

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ В ПУЧКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ

*В. А. Беззубов, И. А. Васильев, В. Н. Горячев, С. П. Денисов**,
В. Н. Евдокимов, С. В. Ерин, А. В. Козелов, А. В. Левин,
В. В. Липаев, *Д. А. Стоянова, А. А. Щукин*

Институт физики высоких энергий Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт», Протвино, Россия

Приводятся результаты измерений характеристик 40-см и 2-м сцинтилляционных счетчиков, облученных пучком частиц с импульсом 7 ГэВ/с от ускорителя ИФВЭ. В счетчиках использовались сцинтилляторы BC-404 и BC-408, которые «просматривались» с двух сторон ФЭУ R1828-01. Спектры сигналов ФЭУ хорошо описываются сверткой распределений Ландау и Гаусса. Их ширина определяется, в основном, флуктуациями ионизационных потерь энергии. Временные распределения сигналов следуют закону Гаусса. Для 40-см счетчика временное разрешение составляет $\sigma(T) = 88$ пс, а для 2-м счетчика изменяется от 120–160 пс в его центре и до ~ 100 пс вблизи края.

The results of 40-cm and 2-m scintillation counters studies in the 7 GeV/c particle beam from the IHEP accelerator are reported. BC-404 and BC-408 scintillators viewed from both ends by R1828-01 PMTs were used. PMT signal spectra are well described by a convolution of the Landau and Gaussian distributions. Their widths are mainly due to the fluctuations of the ionization energy losses. Time spectra are described by Gaussian. Time resolution for 40-cm counter is $\sigma(T) = 88$ ps and for 2-m varies from 120–160 ps at the center to ~ 100 ps near the end.

PACS: 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

В ИФВЭ (Протвино) планируется провести прецизионные измерения упругого рассеяния пионов, каонов и протонов на протонах и ядрах [1]. Важнейшим элементом экспериментальной установки является система TOF (Time-of-Flight), предназначенная для измерения энергии и идентификации частиц отдачи. Она состоит из сцинтилляционных счетчиков — 2 «пучковых» и 128 вокруг мишени. В них предполагается использовать сцинтилляторы

*E-mail: denisov@ihep.ru

типа ВС-404 или ВС-408 фирмы Saint-Gobain [2]. Размеры сцинтилляторов «пучковых» счетчиков — $40 \times 6 \times 1,27$ см, а счетчиков вокруг мишени — $200 \times 6 \times 1,27$ см. Все сцинтилляторы «просматриваются» с двух сторон «быстрыми» ФЭУ R1828-01 фирмы HAMAMATSU [3]. Одно из основных требований к TOF — высокое временное разрешение. Для определения этой и других характеристик счетчиков в области релятивистских энергий были проведены измерения на пучке частиц с импульсом 7 ГэВ/с от ускорителя ИФВЭ. Основные результаты этих измерений приведены ниже.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пучок частиц с импульсом 7 ГэВ/с состоял из протонов и π^+ -мезонов с небольшой примесью K^+ -мезонов, позитронов и мюонов. Он проходил через центр «пучкового» 40-см счетчика. 2-м счетчик располагался горизонтально на подвижной платформе и мог перемещаться поперек пучка с шагом 10 см. В 40-см счетчике входные окна ФЭУ плотно прилегали к торцам сцинтиллятора без оптического контакта. Для 2-м счетчика изучались два варианта — с оптическим контактом и без него.

Интенсивность пучка частиц составляла $\sim 10^5$ с $^{-1}$. Она мониторировалась тремя сцинтилляционными счетчиками, сигнал совпадений которых являлся триггером. Сцинтиллятор последнего счетчика, расположенного сразу за исследуемым, имел размеры 7 мм по горизонтали и 25 мм по вертикали. Он определял профиль пучка регистрируемых частиц.

Сигналы со всех ФЭУ по кабелю РК-50-3-11 длиной 30 м передавались в 32-канальный модуль V1742B преобразователей АВЦП фирмы CAEN (32+2 Channel 12 bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer) [4] для оцифровки с шагом 200 пс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ: 40-СМ СЧЕТЧИК

В качестве амплитуд A сигналов 40-см счетчика использовались максимальные величины импульсов с ФЭУ (см. [5]). Их спектр показан на рис. 1. Он хорошо описывается сверткой распределений Ландау и Гаусса [6]. На том же рисунке представлено распределение отношения A_1/A_2 амплитуд сигналов с двух ФЭУ. Оно свободно от флуктуаций ионизационных потерь энергии E_{ion} и поэтому следует закону Гаусса. Если предположить, что дисперсия распределения A_1/A_2 определяется только флуктуациями числа N_{pe} фотоэлектронов и квантовые выходы ФЭУ одинаковы, то $N_{\text{pe}} = 2/\sigma^2 = 162$ или 62 на 1 МэВ E_{ion} .

На рис. 2 представлено распределение разности $T_1 - T_2$ времен прихода сигналов с ФЭУ счетчика. Известно, что дисперсия этого распределения зависит от уровня A_{thr} , при котором происходит измерение T . Как показали

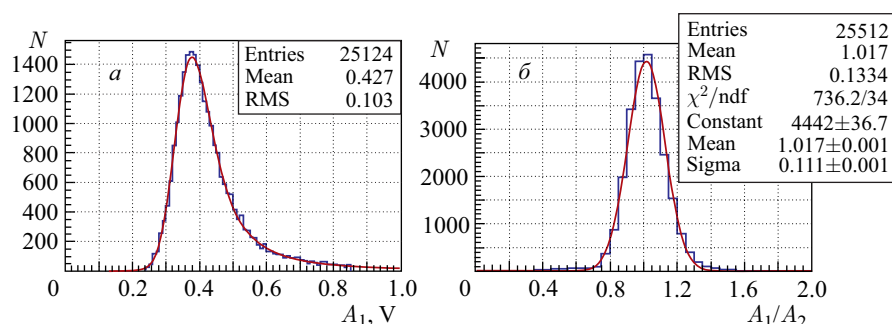


Рис. 1. Спектры амплитуд и отношения амплитуд сигналов с ФЭУ 40-см счетчика, фитированные сверткой распределений Ландау и Гаусса (а) и Гаусса (б)

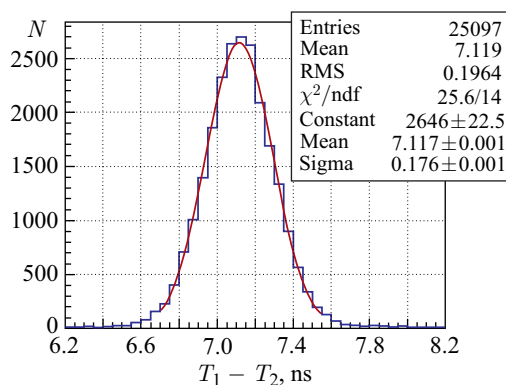


Рис. 2. Распределение разности $T_1 - T_2$ при $A_{\text{thr}}/A = 0,075$, фитированное функцией Гаусса

исследования, минимум $\sigma(T_1 - T_2) = 176$ пс достигается при $A_{\text{thr}} = 0,075A$. Если принять $\sigma_1(T) = \sigma_2(T)$, что подтверждается измеренными распределениями $T_1 - T_0$ и $T_2 - T_0$, где T_0 — время прихода сигнала с последнего триггерного счетчика, и пренебречь малыми поправками, связанными с поперечным разбросом частиц в пучке, то верхняя оценка временного разрешения счетчика составит $\sigma(T) = \sigma(T_1 - T_2)/2 = 88$ пс. Так как в планируемом эксперименте по измерению упругого рассеяния предполагается использовать два таких счетчика, суммарная неопределенность временной метки пучковой частицы будет не более 62 пс, что вполне приемлемо. Временная информация дает также возможность оценить продольную координату x пучковой частицы с погрешностью $\sigma(x) = v_x \sigma(T) = 12$ мм, где $v_x = 13,52$ см/нс — средняя скорость распространения сцинтиляционного света вдоль счетчика [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ: 2-М СЧЕТЧИК

2-м счетчики будут использоваться для измерения скорости частиц отдачи по времени пролета и их энергии по величине $E_{\text{ион}}$, которая пропорциональна интегралу сигнала (заряду) с ФЭУ. Поэтому адекватной амплитудной характеристикой для них является величина $Q = \Delta t \Sigma V_i$, где $\Delta t = 0,2$ нс — шаг оцифровки сигнала ФЭУ и V_i — значения амплитуд в В в 200-пс интервалах канала АВЦП. В настоящей работе она выражается в В · нс, $1 \text{ В} \cdot \text{нс} = 20$ пКл при волновом сопротивлении кабеля РК-50-3-11 50 Ом. Суммирование проводилось в пределах от -10 до 55 нс. В этом интервале содержится более 99 % интеграла сигнала для всех счетчиков.

Спектры Q_i ($i = 1, 2$) удовлетворительно описываются сверткой распределений Ландау и Гаусса, как и для 40-см счетчика (см. рис. 1). Их можно характеризовать наиболее вероятным значением Q_{max} и полной шириной w на полувысоте. Примеры зависимостей Q_{max} и w от продольной координаты трека частицы представлены на рис. 3 и 4. Они удовлетворительно аппроксимируются суммой двух экспонент $\exp(p_0 + p_1 x) + \exp(p_2 + p_3 x)$, где p_i — свободные параметры.

В таблице приведены величины Q_{max} и w/Q_{max} для центра счетчика и его краев для всех типов 2-м счетчиков и обоих ФЭУ. Из таблицы следует, что отношения w/Q_{max} слабо зависят от Q_{max} и определяются, в основном, флуктуациями $E_{\text{ион}}$, кроме больших расстояний d между треком частицы и ФЭУ для ВС-404, когда заметный вклад в ширину спектра дает статистика фотоэлектронов и w становится существенно больше величины $w_l \sim 0,35$, ожидаемой для распределения Ландау.

Описанным в предыдущем разделе методом было оценено среднее число фотоэлектронов для $x = 0$. Оно оказалось равным 130 (ВС-404) и 194

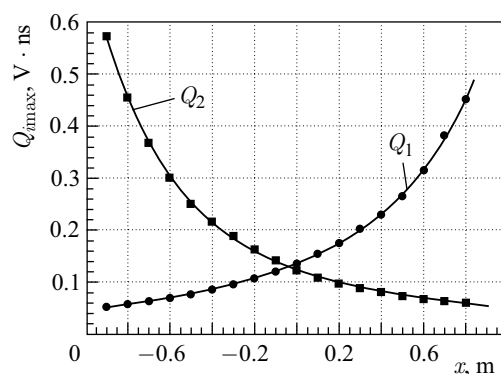


Рис. 3. Зависимость Q_{max} от x для 2-м счетчика с ВС-404 при его оптическом контакте с ФЭУ. Кривые — результат фитирования экспериментальных данных суммой экспонент (см. текст)

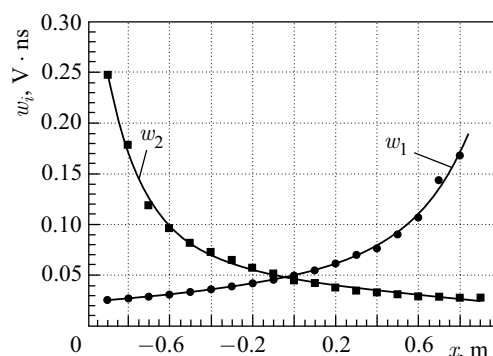


Рис. 4. Зависимость w от x для 2-м счетчика с ВС-404 при его оптическом контакте с ФЭУ. Кривые — результат фитирования экспериментальных данных суммой экспонент (см. текст)

Значения $Q_{i\max}$ и $w_i/Q_{i\max}$ при разных расстояниях d от ФЭУ до трека частицы

Сцинтиллятор	d , см	$Q_{1\max}$, В · нс	$Q_{2\max}$, В · нс	$w_1/Q_{1\max}$	$w_2/Q_{2\max}$
ВС-404	10	0,128	0,157	0,32	0,34
	100	0,057	0,057	0,41	0,43
	190	0,034	0,036	0,51	0,48
ВС-404*	10	—	0,570	—	0,43
	20	0,451	—	0,37	—
	100	0,135	0,124	0,37	0,37
	190	0,053	0,060	0,49	0,47
ВС-408	10	0,269	0,328	0,33	0,35
	100	0,142	0,155	0,40	0,38
	190	0,097	0,111	0,39	0,40
ВС-408*	10	—	—	—	—
	30	0,563	—	0,39	—
	40	—	0,550	—	0,41
	100	0,230	0,240	0,33	0,35
	190	0,117	0,136	0,37	0,38

Примечание. Знак * означает наличие оптического контакта между ФЭУ и сцинтиллятором; характерная погрешность величин $w_i/Q_{i\max}$ составляет 3%.

(ВС-408) при наличии оптического контакта между ФЭУ и сцинтиллятором и 80 (ВС-404) и 132 (ВС-408) без него.

Так же как и для 40-см счетчика, временные распределения сигналов с ФЭУ 2-м счетчика хорошо фитируются кривой Гаусса. Минимум временного разрешения $\sigma(T)$ достигается, если время T измерять при уровне сиг-

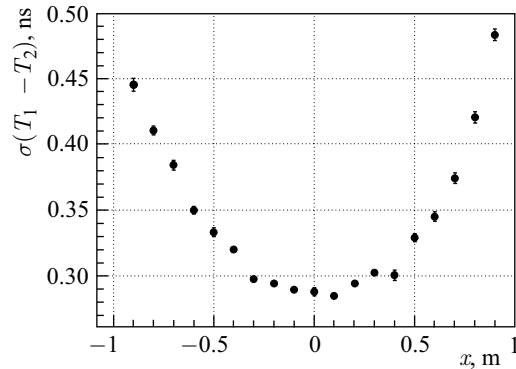


Рис. 5. Зависимость $\sigma(T_1 - T_2)$ от x для 2-м счетчика с ВС-404 при его оптическом контакте с ФЭУ

нала $A_{\text{thr}} = 0,1A_{\text{max}}$. Пример зависимости $\sigma(T_1 - T_2)$ от x показан на рис. 5. Если предположить, что временные флуктуации сигналов с ФЭУ независимы и одинаковы и пренебречь небольшими флуктуациями, связанными с размером пучка, то временное разрешение счетчика при прохождении частицы через его центр составит 145 пс (ВС-404) и 120 пс (ВС-408) при наличии оптического контакта между ФЭУ и сцинтиллятором и 160 пс (ВС-404) и 133 пс (ВС-408) без него. Временное разрешение при прохождении частицы вблизи края сцинтиллятора определяется, в основном, временными флуктуациями сигналов ближнего ФЭУ и составляет около 100 пс для всех вариантов счетчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пучке релятивистских частиц проведены детальные исследования амплитудных и временных характеристик 40-см и 2-м сцинтилляционных счетчиков с использованием оцифровки сигналов с ФЭУ. Показано, что при помощи двух 40-см счетчиков можно достичь требуемой в эксперименте по изучению упругого рассеяния точности временной метки частиц пучка около 60 пс. Весьма высокое (100–160 пс) временное разрешение 2-м счетчиков позволит не только надежно идентифицировать ядра отдачи, но и обеспечит низкий уровень фона при больших переданных импульсах в неисследованной пока области энергий ускорителя ИФВЭ.

Авторы выражают благодарность С. А. Садовскому за содействие в проведении исследований, И. Н. Белякову, С. А. Звягинцеву и О. Н. Ромашову за участие в подготовке аппаратуры к измерениям на канале частиц и Т. З. Гуровой за помощь в подготовке публикации.

Настоящая работа была выполнена при поддержке грантами РФФИ № 14-02-00303 и № 17-02-00120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов С. П., Козелов А. В., Петров В. А. О возможности прецизионного измерения дифференциального сечения упругого pp -рассеяния на ускорителе ИФВЭ // ЯФ. 2016. Т. 79. С. 121–128.
2. <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/Physical%20Constants%20chart.pdf>
3. <http://www.hamamatsu.com>
4. <http://www.caen-russia.com>
5. Горячев В. Н., Денисов С. П., Козелов А. В., Шукин А. А. Исследование амплитудных и временных характеристик сцинтилляционного счетчика при регистрации нерелятивистских протонов // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 9–10, № 5. С. 847; Препринт ИФВЭ ОЭФ 2014-17. Протвино, 2014.
6. https://root.cern.ch/doc/master/langaus_8C.html