

Ордена Ленина

ИАЭ-3063

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

*SM 49 04 404*

*А. И. Климов, Е. А. Мелешко,*

*Б. А. Никольский, В. И. Селиванов*

## Прецизионный спектрометр для экспериментов с мюонами

Москва 1978

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА

А. И. Климов, Е. А. Мелешко,  
Б. А. Никольский, В. И. Селиванов

ПРЕЦИЗИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МЮОНАМИ

Москва  
1978

**Ключевые слова:** спектрометр, сцинтилляционный детектор, схемы, временное разрешение, мезон.

Описан спектрометр со сцинтилляционными детекторами, предназначенный для работы на мезонном луче синхроциклотрона ОИЯИ<sup>3</sup>. В рабочих условиях со сцинтилляторами размерами 150 x 150 x 20 мм временное разрешение спектрометра - 320 пс, дифференциальная нелинейность при ширине канала 55 пс составляет  $\pm 1\%$ .

Оцениваются возможности применения спектрометра для измерения сильных магнитных полей на  $\mu$ -мезоне в веществе и для наблюдения двухчастотной прецессии  $\mu^+$ -мезона.

Временной спектрометр предназначен для измерения больших магнитных полей, которые могут возникать на  $\mu$ -мезонах в магнитных веществах, и для наблюдения двухчастотной прецессии мюония в сильных магнитных полях [1].

Временной спектрометр состоит из системы сцинтилляционных счетчиков и электронной измерительной аппаратуры. Сцинтилляционные счетчики помещены внутри электромагнита, создающего поле величиной 0–8 кЭ, перпендикулярное пучку мюонов. Структурная схема всей установки приведена на рис. 1.

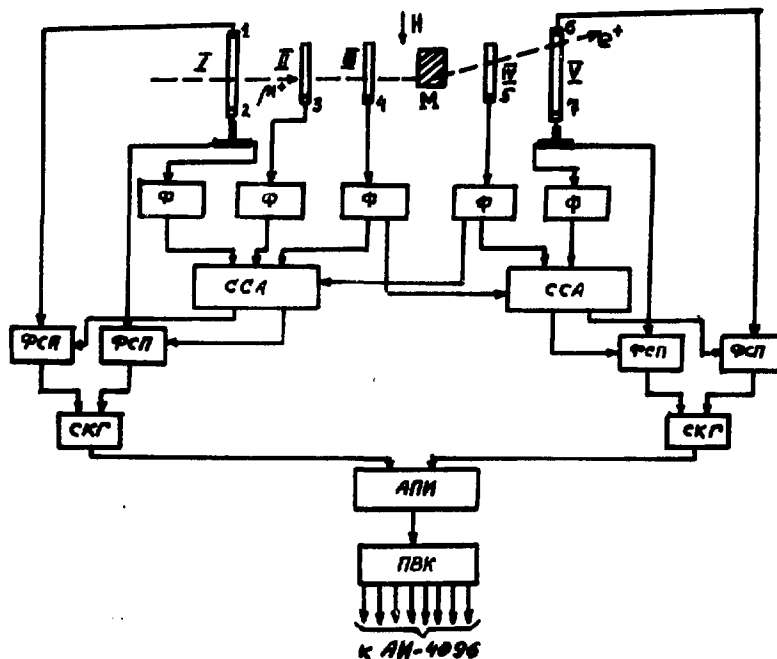


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: Ф - формирователь импульсов; ССА - схема совпадений-антисовпадений; ФСП - формирователь со следящим порогом; СКГ - схема "компенсации геометрии"; АПИ - аналоговый преобразователь интервалов; ПВК - преобразователь время-код; 1-У - сцинтилляционные детекторы; М - мишень

Поляризованные мюоны из ускорителя останавливаются в мишени М из исследуемого вещества. Остановки мюонов в мишени и вылет электронов  $\mu - e$ -распада регистрируются сцинтилляционными детекторами 1-У. Детекторы П-1У выполнены из полистирола с Р-терфенилом и РОРОР, они имеют размеры  $150 \times 150 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Детекторы 1 и У выполнены из сцинтилляционной пластмассы МЕ-110; размеры детектора 1 -  $100 \times 100 \times 20$  мм<sup>3</sup>, детектора У -  $150 \times 150 \times 20$  мм<sup>3</sup>. Детекторы П-1У просматриваются с одной стороны фотоумножителями ФЭУ-36 через световоды из оргстекла длиной 600 мм. Детектор 1, определяющий время остановки мюона в мишени, просматривается с двух сторон фотоумножителями ХР-1021 с целью компенсации геометрического разброса (ФЭУ 1 и 2); длина световодов - 200 мм. Детектор У, определяющий время вылета электрона из мишени, выполнен аналогично, длина световодов в нем - 600 мм.

Остановки мюонов в мишени М определяются логическим сигналом 2345 схемы совпадений - антисовпадений (ССА), которая управляет двумя формирователями со следящим порогом (ФСП) [2]. Сигналы с ФСП подаются на схему "компенсации геометрии" (СКГ), выходной сигнал которой определяет время попадания мюона в мишень ("старт") независимо от места прохождения мюоном сцинтиллятора 1. Вылет электрона  $\mu - e$ -распада из мишени определяется логическим сигналом 574 схемы ССА, которая управляет соответствующими ФСП счетчиков 6 и 7. Сигналы с выходов формирователей поступают на схему СКГ, выходной сигнал которой определяет время вылета электрона  $\mu - e$ -распада - "стоп". Сигналы "старт" и "стоп" подаются на временной анализатор, состоящий из аналогового преобразователя коротких временных интервалов (АПИ) [3] с коэффициентом преобразования  $\frac{T_{и}}{t_{и}} = 100$ , преобразователя время - код (ПВК) [4] с опорной частотой 200 МГц и накопителя АИ-4096. При ширине канала 55 пс дифференциальная нелинейность анализатора на 80% временной шкалы ( $T_{\max} = 150$  нс) составляет  $\pm 1\%$ .

Для точной временной привязки к импульсам детекторов излучений в ФСП используется способ следящего порога, при котором порог срабатывания формирователя для каждого импульса устанавливается индивидуально в соответствии с его амплитудой.

В отличие от других в используемой схеме формирователя влияние изменения загрузки на точность временной привязки значительно ослаблено за счет применения гальванических связей в тракте регулировки порога и в результате использования согласованной укорачивающей линии с токовым съемом сигнала в основном тракте. Формирователь имеет регулируемое мертвое время и может работать в режиме внешнего управления. Измеренная с помощью генератора в диапазоне амплитуд входных сигналов от 0,5 до 5 В погрешность временной привязки к импульсу с фронтом 3 нс не превышает  $\pm 0,15$  нс.

Отличительной особенностью временного кодировщика, используемого в анализаторе, является применение метода фазирования стоповых импульсов с импульсами опорного генератора. Реализация этого метода в ПВК с минимальной шириной канала 4 нс позволила

существенно снизить дифференциальную нелинейность типа "чет-нечет". Максимальное число каналов ПВК - 4096, дифференциальная нелинейность при частоте опорного генератора 200 МГц -  $\pm 0,5\%$ .

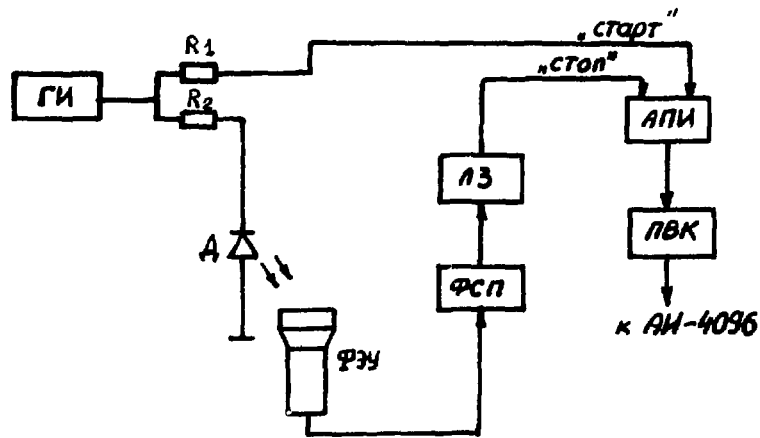


Рис. 2. Блок-схема установки для проверки работы ФЭУ от импульсов светодиодов: ГИ - генератор импульсов; Д - светодиод; ЛЗ - линия задержки

Для предварительной оценки временных разбросов, вносимых ФЭУ, использовались импульсные светодиоды (рис. 2). Сигналы с генератора импульсов через пассивный разветвитель поступали на вход "старт" АПИ и на светодиод Д, засвечивающий фотокатод ФЭУ. Амплитуда электрического импульса на светодиод подбиралась такой, чтобы количество света с диода Д было приблизительно равно количеству света, попадающего

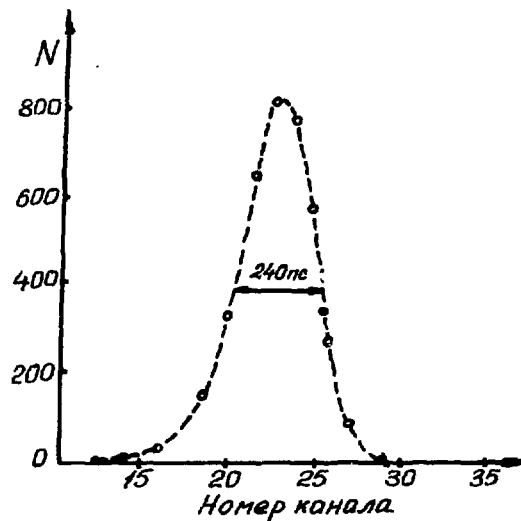


Рис. 3. Временное разрешение ФЭУ XP-1021, полученное при использовании импульсных светодиодов (ширина канала 55 пс)

на ФЭУ в рабочих условиях. Импульсы с ФЭУ подавались на формирователь, выходной сигнал с которого поступал на преобразователь АПИ в качестве сигнала "стоп".

Типичный вид полученного в этих условиях временного спектра представлен на рис.3. Как видно из рисунка, временное разрешение  $2\tau$  при использовании ФЭУ типа ХР-1021 с блоками ФСП составляет 0,24 нс. При существенном увеличении количества света (приблизительно в 5 раз)  $2\tau = 0,12-0,15$  нс.

Для компенсации временного разброса импульсов, вызванного большими размерами сцинтилляторов и неопределенностью места попадания детектируемой частицы в сцинтиллятор, были применены схемы "компенсации геометрии". В СКГ осуществляется привязка к середине временного интервала между фронтами импульсов ФЭУ, "просматривающих" противоположные грани базовых сцинтилляторов. В СКГ временного спектрометра при изменении задержки одного из входных импульсов относительно второго на  $\pm 0,8$  нс погрешность привязки, измеренная с помощью генератора, не превышала  $\pm 0,02$  нс. В органических сцинтилляторах свет проходит 1 см примерно до 0,05 нс и ожидаемый временной разброс, вызванный размерами сцинтиллятора, составляет  $\pm 0,75$  нс для сборки с большим сцинтиллятором ( $150 \times 150 \times 20$  мм<sup>3</sup>) и  $\pm 0,5$  нс для сборки с малым сцинтиллятором ( $100 \times 100 \times 20$  мм<sup>3</sup>). Поэтому можно считать, что параметры схем СКГ в основном удовлетворяют требованиям эксперимента. Временное разрешение спектрометра, измеренное на пучке  $\mu^+$ -мезонов синхроциклотрона ОИЯИ (рис. 4), оказалось равным 320 пс.

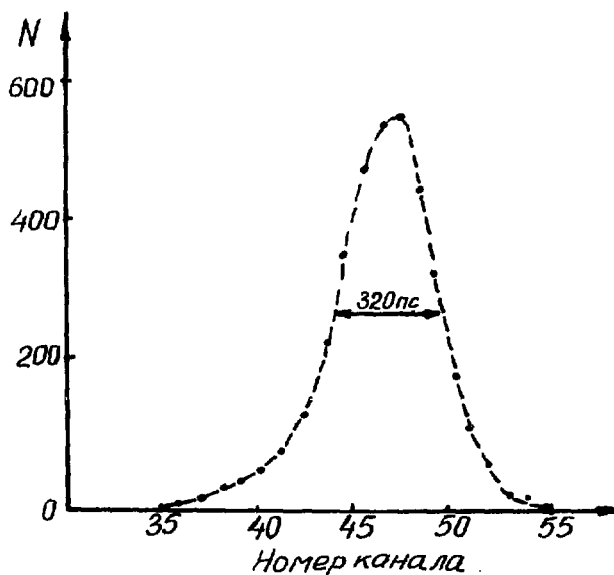


Рис.4. Кривая временного разрешения спектрометра, полученная в рабочих условиях (ширина канала 55 пс)

Кроме временных разбросов, связанных с неидеальностью компенсации изменения амплитуды импульсов в ФСП и места попадания частиц в СКГ, существенный вклад в увеличение ширины кривой временного разрешения вносит большая протяженность световодов

(до 600 мм), необходимых для вынесения ФЭУ из магнитного поля установки. Для сравнения в таблице приведены значения временного разрешения спектрометров, полученные другими авторами в сопоставимых условиях.

Работы	Расстояние между ФЭУ (мм); размеры сцинтиллятора счет- чика I (мм <sup>3</sup> ); количество и тип ФЭУ	Расстояние между ФЭУ (мм); размеры сцинтиллятора счет- чика II (мм <sup>3</sup> ); количество и тип ФЭУ	Разреше- ние $2\sigma$ , нс
[5]	235 35x35x10 2 ХР-1020	360 $\phi$ 160, толщ. 45 2 ХР-1020	0,44
[6]	65 30x30x10 ХР-1021	490 290x50x2,5 2 ХР-1020	0,28
[7]	900 100x100x40 2 ХР-2020	580 100x100x40 2 ХР-1020	0,28
Наст. работа	500 100x100x20 2 ХР-1021	1350 150x150x20 2 ХР-1021	0,32

Из таблицы видно, что примерно такие же значения временного разрешения получены в работах [6, 7] при меньшей протяженности сцинтилляторов и световодов [6] и большей толщине сцинтилляторов [7].

Была измерена долговременная стабильность линии в рабочих условиях. Результаты измерений приведены на рис.5. Как видно из рисунка, смещение линии за 24 ч не превышает 110 пс.

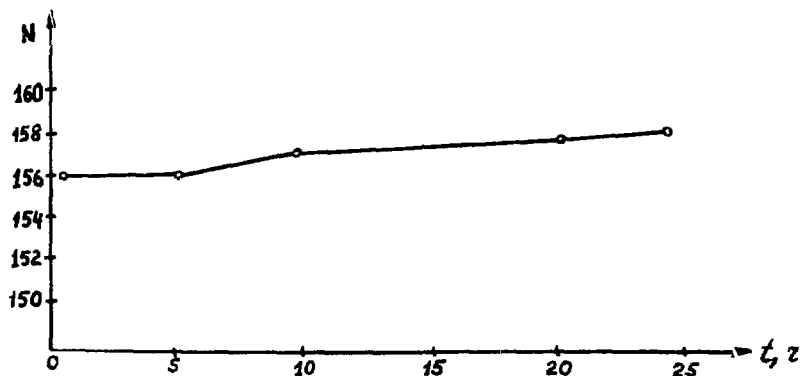


Рис. 5. Кривая, характеризующая долговременную стабильность спектрометра (ширина канала 55 пс)



Созданный временной спектрометр предполагается использовать для наблюдения прецессии  $\mu$ -мезонов в тех случаях, когда частоты прецессии слишком велики и их невозможно наблюдать с помощью обычных спектрометров, имеющих временное разрешение порядка 1 нс (см. [2]). Оценим возможности спектрометра с этой точки зрения.

Предположим, что кривая временного разрешения спектрометра имеет гауссовский вид с полушириной  $\tau$  на полувысоте. Тогда при наблюдении прецессии с периодом  $T$  асимметрия прецессии  $a_T$  уменьшается по сравнению с величиной асимметрии  $a_0$  при большом периоде прецессии по закону

$$a_T/a_0 = \exp\left(-\frac{\pi\tau}{\sqrt{\ln 2} T}\right)^2. \quad (1)$$

Используя формулу (1), получим, что допустимое экспериментальное уменьшение асимметрии в два раза наблюдается, когда

$$T = \frac{\pi\tau}{\ln 2}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что при временном разрешении  $\tau = 160$  пс можно наблюдать периоды прецессии  $\mu$ -мезона  $T_\mu > 0,7$  нс.

Период прецессии  $\mu$ -мезона зависит от величины магнитного поля на нем:

$$T_\mu \approx \frac{70}{H}. \quad (3)$$

Здесь  $T_\mu$  выражено в нс, а  $H$  - в кЭ. Из формулы (3) следует, что с помощью созданного временного спектрометра можно регистрировать магнитные поля на  $\mu$ -мезоне в веществе порядка 100 кЭ. В настоящее время на  $\mu^+$ -мезоне наблюдаются ферромагнитном диспрозии магнитные поля  $H \sim 13$  кЭ [8]. Еще большие магнитные поля могут возникать на  $\mu^+$ -мезоне в других редкоземельных ферромагнетиках. Заметим, что прецессионные кривые, соответствующие магнитным полям  $H \sim 15$  кЭ, уже невозможно наблюдать на обычном спектрометре с временным разрешением  $\tau \sim 1$  нс. Разработанный временной спектрометр предполагается также использовать для измерения магнитных полей на  $\mu^-$ -мезоне в ферромагнетиках ( $H \sim 100$  кЭ).

Рассмотрим возможности спектрометра при наблюдении интересного физического явления - двухчастотной прецессии  $\mu^+$ -мезона в сильном магнитном поле. Зависимость поляризации  $\mu^+$ -мезона от времени  $P(t)$  описывается в этом случае [1] формулой

$$P(t) = \cos \omega_\mu t \cdot \cos \frac{\omega_0}{2} t, \quad (4)$$

где  $\omega_\mu$  - ларморовская частота прецессии  $\mu^+$ -мезона во внешнем поле  $H$ ;  $\omega_\mu < \omega_0$  - частота сверхтонкого расщепления атома мюония. В вакууме  $\omega_0 = 2,8 \cdot 10^{10}$  1/с

и период  $T_0$ , соответствующий  $\omega_0/2$ , равен  $T_0 = 0,44$  нс. При такой величине  $T_0$  уменьшение амплитуд прецессии слишком велико [в  $\sim 8$  раз, как это следует из (1)], чтобы явление можно было наблюдать экспериментально. Явление двухчастотной прецессии с помощью созданного спектрометра можно наблюдать в германии, где  $T_0^{Ge} \approx 0,7$  нс [9], и, возможно, в других полупроводниках.

Авторы благодарны В. А. Суетину за помощь при изготовлении встречных сцинтилляционных детекторов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гуревич И.И., Никольский Б.А., Селиванов В.И. - "Письма в ЖЭТФ", 1972, т. 15, с. 640.
2. Мелешко Е.А. и др. Препринт ИАЭ-2320, М., 1973.
3. Климов А.И., Мелешко Е.А. - ПТЭ, 1976, т. 3, с. 100.
4. Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г. - ПТЭ, 1975, т. 3, с. 95.
5. Лапшин В.Г. и др. Препринт ОИЯИ 13-3549, Дубна, 1967.
6. Тихвитский С.В. и др. Препринт ОИЯИ 13-8152, Дубна, 1974.
7. Бунятов С.А. и др. Препринт ОИЯИ 13-10156, Дубна, 1976.
8. Norrmann W. e.a. - Phys. Lett., 1978, v. 65A, p. 343.
9. Гуревич И.И. и др. - ЖЭТФ, 1971, т. 60, с. 471.

---

Редактор Л. А. Кузьмина

Технический редактор Е. Д. Маркова

Корректор Н. Н. Черемных

Т-12983. 10. 08. 78 г. Формат 60x90/8. Уч.-изд. л. 0,6  
Тираж 121 экз. Заказ 947. Цена 6 коп. ИАЭ



6 коп.