

ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ В ГАЗООБРАЗНОМ ДЕЙТЕРИИ ПРИ ДАВЛЕНИИ 10 атм

Г.Ф. Бинько¹⁾, В.Н. Гребенев¹⁾, Ю.Б. Гуров¹⁾, В.П. Джелепов,
Ю.П. Добрецов¹⁾, В.Г. Зинов, В.Г. Кириллов-Угрюмов¹⁾,
А.А. Малолетнев¹⁾, А.Л. Микаэлян¹⁾, А.П. Пичугин¹⁾,
В.В. Фильченков, Н.Н. Халько¹⁾

На установке с газовой мишенью, заполненной дейтерием до давления 10 атм, измерена остаточная поляризация отрицательных мюонов. Получено значение $P_\mu = (7,2 \pm 2,1)\%$, что согласуется с предсказаниями теории. Измерения выполнены на пучке мюонов фазотрона ОИЯИ.

Экспериментальное изучение процесса деполаризации отрицательных мюонов в водороде (протии, дейтерии, тритии) представляет значительный интерес, т.к. оно дает возможность получить сведения о начальном периоде жизни мезоатома — механизмах его образования и девозбуждения, и в принципе позволяет определить заселенности спиновых состояний мезоатомов и скорости переходов между ними, что крайне важно для исследования процессов μ -захвата и μ -катализа¹⁻³.

После остановки мюона в веществе значительная часть поляризации теряется уже в процессе каскадного девозбуждения мюонного атома за счет спин-орбитального и сверхтонкого взаимодействий. Согласно³ ожидаемая из теории величина поляризации к моменту образования в $1s$ -состоянии мюонного атома дейтерия составляет (для давления газа 10 атм)

$$P_\mu(D_2) \approx 9\% \quad (1)$$

В соударениях мезоатома с ядрами водорода происходит дальнейшая деполаризация. Как было впервые показано в⁴, эффективным механизмом потери поляризации являются процессы соударений типа

$$p\mu(F=1) + p \rightarrow p\mu(F=0) + p, \quad (2a)$$

$$d\mu(F=3/2) + d \rightarrow d\mu(F=1/2) + d, \quad (2б)$$

в которых происходит обмен мюона между тождественными ядрами с изменением полного спина мезоатома (F). Прямых измерений скоростей этих процессов до сих пор не выполнено. Экспериментальное определение скорости γ_d реакции (2б) основано на зависимости скорости резонансного образования молекул $dd\mu$ от спинового состояния $d\mu$ -атома. Результаты измерений величины γ_d ^{5,6} находятся в пределах $(3-5) \cdot 10^7 \phi \text{ с}^{-1}$, что находится в удовлетворительном согласии с теорией⁷⁻⁸:

$$\gamma_p = 1,6 \cdot 10^{10} \phi \text{ с}^{-1}, \quad \gamma_d = (3-5) \cdot 10^7 \phi \text{ с}^{-1}$$

(ϕ — относительная плотность водорода, значению $\phi = 1$ соответствует плотность ядер $N = 4,22 \cdot 10^{22}$ ядер/см³).

До настоящего времени выполнено три работы по измерению поляризации мюонов в водороде, две из них⁹ с жидким протием и одна¹ — с газообразным дейтерием при давлении 40 атм. Ни в одной из этих работ поляризация не наблюдалась, что не противоречит ожидаемым значениям скоростей деполаризации.

¹⁾ Московский инженерно-физический институт.

Целью настоящей работы было измерение остаточной поляризации мюонов в газообразном дейтерии при давлении газа 10 атм. Экспериментальная установка описана в работе ¹⁰, ее схема приводится на рис. 1. Главные части установки – газовая мишень с расположенными внутри нее кремниевыми полупроводниковыми детекторами (*D1* и *D2*), телескопы сцинтилляционных детекторов электронов (*E1–E3*) и магнит (кольца Гельмгольца). Принципиальной особенностью методики является использование спектрометрической информации от детекторов *D1* и *D2* для выделения остановок мюонов в газе.

Измерения были выполнены на мюонном тракте фазотрона ОИЯИ. Мишень заполнялась изотопически чистым дейтерием (содержание протия < 1%, трития – < 10⁻¹⁰, ядер с *z* > 1 менее 10⁻⁵) до давления 10 атм. Величина напряженности магнитного поля была выбрана равной *H* = 200 Э, что соответствует частоте прецессии спина мюона в *dμ*-атоме с *F* = 3/2, $\omega = 5,1$ рад/мкс.

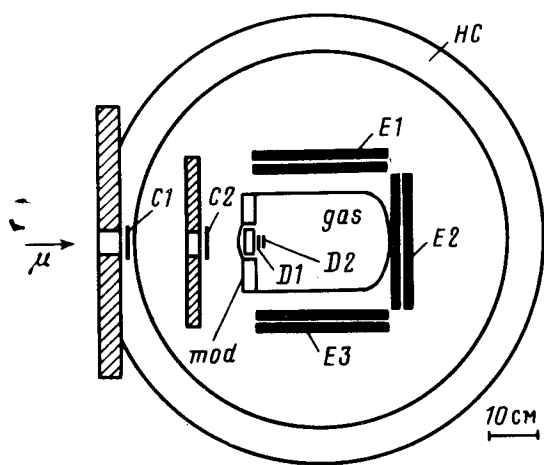


Рис. 1

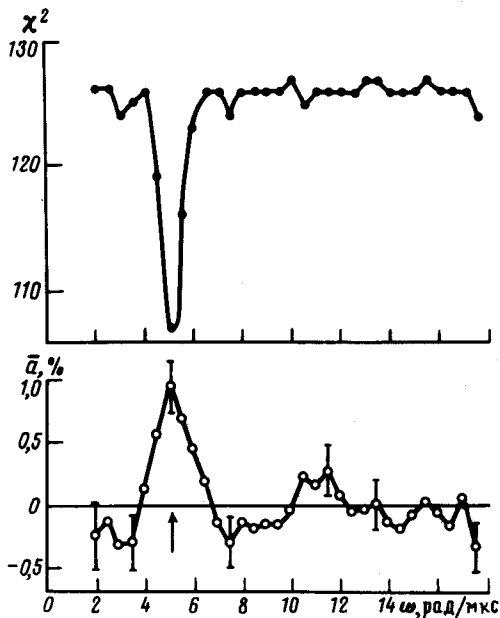


Рис. 2

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: КГ – магнит (кольца Гельмгольца); *C1–C2* – мониторные счетчики; *E1–E3* – телескопы сцинтилляционных детекторов электронов, *D1–D2* – полупроводниковые детекторы мюонов, *mod* – замедлитель мюонов

Рис. 2. Оптимальные значения эффективной амплитуды прецессии и соответствующие им значения величины χ^2 в зависимости от частоты прецессии. Получено при совместном анализе *E1–E3*-временных спектров

Логика эксперимента сводилась к следующему. Сигнал остановки мюона в мишени запускал временные "ворота" длительностью 10 мкс, в течение которых измерялось время регистрации электрона от распада мюона. Временные спектры электронов анализировались с помощью выражения

$$dN_e(t)/dt = A_{Fe} F_{Fe}(t) + A_{Si} F_{Si}(t) + A_{D_2} F_{D_2}(t) + B, \quad (3)$$

где функции $F_i(t)$ описывают временную зависимость регистрации электронов от распада мюонов, остановившихся в стенках мишени (Fe), детекторе *D2* (Si) и газе (*D2*), A_i – нормировочные постоянные, пропорциональные количеству остановок в соответствующем веществе

ве, B — фон случайных совпадений. Функции $F_i(t)$ имеют вид:

$$F_{Fe}(t) = e^{-\lambda_{Fe} t} \quad (4a)$$

$$F_{Si}(t) = e^{-\lambda_{Si} t} [1 + a_{Si} \cos(\omega_{Si} t + \delta_{Si})] \quad (4б)$$

$$F_{D_2}(t) = e^{-\lambda_{D_2} t} [1 + a_{D_2} e^{-\gamma t} \cos(\omega_{D_2} t + \delta_{D_2})], \quad (4в)$$

где $\lambda_{Fe} \approx 4,85 \text{ мкс}^{-1}$, $\lambda_{Si} \approx 1,30 \text{ мкс}^{-1}$, $\lambda_{D_2} \approx \lambda_0 = 0,455 \text{ мкс}^{-1}$ — скорости гибели мюонов (с учетом распада и захвата ядром), a_i , ω_i и δ_i — амплитуды, частоты и фазы прецессии, γ — скорость деполяризации мюонов в дейтерии, обусловленная главным образом процессом (2б).

В процессе обработки для телескопов $E1$ и $E3$ было построено два временных спектра, соответствующих разным диапазонам потерь энергии мюонов в детекторах $D1$ и $D2$. Надлежащий выбор границ этих диапазонов позволил отобрать в спектрах первой группы события практически только от остановок в кремнии, а во второй группе главным образом от остановок в дейтерии (примеси событий от кремния и железа не превышали 7%).

Анализ распределений первой группы позволил определить параметры функции (4б):

$$a_{Si} = 5,1 (7)\%, \quad \delta_{Si1} = -0,92(18), \quad \delta_{Si3} = 0,79(21)$$

(индексы 1 и 3 соответствуют телескопам $E1$ и $E3$); при этом измеренные значения $\lambda_{Si} = 1,30(3) \text{ мкс}^{-1}$ и $\omega_{Si} = 17,0(2) \text{ рад/мкс}$ не противоречат ожидаемому. Полученные таким образом результаты использовались при обработке спектров второй группы (дейтерий), которая осуществлялась в два этапа.

На первом этапе проводился анализ временных спектров методом наименьших квадратов, используя выражения (3, 4) для ряда значений частоты ω_{D_2} , причем скорость деполяризации γ полагалась равной нулю. Результаты такой обработки $\chi^2(\omega_{D_2})$ и $\bar{a}_{D_2}(\omega_{D_2})$ представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, при ожидаемом для $F = 3/2$ состоянии значение $\omega_{D_2} = 5,1 \text{ рад/мкс}$ наблюдается резко выраженный минимум χ^2 , что соответствует значению "эффективной", то есть усредненной по времени наблюдения, амплитуды прецессии

$$\bar{a}_{D_2} = (0,94 \pm 0,21)\% . \quad (5)$$

В действительности данное значение представляет собой нижнюю границу истинного коэффициента асимметрии.

С целью дополнительного контроля аппаратуры был выполнен анализ распределения, полученного путем поканального суммирования $E1$ - и $E3$ -спектров. В этом случае осцилляции должны взаимно погашаться, так как разность фаз для $E1$ и $E3$ — распределений $\delta_1 - \delta_3 = \pi$. Анализ был выполнен для нескольких произвольных значений фаз прецессии. Ни в одном из этих вариантов осцилляции не наблюдаются. Для ожидаемой частоты $\omega = 5,1 \text{ рад/мкс}$ значение фазы оптимизировалось, при этом получено $\delta = 0,49 \pm 0,27$, $\bar{a} = (-0,28 \pm 0,22)\%$. При анализе суммарного распределения было найдено значение скорости гибели мюонов в дейтерии $\lambda_{D_2} = 0,453 \pm 0,005 \text{ мкс}^{-1}$, что находится в согласии с величиной $\lambda_0 = 0,455 \text{ мкс}^{-1}$.

На втором этапе обработки в анализ была включена скорость деполяризации. В результате было найдено оптимальное значение величины γ и соответствующее ей значение начальной амплитуды поляризации

$$\gamma = (4 \pm 2) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}; \quad a = (1,83 \pm 0,53)\% . \quad (6)$$

Для перехода от амплитуды прецессии к величине поляризации было использовано соотношение $a = (0,25 \pm 0,06) P_\mu$, полученное в калибровочных измерениях с углеродной мишенью. В результате для остаточной поляризации в $1s$ -состоянии $d\mu$ -атома со спином $F =$

= 3/2 получается значение

$$P_{\mu}(D_2) = (7,2 \pm 2,1)\% . \quad (7)$$

Из сравнения экспериментального (7) и расчетного (1) значений величины поляризации мюонов в дейтерии следует, что они находятся в согласии друг с другом.

Авторы благодарны Л.И.Пономареву за поддержку работы, В.С.Евсееву, Т.Н.Мамедову и В.С.Роганову и А.И.Руденко за полезные обсуждения, И.С.Соковнину за помощь в наладке экспериментальной установки.

Литература

1. Быстрицкий В.М., Джеленов В.П., Зинов В.Г. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, 838.
2. Евсеев В.С., Мамедов Т.Н., Роганов В.С. Отрицательные мюоны в веществе. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Бухвостов А.П., Попов Н.П. ЖЭТФ, 1982, 82, 23.
4. Герштейн С.С. ЖЭТФ, 1958, 34, 463; Беляев В.Б., Захарьев Б.Н. ЖЭТФ, 1958, 35, 996; Герштейн С.С. ЖЭТФ, 1961, 40, 698.
5. Breunlich W.H. et al. Nucl. Phys., 1981, 353, 201.
6. Balin D.V. et al. Muon Catalyzed Fusion, 1988, 2, Ch. 5.
7. Melejhik V.S., Wozniak Y. Phys. Lett. A, 1986, 116, 370.
8. Пономарев Л.И., Сомов Л.Н., Файфман М.П. ЯФ, 1979, 29, 133. Меньшиков Л.И., Пономарев Л.И., Стриж Т.А., Файфман М.П. ЖЭТФ, 1987, 92, 1173.
9. Игнатенко А.Е. и др. ЖЭТФ, 1958, 35, 1131; Klem R.D. Nuovo Cim. A, 1967, 48, 743.
10. Бинько Г.Ф. и др. Препринт ОИЯИ, 13-89-155, Дубна, 1989.
11. Eskhause M. et al. Nucl. Phys., 1966, 81, 575.