

90-577

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 7900

ФИЛЬЧЕНКОВ Владимир Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНОГО ЗАХВАТА МЮОНОВ
В ГАЗООБРАЗНОМ ВОДОРОДЕ

Специальность - 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований

Научные руководители:

член-корреспондент АН СССР В.П.Джелепов,

кандидат физико-математических наук П.Ф.Ермолов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук А.И.Мухин,
(ИФВЭ, Серпухов)

кандидат физико-математических наук В.Б.Беляев.
(ЛТФ ОИЯИ, Дубна)

Ведущее предприятие -

Московский инженерно-физический институт, Москва.

Автореферат разослан " " _____ 1974 г.

Защита диссертации состоится в _____ час. " " _____ 1974 г.

на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований, гор.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета -

кандидат физ.-мат.наук

Д.А.Батусов

1 - 7900

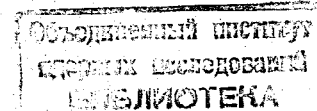
ФИЛЬЧЕНКОВ Владимир Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНОГО ЗАХВАТА МЮОНОВ
В ГАЗООБРАЗНОМ ВОДОРОДЕ

Специальность - 01.04.01 - экспериментальная физика

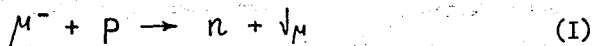
Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



I.

Значительный интерес к изучению процесса ядерного захвата мюона протоном



связан, главным образом, с необходимостью проверки основных положений современной теории слабого взаимодействия. Установление закономерностей реакции (I) позволит также использовать ее для исследования свойств ядер в процессах поглощения мюона ядром.

Как известно, все имеющиеся экспериментальные данные находят свое объяснение в рамках т.н. теории универсального слабого взаимодействия. Согласно этой теории слабые процессы с участием нестранных частиц описываются одинаковым образом в виде смеси векторного (V) и аксиального (A) взаимодействий с "затравочными" константами связи $g_V^0 = -g_A^0 = g$ (для процессов со странными частицами константа взаимодействия меньше примерно в двадцать раз). В чисто лептонном процессе распада мюона отличие константы распада (g_μ) от "затравочной" (g) может быть обусловлено лишь малыми (~1%) радиационными поправками. Для реакций с участием сильновзаимодействующих частиц, таких, как μ -захват или β -распад, теория предсказывает перенормируемость констант взаимодействия и возникновение "индуцированных" взаимодействий.

Результаты исследований распада мюона и β -распада находятся в убедительном согласии с V-A-теорией, учитывающей влияние сильновзаимодействующих частиц. В то же время процесс μ -захвата до настоящего времени остается изученными сравнительно плохо, что объясняется большими трудностями исследования реакции (I) в водо-

роде. Эти трудности обусловлены спецификой реакции (две нейтральные частицы в конечном состоянии), ее малой вероятностью, а также осложняющим влиянием различного рода м μ -атомных явлений. Следует заметить, что использование данных по μ -захвату сложными ядрами для определения характеристик процесса (I) встречается с неопределенностями, связанными с неточным знанием ядерных волновых функций.

Из-за больших экспериментальных трудностей первые опыты по измерению скорости реакции (I) были выполнены с жидким водородом. Однако в жидком водороде из-за интенсивного образования мезомолекул $p\mu p$ захват мюона происходит практически лишь из состояния этой мезомолекулы. Ввиду неточного знания параметров системы $p\mu p$, относящихся к перекрытию волновых функций протонов и мюона и к спиновому состоянию мезомолекулы, интерпретация данных указанных опытов неоднозначна. В связи с этим большую актуальность приобретают опыты по исследованию процесса (I) в среде, где вероятность образования $p\mu p$ мала, а именно - в газообразном водороде.

В диссертации обобщены результаты работы /I+4/ по созданию экспериментальной установки и измерению скорости $\lambda_{зах}^{p\mu}$ захвата мюона из состояния водородного мезоатома. Эксперимент выполнен на синхроциклотроне ОИЯИ. Результаты работ опубликованы в журналах ЖЭТФ и ПТЭ, препринтах и сообщениях ОИЯИ и докладывались на сессии Отделения ядерной физики АН СССР в 1973 г.

II.

Диссертация состоит из шести глав.

В первой главе рассмотрены основные представления теории слабых взаимодействий, результаты ее экспериментальной проверки и ста-

вится вопрос о необходимости изучения μ -захвата в газообразном водороде. В этой же главе кратко рассмотрены процессы, протекающие в водороде с участием $p\mu$ -атома, предшествующие захвату мюона и влияющие на вероятность захвата.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального метода. В принципе постановка опытов сводится к следующему. Мюоны останавливаются в газовой водородной мишени и образуют мезоатомы. Нейтроны от захвата мюонов детектируются сцинтилляционными счетчиками, расположенными вокруг мишени. Регистрация нейтронов осуществляется во временные "ворота", запускаемые сигналом остановки мюона.

Основные экспериментальные трудности обусловлены, главным образом, крайне малой вероятностью исследуемого процесса, малой интенсивностью остановок мюонов в газе, и, следовательно, относительно низкой скоростью счета нейтронов от μ -захвата при большом влиянии различного рода фоновых процессов. Вероятность захвата в водороде составляет $W(H) = \lambda_{зах}^{p\mu} / (\lambda_0 + \lambda_{зах}^{p\mu}) \approx 1/700$. В этом выражении $\lambda_0 = 4,55 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$ - скорость основного канала гибели мюона в $p\mu$ -атоме - распада мюона, $\lambda_{зах}^{p\mu} \approx 650 \text{сек}^{-1}$. Ввиду специфики изучаемой реакции "ворота" для регистрации нейтронов приходится запускать на каждый остановившийся мюон, т.е. во много раз чаще, чем происходит захват. Длительность "ворот" должна быть порядка времени жизни мюона $\tau_{\mu}(H) \approx 1/\lambda_0 = 2,2 \text{мксек}$, т.е. относительно большой. В этих условиях становится весьма значительным влияние фона случайных совпадений. Измерения фоновой загрузки в экспериментальном павильоне синхроциклотрона показали, что соответствующий этой загрузке фон случайных совпадений в десятки раз превышает эффект от μ -захвата в водороде.

Экспериментальные трудности обусловлены также тем, что вероятность захвата быстро растет с порядковым номером Z вещества, и уже для углерода и кислорода $\omega(C, O) \approx 0,1$, а для железа $\omega(Fe) = 0,9$. Надо также добавить, что из-за малой эффективной толщины водорода ($0,08 \text{ г/см}^2$) количество остановок мюонов в газе намного меньше, чем в стенках мишени. В связи с этим возникает проблема подавления фона нейтронов от захвата мюонов в стенках мишени, выход которых в десятки тысяч раз превышает выход из реакции (1).

Из-за большой вероятности захвата мюона сложными ядрами, а также ввиду существования интенсивного механизма перехвата мюона на ядра с $Z > 1$ необходимо использовать в опытах водород, очищенный от примесей до уровня $10^{-7}-10^{-8}$.

Наконец, следует указать также на задачу подавления фона электронов от μ -распада, экспериментальный выход которых в несколько тысяч раз превышал выход нейтронов от исследуемого процесса.

При подготовке эксперимента и создании аппаратуры мы стремились обеспечить такие условия опытов, при которых влияние фоновых процессов было достаточно малым. Основными мероприятиями, позволившими в значительной степени дискриминировать фон случайных совпадений, явились размещение экспериментальной установки в низкофоновой лаборатории, отделенной от основного павильона двухметровой бетонной стеной, и окружение мишени и счетчиков дополнительной водяной защитой.

Схема основной части экспериментальной установки приводится на рисунке I. В опытах использовалась газовая водородная мишень, корпус которой был изготовлен из нержавеющей стали и имел длину

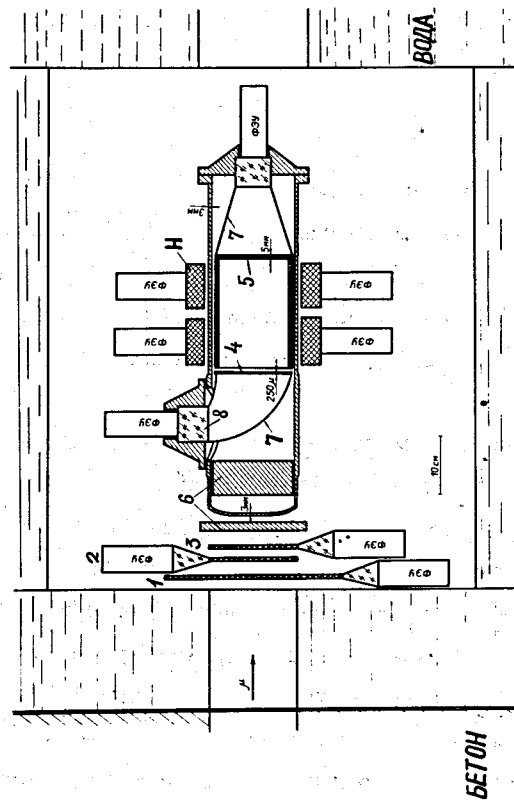


Рис. I. Схема основной части экспериментальной установки (газовая мишень и детекторы нейтронов). 1+5 - сцинтилляционные счетчики, 6 - поглотитель, 7 - полные световоды, 8 - прозрачные уплотнения.

540 мм, диаметр 140 мм и толщину стенок 3 мм. Мюоны регистрировались мониторными счетчиками (1+3), тормозились фильтром (6) и останавливались в мишени. С целью дискриминации фона от μ -захвата в стенках мишени, а также для подавления ложных запусков, связанных с остановками мюонов в стенках, регистрация остановок мюонов осуществлялась с помощью сцинтилляторов из $CsJ(Tl)$ (счетчики 4 и 5), расположенных внутри мишени. При этом фон, обусловленный остановками и захватом мюонов в иодистом цезии, дискриминировался введением задержки (1,3 мксек) в канале регистрации нейтронов. Так как $\tau_{\mu}(CsJ) = 0,09$ мсек, то указанный фон подавлялся практически полностью.

Блок-схема используемой электронной аппаратуры приводится на рисунке 2. В качестве сигнала остановки мюона использовался импульс совпадений 2345, который запускал "ворота" длительностью 4 мксек. Совпадения импульса ворот и импульса (n) от нейтронных детекторов служили в качестве управляющих импульсов в устройстве /5/ для многомерного амплитудного анализа событий, зарегистрированных нейтронными детекторами. Для дискриминации фона случайных совпадений, связанного с пучком мюонов, в опытах использовалась электронная система блокировки запусков, связанных с одновременным прохождением двух (или более) мюонов в интервале 10 мксек.

С целью обеспечения необходимой чистоты водорода была создана и использовалась система аппаратуры, включающая "палладиевый фильтр" /6/. Контрольные анализы чистоты водорода из мишени, выполненные по окончании измерений, свидетельствуют об относительной величине примесей с $Z > 1$ не более, чем 10^{-8} . Такое содержание примесей соответствует фону от захвата в них мюонов, составляющему менее 0,5%.

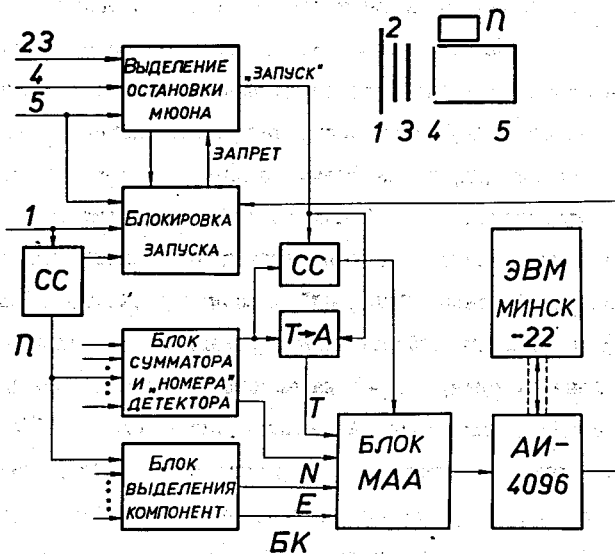


Рис. 2. Блок-схема включения счетчиков и электронной аппаратуры. СС - схема совпадений, Т-А - преобразователь время - амплитуда, блок МАА - устройство для многомерного амплитудного анализа.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с регистрацией нейтронов в наших опытах. Значительное внимание уделено проблемам определения эффективности регистрации нейтронов и электронов [7] и энергетической калибровке нейтронных детекторов. В параграфе 2 описаны методы, используемые в наших опытах для разделения нейтронов и электронов (γ -квантов) по форме импульса в стильбене. Указанное разделение осуществлялось путем анализа амплитуд импульсов, пропорциональных "быстрой" компоненте светового импульса (БК) и энергии (Е). Эти импульсы формировались с помощью блока выделения компонент, схему включения которого можно видеть из рисунка 2. На рисунке 3 приведено двумерное распределение (БК, Е), полученное для одного из нейтронных детекторов в калибровочных измерениях с источником $Po-Be$. Осуществление разделения нейтронов и электронов позволило дополнительно дискриминировать фон случайных совпадений и подавить фон электронов от μ -распада и фотонов их тормозного излучения.

Кроме сигналов БК и Е, анализировались также импульсы M^2, T , характеризующие номер детектора и время между остановкой мюона и регистрацией нейтрона.

Четвертая глава диссертации посвящена условиям опытов, измерениям на пучке мюонов и обработке экспериментальной информации. Интенсивность остановок мюонов в водороде составляла 30 сек^{-1} , а эффективность регистрации нейтронов $E_n = 0,007892 \pm 0,000331$, так что скорость счета исследуемых событий оказалась равной примерно 1 событию/час.

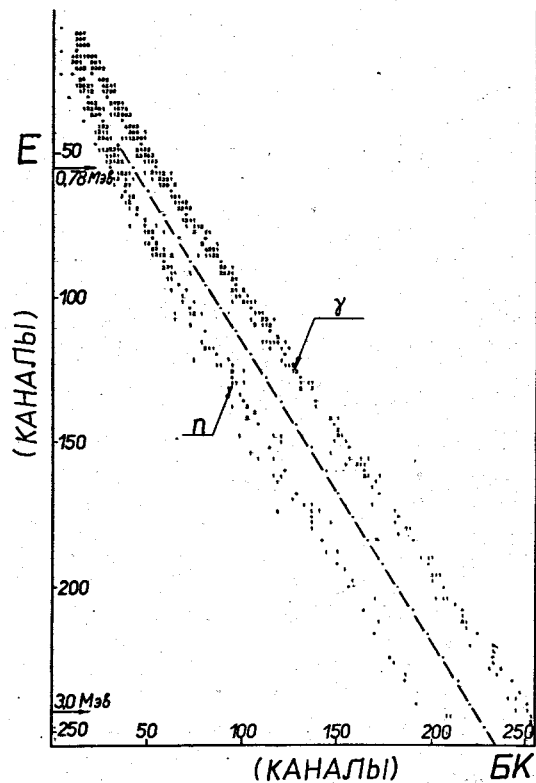


Рис.3. Двухмерное распределение (БК, Е), полученное в калибровочных измерениях с источником $Po-Be$ для одного из нейтронных детекторов. По оси абсцисс - амплитуда импульса БК, по оси ординат - амплитуда сигнала Е, пропорциональная эквивалентной (по световыходу) энергии электрона. Штриховой линией указано найденное на ЭВМ положение линии разделения нерелятивистской (n) и релятивистской (γ) областей.

Значительное внимание уделено определению величины фона в наших опытах. Анализ экспериментальных данных показал, что среди различных компонент фона, не связанного с остановками мюонов в водороде, существенным оказывается практически лишь фон случайных совпадений. Величина этого фона была определена в опытах с вакуумированной мишенью и в опытах с ксеноном и составила около 40% от общего счета нейтронов в экспозициях с водородом.

Среди компонент фона, связанного с остановками мюонов в водороде, важными оказываются фон от диффузии $p\mu$ -атомов и фон от фотоядерных реакций, вызываемых в стильбене фотонами тормозного излучения электронов. Вклад фона от этих реакций составил $\approx 15\%$ относительно эффекта. Фон от диффузии $p\mu$ -атомов был определен в специальных опытах, в которых с помощью γ -спектрометра с кристаллом $NaJ(Tl)$ был измерен выход γ -квантов (в основном, мезорентгеновского излучения), возникающих при перехвате мюона от атома $p\mu$ к ядрам вещества стенок мишени.

Предварительная обработка экспериментальной информации заключалась в разделении нейтронов и электронов и получения амплитудных и временных распределений для каждого сорта частиц. На этой стадии обработка осуществлялась с помощью ЭВМ Минск-22, подключаемой "онлайн" к измерительной аппаратуре и проводилась непосредственно в ходе опытов. На рисунках 4 и 5 приводятся временное и амплитудное распределения нейтронов, полученные в основных экспозициях с водородом.

В пятой главе диссертации проводится анализ зарегистрированных событий, определяется скорость захвата мюона в $p\mu$ -атоме и обсуждаются полученные результаты.

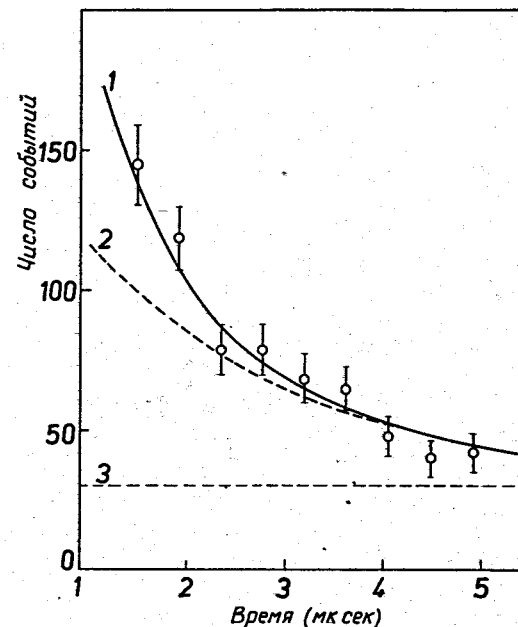


Рис.4. Временное распределение, полученное для нейтронных событий в экспозициях с водородом. По оси абсцисс — время регистрации нейтрона, по оси ординат — число событий на интервал 0,433 мксек. Сплошная линия (1) соответствует зависимости (2) с параметрами А, В и С, найденными на ЭВМ. Штриховые линии (3) и (2) соответствуют уровню случайных совпадений и экспоненте с показателем $-\lambda_0 t$.

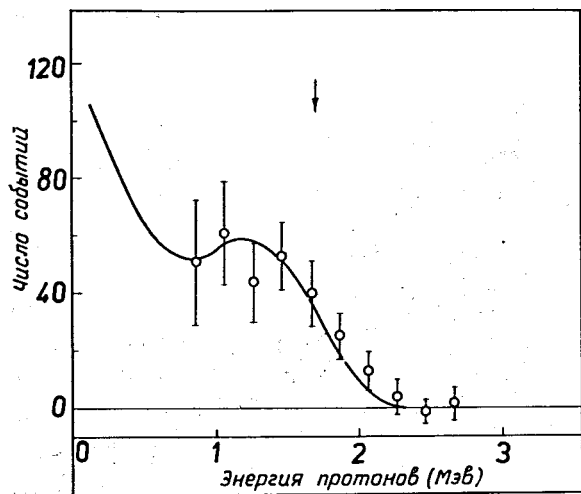


Рис.5. Амплитудный спектр протонов отдачи, измеренный для событий от захвата мюонов в водороде. Нормированный фон вычтен. По оси абсцисс - энергия протонов (в масштабе эквивалентной энергии электрона), по оси ординат - число событий на интервал 0,2 Мэв.

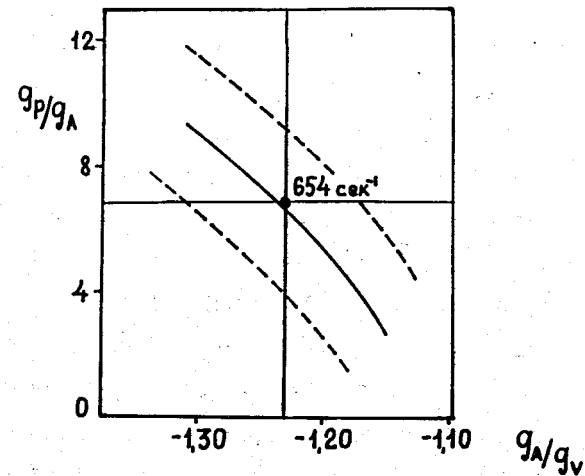


Рис.6. Зависимость g_p/g_A от g_A/g_V , соответствующая экспериментальным данным (6). На рисунке указано также вычисленное в [9] значение (5) $\lambda_{зах}^{PM}$ для $g_A/g_V = -1,23$ и $g_p/g_A = 7,3$

С целью отделения фона временное распределение (рисунок 4) фитировалось с помощью выражения

$$dN/dt = A e^{-\lambda_0 t} + B \varphi_{\text{дифф}}(t) + C, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{дифф}}(t)$ - рассчитанная на ЭВМ БЭСМ-6 временная зависимость для нейтронов от диффузии; A, B, C - варьируемые параметры. Анализ временного распределения был выполнен на ЭВМ БЭСМ-6, при этом использовались экспериментальные данные для вклада фона случайных совпадений и фона от диффузии. В результате было найдено, что число событий, соответствующее первому члену функции (2), составляет 323 ± 32 . С учетом найденного фона от фотоядерных реакций число событий от μ -захвата в водороде оказалось равным $N_n = 278 \pm 33$.

Значение скорости захвата определялось с помощью выражения

$$\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} = \lambda_0 \rho \left(\frac{N_n}{\varepsilon_n} / \frac{N_e}{\varepsilon_e} \right) \quad (3)$$

Здесь N_e означает нормированное число электронов от μ -распада в водороде, найденное исходя из данных измерений выхода электронов, ε_e - эффективность регистрации электронов, а фактор ρ учитывает, что частично μ -захват происходит из состояния мезомолекулы $\rho\mu\mu$ ($\rho = 1,06 \pm 0,03$). Найденное с помощью выражения (3) значение скорости захвата мюона в $\rho\mu$ -атоме составляет $\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} = (686 \pm 88) \text{ сек}^{-1}$ и согласуется с данными теории [8,9].

В последней, шестой, главе диссертации кратко рассмотрены перспективы дальнейшего изучения μ -захвата простейшими ядрами.

III.

Результаты и выводы.

Главные результаты диссертации кратко могут быть сформулированы следующим образом.

1. Создана экспериментальная установка, предназначенная для исследования ядерного захвата мюонов в газообразном водороде. Достигнутые параметры установки позволили эффективно регистрировать редкие события изучаемого процесса (I) и надежно отделить их от фона. Характеристики аппаратуры обеспечили возможность проведения измерений скорости реакции (I) с относительной точностью $\sim 10\%$ и позволяют с успехом использовать эту аппаратуру для изучения целого ряда $\mu\mu$ -атомных явлений (образование мезомолекул $d\mu$ /10/ и $\rho d\mu$, рассеяние атомов $\rho\mu$ на протонах и др.).

Принципиальными особенностями экспериментальной методики являются:

- а) применение для регистрации остановок мюонов в водороде сцинтилляторов из иодистого цезия, расположенных внутри мишени;
- б) использование в опытах сверхчистого водорода (с содержанием примесей с $Z > 1$ не более, чем 10^{-8}), получаемого при помощи установки с палладиевым фильтром;
- в) осуществление дискриминации фона релятивистских частиц по форме светового импульса в сцинтилляторах нейтронных детекторов;
- г) использование многомерного амплитудного анализа регистрируемых событий, осуществляемого непосредственно в ходе экспозиций с помощью ЭВМ Минск-22, связанной "он-лайн" с измерительной аппаратурой.

2. В экспозициях экспериментальной установки на пучке мюонов синхроциклотрона ОИЯИ зарегистрировано 278 ± 33 события от захвата мюонов в водороде, на основании которых определена скорость захвата мюона из синглетного состояния водородного мезоатома

$$\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} = (686 \pm 88) \text{ сек}^{-1} \quad (4)$$

Это значение хорошо согласуется как с данными эксперимента /II/, выполненного с помощью другой методики, так и с теоретическим результатом /9/

$$\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} (F=0) = 654 \text{ сек}^{-1} \quad (5)$$

(F - полный спин атома pM).

Как известно, в расчетах величины $\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}}$ используются значения констант q_{ν} и q_A , найденные в β -распаде. Поэтому согласие экспериментальных данных (4) с теорией подтверждает гипотезу универсального слабого взаимодействия.

3. Из теории следует, что при $q_{\nu} = 0$ скорость реакции (I) составляет $\sim 400 \text{ сек}^{-1}$, а при $q_{\nu} = +q_A$ - около 200 сек^{-1} . Сопоставление этих данных с экспериментальным результатом (4) позволяет сделать заключения: а) о наличии векторного взаимодействия в μ -захвате и б) о реализации в этом процессе \checkmark -A варианта взаимодействия.

4. Близость наших данных (4) и результатов работы /II/ позволяет их объединить, и это приводит к значению

$$\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} = (661 \pm 48) \text{ сек}^{-1} \quad (6)$$

Используя полученное в /9/ выражение для $\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}}$, мы выполнили расчеты этой величины для различных значений отношений констант q_A/q_{ν} и q_P/q_A (q_P - константа индуцированного псевдоскалярного взаимодействия. Результаты расчетов представлены на рисунке 6. Сплошная линия соответствует среднему значению (6), а штриховые линии - коридору ошибок для этой величины.

Если положить $(q_A/q_{\nu}) = -1,23$, то из данных (6) получим $3,9 \leq q_P/q_A \leq 9,0$, что согласуется с данными теории /12/

$$q_P/q_A = 7 \pm 0,7.$$

5. Сравнение результатов измерений скорости μ -захвата в газообразном и жидком водороде с данными теории позволяет сделать оценку для скорости перехода атома pM из триплетного в синглетное состояние $\lambda_{1 \rightarrow 0} > 2 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$ (для плотности жидкого водорода), а также оценить значение скорости μ -захвата из триплетного состояния pM -атома; $\lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} (F=1) / \lambda_{\text{захв}}^{\text{PM}} (F=0) \leq 0,07$. Эти оценки согласуются с предсказаниями теории.

Литература

1. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Д.Пороховой, В.С.Роганов, А.И.Руденко, В.В.Фильченков. ЖЭТФ, 66, 43 (1974).
2. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Д.Пороховой, В.В.Фильченков. ПТЭ, 4, 86(1971).
3. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Д.Пороховой, В.В.Фильченков. ПТЭ, 1, 65(1972).
4. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, Л.С.Котова, В.И.Лепилов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Д.Пороховой, А.И.Руденко, В.В.Фильченков. Сообщение ОИЯИ, 13-7246, Дубна, 1973.
5. А.Н.Синаев, А.А.Стахин, Н.А.Чистов. Сообщение ОИЯИ, 13-4835, Дубна, 1969.
6. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, Н.И.Дороничева, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Д.Пороховой, А.А.Родина, В.Е.Теплов, В.В.Фильченков, ПТЭ, 2, 226(1972).
7. В.М.Быстрицкий, Л.С.Вертоградов, В.В.Фильченков. Сообщение ОИЯИ, 1-7527, Дубна, 1973.
8. P.K.Kabir. Z.Phys. 191, 447 (1966).
9. J.Frazier, C.W.Kim. Phys.Rev. 177, 2568 (1969).
10. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Д.Пороховой, А.И.Руденко, В.В.Фильченков. ЖЭТФ, 66, 61(1974).
11. A.Alberigi Quaranta, A.Bertin, G.Matone, F.Palmonari, G.Torelli, P.Dalpiaz, A.Placchi, E.Zavattini. Phys.Rev. 177, 2118 (1969).
12. Чжоу Гуан-чжао. ЖЭТФ, 39, 703(1960). M.Gell Mann, M.Levy. Nuovo Cimento, 16, 705 (1960). Y.Nambu. Phys.Rev.Lett., 4, 380 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
29 апреля 1974 года.