

X-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-85-120

ХОМЕНКО
Борис Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ
НЕКОТОРЫХ МЕЗОАТОМНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗООБРАЗНОМ ВОДОРОДЕ
И СМЕСЯХ ЕГО С ГЕЛИЕМ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук

В.И.Петрухин

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
доктор физико-математических наук

П.Ф.Ермолов
Н.П.Попов

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Московский
инженерно-физический институт.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1985 года
в _____ часов на заседании специализированного Совета
Д 047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1985 года.

Ученый секретарь Совета
доктор физико-математических наук

Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

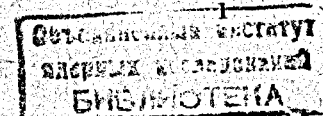
Актуальность проблемы. Исследования в области физики мезонных атомов дали важную, иногда уникальную информацию об элементарных частицах, атомных ядрах и их взаимодействии. Значительный интерес в настоящее время представляет детальное экспериментальное и теоретическое изучение свойств различных мезоатомных и мезомолекулярных объектов с целью, во-первых, повышения точности интерпретации результатов прежних экспериментов путем полного учета сопутствующих процессов, образующих в ряде случаев весьма сложную картину, во-вторых, использования этих свойств для поиска новых или более оптимальных путей решения различных научно-прикладных задач, например, вопроса о возможности технического использования мюонного катализа термоядерных реакций. Одна только эта проблема требует комплексного исследования характеристик процессов, происходящих в водороде, смесях его изотопов, а также в смесях с другими элементами, в частности, с гелием.

Теория мезоатомных и мезомолекулярных явлений в водороде, опираясь на широкий набор имеющихся экспериментальных данных и используя новые методы расчетов, развитые в последнее время, приблизилась к возможности достаточно полного количественного описания этих явлений. Очевидной задачей эксперимента является проверка теоретических выводов в тех пунктах, по которым опытные данные отсутствуют, либо недостаточно точны. Особенно важна такая проверка в "критических точках" - вопросах, в которых появление экспериментальных результатов могло бы качественно воздействовать на представления о механизме каких-либо процессов, на методы их расчета и т.д.

Актуальность исследований, проведенных в данной работе, обусловлена: важной ролью изучаемых процессов в общей картине мезоатомных явлений в водороде и смесях его с гелием, критичностью характеристик этих процессов к различным моделям и методам расчетов, отсутствием либо неоднозначностью предыдущих экспериментальных и теоретических результатов по данным вопросам.

Цель работы

- измерение сечения рассеяния μm -атомов в газообразном водороде;



- поиск процесса перехвата мюонов с водорода на гелий и исследование его характеристик.

Новизна работы. В серии экспериментов по исследованию мезоатомных и мезомолекулярных процессов применена более гибкая и информативная, чем в других работах подобного типа, система регистрации и отбора событий.

Новым методом измерено сечение рассеяния μH -атомов в газообразном водороде. Впервые достигнута ситуация, когда два из нескольких независимых экспериментальных исследований этого вопроса удовлетворительно согласуются, что повышает достоверность их результатов. Близость этих результатов к новым теоретическим расчетам позволяет считать величину сечения этого процесса установленной. При интерпретации данных эксперимента применен простой и в то же время достаточно точный метод учета неупругого характера столкновений μH -атома с молекулами водорода в диффузионном процессе.

Разработана и реализована в эксперименте методика поиска и исследования процессов перехвата мюонов с водорода на гелий. Впервые обнаружен перехват мюонов из основного состояния μH -атомов на гелий и измерена его скорость; впервые исследованы процессы с участием мю-атомов водорода, находящихся в возбужденном состоянии: получены данные о перехвате мюонов на гелий из этих состояний, показано, что он более интенсивен, чем перехват пионов. На этом основании сделан вывод о возможном существовании для мюонов, в отличие от пионов, зависимости параметра перехвата от плотности водорода.

Научная и практическая ценность работы. В работе получила дальнейшее развитие методика эксперимента в области мю-атомной физики. Разработаны методы исследования конкретных мезоатомных процессов. Найденные решения могут быть использованы при постановке других экспериментов.

Исследованы процессы, играющие важную роль в комплексе мезоатомных и мезомолекулярных явлений в водороде и его смесях. Полученные результаты являются либо совершенно новыми, либо играющими существенную роль в установлении характеристик изучаемых процессов. Они представляют значительный интерес и как самостоятельный экспериментальный материал, и как данные, необходимые для проверки и подтверждения ряда теоретических предсказаний и методов расчета. Результаты могут быть использованы для планирования широкого круга научных и прикладных исследований, для корректной интерпретации получаемых в них данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на Международном симпозиуме "Мезоны в веществе" (Дубна, 1977 г.) и семинарах Лаборатории ядерных проблем.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в двух статьях в ЖЭТФ, одной статье в ПТЭ, в материалах Международной конференции и в препринтах ОИЯИ.

Объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Текст занимает 64 страницы, включая 12 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 61 пункта.

Автор защищает

1. Организацию системы регистрации и отбора событий в экспериментах по исследованию мю-атомных и мезомолекулярных процессов, проводимых на линии с ЭМ.

2. Постановку и проведение эксперимента по измерению сечения рассеяния μH -атомов в газообразном водороде, интерпретацию полученных данных и результаты эксперимента.

3. Методику и постановку эксперимента по поиску перехвата мюонов с водорода на гелий. Результат эксперимента - обнаружение перехвата мюонов из основного состояния μH -атомов.

4. Результаты исследования μH -атомов, находящихся в возбужденном состоянии, и интерпретация этих данных. Обнаружение перехвата мюонов из этих состояний.

Содержание диссертации

Во введении кратко характеризуются направления исследований в области физики мезонных атомов водорода и отмечается, что наряду с успехом в изучении и описании многих мезоатомных и мезомолекулярных явлений решение ряда важных вопросов наталкивалось в течение длительного времени на трудности и неясности как теоретического, так и экспериментального характера, и необходимость их преодоления стала приобретать принципиальный характер. Рассмотрена постановка двух таких проблем, составивших предмет диссертации, обоснованы и сформулированы задачи соответствующих экспериментов.

В первой главе описана экспериментальная установка и рассмотрена система регистрации и отбора событий, содержащая ряд новых решений.

Эксперименты, результаты которых вошли в диссертацию, были выполнены на мюонном пучке синхротрона ОИЯИ, в низкофоновой лаборатории. Основу экспериментальной установки составила созданная в Лаборатории ядерных проблем газовая водородная мишень с детекторами и системой газообеспечения. Для проведения серии исследований в области мезоатомных и мезомолекулярных процессов была решена общая методическая задача - постановка экспериментов на линии с ЭМ НР-2116С измерительного центра ЛЯП, что предполагало создание: электронной сис-

темы регистрации и отбора событий, формирования информации и передачи ее в ЭМ; математического обеспечения "on line"-эксперимента и последующей обработки данных; развитие соответствующей методики проведения настройки, калибровок, измерений и контроля их хода. Решение этой задачи обеспечило выполнение запланированных исследований на современном методическом уровне.

На рис.1 приведена схема расположения на мюонном пучке газовой мишени и детекторов.

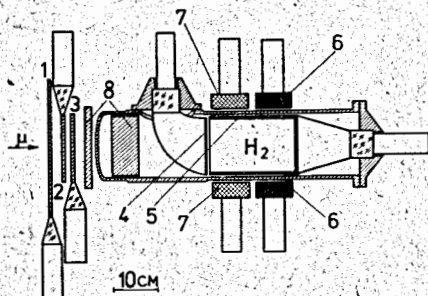


Рис.1 Схема экспериментальной установки.

Мюоны пучка проходят счетчики 1, 2, 3, тормозятся фильтрами 8 и попадают в рабочий объем мишени, ограниченный сцинтилляторами счетчиков 4, 5. Детектор 4 с тонким сцинтиллятором (~250 мкм) и воздушным световодом контролирует вход мюона в этот объем. Сцинтиллятор счетчика 5 имеет форму стакана, что позволяет регистрировать вылет из рабочей области мюонов пучка и заряженных вторичных частиц. Остановка мюона определяется по срабатыванию счетчиков 2, 3, 4, 5. Вторичные частицы регистрируются группами детекторов 6 (γ) и 7 (e) со сцинтилляторами из NaJ(Tl) и пластика, соответственно. Выделение заряженных и нейтральных вторичных частиц, зарегистрированных в γ- и e-счетчиках, производится по одновременному (в пределах некоторого разрешающего времени) срабатыванию (или его отсутствию) счетчика 5 (комбинации "γ+5", "e+5" и "γ-5", "e-5"). Широкоапертурный охранный счетчик 1 контролирует прохождение мюонов пучка в течение времени регистрации вторичных частиц и в некотором интервале перед остановкой. Счетчики 2 и 3 являются мониторинговыми. Газовая мишень может использоваться в двух вариантах: со сцинтилляторами детекторов 4 и 5 как из свJ(Tl), так и пластическими. Система газообеспечения позволяет заполнять мишень водородом, очищенным от примесей z > 1 до 10⁻⁷ объемных долей.

Сформулированы типичные требования, предъявляемые к системам регистрации и отбора событий в экспериментах по исследованию мн-атомных и мезомолекулярных процессов.

Система предварительного отбора событий традиционно выполняет следующие задачи:

- отбрасывание тех случаев, когда после остановки мюона не были зарегистрированы вторичные частицы;
- отбрасывание событий, которые сопровождалось близким по времени к остановке мюона и регистрации вторичной частицы прохождением другого мюона пучка;
- идентификация заряженных и нейтральных вторичных частиц.

В отличие от предыдущих экспериментальных исследований, в которых все указанные задачи решались на аппаратном уровне, что усложняло электронику экспериментов и исключало возможность варьирования критериев отбора, в данной работе отбор по условиям б) и в) был возложен на ЭМ и реализовывался на этапах "on line" и "off line"-обработки. Описывается функциональная схема электроники эксперимента, обеспечивающая регистрацию остановок мюонов в рабочем объеме мишени, измерение и передачу в ЭМ информации о срабатывании детекторов вторичных частиц (номер 1-го сработавшего детектора, время t_1 и амплитуду A_1 сигнала), времени срабатывания счетчика 5 (T_5) и времен прохождения ближайших частиц пучка до (T_{μ}^-) и после (T_{μ}^+) остановившегося мюона (все времена измерялись относительно момента остановки). При обработке информации в ЭМ условие отбора б) реализовывалось требованием $T_{\mu}^- < 5$ мкс, $T_{\mu}^+ > 10$ мкс (событие проходит). Поправка на потерю при этом нормальных событий определяется из анализа распределений T_{μ}^- и T_{μ}^+ . Дискриминация заряженных и нейтральных частиц проводилась по условию $|T_1 - T_5| < \Delta_1$ (заряженная частица), где Δ_1 - параметр, зависящий от временного разрешения данного детектора.

В целом выработанная система электроники позволила оптимизировать процесс отбора регистрируемых событий как на аппаратном уровне, так и при анализе их на ЭМ. Объем и характер информации, передаваемой с экспериментальной установки в ЭМ, позволяют надежно и эффективно контролировать работу всей регистрирующей системы в течение длительных экспозиций на пучке мюонов. Наряду с существенным упрощением электронной аппаратуры повышена ее надежность и расширены функциональные возможности системы регистрации и отбора событий.

Во второй главе описывается эксперимент по измерению сечения рассеяния ρ_{μ} -атомов в газообразном водороде:



Метод и постановка эксперимента основаны на использовании связи средней длины прямолинейных пробегов мезоатомов в газообразном водороде L с сечением рассеяния σ . Приблизительно эта связь может быть выражена как $L = R/\sqrt{3nu}$, $u = 1 - \cos \theta$, где R — полный пробег μM -атомов за время его жизни; $n(\sigma)$ — число испытанных им соударений; θ — угол рассеяния в л.с. В данной постановке используется то обстоятельство, что μM -атомы, образовавшиеся в рабочем объеме мишени вблизи (на расстоянии $\sim L$) от ограничивающих его поверхностей сцинтилляторов счетчиков 4 и 5 (рис.1), выполненных из CsJ , с большой вероятностью могут достигнуть этих стенок в процессе диффузии. При контакте происходит перехват мюонов на атомы вещества стенок, сопровождаемый испусканием каскадных γ -квантов из Cs_{M} и J_{M} -атомов. Наряду с регистрацией этого излучения в экспозиции с чистым водородом проводится нормировочное измерение. В этом случае к водороду добавляется небольшая ($\sim 10^{-4}$) примесь ксенона, обеспечивающая значительное число перехватов мюонов на ксенон, чем, в силу близости атомных номеров элементов ^{53}J , ^{54}Xe и ^{55}Cs , во всем объеме мишени имитируется перехват на CsJ . (В.М.Быстрицкий и др. ЖЭТФ, 1974, 66, с.43). Сопоставление выходов γ -квантов в обеих экспозициях позволяет определить, какая доля α из общего числа μM -атомов, образовавшихся в объеме мишени, достигает стенок рабочего объема. Тем самым определяется L и может быть определено сечение.

Таблица I. Основные характеристики измерений.

Экспозиции	Давление (атм.)	Монитор (млн.)	Выход e	Выход γ
H	41,0	786,7	78936	1085 \pm 73
He	47,0	640,7	63173	
H+D	43,9	1445,0	142260	
H+D+Xe	43,9	61,3	-	1360 \pm 60

В эксперименте были проведены следующие экспозиции (табл.1). "H" — с изотопически чистым водородом с содержанием дейтерия не более $2 \cdot 10^{-6}$, что исключало заметное искажение результата, связанное с образованием и выходом на стенки μM -атомов; "He" — фоновое измерение с гелием; нормировочная экспозиция "H+D+Xe" с 7% дейтерия, необходимого для другого эксперимента, и измерение "H+D", используемое для корректного пересчета данных нормировки к условиям основного измерения; "T" — измерение с пустой мишенью. Кроме того, были проведены тесты, позволившие убедиться, что значения средней плотности остановок мюонов вблизи стенок рабочего объема и по всему объему совпадают.

На рис.2 приведены временные спектры γ -квантов, полученные в экспозициях "H", "He" (подштриховано) и "T" (заштриховано), перенормированные к одинаковым условиям. Превышение первой гистограммы над второй обусловлено исследуемым эффектом — выходом μM -атомов на стенки рабочего объема. Разность этих спектров представлена на рис.3.

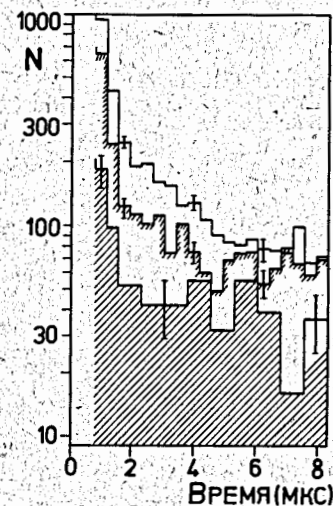


Рис.2 Временные распределения γ -квантов, измеренные в экспозициях "H", "He" и "T".

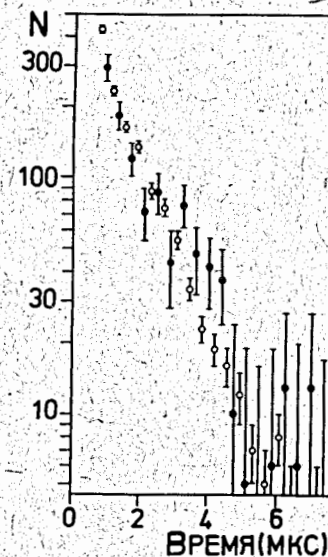


Рис.3 Временные распределения γ -квантов от эффекта: ● — измеренные, ○ — результат моделирования.

Число γ -квантов, зарегистрированных во временном интервале 0,4–7,6 мкс, соответствует относительный выход μM -атомов на стенки $\alpha_+ = 0,0125 \pm 0,0010$. Для определения, какому сечению это соответствует, а также для выяснения чувствительности результатов к различным предположениям о характеристиках процесса (1) проводилось численное моделирование методом Монте-Карло событий, происходящих в мишени после образования μM -атома. При этом, в частности, полагалось, что сечение неупругих взаимодействий мезоатома в водороде при энергии $\epsilon > \Delta \epsilon$ ($\Delta \epsilon = 0,18$ эВ — энергия сверхтонкого расщепления в μM -атоме) достаточно велико, чтобы он быстро замедлился до $\epsilon \approx \Delta \epsilon$, не успев пройти

сколь-нибудь значительное расстояние. В области $\bar{\epsilon} \leq \Delta \bar{\epsilon}$ сечение рассеяния считалось постоянным (т.н. приближение эффективного сечения). Для учета того, что при столкновении мезоатома с протоном возбуждаются вращательные уровни молекулы водорода, т.е. о чисто упругих соударениях с ней, как целом, говорить нельзя, было введено понятие эффективной массы молекулы M , величина которой, заключенная между m_p и $2m_p$ (m_p - масса протона), позволяет описать рассеяние как изотропное в с.ц.м. (на частице с этой массой). Входными параметрами программы, реализующей моделирование, были: $\bar{\epsilon}_0$ - начальная энергия μm -атома, σ - сечение рассеяния на молекуле и эффективная масса M . Основным результатом работы программы являлись: временное распределение случаев столкновения μm -атомов со стенками и модельная оценка относительного выхода $\alpha_m(\bar{\epsilon}_0, \sigma, M)$. Результаты розыгрыша около сорока вариантов для $\bar{\epsilon}_0 = \Delta \bar{\epsilon}$ были объединены эмпирической зависимостью вида $\alpha_m(\sigma, M) = A \exp(-B\sigma y)$, где A и B - параметры подгонки; y - параметр, однозначно связанный с M .

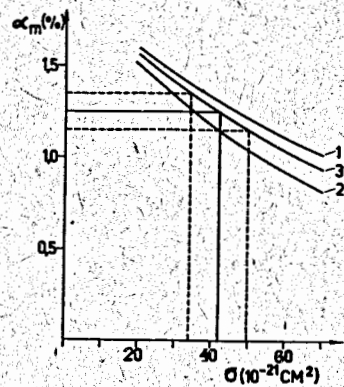


Рис.4 Зависимости $\alpha_m(\sigma)$ для эффективных масс молекул: (1) - m_p , (2) - $2m_p$, (3) - $1,25m_p$.

На рис.4 показаны зависимости $\alpha_m(\sigma)$ для граничных значений M и обозначено экспериментальное значение α_t с указанием статистической ошибки. Отсюда можно сделать вывод о пределах, между которыми заключено искомое сечение. Для более точного указания эффективной массы молекулы водорода, с учетом того, что при соударениях с мезоатомом вращательные уровни молекулы возбуждаются легко, а колебательные

не возбуждаются, был рассмотрен ее классический аналог в виде двух атомов, расположенных на оси с фиксированным расстоянием между ними. Мезоатом упруго сталкивается с одним из атомов, при этом молекула, в зависимости от ее ориентации относительно линии соударения, проявляет себя как частица с разной массой: от $M = m_p$ (когда линия удара перпендикулярна оси молекулы) до $M = 2m_p$ (удар вдоль оси). Специальное моделирование показало, что средние характеристики процесса рассеяния эквивалентны случаям соударения мезоатома с частицами, имеющими массу $M = 1,25m_p$. Тогда из экспериментального значения α_t следует резуль-

тат - эффективное сечение рассеяния μm -атомов на молекулах водорода: $\sigma(\mu m + H_2) = (42 \pm 8) \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$. Для сопоставления с теорией, рассматривавшей обычно сечение рассеяния на свободных протонах, можно воспользоваться связью $\sigma(\mu m + H_2) / \sigma(\mu m + p) = 2,42$ (Л.И.Меньшиков. Препринт ИАЭ-38II/12, Москва, 1983), что дает: $\sigma(\mu m + p) = (17,4 \pm 3) \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$. Оценка влияния примеси дейтерия в водороде на результат показала, что возможная поправка не превышает 5%.

Измеренная величина сечения близка к новому теоретическому результату $\sigma(\mu m + p) = 19 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$ (В.С.Мележик и др. ЖЭТФ, 1983, 85, с.434) и удовлетворительно согласуется с последним экспериментальным результатом группы Болонья-ЦЕРН: $\sigma(\mu m + H_2) = (29,8 \pm 2,8) \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$ (A. Bertin et al. Nuovo Cimento, 72A, 1982, p.225), полученным в предположении о чисто упругом характере рассеяния μm -атома на молекуле водорода, как целом, т.е. $M = 2m_p$. Использование для этой работы более точного значения эффективной массы, а также поправка 6-8% в большую сторону, связанная с учетом образования μm -атомов, делает все три результата весьма близкими.

Третья глава посвящена перехвату мюонов с водорода на гелий.

Рассмотрена схема процессов (рис.5) в газообразной смеси водорода, гелия и ксенона, используемого в качестве "пробного газа" с концентрациями, соответственно, $C \sim 0,1+1$ и $C_{Xe} \sim 10^{-4}$ ($C_z = n_z/n_H$, где n_z, n_H - атомарные плотности газов). Мюоны, остановившиеся в смеси, захватываются атомами водорода и гелия с относительными вероятностями I и Ac , соответственно, образуя возбужденные μm^* - и $He \mu^*$ -атомы, постепенно переходящие в основное состояние. Основные механизмы возбуждения мезоатомов водорода обусловлены их соударениями с атомами смеси. В случае столкновения μm -атома с атомом гелия может произойти перехват:



Если $w_H = (I + Ac)^{-1}$ - вероятность атомного захвата на водород, а w_0 - вероятность успешного перехода μm -атома в основное состояние, то при остановке в смеси N_0 -мезонов ко времени окончания атомного каскада в водороде ($\sim 10^{-9}$ с) образуется $N_{10} = N_0 w_H w_0$ и $N_{20} = N_0 (1 - w_H w_0)$ атомов μm и $He \mu$, соответственно. На этом этапе влияние на процесс малой примеси ксенона и распадов мюонов пренебрежимо мало. Далее μm -атом, находясь уже в основном состоянии, может отдать мюон атому гелия



или атому ксенона, может образовать мезомолекулу μm или исчезнуть

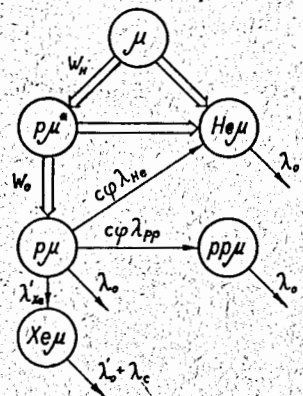


Рис.5 Схема процессов: у широких стрелок указаны вероятности переходов, у узких - скорости процессов.

из-за распада мюона. Добавка пробного газа такова, что скорость перехода мюонов на ксенон сравнима со скоростью их распада: $\lambda_{\text{Xe}} \sim \lambda_0 = 0,455 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Образующиеся $\text{He}\mu$ -атомы быстро исчезают вследствие захвата мюона ядром ксенона (скорость $\lambda_c \sim 10^7 \text{ с}^{-1}$) или распада мезона (в поле ядра скорость $\lambda_0 \approx \lambda_0$). Что касается $\text{He}\mu$ -атомов и $\mu\mu$ -молекул, то они исчезают только из-за распадов мюонов. Характерные времена всех этих процессов - микросекунды, для них первый

этап можно считать мгновенным, и число мезоатомов, определенное для конца первого этапа, отнести к нулевому моменту времени. Зависимость количества мезоатомов и мезомолекул от времени описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_{\mu}: N_1(t) &= N_{10} e^{-\lambda_5 t}, \\ \text{He}\mu: N_2(t) &= N_{20} e^{-\lambda_0 t} + N_{10} \frac{\psi \lambda_{\mu\text{He}}}{\lambda_5 - \lambda_0} c (e^{-\lambda_0 t} - e^{-\lambda_5 t}), \\ \mu\mu: N_3(t) &= N_{10} \frac{\psi \lambda_{\mu\mu}}{\lambda_5 - \lambda_0} (e^{-\lambda_0 t} - e^{-\lambda_5 t}), \\ \text{He}\mu: N_4(t) &\approx N_{10} \frac{\lambda'_{\text{Xe}}}{\lambda_c + \lambda_0 - \lambda_5} e^{-\lambda_5 t}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\lambda_5 = \lambda_0 + \lambda'_{\text{Xe}} + \lambda'_{\mu\mu} + \text{ср} \lambda_{\mu\text{He}} = \lambda_1 + \text{ср} \lambda_{\mu\text{He}}$$

(ψ - относительная плотность водорода). Во временных распределениях $\mu\mu$ - и $\text{He}\mu$ -атомов доминируют составляющие с различными экспонентами: $\exp(-\lambda_5 t)$ и $\exp(-\lambda_0 t)$. Соответственно различаются и распределения вторичных частиц, рождающихся в процессах, инициированных этими мезоатомами. Причем $\text{He}\mu$ -атомы дают только распадные электроны, а остальные частицы - каскадные γ -кванты и продукты ядерного захвата в $\text{He}\mu$ -атомах - связаны с $\mu\mu$ -атомами.

Метод эксперимента состоит в том, что при анализе временных спектров нейтральных и заряженных частиц, измеренных при некоторой концентрации гелия, определяются вклады в них от процессов, вызванных первоначально образованными $\mu\mu$ - и $\text{He}\mu$ -атомами. Возможность такого разделения обеспечивается различием составляющих спектров как по фор-

ме, так и по соотношению в этих компонентах нейтральных и заряженных частиц. В результате могут быть определены относительные значения чисел N_{10} и N_{20} , а из них - величины $w = w_{\mu} w_0 = N_{10} / (N_{10} + N_{20})$ для данной концентрации гелия. Анализ временных распределений дает ответ также на вопрос, зависит ли скорость λ_5 от концентрации гелия. Поскольку, как определено в (3), $\lambda_1 = \text{const}(c)$, то наличие такой зависимости явилось бы прямым указанием на существование перехвата из основного состояния: $\lambda_{\text{He}} > 0$.

Далее рассмотрено, как формируются спектры заряженных $E(t)$ и нейтральных $G(t)$ частиц с учетом неточного их разделения. Ошибки в определении типа частиц обусловлены двумя главными причинами: неполной эффективностью регистрации счетчиком 5 заряженных частиц и, при регистрации основным детектором нейтральной частицы, попаданием в счетчик 5 сопровождающей ее заряженной частицы либо мягкого γ -кванта. Показано, что совокупность таких неизвестных точно факторов, как вероятности испускания различных частиц и относительные значения эффективностей их регистрации, может быть сведена к двум параметрам, характеризующим смешивание $\mu\mu$ - и $\text{He}\mu$ -компонент в спектрах $G(t)$ и $E(t)$: $E_{\mu\mu}(t) = \epsilon G_{\mu\mu}(t)$ и $G_{\text{He}\mu}(t) = \gamma E_{\text{He}\mu}(t)$. Параметры γ и ϵ , а также нормировочные множители для компонент спектров определяются с помощью измерений с чистым водородом "H" и смесью "H+Xe".

Всего было проведено 3 серии измерений, главное различие между ними - количество ксенона в смеси и области значений концентрации гелия. В каждой серии (сеансе) делались измерения с пустой мишенью, с чистым водородом, со смесью H+Xe и с добавлением нескольких порций гелия (H+Xe+He₁). Кроме того, для контрольных целей проводились измерения с чистым гелием. Данные о составах смесей приведены в таблице 2. Мерой концентрации ксенона является скорость λ'_{Xe} , в таблице дано ее отношение к скорости λ_0 . Каждый детектор использовался для регистрации как нейтральных вторичных частиц, так и заряженных. Для обработки были построены спектры $G(t)$ и $E(t)$ в интервале времен 0,7-8,2 мкс.

Таблица 2. Характеристики состава газовой смеси в эксперименте.

Сеанс	Давление водорода (атм.)	$\lambda'_{\text{Xe}} / \lambda_0$	Значения концентрации гелия
I	20	≥ 8	0,46; 0,89
II	16,5	3	0,19; 0,38; 0,70; 1,03; 2,14
III	24,6	I	0,05; 0,11; 0,29

Изложены процедура и результаты первого этапа обработки данных, проведенного в предположении отсутствия перехвата мюонов на гелий из основного состояния $\rho\mu$ -атомов. В этом случае $\lambda_g(c) = \text{const}$, что позволяет оперировать только с интегральными выходами частиц. Результаты обработки показали, что перехват мюонов на гелий весьма интенсивен, однако его характеристики оказались зависящими от концентрации ксенона, причем характер зависимости указывал на наличие конкуренции между перехватом на гелий и на ксенон.

Поскольку влияние ксенона на этапе существования возбужденных $\rho\mu$ -атомов из-за малой его концентрации пренебрежимо мало, можно предположить, что идет перехват мюонов на гелий из основного состояния $\rho\mu$ -атомов. Для получения корректных результатов с учетом этой возможности была проведена полная обработка, основывающаяся на анализе временных распределений частиц, общие черты которого охарактеризованы выше. Однако уже предварительное рассмотрение временных спектров дает ответ на вопрос о существовании перехвата из основного состояния.

На рис.6а приведены в качестве примера λ -спектры, полученные в сеансе II при нескольких значениях концентрации гелия. На рис.6б представлены результаты разложения этих спектров (после вычитания фона) на составляющие $\exp(-\lambda_g t)$ и $\exp(-\lambda_o t)$. Как видно, с увеличением количества гелия вклад первой экспоненты уменьшается (что указывает на уменьшение числа $\rho\mu$ -атомов $N_{\rho\mu}$) и растет ее наклон, что является свидетельством перехвата мюонов на гелий из основного состояния $\rho\mu$ -атомов. При концентрации $C \approx 1$ эта экспонента уже не наблюдается. Вклад второй экспоненты является мерой количества образовавшихся $\text{He}\mu$ -атомов $N_{\text{He}\mu}$; при $C > 0,5$ он становится доминирующим. На рис.7 приведены значения λ_g как функции концентрации гелия, полученные в сериях II и III, в совокупности они показывают систематический рост λ_g с концентрацией гелия.

Окончательная обработка данных состояла в одновременной аппроксимации всех спектров выражениями, основывающимися на распределениях (3) с нахождением параметров: λ_{He} - общего для всех данных; λ, ϵ , нормированных множителей и характеристик фона, общих для каждой серии; значений w_i , индивидуальных для каждой точки с концентрацией C_i . В результате было найдено:

$$\lambda_{\text{He}} = (3,6 \pm 1,0) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$$

Это значение хорошо согласуется с величиной скорости, вычисленной в предположении существования молекулярного механизма перезарядки $\rho\mu$ -атомов на атомах гелия $\lambda_{\text{He}}^{\text{теор.}} = 4,4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ (Д.А.Аристов и др. ЯЭ, 1981, 33, с.1066). На рис.7 штриховыми линиями показаны зависи-

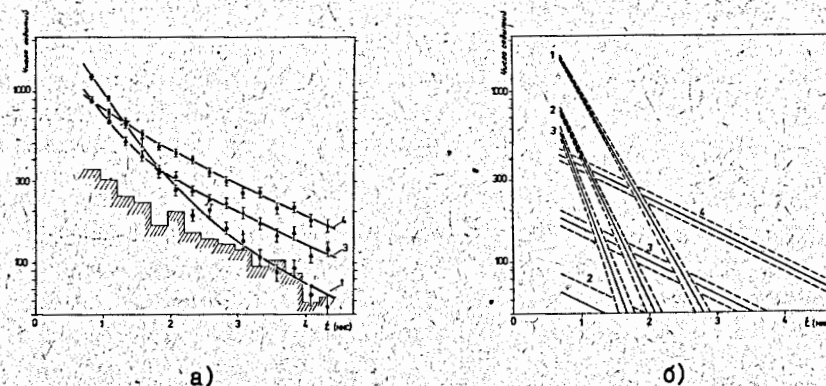


Рис.6 а) Примеры временных λ -спектров (измеренных при концентрации гелия: 1-0; 2-0,19; 3-0,38; 4-1,03; б) разложение их на составляющие компоненты.

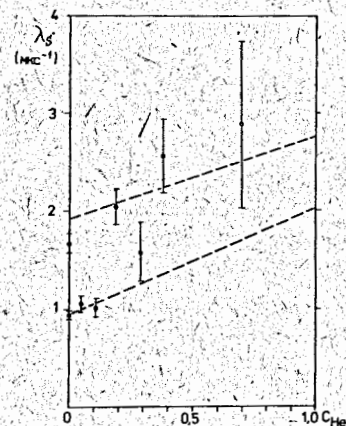


Рис.7 Предварительные оценки величин λ_g (O - II сеанс, ● - сеанс III) и зависимости $\lambda_g(C)$ для этих сеансов, полученные в результате полной обработки.

мости $\lambda_g(C)$, полученные при пересчете найденной скорости λ_{He} к значениям плотности водорода в сериях II и III.

Данные о вероятностях $w_i(C_i)$ приведены в таблице 3 и на рис.8. На этом же рисунке изображена аналогичная зависимость для пионов $\lambda_{\pi}(c)$ (В.И.Петрухин, В.М.Суворов. ЖЭТФ,

1976, 70, с.1145) с тем отличием, что если пион не перехватывается, то каскад в $\rho\pi$ -атоме завершается ядерным захватом пиона протоном. Из рис.8 видно, что точки для мюонов идут заметно ниже. Поскольку есть основания полагать, что атомный захват пионов и мюонов в смеси водорода и гелия описывается одинаково, делается вывод о том, что существует перехват мюонов из возбужденных состояний $\rho\mu$ -атомов на гелий, более интенсивный, чем перехват пионов. Аналогично параметру перехвата пионов на гелий $\lambda_{\pi} = 1,84 \pm 0,09$ (см. предыдущую ссылку) для мюонов имеем: $\lambda_{\mu} = 3,8 \pm 0,3$, что дает оценку скорости перехвата, приве-

Таблица 3. Измеренные значения w .

C_1	w_1	C_1	w_1
0,05	0,87±0,03	0,46	0,25±0,02
0,11	0,70±0,04	0,70	0,13±0,02
0,19	0,50±0,02	0,89	0,12±0,02
0,29	0,33±0,05	1,03	0,06±0,02
0,38	0,28±0,03	2,14	-

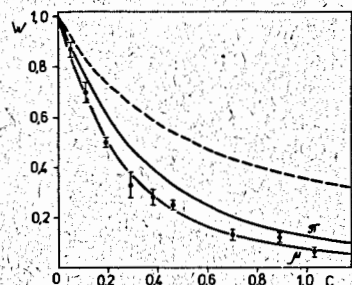


Рис.8 Измеренные значения w_1 и их аппроксимация (μ); π — аналогичная зависимость для пионов.

денной к плотности жидкого водорода, $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Различие связывается с ядерным захватом пионов с нижних уровней $\rho\pi$ -системы, подавляющим перехват из этих состояний на гелий. Наличие же перехвата с нижних уровней $\rho\mu$ -системы —

процесса, скорость которого пропорциональна плотности водорода, конкурирующего с девозбуждением, скорость которого слабо зависит от плотности (основной механизм девозбуждения для нижних уровней — радиационные переходы) — означает, что в перехвате мюонов, в отличие от перехвата пионов, должен проявляться эффект плотности.

В заключении формулируются результаты диссертационной работы.

1. Решены вопросы постановки серии экспериментов по исследованию мю-атомных и мезомолекулярных процессов на линии с ЭМ. Модифицирована система регистрации и отбора событий, оптимизировано распределение функций между электронной системой установки и ЭМ.

2. В эксперименте с газообразным водородом измерено эффективное сечение рассеяния $\rho\mu$ -атомов на молекулах водорода $\sigma(\rho\mu + \text{H}_2) = (42 \pm 8) \cdot 10^{21} \text{ см}^2$, что соответствует сечению рассеяния на свободных протонах $\sigma(\rho\mu + p) = (17,4 \pm 3,3) \cdot 10^{21} \text{ см}^2$. При интерпретации данных применен простой способ учета связанности протонов в молекуле, использующий ее классический аналог. Результат согласуется с новыми теоретическими данными о синглет-синглетном рассеянии $\rho\mu$ -атомов на протонах и с последними экспериментами, проведенными в ЦЕРНе. Тем самым сечение этого процесса может считаться установленным.

3. В экспериментах с газообразными смесями водорода с гелием:

а) обнаружен перехват мюонов с $\rho\mu$ -атомов, находящихся в основном состоянии, на гелий и определена его скорость $\lambda_{\text{He}} = (3,6 \pm 1,0) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, что согласуется с расчетом, основанным на предположении о мезомолекулярном механизме этого процесса;

б) впервые для μ -мезонов измерена зависимость $w(c)$ — вероятность образования в смеси водорода с гелием $\rho\mu$ -атома в основном состоянии; сопоставление ее с соответствующей функцией для π -мезонов $w_{\pi}(c)$ позволяет сделать, независимо от интерпретации $w_{\pi}(c)$ -зависимости, вывод о существовании перехвата мюонов из возбужденных состояний $\rho\mu$ -атомов на гелий, причем более интенсивного, чем перехват пионов, что связывается с дополнительным вкладом в перехват мюонов нижних уровней $\rho\mu$ -системы; мюонный параметр перехвата должен, в отличие от пионного, возрастать с ростом плотности водорода.

Публикации

1. В.М.Быстрицкий, А.И.Руденко, В.М.Суворов, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. Отбор событий в экспериментах по исследованию μ -атомных и мезомолекулярных процессов. ПТЭ, 1983, 4, с.48.
2. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, А.И.Руденко, В.М.Суворов, В.В.Фильченков, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. Измерение сечения рассеяния $\rho\mu$ -атомов в газообразном водороде. Препринт ОИЯИ, Р1-84-17, Дубна, 1984; ЖЭТФ, 1984, 87, с.384.
3. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, А.И.Руденко, Л.Н.Сомов, В.М.Суворов, В.В.Фильченков, Г.Хемниц, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. Наблюдение перехвата мюонов в столкновениях $\rho\mu + \text{He}$. В кн.: "Мезоны в веществе". Труды международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе. ОИЯИ, Д1,2,14-10908, Дубна, 1977, с.220.
4. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, В.И.Петрухин, А.И.Руденко, В.М.Суворов, В.В.Фильченков, Н.Н.Хованский, Б.А.Хоменко. Перехват мюонов с водорода на гелий. Препринт ОИЯИ, Р1-82-646, Дубна, 1982; ЖЭТФ, 1983, 84, с.1257.

Рукопись поступила в издательский отдел 19 февраля 1985 года.