

Б-955

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1 - 10766

БЫСТРИЦКИЙ
Вячеслав Михайлович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕКОТОРЫХ МЕЗОАТОМНЫХ
И МЕЗОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗООБРАЗНОМ ВОДОРОДЕ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна)

Научные руководители: член-корреспондент АН СССР
профессор В. П. ДЖЕЛЕПОВ,
кандидат физико-математических наук
В. В. ФИЛЬЧЕНКОВ.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
А. И. МУХИН,
доктор физико-математических наук
В. Б. БЕЛЯЕВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, г. Москва.

Автореферат разослан " " _____ 1977 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1977 года
в " " часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных
проблем ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного
института ядерных исследований.

Ученый секретарь совета
кандидат физико-математических наук

И. А. БАТУСОВ

Исследование мезоатомных и мезомолекулярных процессов, а также ядерных реакций синтеза в "холодном" водороде представляет в настоящее время самостоятельный раздел физики мюонов. Повышенный интерес к изучению таких процессов связан в основном с двумя обстоятельствами: во-первых, с необходимостью иметь о них сведения для корректной постановки экспериментов и интерпретации данных по ядерному захвату мюонов протонами (дейтронами) и, во-вторых, с экспериментальным открытием группой Альвареса (L.W. Alvarez, N. Brander et al. Phys. Rev., 105, 1127 (1957)) интересного явления - катализа мюонами ядерных реакций синтеза изотопов водорода. Последний эффект был ранее предсказан теоретически на основе своеобразной картины поведения отрицательно заряженных мюонов малой энергии в водороде (Я. Б. Зельдович. ДАН, 95, 493 (1954)). Мюоны, попадая в водород, испытывают потери энергии на ионизацию и захватываются на высоковозбужденные квантовые орбиты $p\mu$ -атома. В результате деэвозбуждения $p\mu$ -атома мюон оказывается на K -орбите за время, гораздо меньшее его времени жизни ($\sim 10^{-12}$ с в чистом водороде). Мезоатомами $p\mu$, благодаря малым размерам и электронейтральности, проникают через электронную оболочку других атомов и приближаются к их ядрам на расстояния порядка мезоатомной единицы длины $a_\mu = 2,56 \cdot 10^{-11}$ см.

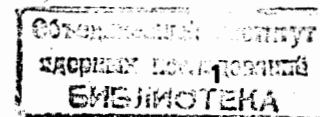
Такое сближение сопровождается целым рядом мезоатомных и мезомолекулярных процессов (S.S. Gershtein, L.I. Ponomarev. MUON PHYSICS, V. III, Chemistry and Solids, Academic Press, N.-Y., 1975, p. 141.):

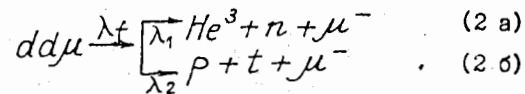
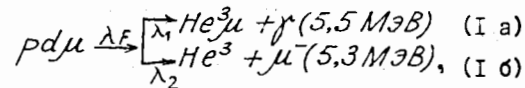
а/ упругими столкновениями мезоатомов водорода с протонами и дейтронами ($p\mu + p, p\mu + d, d\mu + p, d\mu + d$ и т.д.);
б/ переходом мюонов от легких изотопов водорода к тяжелым;
в/ перехватом мюонов от изотопов водорода к ядрам других элементов с зарядом $Z > 1$;

г/ переходами между уровнями сверхтонкой структуры $p\mu$ - и $d\mu$ - атомов при столкновении их с протонами или дейтронами (переходы $F = 1 \rightarrow F = 0$ для $p\mu$ - атомов и $F = 3/2 \rightarrow F = 1/2$ для $d\mu$ - атомов, F - полный момент мезоатома);

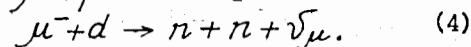
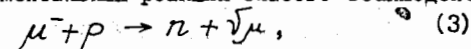
д/ образованием мюонных молекул $p\mu\mu, p\mu d, dd\mu$ при столкновениях мезоатомов с ядрами молекул водорода.

В мезомолекулах водорода возможны подбарьерные ядерные реакции слияния изотопов водорода, входящих в состав мюонной молекулы:





Таким образом, картина мезоатомных и мезомолекулярных явлений представляет собой многоступенчатую и разветвленную цепь процессов, количественные данные о которых крайне важно иметь при изучении фундаментальных реакций слабого взаимодействия:



Мезоатомные и мезомолекулярные процессы могут существенно изменить вероятность ядерного захвата мюона. В частности, при полном переходе $p\mu(F=1) \rightarrow p\mu(F=0)$ скорость процесса (3) возрастает примерно в 4 раза по сравнению со случаем, когда состояния $F=1$ и $F=0$ заполнены статистически, а переход $d\mu(3/2) \rightarrow d\mu(1/2)$ приводит к увеличению в 3 раза скорости процесса (4) по сравнению со случаем статистической заселенности состояний сверхтонкой структуры $d\mu$ -атома. Кроме того, отмеченные мезоатомные процессы являются источниками нейтронного фона по отношению к исследуемым реакциям (3) и (4). Такими источниками в случае реакции (3) является μ^- -захват в $p\mu$ -молекуле со скоростью, отличной от скорости μ^- -захвата в изолированном $p\mu$ -атоме, а в случае реакции (4) — μ^- -захват протоном или дейтроном в $rd\mu$ -молекуле, реакция ядерного синтеза (2 а) в $dd\mu$ -молекуле, μ^- -захват в системе $\text{He}^3\mu$, образующейся в реакции синтеза (1 а).

Для правильной интерпретации экспериментов (3) и (4) необходимо знать следующие величины: 1) скорость перехода $p\mu$ - и $d\mu$ -атомов между состояниями сверхтонкой структуры, с целью определения характера заселенности спиновых состояний $p\mu$ - и $d\mu$ -атомов в момент ядерного захвата; 2) скорости образования $p\mu$ -, $rd\mu$ -, $dd\mu$ -молекул; 3) скорости перехвата мюона с протона (дейтрона) к ядрам с $Z > 1$; 4) скорости ядерного синтеза в $rd\mu$ -, $dd\mu$ -молекулах.

С теоретической точки зрения интерес к таким процессам обусловлен тем обстоятельством, что в столкновениях мезоатомов в чистом виде реализуется квантово-механическая задача трех тел, взаимодействующих по закону Кулона.

Своеобразие и богатство мезоатомных и мезомолекулярных процессов и проблемы, связанные с захватом мюона протоном (дейтроном), инициировали большое количество теоретических и экспериментальных работ.

Переходя к описанию экспериментальных работ и полученным результатам, отметим, что большинство этих работ было выполнено с жидким водородом.

Значения величины $\lambda_{pp\mu}$ скорости образования $p\mu$ -молекул, полученные с жидким водородом ($(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — E. Bleser, E.W. Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); $(2,55 \pm 0,18) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — G. Conforto, C. Rubbia et al. Nuovo Cim., 33, 1001 (1964))

и с газообразным водородом ($(1,5 \pm 0,6) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов и др. Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, т. I, 878, 1964, М., Атомиздат, 1966.); $(2,74 \pm 0,25) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — Ю.Г. Будяшов, П.Ф. Ермолов и др. Препринт ОИЯИ, Р15-3964, Дубна (1968)), различаются между собой в пределах до двух статистических ошибок. Во-первых, такая ситуация не позволяет сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии зависимости скорости образования $p\mu$ -молекул от температуры среды, что весьма важно для проверки расчетных значений $\lambda_{pp\mu}$. Во-вторых, точное знание этой величины в газе позволит уменьшить неопределенность при анализе данных опытов по определению скоростей захвата мюона протоном или дейтроном (реакции (3) и (4)).

Что касается образования $rd\mu$ -молекулы, то прямых измерений $\lambda_{rd\mu}$ скорости этого процесса в газе выполнено не было, а результаты экспериментов, проведенных с жидким водородом ($(5,8 \pm 0,3) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — E. Bleser, E.W. Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); $(6,82 \pm 0,25) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — G. Conforto, C. Rubbia et al. Nuovo Cim., 33, 1001 (1964)), различаются между собой более чем на три статистических ошибки и не согласуются с расчетными значениями ($1,3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — Я.Б. Зельдович, С.С. Герштейн. УФН, 71, 581 (1960); $3,0 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — S. Cohen, D.L. Judd et al., Phys. Rev., 119, 397 (1960)). В то же время знание этой величины (как и в случае $p\mu$ -молекул) крайне необходимо для анализа экспериментальных данных опыта (4) и для установления зависимости $\lambda_{rd\mu}$ от энергии $d\mu$ -атома. Кроме того, суммарная скорость реакции синтеза λ_F в $rd\mu$ -молекуле найдена лишь в одной работе

$(0,305 \pm 0,01) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ - E. Blezer, E.W. Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963) с использованием при обработке экспериментального материала гипотезы о статистическом характере заселенности спиновых состояний $d\mu$ -системы в момент образования $pd\mu$ -молекулы.

Скорость образования $dd\mu$ -молекулы ($\lambda_{dd\mu}$), измеренная с помощью пузырьковых камер $((0,076 \pm 0,015) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ - J.G. Fetkovich et al. Phys. Rev. Lett., 4, 570 (1960) ; $(0,103 \pm 0,004) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ - J.N. Doede. Phys. Rev., 132, 1782 (1963) ; $T \approx 35^\circ \text{K}$), почти на порядок меньше соответствующей величины, полученной с использованием диффузионной камеры $((0,75 \pm 0,11) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ - В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов и др. ЖЭТФ, 50, 1235 (1966); $T \approx 240^\circ \text{K}$). Такое различие в значениях $\lambda_{dd\mu}$ может свидетельствовать о зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекулы от температуры среды. Для объяснения столь резкого различия в экспериментальных значениях $\lambda_{dd\mu}$ в работе (Э.А. Бесман. Препринт ОИЯИ, Р-3256, Дубна (1967)) было высказано предположение о существовании резонансного по энергии $d\mu$ -атома механизма образования $dd\mu$ -молекулы. Однако небольшой набор экспериментальных данных не позволяет однозначно ответить на вопрос о справедливости этой модели. В свете этого целесообразны новые эксперименты по определению $\lambda_{dd\mu}$ при различных температурных условиях и с использованием методики, обеспечивающей одновременное измерение как выхода, так и вида временного распределения нейтронов от реакции синтеза (2 а), что позволит найти не только $\lambda_{dd\mu}$, но и скорость синтеза в $dd\mu$ -молекуле.

Анализируя вопрос о характере заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атома в момент ядерного захвата мюона дейтроном, заметим, что до последнего времени прямые измерения λ_d -скорости перехода $d\mu(3/2) \rightarrow d\mu(1/2)$ не были выполнены, а имелись только два расчетных значения скорости процесса $d\mu(3/2) + d \rightarrow d\mu(1/2) + d$, которые различаются между собой на порядок. Результаты экспериментов (E. Blezer, E.W. Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963) ; I.-T. Wang et al. Phys. Rev., 139, 1528 (1965); A. Placchi et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973)) неоднозначны и свидетельствуют о существенно различном характере заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атома в момент μ -захвата. Для выяснения этого вопроса необходимо проведение дополнительных экспериментов по измерению λ_d в газообразном водороде с примесью дейтерия.

Целью исследований, обобщенных в диссертации, являлось:

а) определение прямым методом и с более высокой точностью некоторых уже ранее измерявшихся основных мезомолекулярных констант, таких как $\lambda_{pp\mu}$, $\lambda_{pd\mu}$, $\lambda_{dd\mu}$ при нормальной температуре ($T = 300^\circ \text{K}$);

б) измерение ряда неизрестных, также важных характеристик мезоатомных и мезомолекулярных процессов: скоростей реакций синтеза в $pd\mu$ -и $dd\mu$ -молекулах, заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атомов в момент ядерного захвата мюона дейтроном и др. В связи с этим на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ с 1971 года по 1976 год был выполнен цикл исследований в газообразном водороде, ставивший своей целью:

а) прямое измерение скоростей образования $pp\mu$ - и $pd\mu$ -молекул и скорости синтеза в мезомолекуле $pd\mu$;

б) определение характера заселенности спиновых состояний $pd\mu$ -молекулы и измерение λ_d -скорости перехода $d\mu$ -атома из состояния с суммарным спином $F = 3/2$ в нижнее состояние $F = 1/2$;

в) измерение $\lambda_{dd\mu}$ -скорости образования $dd\mu$ -молекулы при $T = 300^\circ \text{K}$ с помощью электронной методики для проверки существования зависимости $\lambda_{dd\mu}$ от температуры среды. Напомним, что прежние данные были получены на основании измеренных выходов реакций (2 а, 2 б) и предположения $\lambda_f \gg \lambda_0$ (λ_0 - скорость распада свободного мюона);

г) получение непосредственной информации о скорости реакции синтеза λ_f в мезомолекуле $dd\mu$ путем измерения выхода и вида временного распределения нейтронов от реакции (2 а). Полученные экспериментальные данные позволили провести достаточно широкое сравнение с имеющимися теоретическими расчетами.

Результаты исследований и их анализ излагаются в диссертации, состоящей из пяти глав.

В первой главе описывается созданная нами экспериментальная аппаратура, которая использовалась при проведении экспериментов. Она включает в себя: а) установку для получения сверхчистого газообразного водорода при давлении до 50 атм¹; б) систему вакуумирования и заполнения мишени (с внутренними скintилляторами из CsI (Tl)) водородом ^{1/2}; в) регистрирующую аппаратуру ^{1/3,4}.

При исследовании мезоатомных и молекулярных процессов в водороде предъявляются очень высокие требования к чистоте водорода

(концентрация примесей с $Z > 1$ не более 10^{-7} объемных долей при изучении мезомолекулярных процессов и не более 10^{-8} объемных долей при изучении μ -захвата протоном (дейтроном)). Для получения водорода (изотопов водорода) указанной чистоты нами была создана установка диффузионной очистки^{/1/} (палладиевый фильтр), работа которой основана на большой проницаемости палладия и его сплавов по отношению к водороду.

Достоинством установки диффузионной очистки является ее компактность, простота в эксплуатации и возможность получения сверхчистого водорода под давлением до 50 атм без использования компримирующих устройств. Средние величины производительности установки в интервале давлений 0 - 50 атм, при температурах на палладиевом фильтре 280°C и 120°C, составляли 0,72 л·атм/мин и 0,148 л·атм/мин. Анализ водорода после очистки показали, что суммарное содержание примесей с $Z > 1$ в водороде порядка 10^{-8} объемных долей.

Водород с выхода установки диффузионной очистки через систему вакуумирования и заполнения мишени водородом^{/2/} поступал в газеую мишень, которая представляла собой сосуд из нержавеющей стали с расположенными внутри сцинтилляторами CsI(Tl): один в виде стакана длиной 205 мм и диаметром 130 мм (счетчик 5), другой в виде тонкого диска толщиной 250 мкм (счетчик 4) и диаметром 120 мм.

На рис. 1 схематически изображена основная часть экспериментальной установки - мишень и детекторы. Для уменьшения фона установка была размещена в специально созданной лаборатории и окружена водяной защитой. Все эксперименты проводились на мюонном пучке с импульсом $P = 130$ МаВ/с и интенсивностью $I = 2 \cdot 10^4$ I/с. В зависимости от цели опыта вокруг мишени располагались либо девять e^- детекторов с кристаллами стибьена ($C_{14}H_{12}$) диаметром 70 мм и толщиной 30 мм для регистрации нейтронов и электронов от распада мюонов (эксперимент по измерению $\lambda_{dd\mu}$ и λ_f в мезомолекуле $dd\mu$), либо четыре e^- детектора и два γ -детектора с кристаллами NaI(Tl) размерами 150x100 мм² для регистрации мезорентгеновского излучения Хе μ -атомов и электронов от распада мюонов (эксперименты по измерению $\lambda_{pp\mu}$, $\lambda_{pd\mu}$, λ_d , λ_f).

В главе II описывается программа, созданная для вычисления эффективностей регистрации нейтронов (ϵ_n) от реакций (2 а), (3) и электронов (ϵ_e) от распада мюонов нашей экспериментальной уста-

новкой^{/5/} (регистрация нейтронов и электронов осуществлялась с помощью девяти e^- детекторов).

Знание величины ϵ_n необходимо для определения абсолютного выхода нейтронов в наших опытах^{/6,7/}, а ϵ_e - для определения числа остановок мюонов в мишени, заполненной водородом либо смесью изотопов водорода. Задача об определении эффективностей регистрации нейтронов в условиях плохой геометрии установки (протяженные размеры мишени) решалась путем численного моделирования с помощью метода Монте-Карло. Расчеты производились на ЭМ БЭСМ-6. Последовательность расчетов состояла из следующих этапов: 1) моделирование точки остановки мюона в мишени и угла вылета нейтрона (электрона); 2) моделирование взаимодействия нейтрона (электрона) с веществом внутренних сцинтилляторов и стенок мишени; 3) моделирование взаимодействий нейтрона (электрона) в стибьене и построение амплитудных распределений событий, зарегистрированных e^- детекторами. Окончательные значения эффективностей ре-

гистрации нейтронов и электронов экспериментальной установкой составили:
 $\epsilon_n = 0,0462 \pm 0,0009$ (реакция (3));
 $\epsilon_n = 0,0679 \pm 0,0017$ (реакция (2 а));
 $\epsilon_e = 0,1782 \pm 0,0033$.

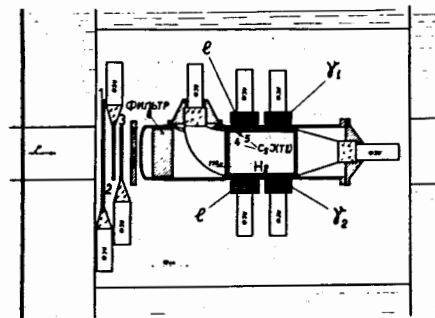


Рис. 1

Схема экспериментальной установки (газовая мишень и детекторы).

Глава III посвящена описанию эксперимента^{/6/} по измерению $\lambda_{dd\mu}$ - скорости образования $dd\mu$ -молекулы и λ_f - скорости синтеза в ней в газообразном дейтерии при $T = 300^\circ K$. Метод определения величин $\lambda_{dd\mu}$ и λ_f был основан на измерении выхода и временного распределения нейтронов от реакции (2 а) и последующем анализе его путем аппроксимации выражением, являющимся функцией указанных величин. Работа выполнялась на пучке мюонов с использованием газовой мишени, заполненной сверхчистым дейтерием ($C_Z < 10^{-8}$ объемных долей) до давления 41 атм. Мюоны после прохождения счетчиков 1, 2, 3 (см. рис. 1) тормозились фильтром 6 и

попадали в объем газовой мишени. Методы выделения остановок мюонов с помощью сцинтилляторов из $CsJ(Tl)$, находящихся внутри мишени (счетчики 4,5), рассмотрены в работе /4/. На рис. 2 представлена блок-схема электронной аппаратуры. Импульс остановки мюона (2345) запускал "ворота" длительностью 4 мкс, в течение которых анализировались события, зарегистрированные е-детекторами. Многоканальная система регистрации нейтронов описана в работе /3/.

Блок выделения компонент осуществлял разделение нейтронов и γ -квантов по форме сцинтилляционного импульса в стильбене. В результате разделения на выходе БЭК появлялись два импульса: амплитуда одного пропорциональна площади "быстрой" компоненты ("БК"), а амплитуда другого - полной площади светового импульса ("Е"). Блок сумматора и номера детектора вырабатывал также два импульса: один логический (е), другой - аналоговый. Логический сигнал (е) свидетельствовал о том, что в одном из е-детекторов зарегистрировано событие, а амплитуда аналогового импульса соответствовала номеру данного детектора ("Н"). Время появления сигнала с е-детектора ("Т") относительно момента остановки мюона измерялось с помощью время-амплитудного преобразователя $T \rightarrow A$. Электронная логика производила отбор событий, зарегистрированных е-детекторами, согласно критериям.

Аналоговые сигналы ("БК", "Е", "Т"), соответствующие отобранному событию, поступали на вход блока многомерного анализа (БМАА), выполненного на основе анализатора АИ-4096. После заполнения 4096 ячеек памяти анализатора числовой массив передавался на ЭВМ "Минск-22" с записью на магнитную ленту и частичной его обработкой. Число остановок мюонов в дейтерии определялось путем измерения выхода электронов от распада мюонов в течение временных "ворот" и использования ранее найденного нами расчетного значения эффективности регистрации электронов. Фон случайных совпадений был измерен в опыте с вакуумированной мишенью и его вклад оказался равным 15%.

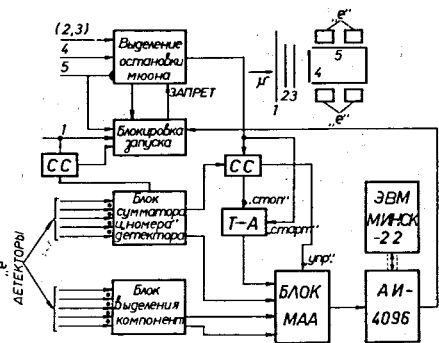


Рис. 2

Экспериментальное временное распределение нейтронов приведено на рис. 3. При анализе временного распределения нейтронов использовались: число мюонных остановок $N_{\mu} = (3,12 \pm 0,10) \cdot 10^6$; число нейтронных событий, зарегистрированных е-детекторами $N_n = 1148 \pm 34$; эффективность регистрации нейтронов $\epsilon_n = (1,430 \pm 0,088) \cdot 10^{-2}$; временное распределение фона случайных совпадений, измеренное в опыте с вакуумированной мишенью.

Для определения величин $\lambda_{dd\mu}$ и λ_f это распределение фитировалось с помощью выражения:

$$\frac{dN_n}{dt} = Af(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f, t) + c, \text{ где } f(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f, t) = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{dd\mu} \cdot \lambda_f \cdot \frac{e^{-(\lambda_0 + \lambda_{dd\mu})t} - e^{-(\lambda_0 + \lambda_f)t}}{\lambda_f - \lambda_{dd\mu}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{dd\mu} \lambda_f t}{\lambda_f - \lambda_{dd\mu}}\right),$$
 где $A = N_{\mu} \epsilon_n$, c - уровень фона случайных совпадений. В результате обработки получены следующие значения величин: $\lambda_{dd\mu} = (0,73 \pm 0,07) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\lambda_f > 1,8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ (на уровне 90% достоверности). ($\rho_D = 4,22 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$).

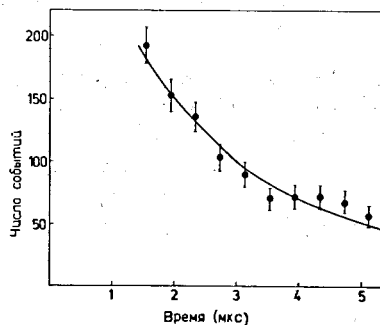


Рис. 3

Временное распределение нейтронов, измеренное в экспозициях с дейтерием. По оси абсцисс отложено время относительно момента остановки мюона, по оси ординат - число событий в интервале 0,5 мкс. Линия соответствует зависимости (5) с найденным значением $\lambda_{dd\mu}$. Существенно превосходит скорость распада мюона и свидетельствует в пользу справедливости теоретических оценок, дающих для λ_f большое значение $\approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$ (Э.А.Весман. Препринт ОИЯИ, Р-3256, Дубна (1967)).

Сравнение полученных данных с результатами работ (J.G.Petkovich et al. Phys.Rev.Lett., 4, 570(1960); J.H.Doede, Phys. Rev., 132, 1782 (1963)) подтверждает наличие зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекулы от температуры среды. В то же время эти результаты при рассмотрении в совокупности с данными работы (В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов и др. ЖЭТФ, 50, 1235 (1966)) не противоречат предположению существования резонансного механизма образования $dd\mu$ -молекулы. Найденное нижнее граничное значение величины λ_f показывает, что скорость ядерной реакции в $dd\mu$ -молекуле существенно превосходит скорость распада мюона и свидетельствует в пользу справедливости теоретических оценок, дающих для λ_f большое значение $\approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$ (Э.А.Весман. Препринт ОИЯИ, Р-3256, Дубна (1967)).

В главе IV описывается эксперимент ^{18/}, целью которого являлось прямое измерение скоростей образования $pp\mu$ - и $pd\mu$ -молекул в газообразном водороде. В процессе эксперимента было получено также отношение скоростей перехвата мюона с протона и дейтрона на ксенон. В работе был применен метод измерения, в основе которого лежат использование смеси водорода с малой примесью газа $Z > 1$ (в нашем случае был взят ксенон с атомарной концентрацией $\sim 10^{-5}$). Временные распределения γ -квантов мезорентгеновского излучения $Z\mu$ -атомов (возникшего в результате перехвата мюона с протона (дейтрона) к ядрам ксенона) и электронов от распада мюонов можно записать единым образом для смеси $H_2 + Xe$ (опыт по определению $\lambda_{pp\mu}$) и $H_2 + D_2 + Xe$ (опыт по определению $\lambda_{pd\mu}$):

$$\frac{dn_{\gamma}}{dt} = \lambda_{xe} e^{-\lambda_s t} \quad (6)$$

$$\frac{dne}{dt} = (\lambda_0 - \frac{\lambda_0' \lambda_{xe}}{\lambda_s - \lambda_0' - \lambda_{xe}^{cap}} - \frac{\lambda_0 \lambda_x}{\lambda_s - \lambda_0}) e^{-\lambda_s t} + \frac{\lambda_0 \lambda_x}{\lambda_s - \lambda_0} e^{-\lambda_0 t} \quad (7)$$

Здесь для смеси $H_2 + Xe$ $\lambda_s = \lambda_0 + \varphi \lambda_{pp\mu} (1 - C_D) + \varphi C_{Xe} \lambda_{xe} + \varphi C_D \lambda_{pd}$;
 $\lambda_x = \lambda_{pp\mu}$, $\lambda_{xe} = \lambda_{xe}^p$, а для смеси $H_2 + Xe + D_2$

$\lambda_s = \lambda_0 + \varphi (1 - C_D) \lambda_{pd\mu} + \varphi C_D \lambda_{dd\mu} + \varphi C_{Xe} \lambda_{xe}$, $\lambda_x = \lambda_{pd\mu}$, $\lambda_{xe} = \lambda_{xe}^d$;
 λ_{xe}^p , λ_{pd} - скорость перехвата мюона с протона (дейтрона) к ядрам Xe, λ_{pd} - скорость перехвата мюона с протона на дейтрон;

C_{Xe} , C_D - атомарные концентрации ксенона и дейтерия соответственно;

φ - отношение плотности газа к плотности жидкого водорода;

λ_{xe}^{cap} - скорость захвата мюона ядром ксенона; λ_0' - скорость распада мюона на орбите $Xe\mu$ -атома.

Анализ экспериментальных временных распределений с помощью выражений типа (6) и (7) с целью определения параметров указанных экспонент дает возможность найти искомые величины λ_x , λ_{xe} .

Пучок мюонов, газовая мишень, система очистки водорода и методы выделения остановок мюонов в объеме мишени были теми же, что и в опытах по измерению скорости образования $dd\mu$ -молекул ^{16/}. Регистрация γ -квантов мезорентгеновского излучения $Xe\mu$ -атомов и электронов от распада мюонов осуществлялась двумя детекторами (γ_1 , γ_2) и четырьмя счетчиками ($e_1 \div e_4$).

Преобразованная в цифровой код амплитудно-временная информация о событии, зарегистрированном γ -или e -детектором, вместе с содержимым регистра логических признаков передавалась в ЭЕМ НР-2116.

На пучке мюонов было проведено четыре экспозиции. Условия опытов приведены в таблице I.

Во всех четырех опытах проводилось измерение временных спектров событий, зарегистрированных γ - и e -детекторами в совпадениях и антисовпадениях с сигналом от детектора 5 (спектры $e+5$, $e-5$, $\gamma+5$, $\gamma-5$). Кроме того, измерялись также амплитудные распределения импульсов от детекторов $Na\text{I}(Tl)$. Характерные временные распределения событий, зарегистрированных в опыте $H_2 + Xe$, приведены на рис. 4. Для нахождения величин $\lambda_{pp\mu}$, $\lambda_{pd\mu}$, $B = \frac{\lambda_{xe}^d}{\lambda_{xe}^p}$ были проанализированы по методу наименьших квадратов временные распределения событий, зарегистрированных γ - и e -детекторами в экспозициях "I", "II", "III".

Таблица I.

Экспозиция	Наполнение мишени	Давление смеси газов в мишени при $t = 20^\circ C$	Концентрация ксенона (C_{Xe})	Концентрация дейтерия (C_D)
"I"	H_2	40 атм	-	$< 10^{-6}$
"II"	$H_2 + Xe$	40 атм	$\approx 3 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-6}$
"III"	$H_2 + Xe + D_2$	43 атм	$\approx 3 \cdot 10^{-5}$	$\approx 0,07$
"IV"	вакуум	10^{-5} атм	-	-

Фоновые распределения, полученные в опыте "IV" и приведенные к условиям соответствующей экспозиции, вычитались поканально. Максимальный вклад фона не превышал 3%. В результате обработки экспериментальных данных найдены следующие значения величин $\lambda_{pp\mu}$,

$$\lambda_{pd\mu} \text{ и } B: \quad \lambda_{pp\mu} = (2,34 \pm 0,17) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$$\lambda_{pd\mu} = (5,53 \pm 0,16) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$$B = \frac{\lambda_{xe}^d}{\lambda_{xe}^p} = 1,62 \pm 0,05.$$

Полученное нами значение $\lambda_{pp\mu}$ скорости образования $pp\mu$ -молекулы хорошо согласуется с экспериментальными данными (E.Bleser, E.W.Anderson et al. Phys. Rev., **132**, 2679 (1963); G.Conforto, S.Rubbia et al. Nuovo Cim., **33**, 1001 (1964); В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов и др. Труды XIII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, т.1, 878, 1964, М., Атомиздат, 1966; Ю.Г.Будяшов, П.Ф.Ермолов и др. Препринт ОИЯИ, Р 15-3964, Дубна (1968)) и с результатами (Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн. УФН, **71**, 581 (1960); Л.И.Пономарев, М.П.Файфман. ЭТФ, **71**, 1689 (1976)), а значение $\lambda_{pd\mu}$ совпадает с данными работы

(E.Bleser, E.W.Anderson et al. Phys. Rev., **132**, 2679

(1963)) и вычислениями (Л.И.Пономарев, М.П.Файнман. ЖЭТФ, 71, 1689 (1976)). Сопоставление данных измерений величин $\lambda_{pp\mu}$ и $\lambda_{pd\mu}$, выполненных в различных экспериментальных условиях, позволяет сделать заключение, что скорости образования мезомолекул $pp\mu$ и $pd\mu$ в жидком и газообразном водороде не различаются, т.е. отсутствует зависимость скоростей образования $pp\mu$ - и $pd\mu$ -молекул от энергии $p\mu$ ($d\mu$) - атома.

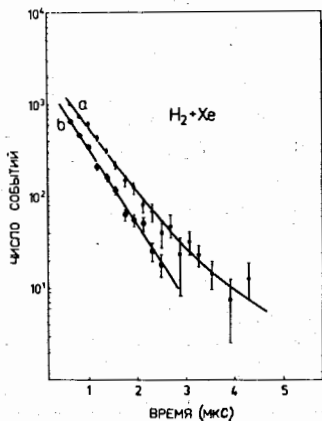
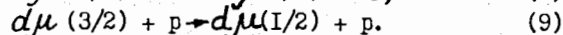
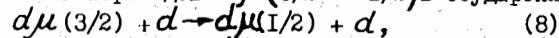


Рис. 4

Временные спектры событий, зарегистрированных детекторами в опыте "П" (нормированный фон вычтен); а - совпадения с сигналом от детектора 5 (γ_5), б - антисовпадения с сигналом от детектора 5 (γ_5); сплошные линии - расчетные кривые.

статистически, тем не менее к моменту ядерного μ -захвата или образования мезомолекулы $pd\mu$ характер заселенности может изменяться из-за возможных переходов $d\mu(3/2 \rightarrow 1/2)$ в соударениях:



Результаты экспериментов (E.Bleser, E.W.Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); I.-T.Wang et al. Phys. Rev., 139, 1528 (1965)) свидетельствуют о статистическом характере заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атомов в момент μ -захвата, тогда как полученная в опыте (A.Placchi et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973))

величина скорости захвата согласуется с теоретическими расчетами этой величины лишь при допущении, что к моменту μ -захвата все $d\mu$ -атомы переходят в состояние $F = 1/2$. Из вычисленного значения λ_d скорости процесса (8) ($\lambda_d = 7 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ - С.С.Герштейн.

ЖЭТФ, 40, 698 (1961); авторы полагают, что переходы $3/2 \rightarrow 1/2$ возможны только в столкновениях (8)) следует, что как в условиях экспериментов (E.Bleser, E.W.Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); I.-T.Wang et al. Phys. Rev., 139, 1528 (1965)), так и в условиях опыта (A.Placchi et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973)) влияние этого процесса пренебрежимо мало. Для объяснения результатов своего опыта (A.Placchi et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973)) авторы предположили, что интенсивный переход $d\mu(3/2 \rightarrow 1/2)$ обусловлен столкновениями (9). Следует отметить, что такой механизм приводил бы в условиях экспериментов (E.Bleser, E.W.Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); I.-T.Wang et al. Phys. Rev., 139, 1528 (1965)) к 100% переходу $d\mu$ -атомов в нижнее состояние с $F = 1/2$, что явно противоречит результатам данных работ. Поэтому предположение о существовании интенсивного перехода $d\mu(3/2) \rightarrow d\mu(1/2)$ за счет процесса (9) не снимает расхождение между данными опытов

(A.Placchi et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970);

Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973)) и (E.Bleser, E.W.Anderson

et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); I.-T.Wang et al. Phys. Rev., 139, 1528 (1965)).

Для однозначного установления характера заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атома (предполагается, что переходы $d\mu(3/2) \rightarrow d\mu(1/2)$ происходят только в столкновениях (8)) необходимо знание величины λ_d . Величину λ_d можно определить

путем измерения временного распределения и абсолютного выхода γ -квантов от реакции (I а), который существенно зависит от распределения $d\mu$ -атомов по спиновым состояниям в момент образования $pd\mu$ -молекулы. Это связано со следующими обстоятельствами:

1) заселенность подуровней основного состояния $pd\mu$ -молекулы ($\mathcal{Y} = 2, 1$ (два уровня), 0; \mathcal{Y} - полный момент $pd\mu$ -молекулы) определяется характером распределения $d\mu$ -атомов по спиновым состояниям $F = 3/2$ и $F = 1/2$; 2) скорость реакции (I а) зависит от значения момента $pd\mu$ -молекулы (при $\mathcal{Y} = 2$ реакция не происходит, в остальных состояниях она протекает со скоростями, значения которых найдены в работе (С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 40, 698 (1961)).

Временное распределение γ -квантов от реакции (I а) можно представить следующим образом:

$$\frac{dn_i}{dt} = A E_i P; \quad P = f(\alpha_i, v_i, d_i, \lambda_{pd\mu}, \lambda_F, \lambda_d), \quad (10)$$

где $i = 1, 2, 3$ - индекс, соответствующий определенному

состоянии $rd\mu$ - молекулы ($J = 0, I$ (два состояния)); A - коэффициент, пропорциональный числу остановок мюонов в мишени; E_f - эффективность регистрации γ -квантов от реакции (I а); a_i, b_i - статистические веса подуровней $rd\mu$ - молекулы, приведенные в работе (С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 40,698 (1961)), образованной из $d\mu$ -атомов, находящихся в состоянии со спином $F = 3/2$ и $F = 1/2$ соответственно; a_i - отношение скорости реакции синтеза (I а) для определенного состояния $rd\mu$ - молекулы с моментом J к значению скорости синтеза в $rd\mu$ - молекуле с $J = 0$.

Искомые скорости λ_d, λ_f были определены путем аппроксимации экспериментальных временных распределений γ -квантов выражением (10) при использовании найденного нами ранее значения

$\lambda_{rd\mu} = (5,53 \pm 0,16) \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ и величины E_f , измеренной в дополнительных экспериментах.

При проведении данного эксперимента использовалась та же экспериментальная аппаратура, что и в опыте по измерению скоростей образования $rr\mu$ - и $rd\mu$ -молекул (глава IV).

В эксперименте были проведены две экспозиции: "А" - со смесью $H_2 + D_2$ и "Б" - опыт с гелием (фоновый). Условия проведения эксперимента и основные данные, характеризующие опыт, приведены в таблице 2. Для каждой экспозиции производилось построение амплитудных спектров γ -квантов, зарегистрированных γ -детекторами в антисовпадениях с сигналом от счетчика 5.

С целью определения эффективности регистрации γ -квантов, образующихся в реакции (I а), был проведен эксперимент с мишенью из Та, которая располагалась в разных точках внутри стакана скintиллятора детектора 5 (CsI(Tl)).

Выбор танталовой мишени был обусловлен тем, что энергия перехода $2p \rightarrow 1s$ в Та μ -атоме ($E(K_{\alpha}) = 5,35 \text{ МэВ}$) близка по величине к энергии γ -квантов (5,5 МэВ) от реакции (I а). Обработка амплитудных спектров, полученных в данном опыте, проводилась в области, соответствующей энергии γ -квантов от 4,1 МэВ до 6,1 МэВ. Выбор этих границ позволил полностью исключить вклад L, M и других серий γ -квантов. Вклад более жестких линий K-серий составлял $\leq 2\%$ и был учтен при обработке. Найденные значения эффективности регистрации γ -квантов для обоих детекторов помещены в таблице 2.

Таблица 2.

Экспериментальные данные

Опыт	Число остановок мюонов в газе	Наполнение мишени и давление в (атм)	Число γ -квантов, зарегистрированных детекторами при энергетическом пороге $E_{\text{пор}} = 4,1 \text{ МэВ}$		Эффективность регистрации γ -квантов $E_{\text{пор}} = 4,1 \text{ МэВ}$	
			детектор δ_1	детектор δ_2	детектор δ_1	детектор δ_2
"А"	$2,9 \cdot 10^6$	$H_2 + 7\% D_2$ (42)	1550	2020	$0,0229 \pm 0,0025$	$0,0297 \pm 0,0036$
"Б"	$1,57 \cdot 10^6$	He (47)	280*	350*		

*Эти значения нормированы на число остановок мюонов в экспозиции "А".

Временные распределения γ -квантов (χ^2), полученные в опыте "Б" и нормированные к условиям экспозиции "А", вычитались по каналам из соответствующих временных распределений, измеренных в опыте "А". Интегральный вклад фона при энергетическом пороге регистрирующей аппаратуры 4,1 МэВ не превышал 18%.

Результирующие временные распределения (χ^2), полученные с помощью обоих детекторов, обрабатывались по методу наименьших квадратов путем аппроксимации их выражением (10) с целью определения скорости перехода λ_d и скорости синтеза λ_f в мезомолекуле $rd\mu$ (рис. 5).

Получены следующие значения величин:

$\lambda_f = (0,287 \pm 0,022) \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$; $\lambda_d < 15 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ на уровне 90% достоверности.

Значение λ_f находится в хорошем согласии с результатами экспериментальной работы (E. Bleser, E.W. Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963)) и вычислений (0,263 $\cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ - S. Gallone et al. Nuovo Cim., 6, 168 (1958); 0,294 $\cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ - V.P. Carter. Phys. Rev., 141, 863 (1966)). Найденная верхняя граница скорости перехода (8) хорошо согласуется с данными экспериментов (E. Bleser, E.W. Anderson et al. Phys. Rev., 132, 2679 (1963); I.-T. Wang et al. Phys. Rev., 139, 1528 (1965)) и с расчетным значением - 7 $\cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ (С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 40,698 (1961)). Из полученной нами оценки λ_d следует, что при небольших концентрациях дейтерия (порядка нескольких процентов) в смесях $H_2 + D_2$ характер

заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атомов в момент ядерного захвата мюона дейтроном близок к статистическому. Это заключение расходится с выводами авторов работы (A. Placci et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973)), причем расхождение сохраняет силу независимо от характера предположения о роли процесса (9) в переходах $d\mu(3/2) \rightarrow d\mu(1/2)$.

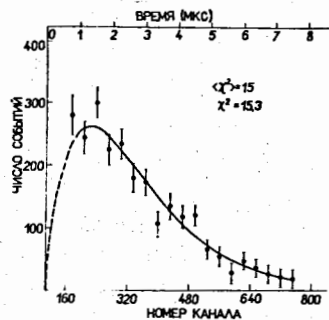


Рис. 5

Временное распределение γ -квантов от реакции синтеза в мезомолекуле $pd\mu$ (нормированный фон вычтен). По оси ординат — число событий на интервал 0,378 мкс. Сплошная линия — расчетная кривая.

Действительно, если не пренебрегать вкладом процесса (9), то наш результат можно представить в виде:
 $\lambda_d + \frac{\lambda - C_D}{C_D} \lambda'_d < 15 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ и для λ'_d — скорости процесса (9) — следует $\lambda'_d < 1,1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ (C_D — атомарная концентрация дейтерия). Для условий эксперимента (A. Placci et al. Phys. Rev. Lett., 25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973))

на основании полученных нами значений λ_d и λ'_d вытекает ограничение:

$\lambda(3/2 \rightarrow 1/2) < 0,2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, что резко отличается от оценки авторов работы (A. Placci et al. Phys. Rev. Lett.,

25, 475 (1970); Phys. Rev., 8D, 11, 3774 (1973)), согласно которой $\lambda(3/2 \rightarrow 1/2) > 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Основные результаты, изложенные в диссертации, сводятся к следующему:

1. Создана установка для получения сверхчистого газообразного водорода при давлении 50 атмосфер (Pd-фильтр) и система вакуумирования и заполнения мишени (с внутренними сцинтилляторами CsJ(Tl)) газообразным водородом до давления 40 атмосфер. Эта система в целом позволяет получать и сохранять водород в мишени в течение 100-150 часовых экспозиций на пучке мюонов, обеспечивая необходимые требования по чистоте (суммарное содержание примесей N_2 , O_2 и др. в водороде порядка 10^{-8} объемных долей).

2. Создана универсальная программа для расчета эффективностей

регистрации нейтронов и электронов методом Монте-Карло в экспериментах с мюонами. Получены энергетические и амплитудные спектры нейтронов и электронов, зарегистрированных детекторами с кристаллами стибена ($C_{14}H_{12}$).

3. Выполнен эксперимент по измерению $\lambda_{dd\mu}$ — скорости образования $dd\mu$ -молекулы в газообразном дейтерии при $T = 300^\circ K$ и определено нижнее граничное значение λ_f — скорости синтеза в $dd\mu$ -молекуле. Величины $\lambda_{dd\mu}$ и λ_f оказались равными: $\lambda_{dd\mu} = (0,73 \pm 0,07) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ($\beta_D = 4,22 \cdot 10^{22} \text{ I/cm}^3$); $\lambda_f > 1,8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ (на уровне 90% достоверности). Найденное значение $\lambda_{dd\mu}$ подтверждает существование зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул от температуры среды, а полученное значение для λ_f не противоречит предсказаниям теории о большой величине скорости реакции синтеза в $dd\mu$ -молекуле.

4. Измерены прямым методом скорости образования $pp\mu$ - и $pd\mu$ -молекул в газообразном водороде. В ходе работы было получено также отношение В скоростей перехвата мюона с протона и дейтрона к ядрам ксенона. Найденны следующие значения скоростей образования $pp\mu$ -, $pd\mu$ -молекул и величины В: $\lambda_{pp\mu} = (2,34 \pm 0,17) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\lambda_{pd\mu} = (5,53 \pm 0,16) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; В = 1,62 ± 0,05.

Сравнение значений $\lambda_{pp\mu}$ и $\lambda_{pd\mu}$, полученных нами в газообразном водороде с соответствующими величинами, найденными в экспериментах с жидким водородом, позволяет сделать заключение, что скорости образования мезомолекул $pp\mu$ и $pd\mu$ в газообразном и жидком водороде не различаются.

5. В опыте с газовой мишенью, заполненной смесью $H_2 + 7\% D_2$ под давлением 42 атм, измерена скорость реакции синтеза λ_F в мезомолекуле $pd\mu$ и найдено верхнее граничное значение скорости перехода λ_d между уровнями сверхтонкой структуры $d\mu$ -атомов в соударениях $d\mu(3/2) + d \rightarrow d\mu(1/2) + d$. Получены следующие значения величин: $\lambda_F = (0,287 \pm 0,022) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\lambda_d < 15 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Из найденной оценки величины λ_d следует, что при небольших концентрациях дейтерия (порядка нескольких процентов) в смесях $H_2 + D_2$ характер заселенности спиновых состояний $d\mu$ -атомов в момент ядерного захвата мюона дейтроном близок к статистическому.

Материал, изложенный в диссертации, основан на работах [1, 2, 5, 6, 8, 9], опубликованных в ЖЭТФ, ПТЭ, препринтах ОИЯИ, и докладывался на III Международном симпозиуме по физике высоких энергий и элементарных частиц (г.Синая, СРР, 1973г.) и на VI Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Санта-Фе, США, 1975).

Литература

1. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, А.А.Родина, В.Е.Теплов, Е.Е.Фильченков. ПТЭ, 2, 226 (1972).
2. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, Л.С.Котова, В.И.Лепилов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, А.И.Руденко, В.В.Фильченков. Сообщение ОИЯИ, 13-7246, Дубна (1973).
3. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, В.В.Фильченков. ПТЭ, 1, 65 (1972).
4. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, В.В.Фильченков. ПТЭ, 4, 86 (1971).
5. В.М.Быстрицкий, Л.С.Бертоградов, В.Е.Фильченков. Сообщение ОИЯИ, 1 - 7527, Дубна (1973).
6. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, А.И.Руденко, Е.Е.Фильченков. ЖЭТФ, 66, 61 (1974).
7. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, Е.Е.Фильченков. ЖЭТФ, 66, 43 (1974).
8. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, А.И.Руденко, Е.М.Суворов, Е.Е.Фильченков, Г.Хемниц, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. ЖЭТФ, 70, 1167 (1976).
9. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, А.И.Руденко, Е.М.Суворов, Е.Е.Фильченков, Г.Хемниц, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. ЖЭТФ, 71, 1680 (1976).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 июня 1977 года.