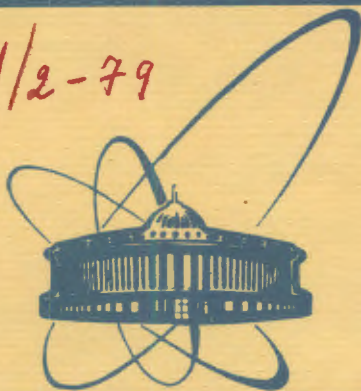


3154/2-79



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

С346.36

Б-334

13/8-79

6 - 12342

В.А.Башкиров, В.В.Говоров, Ю.П.Добрецов,
Б.А.Долгошеин, Б.Ж.Залиханов, В.Г.Зинов,
В.Г.Кириллов-Угрюмов, П.Л.Невский, А.М.Рогожин,
А.Я.Смаков, А.В.Сумароков

НАБЛЮДЕНИЕ МЮ-НУКЛОННОГО АТОМА ХЛОРА

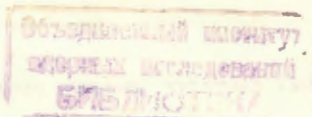
1979

6 - 12342

В.А.Башкиров*, В.В.Говоров*, Ю.П.Добрецов*,
Б.А.Долгошеин*, Б.Ж.Залиханов, В.Г.Зинов,
В.Г.Кириллов-Угрюмов*, П.Л.Невский*, А.М.Рогожин*,
А.Я.Смаков*, А.В.Сумароков*

НАБЛЮДЕНИЕ МЮ-НУКЛОННОГО АТОМА ХЛОРА

*Московский инженерно-физический институт.



Башкиров В.А. и др.

6 - 12342

Наблюдение мю-нуклонного атома хлора

Приведены результаты эксперимента по наблюдению мю-нуклонного атома хлора, возникающего при захвате отрицательных мюонов атомами аргона. Использовался метод прецессии полного момента мю-нуклонного атома в слабом поперечном магнитном поле с регистрацией временного спектра электронов μ -e распада. Эксперимент проведен на мезонном канале Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, газовая мишень (объем - 1,8 л, давление - 46 атм) использовалась одновременно как сцинтилляционный детектор для регистрации остановок мюонов в ее рабочем объеме. Описывается экспериментальная установка и методика проведения измерений.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Bashkirov V.A. et al.

6 - 12342

Observation of μ^- -Nucleon Atom of Chlorine

The results of experiment on the observation of μ^- -nucleon chlorine atom produced at the capture of negatively charged muons by argon atoms are described. The method of precession of the total momentum of μ^- -nucleon atom in a weak transverse magnetic field with registering time spectrum of μ -e-decay electron was used. The experiment was performed on a JINR meson channel, gas target (volume - 1.8 l, pressure - 46 atm.) was used simultaneously as a scintillation detector for registering muon stops in its working volume. Experimental setup and methods of measuring are described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известны два эксперимента по обнаружению образования свободных мю-нуклонных атомов /1-3/ - мю-мезоатомов с полностью заполненной электронной оболочкой. В первом из них был обнаружен мю-нуклонный фтор, во втором - водород. Интерес к таким системам связан с большими возможностями по использованию их в качестве инструмента как для изучения физико-химических свойств вещества, так и для изучения свойств самого мюона /4-6/. Поэтому важным является расширение списка мю-нуклонных атомов, наблюдавшихся экспериментально.

Нами исследовалось образование мю-нуклонного атома хлора, возникающего при захвате отрицательных мюонов атомами аргона. Как известно, атом хлора обладает парамагнетизмом, обусловленным P-состоянием его внешней электронной оболочки. Поэтому существование свободного мю-нуклонного атома хлора может быть обнаружено по прецессии его полного момента $F = J \pm \frac{1}{2}$ (где J - момент электронной оболочки, $\frac{1}{2}$ - спин мюона) в магнитном поле с частотой $\omega = g(F)M_e H$, где H - магнитное поле, M_e - электронный магнетон Бора, $g(F)$ - фактор Ланде.

В опыте регистрировался временной спектр электронов μ -e распада, модулированный частотой прецессии полного момента в поперечном магнитном поле напряженностью 3,0 и 4,4 Э.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования по образованию мю-нуклонного атома хлора проводились на мезонном канале синхроциклотрона

Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ ^{7/} на мягком пучке отрицательных мюонов с импульсом 110 МэВ/с, растянутом во времени и лишенном временной структуры (полуширина на полувысоте кривой пробегов $\Delta L = 2,1 \text{ г/см}^2$ углерода, поляризация пучка $P_0 = 0,75 \pm 0,05$). Этот пучок имеет определенные преимущества в исследованиях с останавливающимися в тонких мишенях мюонами, обеспечивая наибольшее отношение плотности остановок в мишени к интенсивности частиц, проходящих через нее ^{8/}. Общая схема экспериментальной установки и блок-схема электронной аппаратуры приведены на рис. 1 и 2. Сцинтилляционные счетчики 1 и 2 размером $20 \times 20 \times 1 \text{ см}^3$ и $10 \times 10 \times 0,3 \text{ см}^3$ соответственно регистрировали пучок мюонов, проходящий через свинцовый коллиматор диаметром 9 см. Дополнительное формирование пучка осуществлялось латунным коллиматором диаметром 7 см. Малая толщина фильтра ($5 \pm 7 \text{ г/см}^2$) позволяла использовать в качестве замедлителя полиэтилен, в котором мюоны слабо рассеиваются. Газовая мишень использовалась одновременно как сцинтилляционный детектор для регистрации остановок мюонов в ее рабочем объеме ^{9/}. Сферический корпус мишени (рис. 3) изготовлен из нержавеющей стали, внутренний диаметр - 150 мм, толщина стенок - 3 мм, рабочее давление газа - 46 атмосфер. Объем газовой мишени просматривался ФЭУ-110 через окно, закрытое кварцевым стеклом толщиной 40 мм. Световод из полистирола использовался для вывода ФЭУ с магнитным экраном из области магнитного поля.

Для выделения остановок в газе использовался метод дискриминации сигнала с газовой мишени (с помощью дискриминатора с точной временной привязкой ДП ^{10/}), основанный на резкой зависимости ионизационных потерь от энергии частиц, попадающих в газ.

Для формирования полностью заполненной электронной оболочки мю-нуклонного атома хлора аргон должен содержать химически инертную примесь, обладающую потенциалом ионизации, меньшим, чем энергия связи последнего электрона в мю-нуклонном атоме. Для этой цели использовался ксенон. Мишень наполнялась следующими смесями газов: Ar (45 атм.) + Xe (1 атм.) и Ar (39 атм.) + Xe (7 атм.). Увеличение концентрации ксенона привело

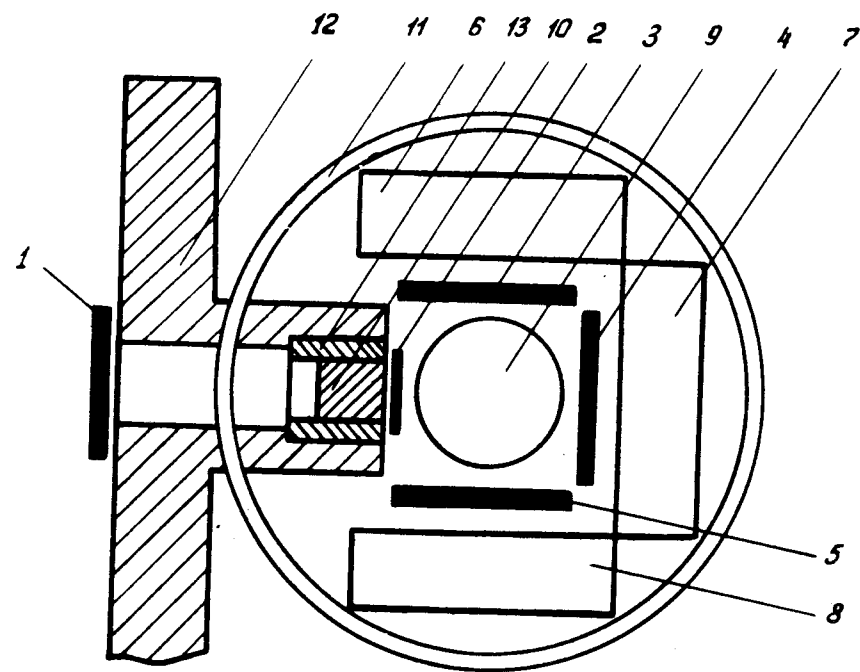


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1,2 - мониторные счетчики; 3÷5 - e-счетчики электронного телескопа; 6÷8 - E-счетчики электронного телескопа; 9 - газовая мишень; 10 - фильтр из полиэтилена; 11 - кольца Гельмгольца; 12 - свинцовая защита; 13 - латунный коллиматор.

к увеличению амплитуды сцинтилляционной вспышки и улучшению энергетического разрешения детектора: $\Delta A/A = 22\%$, где A - средняя амплитуда сигнала от α -источника, установленного внутри мишени (рис. 3), ΔA - ширина на полувысоте амплитудного распределения.

Три электронных телескопа, каждый из которых состоял из двух счетчиков, включенных на совпадения, позво-

лили получить большой телесный угол регистрации электронов распада $4\pi \times 0,3$ ср. Е - счетчики электронного телескопа имеют размеры пластического сцинтиллятора ($30 \times 30 \times 10 \text{ см}^3$) с воздушным световодом для вывода ФЭУ-52 с магнитным экраном из области магнитного поля. Средняя энергия электронов распада - 33 МэВ ^{11/}, их энергетические потери в Е-счетчиках составляют в среднем 20 МэВ. После калибровки Е-счетчиков на пучке проходящих релятивистских частиц на дискриминаторах Д устанавливался уровень дискриминации, соответствующий энергетическим потерям 10 МэВ в сцинтилляторе, что исключало в рабочих условиях регистрацию мягких фоновых γ -квантов. Для эффективной работы Е-счетчиков необходимо хорошее амплитудное разрешение и равномерная зонная характеристика ФЭУ. Это обеспечивалось подбором потенциалов на фокусирующих электродах и первом диоде ФЭУ-52 по методике, предложенной в работе ^{12/}.

Временное разрешение Е-счетчиков, измеренное для проходящих через счетчик частиц, равно времени нарастания сигнала на аноде фотоумножителя и составило ~ 6 нс.

е-счетчики имели размеры сцинтиллятора ($20 \times 20 \times 1 \text{ см}^3$), который просматривался через плексигласовый световод фотоумножителем ФЭУ-30. Использование низкопороговых формирователей позволило получить временное разрешение е-счетчиков порядка 2 нс. Сигнал с низкопороговых формирователей поступал на входы схем совпадения С3, С4, С5 (рис. 2) с задержкой ~ 10 нс по отношению к сигналу с дискриминаторов. Для улучшения эффективности подавления запусков от проходящих частиц сигналы с ФН подавались на вход антисовпадений схемы С2.

Распределение интервалов времени между остановкой мюона в мишени (сигнал $12\text{Г}\bar{e}$) и его распадом (сигнал eE) регистрировалось с помощью Т-К конвертора ^{13/}, который преобразовывал временной интервал в код, поступающий на многоканальный анализатор АИ-4096. Осуществлялось разделение памяти анализатора на четыре плоскости по 512 каналов в каждой. Кодировка каждого события с помощью схемы "дешифратор" позволяла записывать его в одну из трех плоскостей в зависимости от номера теле-

скопа, регистрирующего электрон распада. После прихода сигнала "старт" ($12\text{Г}\bar{e}$) Т-К конвертор вырабатывал импульс ворот длительностью 7 мкс, в течение которого велась регистрация электронов распада. "Охранная" логика (блоки кратных событий "2e" и "2 μ ") контролировала появление только одного мюона и одного электрона в рабочем интервале $1 \text{ мкс} \div 6 \text{ мкс}$ ($t=0$ - момент остановки мюона), что обеспечивало равномерность фона случайных совпадений. В случае нарушения этого условия событие записывалось в четвертую плоскость анализатора. Сдвиг момента остановки мюона в рабочем интервале шкалы анализатора на 1 мкс осуществлялся блоками кабельных линий задержки ЛЗ. При совпадении во времени (хотя бы частично) сигналов с электронных телескопов на вход схемы "2e" со смесителя СМ приходил только один сигнал, поэтому для правильной идентификации такого события использовалась мажоритарная схема совпадений МС кратности два. Временные спектры электронов распада от каждого телескопа, модулированные частотой прецессии спина мюона, отличались лишь начальными фазами прецессии ϕ . Уровень фона случайных совпадений по отношению к первым каналам временного спектра электронов распада составил $\sim 1\%$.

Было проанализировано влияние следующих величин: Δt - ширины канала анализатора; m - числа каналов анализатора, приходящихся на период прецессии T ; $k\Delta t$ - величины рабочего интервала - на относительную ошибку $\frac{\Delta a}{a}$ вычисления коэффициента асимметрии a . В соответствии с полученными результатами измерения проводились при следующих условиях:

- 1) $\frac{k\Delta t}{\tau} \geq 3$,
- 2) $m \geq 10$,
- 3) $\frac{T}{\tau} < 1$,

где τ - время жизни мюона в веществе мишени. Ширина канала анализатора Δt определялась частотой кварцевого генератора Т-К конвертора и составляла 20 нс. Величина напряженности магнитного поля выбиралась такой, чтобы

выполнялись условия 2) и 3). Магнитные поля напряженностью $1 \div 5$ Э создавались кольцами Гельмгольца (ϕ колец = 670 мм), а поля напряженностью $40 \div 60$ Э - соленоидом с $\phi = 150$ мм и длиной 300 мм. Ось катушки и ось соленоида совпадали с направлением рассеянного поля ускорителя ($H_{уск} = 4,5$ Э), которое сохраняло постоянную величину и направление в течение проведения измерений. Поэтому $H_{\Sigma} = H_{уск} + H_0$, где H_0 - поле, создаваемое катушками или соленоидом. Временная неоднородность магнитного поля $(\Delta H_{\Sigma}/H_{\Sigma})_{врем.}$ равнялась 0,4%, неоднородность поля в области, занимаемой газовой мишенью, $(\Delta H_{\Sigma}/H_{\Sigma})_{простр.}$ - 2%.

Очистка газа мишени от примесей осуществлялась путем его непрерывной циркуляции через печь с металлической стружкой кальция и титана, нагретой до температуры 650°C .

Методом хроматографического анализа было показано, что относительная концентрация примесей (O_2 , N_2 , H_2O , H_2 и простые органические соединения) в мишени при давлении газа 46 атм. не превышает 10^{-6} . Используя известные константы химических реакций к атомарного хлора ^{14/} и концентрации соответствующих примесей ($k \approx 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$), можно рассчитывать время вступления μ -нуклонного атома хлора в химические реакции с молекулами примесей с образованием диамагнитных соединений $t_{хим.} = 1/kn \approx 10^{-5}$ с, что гораздо больше времени жизни мюона в аргоне $\tau_{Ar} = 570$ нс.

ИЗМЕРЕНИЯ

В эксперименте использовалась ЭВМ НР-2116. Числовые массивы накапливались в памяти анализатора АИ-4096 в течение определенного времени, затем выводились на ЭВМ с записью на магнитную ленту. Программы первичной обработки экспериментальных спектров позволяли быстро получать необходимые данные для выбора и контроля условий проведения эксперимента.

1. Калибровочные измерения проводились на углеродной мишени размером $9 \times 9 \times 2,5$ см³ в магнитном поле напряженностью 40 Э. Полученное методом наименьших квад-

ратов (МНК) значение параметра асимметрии $a_c = (4,75 \pm 0,10)\%$ может быть использовано для калибровки результатов. Большая статистика, одночастотная прецессия с большим коэффициентом асимметрии позволяли с хорошей точностью определять начальные фазы прецессии. Эти фазы использовались при обработке спектров, полученных на газовой мишени.

2. Выбор рабочего уровня дискриминации сигнала с газовой мишени проводился путем выделения с помощью метода наименьших квадратов двух экспонент во временном спектре электронов распада, отвечающих остановкам в корпусе мишени ($\tau_{Fe} \approx 200$ нс) и в газе мишени ($\tau_{Ar} \approx 570$ нс) ^{9/}. Вычислялось отношение N_{Fe}/N_{Ar} , где N_{Fe} - полное число электронов распада мюонов, останавливающихся в стенках мишени, N_{Ar} - полное число электронов распада мюонов, останавливающихся в газе, в зависимости от уровня дискриминации сигнала с газовой мишени. Выбирался уровень дискриминации, обеспечивающий высокую скорость набора полезной статистики и малую долю проходящих газ частиц в общем числе запусков. В эксперименте получена средняя скорость набора полезной информации $n_{Ar} = 9$ соб./с, интегральный вклад электронов μ -е распада от остановок в стенках мишени N_{Fe}/N_{Ar} не превышал 10%.

3. Полное время набора статистики на газовой мишени состояло из отдельных экспозиций, длительность которых мониторировалась потоком мюонов N_{12} . Это позволяло осуществлять контроль условий проведения эксперимента и вносить необходимые коррективы в процессе измерений. При обработке результатов проводилось поканальное суммирование спектров отдельных экспозиций. Временная стабильность работы электроники контролировалась по положению на временной шкале анализатора момента остановки мюона в мишени. Для этого на пучке проходящих через мишень частиц организовывался режим работы электронной схемы, в котором сигналы "старт" (12Г) и "стоп" (eE) на входе Т-К конвертора инициировались одной и той же частицей. С помощью специальных программ обработки временного спектра электронов распада для отдельных экспозиций контролировалось отношение $N_{эфф}/N_{фон}$ (где $N_{эфф}$ - число

электронов распада, $N_{\text{фон}}$ - число фоновых событий на одном и том же временном интервале), средняя скорость набора полезной статистики n_{Ag} и интегральный вклад электронов μ -е распада от остановок мюонов в стенках мишени.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Прецессия полного момента атома в слабом магнитном поле подробно рассмотрена в работе ^{/2/} применительно к случаю мю-нуклонного атома фтора. Конфигурация внешней электронной оболочки галогенов одинакова, поэтому схема уровней мю-нуклонного атома хлора, квантовые числа, характеризующие каждое состояние (рис. 4), картина прецессии такие же, как и для мю-нуклонного атома F. В поперечном магнитном поле должны наблюдаться две частоты прецессии в основном состоянии атома галогена $^2P_{3/2}$ (ω для $F = 2$ и $5/3 \omega$ для $F = 1$) и одна - в возбужденном состоянии $^2P_{1/2}$ ($1/3 \omega$ для $F = 1$). Здесь ω - частота прецессии триплетного мюония в магнитном поле той же напряженности. Временное распределение электронов μ -е распада для случая P-состояния оболочки мю-нуклонного атома хлора имеет вид (в отсутствие фона):

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \left\{ 1 + a_k \left[\frac{a}{2} \cos\left(\frac{1}{3}\omega t + \phi\right) + (1-a) \frac{5}{16} \cos(\omega t + \phi) + (1-a) \frac{1}{16} \cos\left(\frac{5}{3}\omega t + \phi\right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где λ^{-1} - время жизни мюона в аргоне; ϕ - начальная фаза прецессии; a_k - коэффициент асимметрии, соответствующий остаточной поляризации мюона на K-оболочке в отсутствие сверхтонкого взаимодействия; a - заселенность $^2P_{1/2}$ -состояния; $(1-a)$ - заселенность $^2P_{3/2}$ -состояния; ω - частота прецессии триплетного мюония. Амплитуды прецессии на соответствующих частотах зависят от величины a_k , от характера заселенности состояний $^2P_{1/2}$

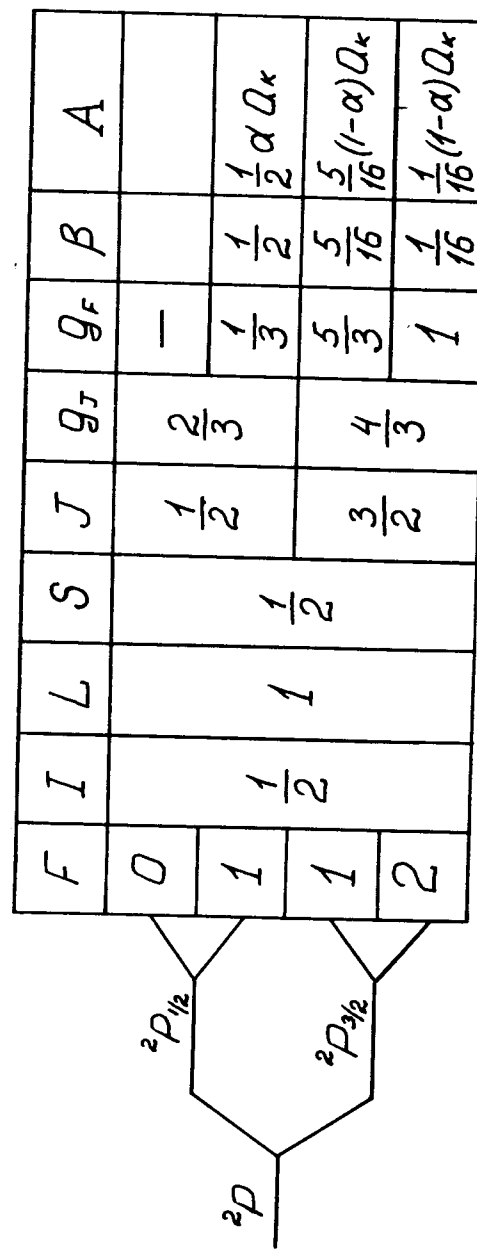


Рис. 4. Схема уровней мю-нуклонного атома хлора и таблица квантовых чисел. A - амплитуда прецессии на соответствующей частоте.

и ${}^2P_{3/2}$ и от величины β деполаризации мюона в результате заселения состояний с различными проекциями M_F полного момента F (для соответствующих частот $\beta = 1/2, 5/16$ и $1/16$, рис. 4).

Экспериментальные временные распределения электронов μ -е распада обрабатывались методом наименьших квадратов (МНК) с использованием зависимости (1). Учитывался вклад в экспериментальное распределение электронов μ -е распада от мюонов, остановившихся в корпусе мишени и в кварцевом стекле, через которое просматривался объем газовой мишени. Начало обработки спектра сдвигалось на несколько каналов, что позволяло избавиться от вклада экспоненты, отвечающей распаду мюонов, захваченных атомами ксенона ($\tau_{Xe} = 80$ нс, ширина канала - 20 нс). Обработка информации проводилась в следующей последовательности. Для каждого спектра, полученного с помощью одного из трех электронных телескопов, проводился гармонический анализ, который позволял выделять частоты прецессии и получать начальные приближения параметров для последующей обработки спектра нелинейным МНК (программа FUMILI). Начальные фазы прецессии ϕ , найденные при обработке спектров, полученных на углеродной мишени, фиксировались. В связи с сильной корреляцией параметра асимметрии a_k и заселенности ${}^2P_{1/2}$ -состояния мю-нуклонного атома определение величины a с помощью нелинейного МНК затруднено. Поэтому на первом этапе обработки величина a фиксировалась в предположении статистической заселенности состояний ${}^2P_{1/2}$ и ${}^2P_{3/2}$ ($a = 1/3$).

Затем применялся метод двухпараметрического анализа зависимости $\chi^2(a, a_k)$ для каждого спектра (остальные параметры, найденные на первом этапе обработки, фиксировались). Вес a и коэффициент асимметрии a_k не зависят от факторов, которые могли бы меняться от спектра к спектру, поэтому проводилась операция сложения χ^2 , полученных при одинаковых значениях a и a_k для каждого спектра. Результаты двухпараметрического анализа по всей статистике приведены на рис. 5. Получено значение веса ${}^2P_{1/2}$ -состояния мю-нуклонного атома хлора $a = 0,22 \pm 0,11$. Далее параметры $a_k, \omega, \lambda, N_0$ опре-

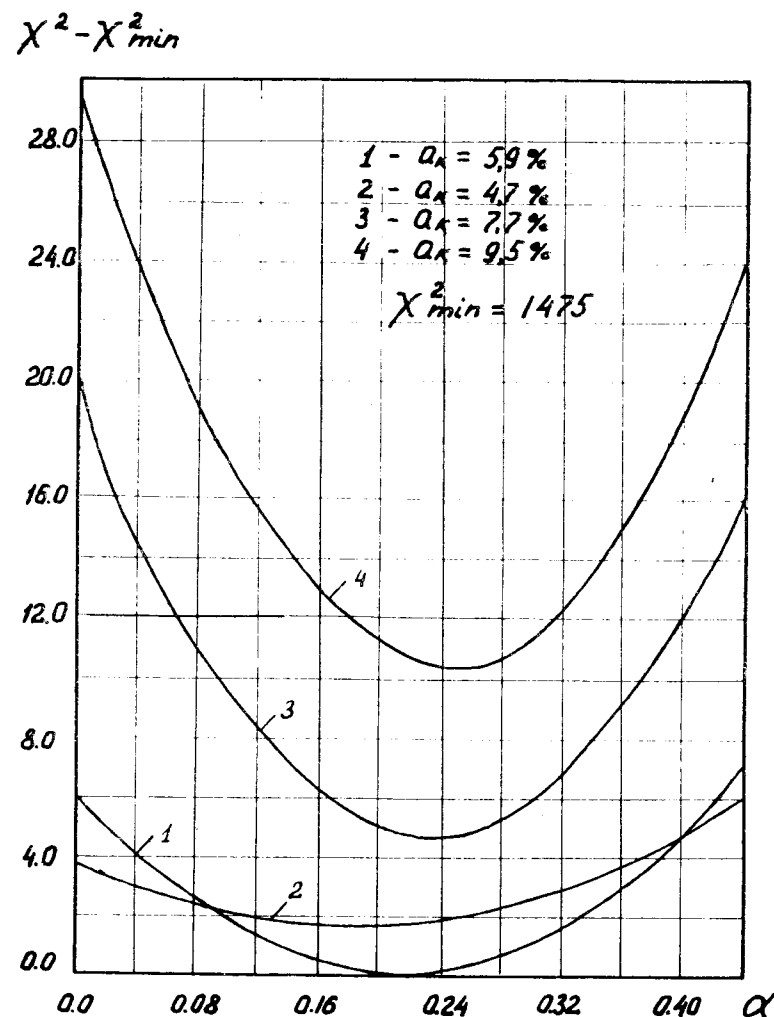
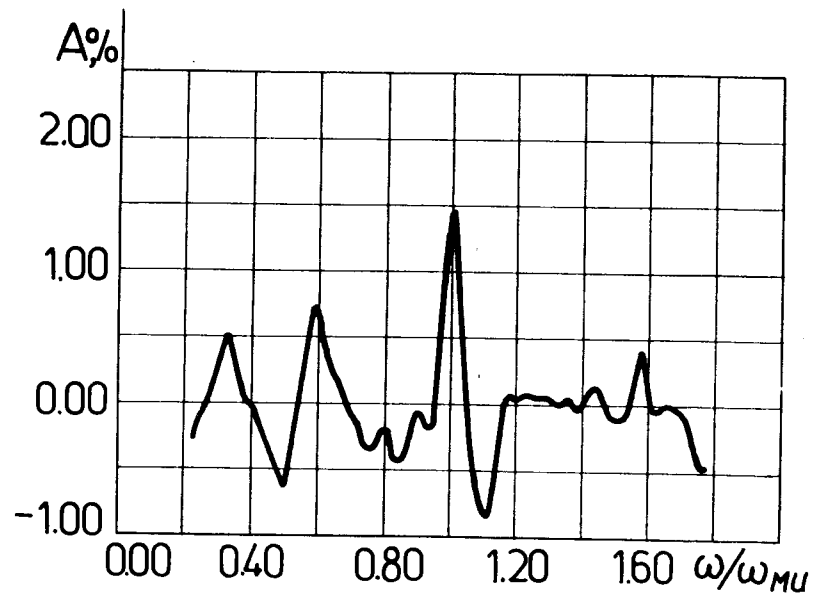
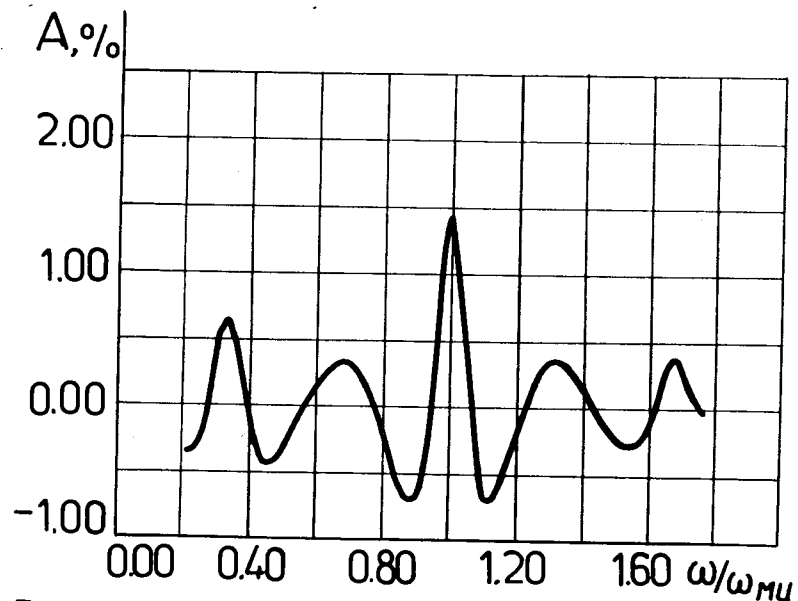


рис. 5. Результаты двухпараметрического анализа зависимости $\chi^2(a, a_k)$.



а)



б)

Рис. 6. Результаты гармонического анализа: а) экспериментального временного распределения электронов распада в аргоне; б) расчетного распределения, ожидаемого в случае образования мю-нуклонного атома хлора.

делялись нелинейным МНК при фиксированном значении параметра $\alpha = 0,22$ и усреднялись по трем спектрам соответствующих электронных телескопов. Получено средневзвешенное по всей статистике значение $a_k = (5,9 \pm 1,2)\%$ и время жизни отрицательного мюона в аргоне $\tau_{Ar} = 571 \pm 20$ нс.

На рис. 6 показаны результаты гармонического анализа всей статистики. На этом же рисунке приведена ожидаемая кривая, полученная с учетом условий эксперимента для случая трехчастотной прецессии при $a_k = 5,9\%$ и $\alpha = 0,22$. Поскольку измерения проводились в магнитных полях различной напряженности, для построения суммарной кривой ось абсцисс проградуирована в единицах $\omega/\omega_{\mu н}$, где $\omega_{\mu н}$ — частота прецессии триплетного мюония в данном магнитном поле.

Авторы выражают свою благодарность В.П.Джелепову и Л.И.Лапидусу за проявленный интерес и внимание к работе, а также В.А.Канцерову, В.Н.Старосельцеву, Р.Л.Ибрагимову и А.В.Василищуку за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варламов В.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, с.186.
2. Варламов В.Г. и др. ЯФ, 1975, 21, с.120.
3. Souder P.A. et al. Phys.Rev.Lett., 1975, 34, p.1417.
4. Горелкин В.Н., Смилга В.П. ЖЭТФ, 1974, 66, с.1201.
5. Горелкин В.Н. ЯФ, 1977, 26, с.367.
6. Барышевский В.Г., Кутень С.А. Мезоны в веществе. Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов. Дубна, 7-10 июня 1977 г. ОИЯИ, Д1,2,14-10908, Дубна, 1977.
7. Грашин Ю.М. и др. АЭ, 1965, 18, с.384.
8. Демьянов А.В., Роганов В.С. ОИЯИ, 1-4026, Дубна, 1968.
9. Говоров В.В. и др. ОИЯИ, 13-12341, Дубна, 1979.
10. Балдин Б.Ю., Крумштейн З.В., Ронжин А.И. ОИЯИ, 13-9850, Дубна, 1976; ПТЭ, 1977, 5, с.91.

11. Вайсенберг А.О. Мю-мезоны. "Наука", М., 1964.
12. Залиханов Б.Ж. Автореферат диссертации. ОИЯИ, 1-10897, Дубна, 1977.
13. Гребенюк В.М., Зинов В.Г. ПТЭ, 1972, №2, с.62; Медведь С.В. и др. ОИЯИ, 10-3836, Дубна, 1968.
14. Кондратьев В.Н. Константы скорости газофазных реакций. "Наука", М., 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 апреля 1979 года.