Письма в ЖЭТФ, том 97, вып. 12, с. 763 – 765 © 2013 г. 25 июня

Исследование потерь поляризации мюонов в пластических сцинтилляторах и кварце μSR-методом

С. И. Воробьев[1)], *А. Л. Геталов, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, И. И. Павлова, А. Э. Морослип, Г. В. Щербаков*

С.-Петербургский институт ядерной физики им. Константинова,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 188300 Гатчина, Россия

Поступила в редакцию 15 марта 2013 г.

Проведены исследования потерь поляризации мюонов в пластических сцинтилляторах двух типов и в плавленом кварце с помощью мюонного метода (μSR-метода). Спектры прецессии спина мюона и мюония измерены на μSR-установке, размещенной на выходе мюонного канала синхроциклотрона ПИЯФ. Показано, что в пластиках значительная доля остановившихся мюонов участвует в процессах образования мюония. В результате эти мюоны полностью теряют поляризацию. Величина деполяризации мюонов существенно зависит от типа пластика. Обнаружен сдвиг частоты прецессии мюона во внешнем магнитном поле для образца плавленого кварца ($F_{\mathrm{Q},\mu} = 0.116 \pm 0.002$ МГц) по сравнению с соответствующей частотой в образцах пластических сцинтилляторов ($F_{1,\mu} = 0.101 \pm 0.005$ МГц и $F_{2,\mu} = 0.101 \pm 0.002$ МГц).

DOI: 10.7868/S0370274X13120011

В физических экспериментах для регистрации элементарных заряженных частиц часто используются детекторы, изготовленные с применением сцинтиллирующих пластиков. В случае использования таких детекторов при работе на поляризованных мюонных пучках нередко возникает вопрос о том, что происходит с поляризацией мюонов, остановившихся в сцинтилляционном счетчике.

Сцинтиллирующие пластики по физическим свойствам относятся к классу изоляторов. Известно [1], что во многих изоляторах в момент термализации мюон с большой вероятностью образует водородоподобный атом – мюоний ($\mathrm{Mu} \equiv \mu^+e^-$). В большинстве случаев образование атомов мюония сопровождается значительной потерей начальной поляризации остановившихся мюонов. Наиболее вероятными могут быть две причины потери поляризации:

1) образование мюония или парамагнитного радикала с большой частотой сверхтонкого расщепления, быстро распадающегося со скоростью $\lambda \sim \omega_0$, $\omega_0 \approx (4{-}5) \cdot 10^3$ МГц;

2) переход из одного парамагнитного состояния в другое, в результате которого происходит сбой фазы.

Реально в большинстве случаев прецессии мюония не наблюдается из-за быстрых химических реакций мюония, протекающих за время $\sim 10^{-10}$ с, существенно меньшее возможного времени наблюдения в эксперименте ($\sim 10^{-8}$ с), а также из-за наличия спин-обменных взаимодействий между электроном мюония и электронами среды.

Цель данного эксперимента заключалась в измерении потерь поляризации мюонов, остановившихся в сцинтиллирующих пластиках двух типов. Измерения проводились на мюонном канале синхроциклотрона ПИЯФ с помощью μSR-установки [2]. Для измерения потерь поляризации мюонов в исследуемых образцах был использован μSR-метод (метод вращения спина мюона во внешнем магнитном поле).

В настоящей работе были исследованы образцы пластических сцинтилляторов, изготовленные в двух разных лабораториях (Дубна, Харьков). Калибровочные измерения проводились на образцах алюминия (для определения начальной поляризации пучка мюонов) и плавленого кварца. Толщина образцов выбиралась из требования обеспечения одного и того же распределения остановок мюонов в образцах. Размер сепарированного поляризованного мюонного пучка на исследуемом образце ограничивался соответствующим коллиматором, одинаковым для всех образцов, чтобы обеспечить одинаковую геометрию на протяжении всего эксперимента. Исследования проводились при комнатной температуре во внешних перпендикулярных магнитных полях (~ 108 и ~ 7.5 Гс) при импульсе мюонов $P_\mu = 90$ МэВ/с.

Изучение сцинтилляционных материалов проводилось и ранее. Например, в работе Г.Г. Мясищевой и др. [3] исследовалась деполяризация μ^+-мезонов в сцинтиллирующих пластмассах.

[1)]e-mail: vsiloa@pnpi.spb.ru

Результаты измерений во внешнем поперечном магнитном поле ~ 108 Гс на образцах двух типов пластических сцинтилляторов, плавленом кварце и алюминии показаны на рис. 1 и 2. При данной величине

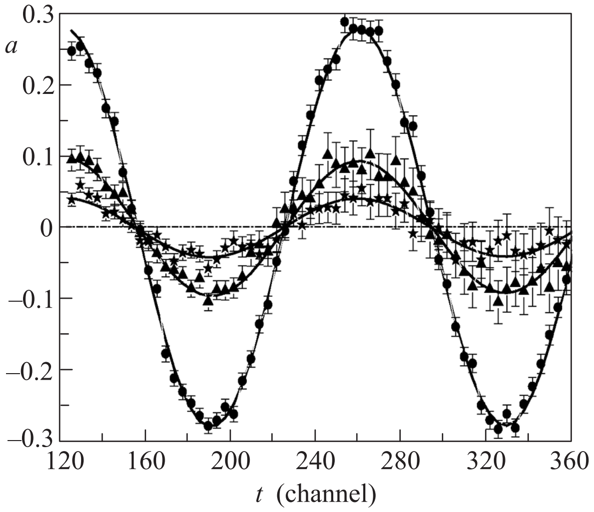

Рис. 1. Наблюдаемая прецессия спина мюонов в поле ~ 108 Гс. Один канал соответствует 5 нс. Нуль времени находится в 121-м канале. Кружки – Al ($a_{\mathrm{Al}} = 0.2794(24)$; $\lambda = 0.0089(33)$ мкс$^{-1}$); звездочки – пластик 1 ($a = 0.0419(20)$; $\lambda = 0.038(20)$ мкс$^{-1}$); треугольники – пластик 2 ($a = 0.0975(24)$; $\lambda = 0.0656(110)$ мкс$^{-1}$)

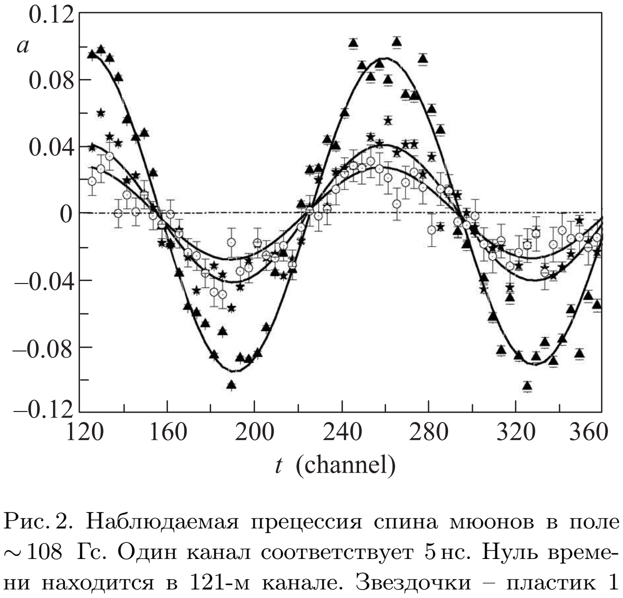

Рис. 2. Наблюдаемая прецессия спина мюонов в поле ~ 108 Гс. Один канал соответствует 5 нс. Нуль времени находится в 121-м канале. Звездочки – пластик 1 ($a = 0.0421(20)$; $\lambda = 0.0358(200)$ мкс$^{-1}$); треугольники – пластик 2 ($a = 0.0974(24)$; $\lambda = 0.0642(114)$ мкс$^{-1}$); кружки – кварц ($a = 0.0284(18)$; $\lambda = 0.0469(281)$ мкс$^{-1}$)

поля можно наблюдать прецессию только на мюонной частоте. Следовательно, по результатам измерения можно определить долю свободных мюонов по отношению ко всем мюонам, остановившимся в исследуемом образце. Наблюдаемая асимметрия распадов остановившихся в пластических сцинтилляторах мюонов связана с долей свободных мюонов.

На основании данных, приведенных на рис. 1 и 2, можно сказать, что и в пластических сцинтилляторах, и в плавленом кварце значительная доля остановившихся мюонов участвует в процессах образования атомов Mu (μ^+e^-). Оставшиеся свободные мюоны прецессируют на частоте внешнего магнитного поля (не наблюдается ни фазового сдвига, ни изменения частоты прецессии спина мюонов).

Остаточная поляризация мюонов для различных материалов

Материал	$P_{\mathrm{res}} = a_i/a_{\mathrm{Al}}$	Источник
Алюминий	1.0	Данная работа
Оргстекло	0.5	[3]
Полистирол	0.2–0.24	[3]
Пластик 1	0.33	Данная работа
Пластик 2	0.15	–//–
Кварц	0.11	–//–

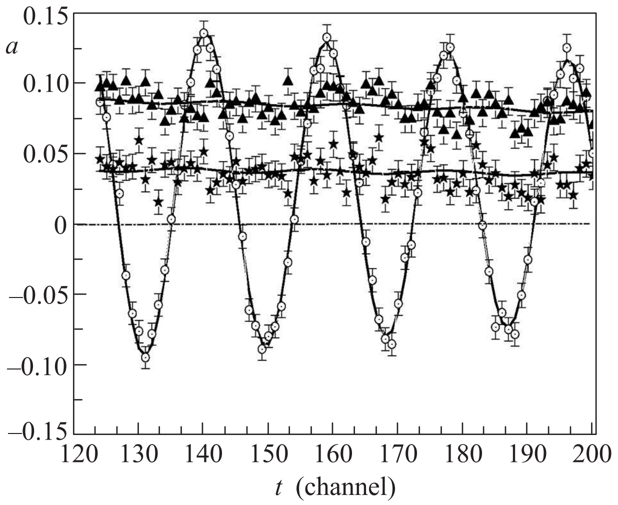

Рис. 3. Наблюдаемая прецессия на частоте мюония в поле ~ 7.5 Гс. Один канал соответствует 5 нс. Нуль времени находится в 121-м канале. Кружки – кварц ($a_{\mathrm{Mu}} = 0.121(1)$; $F_{\mathrm{Mu}} = 10.874(3)$ МГц; $a_{\mu} = 0.0232(6)$;$F_{\mathrm{Q},\mu} = 0.116(2)$ МГц); звездочки – пластик 1 ($a_{\mu} = 0.041(2)$; $F_{1,\mu} = 0.101(5)$ МГц); треугольники – пластик 2 ($a_{\mu} = 0.0908(19)$; $F_{2,\mu} = 0.101(2)$ МГц)

В таблице приводится остаточная поляризация для различных типов пластических сцинтилляторов, оргстекла, плавленого кварца и алюминия: $P_{\mathrm{res}} = a_i/a_{\mathrm{Al}}$ (где a_i – остаточные асимметрии для данных образцов, полученные путем обработки временных спектров, набранных в эксперименте, a_{Al} – асимметрия для образца из алюминия).

Измерения во внешнем поперечном магнитном поле позволяют одновременно наблюдать во временных спектрах прецессию как на частоте мюония, так и на частоте мюона ($F_{\mathrm{Mu}}/F_{\mu} = 103$). Сравнивая эти спектры, можно определить доли (веса) различных состояний мюона в исследуемом образце.

На рис. 3 показан начальный участок временного спектра для плавленого кварца и двух пластиков. На кварце хорошо видна прецессия на частоте мюония во внешнем магнитном поле с асимметрией $a_{\mathrm{Mu}} = 0.121 \pm 0.001$ и частотой $F_{\mathrm{Mu}} = 10.874 \pm 0.003$ МГц, что соответствует приложенному внешнему магнитному полю $H_{\perp} = 7.756 \pm 0.001$ Гс.

На временных спектрах для пластических сцинтилляторов прецессии на мюониевой частоте не наблюдается. Это указывает на то, что в сцинтиллирующих пластиках при комнатной температуре образующийся мюоний за время $\sim 10^{-10}$ с вступает в химическую реакцию и полностью теряет поляризацию.

Одновременно с мюониевой частотой прецессии на временных спектрах наблюдается частота прецессии мюона во внешнем магнитном поле. На рис. 4 показана прецессия на мюонной частоте для кварца и двух образцов сцинтиллирующих пластиков.

При обработке временных спектров было произведено суммирование с шагом, равным периоду прецессии на мюониевой частоте. Это позволило сгладить временной спектр на кварце по частоте прецессии мюония. Из приведенных данных видно, что в пластиках имеется прецессия на частоте свободного мюона, причем частота этой прецессии одна и та же для обоих пластиков: $F_{1,\mu} = 0.101 \pm 0.005$ МГц; $F_{2,\mu} = 0.101 \pm 0.002$ МГц.

На плавленом кварце также наблюдается прецессия на мюонной частоте, но при этом частота прецессии равна $F_{Q,\mu} = 0.116 \pm 0.002$ МГц. Таким образом, мы видим сдвиг частоты мюонной прецессии в плавленом кварце по сравнению с соответствующей частотой прецессии, наблюдаемой в пластических сцинтилляторах.

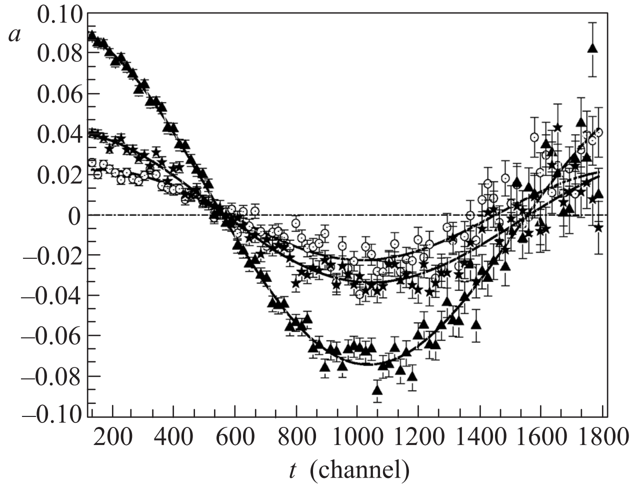

Рис. 4. Наблюдаемая прецессия спина мюонов в поле ~ 7.5 Гс. Один канал соответствует 5 нс. Нуль времени находится в 121-м канале. Звездочки – пластик 1 ($a = 0.0403(17)$; $\lambda = 0.0407(262)$ мкс$^{-1}$; $F_{1,\mu} = 0.101(5)$ МГц); треугольники – пластик 2 ($a = 0.0895(17)$; $\lambda = 0.0414(116)$ мкс$^{-1}$; $F_{2,\mu} = 0.101(2)$ МГц); кружки – кварц ($a = 0.0224(06)$; $\lambda = 0.0001(930)$ мкс$^{-1}$; $F_{\mathrm{Q},\mu} = 0.116(2)$ МГц)

Итак, мюонным методом исследования вещества (μSR-методом) можно определять величину потери поляризации мюонов в материалах, из которых делают сцинтилляторы, перед тем как они будут применяться в эксперименте.

1. В. П. Смилга, Ю. М. Белоусов, *Мюонный метод исследования вещества*, М.: Наука, 1991, 344 с.
2. С. Г. Барсов, С. И. Воробьев, В. П. Коптев и др., ПТЭ **50**(6), 36 (2007).
3. Г. Г. Мясищева, Ю. В. Обухов, В. С. Роганов, В. Г. Фирсов, ЖЭТФ **56**(4), 1199 (1969).