - поляризация в дейтерии).

Величина  $P_\mu(D_2)$  была измерена нами в опытах [22] на фазотроне ОИЯИ с газовой мишенью, заполнявшейся дейтерием при давлении 10

бар. Мишень помещалась внутри магнита, создающего поле величиной 200 Oe, направленное по нормали к оси пучка мюонов. Для выделения остановок мюонов в газе использовалась спектрометрическая информация от двух полупроводниковых детекторов, расположенных внутри мишени (метод разработан группой МИФИ). Анализировались временные спектры электронов, регистрируемые сцинтилляционными детекторами, расположенными вокруг мишени. Как обычно в методе  $\mu SR$ , определялись амплитуда ( $a$ ) и частота прецессии ( $\omega$ ) спина мюона. На первом этапе анализа скорость деполаризации  $\gamma_d$  за счет спиновых соударений  $d\mu$ -атомов с дейтронами полагалась равной нулю. Результаты "частотного анализа" показаны на рис. 10. Можно видеть, что имеется отчетливо выраженный пик для величины эффективной амплитуды прецессии  $a$  при ожидаемом (для верхнего спинового состояния  $d\mu$ - атома) значении  $\omega = 5,1$  рад/мкс. Учет деполаризации приводит к значению  $a = (1,83 \pm 0,53)\%$ , что соответствует величине поляризации  $P_\mu(D_2) = (7,2 \pm 2,1)\%$ . Она согласуется с теоретическим значением  $P_\mu(D_2)^{теор} = 8 - 9\%$ .

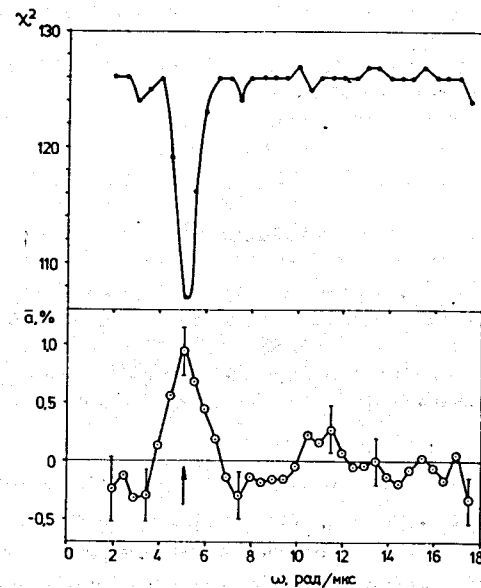


Рис.10. Оптимальные значения эффективной амплитуды прецессии ( $a$ ) и соответствующие значения величины  $\chi^2$  в зависимости от частоты прецессии.

Для скорости деполаризации получена оценка  $\gamma'_d = (4 \pm 2) \cdot 10^7$  с<sup>-1</sup>. Она находится в согласии с данными для скорости  $\gamma_d$ , переходов между состояниями СТС  $d\mu$ -атомов, найденными из анализа временных распределений нейтронов от реакций (2,3) синтеза  $d+d$ . Эти результаты приведены

на рис. 11. Из рисунка следует, что наши данные для плотности  $\phi \approx 1$  хорошо согласуются с результатами измерений группы Вена-ПСИ, выполненными при малой плотности дейтерия  $\phi = 0,02$  и  $0,04$ . В то же время экспериментальные данные плохо согласуются с вычислениями, учитывающими увеличение скорости переходов  $F_{d\mu} = 3/2 \rightarrow F_{d\mu} = 1/2$  за счет распада комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]$ . Причина этого расхождения пока не понятна.

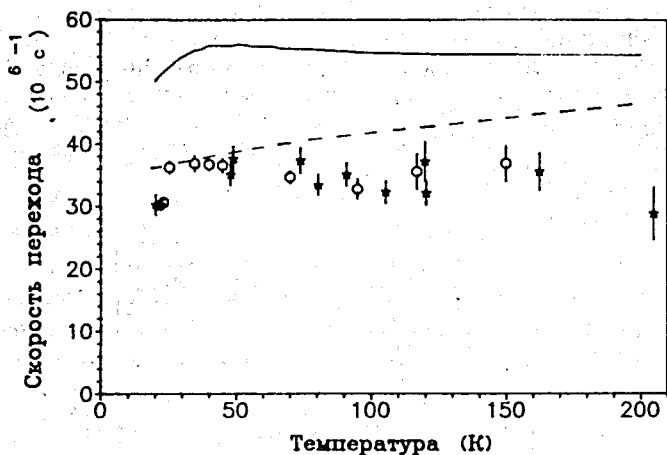


Рис.11. Значения скорости перехода между состояниями сверхтонкой структуры  $d\mu$ - атомов в зависимости от температуры дейтерия. Символы: ★ - наши измерения [20], [21], ○ - результаты группы Вена - ПСИ. Штриховая линия - расчеты для скорости указанных переходов в спин-обменных соударениях  $d\mu + d$ , сплошная линия - то же с учетом изменения спиновых состояний  $d\mu$ - атомов при обратном распаде комплекса  $[(dd\mu), d, 2e]$ .

В заключение главы автор проводит рассмотрение возможностей прецизионного определения энергии сверхтонкого расщепления в мюонных атомах и молекулах. Из нашей работы [24] следует, что высокая скорость спин-обменных соударений и доплеровское уширение линии являются факторами, принципиально ограничивающими указанные возможности. Мощность лазера, требуемая для заметного изменения населенностей состояний СТС мю-атомов оказывается на уровне предельно допустимой. Автор диссертации обратил внимание на то, что для мюонных молекул указанные ограничения практически отсутствуют - спиновые состояния мюонных молекул являются метастабильными, а доплеровская ширина уменьшается до размеров естественной ширины в соударениях

мезомолекулярных комплексов с молекулами водорода. Проведение соответствующих измерений важно не только для спектроскопии уровней мезомолекул, но и открыло бы новые возможности для изучения спиновой зависимости реакций  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$  и  $p + d \rightarrow n + \gamma$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально обнаружено и изучено явление резонансного образования мюонных молекул дейтерия. Это открытие явилось важным ключевым фактором - оно возродило вновь большой интерес к экспериментальным и теоретическим исследованиям по мюонному катализу.
2. Получен один из двух существующих в мире результатов по измерению скорости фундаментальной реакции слабого взаимодействия - мю-захвата протоном в газообразном водороде. Оба результата, полученные с помощью различных методов, согласуются с теорией, что позволяет сделать заключение о справедливости описания процесса мю-захвата в рамках V-A универсального слабого взаимодействия с соответствующим учетом индуцированных взаимодействий - псевдоскалярного и слабого магнетизма.
3. Впервые измерена температурная зависимость скоростей образования молекул  $dd\mu$  из различных состояний сверхтонкой структуры  $d\mu$ - атомов дейтерия с относительной плотностью  $\phi \approx 1$ . Полученные результаты согласуются с современными расчетами на основе резонансной теории, учитывающей ударное уширение резонанса, и подтверждают выполненные с учетом релятивистских поправок прецизионные вычисления энергии слабосвязанного уровня в системе  $dd\mu$ .
4. Впервые измерена температурная зависимость скорости перехода между состояниями сверхтонкой структуры  $d\mu$ - атомов в дейтерии высокой плотности ( $\phi \approx 1$ ). Результаты совпадают с данными измерений этой величины в дейтерии малой плотности и плохо согласуются с теорией, учитывающей изменение спинового состояния  $d\mu$ - атома не только в спин- обменных соударениях, но и при обратном распаде мезомолекулярного комплекса, содержащего молекулу  $dd\mu$ .
5. Развито новое направление исследований, связанное с измерением остаточной поляризации отрицательных мюонов в газообразном водороде, дейтерии и их смеси, и указано на его важность для изучения мю-захвата и мю- катализа. Проведены первые измерения остаточной поляризации мюонов в газообразном водороде и дейтерии при давлении 40 бар. Впервые зарегистрирована ненулевая поляризация отрицательных мюонов в газообразном дейтерии при давлении 10 бар.
6. Предложен резонансный метод измерения величины сверхтонкого расщепления в мюонных системах  $pp\mu$  и  $pd\mu$  и показана его принципиальная реализуемость, что открывает новые возможности для прецизионного определения релятивистских эффектов в связанной системе трех тел, а также для изучения спиновой зависимости скоростей реакций  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$  и  $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ .
7. Впервые реализован экспериментальный метод исследования процессов мюонного катализа, основанный на регистрации нейтронов с исполь-

зованием газовой мишени и сцинтилляционных детекторов. Метод нашел широкое применение в мировой практике.

8. Впервые реализован и использовался в ряде экспериментов сцинтилляционный спектрометр нейтронов "полного поглощения" с рекордными амплитудными характеристиками и эффективным нейтрон-гамма разделением.

9. Впервые предложен и реализован эффективный способ корректного извлечения параметров процесса множественного мюонного катализа из данных измерений выхода и временных распределений реакций катализа, регистрируемых с конечной эффективностью. Результат получил мировое признание и широко используется различными группами.

10. Впервые получены решения уравнений кинетики процесса мюонного катализа в дейтерии с учетом спиновых эффектов и конечной эффективности регистрации продуктов реакций катализа. Результаты использовались при изучении спиновых эффектов в резонансном образовании  $dd\mu$ -молекул и позволяют провести прецизионное сравнение экспериментальных данных с теорией.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

- [1] Весман Э.А., Герштейн С.С., Джелепов В.П., Ермолов П.Ф., Фильченков В.В. Бюллетень "Открытия и изобретения", 1988, N 46, с.3. Открытие N 349.
- [2] Джелепов В.П., Ермолов П.Ф., Москалев В.И., Фильченков В.В., Фриэл М. ЖЭТФ, 1966, т. 50, с. 1235.
- [3] Быстрицкий В.М., Джелепов В.П., Петрухин В.И., Руденко А.И., Суворов В.М., Сомов Л.Н., Фильченков В.В., Хованский Н.Н., Хоменко Б.А., Хорват Д. Резонансная зависимость скорости образования  $dd\mu$ -молекул в газообразном дейтерии. ЖЭТФ, 1979, т. 76, с. 460.
- [4] Быстрицкий В.М., Джелепов В.П., Ермолов П.Ф., Котова Л.И., Лепилов В.И., Оганесян К.О., Омеляненко М.О., Пороховой С.Ю., Руденко А.И., Фильченков В.В. Система с газовой мишенью для экспериментов с сверхчистым водородом. Сообщение ОИЯИ, 137246, Дубна, 1973.
- [5] Быстрицкий В.М., Джелепов В.П., Ермолов П.Ф., Оганесян К.О., Омеляненко М.О., Пороховой С.Ю., Руденко А.И., Фильченков В.В. Увеличение эффективности совпадений и антисовпадений при работе с сцинтилляторами  $CsJ(Tl)$ . ПТЭ, 1971, т.4, с.86.
- [6] Быстрицкий В.М., Джелепов В.П., Ермолов П.Ф., Оганесян К.О., Омеляненко М.О., Пороховой С.Ю., Руденко А.И., Фильченков В.В.

Многоканальная система регистрации нейтронов на линии с ЭВМ. ПТЭ, 1972, т.1, с.65.

- [7] Быстрицкий В.М., Джелепов В.П., Ермолов П.Ф., Оганесян К.О., Омеляненко М.О., Роганов В.С., Пороховой С.Ю., Руденко А.И., Фильченков В.В. Измерение скорости захвата мюонов в газообразном водороде. ЖЭТФ, 1974, т.66, с.43.
- [8] Зинов В.Г., Надежден В.С., Руденко А.И., Сомов Л.Н., Фильченков В.В. Высокоэффективная система регистрации нейтронов для экспериментов с мюонами. ПТЭ, 1982, т.1, с.26.
- [9] Зинов В.Г., Конин А.С., Фильченков В.В. Исследование параметров нейтронного детектора с жидким сцинтиллятором протяженных размеров. NIM, 1985, v. A245, p. 490.
- [10] Джелепов В.П., Зинов В.Г., Конин А.С., Руденко А.И., Соловьева Г.М., Фильченков В.В. Сцинтилляционный спектрометр нейтронов полного поглощения. NIM, 1988, v. A256, p. 634.
- [11] Конин А.С., Руденко А.И., Фильченков В.В. Параметры нейтронного спектрометра полного поглощения. NIM, 1990, v. A294, p. 504.
- [12] Зинов В.Г., Конин А.С., Марциш Д., Руденко А.И., Фильченков В.В. Временные измерения с нейтронным спектрометром полного поглощения. Сообщения ОИЯИ, 13-91182, Дубна, 1991.
- [13] Filchenkov V.V., Marczis I. Registration efficiency of a full absorption neutron spectrometer. Communications JINR, E13-88-566, Dubna, 1988.
- [14] Зинов В.Г., Сомов Л.Н., Фильченков В.В. Об определении параметров процесса множественного мюонного катализа. Препринт ОИЯИ, P15-82-566, Дубна, 1982. Ат. Энергия, 1984, т.58, с.190.
- [15] Зинов В.Г., Сомов Л.Н., Фильченков В.В. Об определении параметров процесса мюонного катализа из анализа экспериментальных временных распределений последовательно регистрируемых реакций синтеза. Препринт ОИЯИ, P15-83-853, Дубна, 1983. NIM, 1984, v.228, p.174.
- [16] Зинов В.Г., Сомов Л.Н., Фильченков В.В. Последовательно регистрируемые события процесса множественного мюонного катализа. Препринт ОИЯИ, P4-84-85, Дубна, 1984.
- [17] Filchenkov V.V. On the determination of the parameters of the MCF reaction  $d+d$ . Communications JINR, E1-89-57, Dubna, 1989.

- [18] Bystritsky V.M., Dzhelepov V.P., Filchenkov V.V., Gilev A.I., Granovsky V.B., Han Don Ir, Illieva-Sokolina N., Konin A.D., Marcis L., Merkulov D.G., Rudenko A.I., Selikov A.B., Somov L.N., Stolupin V.A., Zinov V.G.  
The measurement of the  $dd\mu$ -molecule formation rate at high deuterium pressures (1.5 - 0.4 kbar). Muon Catalyzed Fusion Symposium, Sanibel Island, Florida, 1988. Proceedings / Eds S.E. Jones, H.J. Monkhorst. AIP Conf. Proc., 1989, No. 181, p. 17.
- [19] Bystritsky V.M., Dzhelepov V.P., Zinov V.G., Illieva-Sokolina N., Konin A.D., Marcis L., Merkulov D.G., Marczis L., Merkulov D.G., Rudenko A.I., Somov L.N., Stolupin V.A., Filchenkov V.V., Han Don Ir.  
Measurement of the temperature dependence of the  $dd\mu$ -molecule formation rate in gaseous deuterium at pressures of 1.5 and 0.4 kbar. Preprint JINR E1-90-322, Dubna, 1990. Muon Catalyzed Fusion, 1991, v. 5/6, p. 141.
- [20] Filchenkov V.V., Marcis L.  
The possibilities of the experimental investigations of the spin effects in the  $dd\mu$ -molecule formation at the deuterium pressure 1.5 kbar. The first results. Preprint JINR E1-90-321, Dubna, 1990. Muon Catalyzed Fusion, 1991, v. 5/6, p. 499.
- [21] Джелепов В.П., Зинов В.Г., Ивановский С.А., Карпов С.Б., Конин А.Д., Мальшев А.И., Марциш Л., Меркулов Д.Г., Руденко А.И., Фильченков В.В., Юрин О.А.  
Экспериментальное исследование спиновых эффектов в резонансном образовании мюонных молекул дейтерия. Письма в ЖЭТФ, 1991, т. 53, с. 581.  
Джелепов В.П., Зинов В.Г., Ивановский С.А., Карпов С.Б., Конин А.Д., Мальшев А.И., Марциш Л., Меркулов Д.Г., Руденко А.И., Фильченков В.В., Юрин О.А.  
Измерение температурной зависимости скорости образования молекул  $dd\mu$  из различных спиновых состояний  $d\mu$ -атома при высокой плотности дейтерия. ЖЭТФ, 1992, т. 101, с. 1105.
- [22] Бинько Г.Ф., Гребенев В.Н., Гуров Ю.Б., Джелепов В.П., Добрецов Ю.П., Зинов В.Г., Кириллов-Угрюмов В.Г., Малолетнев А.А., Микаэлян Ф.Л., Пичугин А.П., Фильченков В.В., Халько Н.Н.  
Измерение остаточной поляризации отрицательных мюонов в газообразном дейтерии при давлении 10 атм. Письма в ЖЭТФ, 1989, т. 49, с. 476.
- [23] Filchenkov V.V.  
On the possibility of obtaining some MCF process parameters by means of the measurements of the negative muon polarization in hydrogen. Contribution A21 to the 12-th Int. Conf. on Few Body Problem, Vancouver, 1989.
- [24] Смильга В.П., Фильченков В.В.  
Экспериментальные возможности прецизионных измерений энергии сверхтонкого расщепления в мюонных атомах и молекулах. ЖЭТФ, 1983, т.85, с. 124.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 ноября 1992 года.