

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХМЕТРОВЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 90 МэВ

В. Н. Горячев, С. П. Денисов, А. В. Козелов, А. А. Щукин*

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

Представлены характеристики сцинтилляционных счетчиков, измеренные в пучке протонов с энергией 90 МэВ. В счетчиках использовались сцинтилляторы BC-404 и BC-408 длиной 2 м, которые «просматривались» с противоположных торцов ФЭУ R1828-01. Как амплитудные, так и временные распределения сигналов с ФЭУ хорошо описываются распределением Гаусса. Оказалось, что амплитудное разрешение $\sigma(A)/A$ слабо зависит от типа сцинтиллятора и координаты протона вдоль счетчика и находится в пределах от 4 до 5%. Наилучшее временное разрешение $\sigma(T)$ составляет около 50 пс у края счетчика и 63 пс в его центре.

Characteristics of the scintillation counters measured in 90 MeV proton beam are presented. Two-meter-long BC-404 and BC-408 scintillators viewed from both ends by R1828-01 PMTs were used. Both amplitude and time distributions of PMT signals are well described by Gaussian function. It turned out that the amplitude resolution $\sigma(A)/A$ weakly depends on the scintillator type and proton position along the counter, and is in the range from 4 to 5%. The best obtained time resolution $\sigma(T)$ is about 50 ps near the scintillator edge and 63 ps at the center.

PACS: 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

В ИФВЭ (Протвино) ведется подготовка к экспериментам [1] по прецизионному измерению упругого рассеяния пионов, каонов и протонов на протонах и ядрах. Целью исследований является, в частности, поиск «тонкой» структуры в области дифракционного пика pp -рассеяния [2], для чего необходимо определять энергию протона отдачи в области от десятков до сотен мегаэлектронвольт с погрешностью не более нескольких процентов.

*E-mail: denisov@ihep.ru

Для измерения энергии и идентификации частиц отдачи планируется использовать 128 сцинтилляционных счетчиков, окружающих газовую мишень [1]. Сцинтилляторы счетчиков типа ВС-404 или ВС-408 [3] будут иметь размеры $200 \times 6 \times 1,27$ см и просматриваться с двух сторон «быстрыми» ФЭУ R1828-01 фирмы Hamamatsu. Энергия частиц будет определяться как по времени пролета, так и по величине ионизационных потерь энергии (амплитуде сигналов). Таким образом, счетчики должны обладать высокими временным и амплитудным разрешениями. Для определения этих и других характеристик и их зависимости от места прохождения частицы через счетчик, типа сцинтиллятора, качества полировки его поверхности и наличия оптического контакта между ФЭУ и сцинтиллятором были проведены расчеты методом Монте-Карло и измерения на пучке протонов с энергией 90 МэВ. Основные результаты этих исследований приведены ниже.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОСБОРА НА ФЭУ

Зависимость вероятности ε попадания фотона на фотокатод ФЭУ от продольной координаты x прохождения частицы через сцинтиллятор вычислялась методом Монте-Карло. Предполагалось, что фотоны излучаются изотропно и равномерно вдоль трека частицы, перпендикулярного поверхности счетчика. В расчетах учитывались их объемное поглощение и потери при отражении от поверхностей сцинтиллятора и входных окон ФЭУ. Длины поглощения полагались равными 160 см (ВС-404) и 380 см (ВС-408), а показатель преломления — 1,58 [3]. Свет, вышедший через боковые грани сцинтиллятора, считался потерянным. Неидеальность полировки сцинтиллятора учитывалась коэффициентом b , который представляет собой среднюю вероятность потери фотона при отражении. Его значение варьировалось от 0 до 0,03.

Были смоделированы два варианта — с оптическим контактом между входным окном ФЭУ R1828-01 диаметром 53 мм и сцинтиллятором и без него. В первом варианте отражением света от торца, противоположного ФЭУ, пренебрегалось. Результаты расчетов аппроксимировались полиномиальными и экспоненциальными зависимостями. Оказалось, что для всех значений b $\varepsilon(x)$ удовлетворительно описывается суммой экспонент:

$$\varepsilon(x) = \exp(p_0 + p_1x) + \exp(p_2 + p_3x), \quad (1)$$

где p_i — свободные параметры. При $\varepsilon(x) \ll 1$ из (1) следует, что вероятность попасть фотону хотя бы на один из двух ФЭУ представляется суммой гиперболических косинусов:

$$\varepsilon_1(x) = 2[\exp(p_0) \operatorname{ch}(p_1x) + \exp(p_2) \operatorname{ch}(p_3x)]. \quad (2)$$

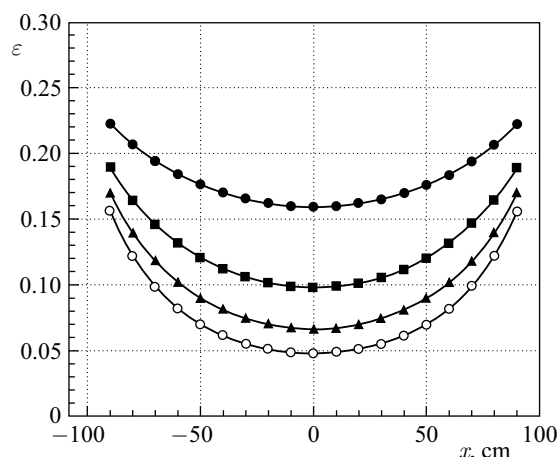


Рис. 1. $\varepsilon_1(x)$ для ВС-404 при оптическом контакте с ФЭУ, фитированные формулой (2) при $b = 0\%$ (●), 1% (■), 2% (▲) и 3% (○)

На рис. 1 показаны некоторые рассчитанные зависимости, фитированные формулой (2). Полученные результаты позволяют, в частности, сделать следующие выводы:

— среднее число фотонов, попадающих на фотокатоды ФЭУ из центра сцинтиллятора, примерно в полтора раза больше для ВС-408 по сравнению с ВС-404, что связано в основном с большим значением длины поглощения света;

— оптический контакт дает выигрыш в числе фотонов от 1,5 ($b = 0,03$) до 2,4 ($b = 0$) при прохождении частицы через центры сцинтилляторов.

Световые выходы для ВС-408 и ВС-404 составляют $1,16 \cdot 10^4$ и $1,23 \cdot 10^4$ фотонов на 1 МэВ ионизационных потерь энергии [4]. Их можно использовать для оценки среднего числа фотонов N_p , попадающих на фотокатод ФЭУ. Например, протон с энергией 90 МэВ теряет в сцинтилляторе толщиной 12,7 мм около 11 МэВ, и если он проходит через центр сцинтиллятора ВС-404 с $b = 0,01$, имеющего оптический контакт с ФЭУ, то $\varepsilon = 0,05$ и $N_p = 6,8 \cdot 10^3$. При тех же условиях для релятивистской частицы $N_p = 1,6 \cdot 10^3$.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Характеристики счетчиков были исследованы на пучке протонов с энергией 90 МэВ на ускорителе Физико-технического центра ФИАН в Протвино. Профиль пучка протонов в вертикальной и горизонтальной плоскостях на выходе из ускорителя имел форму кривой Гаусса с $\sigma = 4$ мм. За исследуемым

счетчиком располагался триггерный счетчик с ФЭУ ХР2020 и сцинтиллятором ВС-404 шириной 0,7 см и высотой 2 см. Исследуемый счетчик помещался в светонепроницаемый короб, который мог перемещаться поперек пучка с шагом 10 см.

Сигналы со всех ФЭУ подавались по кабелю РК-50-3-11 длиной 30 м на блок электроники V1742B (32+2 channel 12 bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer) фирмы CAEN для оцифровки сигналов с шагом 200 пс.

АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЧЕТЧИКОВ

Величина A_i сигнала с i -го ФЭУ ($i = 1, 2$) представляет собой интеграл, полученный суммированием амплитуд в 200-пс временных интервалах канала блока V1742B, и выражается в В · нс ($1 \text{ В} \cdot \text{нс} = 20 \text{ пКл}$ при волновом сопротивлении кабеля РК-50-3-11 50 Ом). Она пропорциональна числу сцинтилляционных фотонов, т. е. величине ионизационных потерь энергии частицы. Все распределения амплитуд сигналов и их суммы с обоих ФЭУ счетчика хорошо описываются функцией Гаусса, а зависимости $\langle A_i \rangle(x)$, $i = 1, 2$, и $\langle A_1 + A_2 \rangle(x)$ — формулами (1), (2) (рис. 2). Из рис. 1 и 2 следует, что для ВС-404 b близко к 1 %. Пример зависимостей $\sigma(A_i)/\langle A_i \rangle$ от x показан на рис. 3. Значения $\sigma(A_i)/\langle A_i \rangle$ для всех вариантов счетчика при расстояниях d от трека частицы до входного окна ФЭУ 10, 100 и 190 см представлены в таблице. Следует иметь в виду, что флуктуации амплитуд A_1 и A_2 частично коррелированы, так как флуктуации ионизационных потерь энергии дают в них одинаковый вклад. Анализ полученных результатов показы-

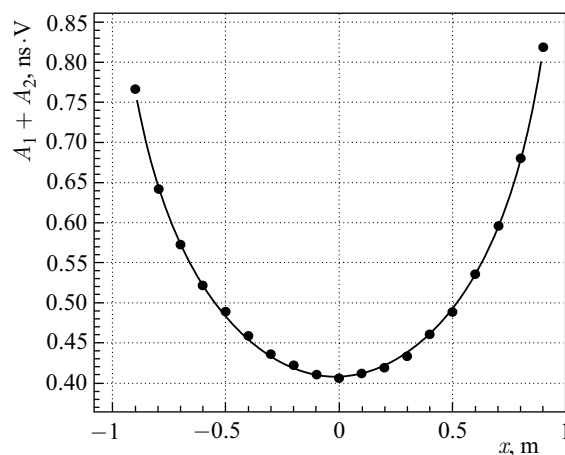
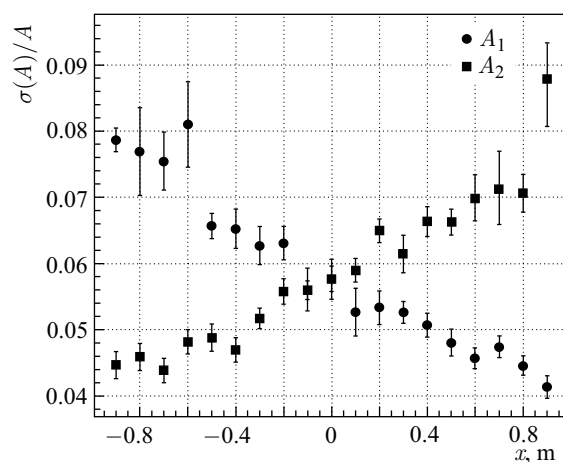


Рис. 2. Зависимость $A_1 + A_2$ от x для ВС-404 при оптическом контакте с ФЭУ, фитированная формулой (2)

Рис. 3. Зависимость $\sigma(A)/A$ от x для ВС-404 при оптическом контакте с ФЭУЗависимость амплитудного разрешения $\sigma(A_i)/\langle A_i \rangle$ от d

Сцинтиллятор	i	d , см		
		10	100	190
ВС-404	1	$0,0496 \pm 0,0010$	$0,0690 \pm 0,0012$	$0,0820 \pm 0,0028$
	2	$0,0544 \pm 0,0011$	$0,0695 \pm 0,0011$	$0,0871 \pm 0,0016$
ВС-404*	1	$0,0414 \pm 0,0017$	$0,0577 \pm 0,0020$	$0,0787 \pm 0,0017$
	2	$0,0447 \pm 0,0020$	$0,0577 \pm 0,0019$	$0,0878 \pm 0,0071$
ВС-408	1	$0,0479 \pm 0,0006$	$0,0551 \pm 0,0005$	$0,0590 \pm 0,0007$
	2	$0,0497 \pm 0,0006$	$0,0551 \pm 0,0007$	$0,0621 \pm 0,0008$
ВС-408*	1	$0,0398 \pm 0,0019$	$0,0490 \pm 0,0014$	$0,0537 \pm 0,0020$
	2	$0,0426 \pm 0,0028$	$0,0489 \pm 0,0018$	$0,0588 \pm 0,0021$

Примечание. Знак * означает наличие оптического контакта сцинтиллятора с ФЭУ.

вайт, что амплитудное разрешение счетчика достаточно слабо зависит от x , типа сцинтиллятора и наличия оптического контакта и находится в пределах от 4 до 5%.

Представляет интерес оценить среднее число фотоэлектронов $\langle N_{pe} \rangle$. На рис.4 представлено распределение A_1/A_2 при $x = 0$ для ВС-404 при наличии оптического контакта. Оно свободно от флуктуаций ионизационных потерь энергии и удовлетворительно описывается распределением Гаусса с $\sigma/\langle A_1/A_2 \rangle = (0,0633 \pm 0,0003)$. Пренебрегая флуктуациями, связанными с попадающими на фотокатод фотонами и вторичными электронами, и полагая квантовый выход q обоих ФЭУ одинаковым, можно получить нижнюю

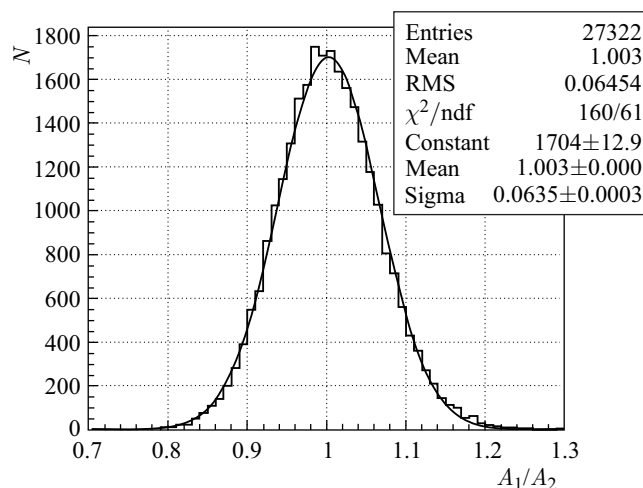


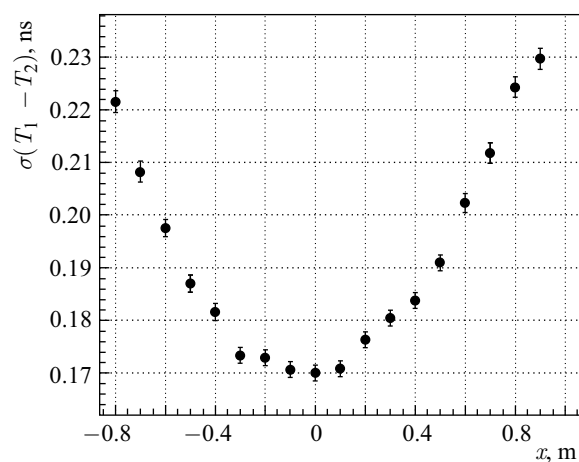
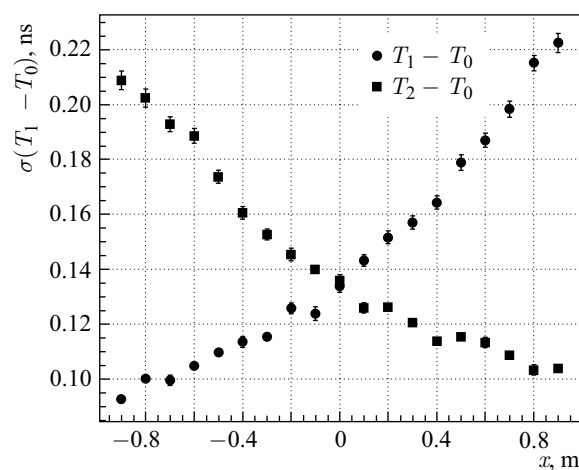
Рис. 4. Распределение A_1/A_2 при $x = 0$ для ВС-404 при оптическом контакте с ФЭУ

оценку $N_{\text{pe}} = 2(\sigma/\langle A_1/A_2 \rangle)^{-2} = 500$. Если предположить, что для ВС-404 $b = 0,01$ (см. выше), то для среднего по спектру фотонов значения q получим $q \sim N_{\text{pe}}/N_p = 7,4\%$. При тех же условиях для ВС-404 без оптического контакта с ФЭУ $N_{\text{pe}} = 330$, а для ВС-408 — 872 при оптическом контакте и 574 без него.

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЧЕТЧИКА

Как известно, для достижения наилучшего временного разрешения уровень A_{thr} сигнала ФЭУ, при котором происходит измерение времени T , должен быть пропорционален его максимальной амплитуде A_{max} . Как показали исследования, в нашем случае оптимальным для всех типов счетчиков является уровень $A_{\text{thr}} = 0,1A_{\text{max}}$ независимо от x (метод определения A_{max} описан в [5]).

Оказалось, что $T_1 - T_2$ и все другие временные распределения хорошо описываются кривой Гаусса. На рис. 5 и 6 представлены типичные x -зависимости $\sigma(T_1 - T_2)$ и $\sigma(T_i - T_0)$, где T_0 — время прихода триггерного сигнала. Если предположить, что флуктуации T_1 и T_2 независимы и одинаковы при $x = 0$, и пренебречь небольшими флуктуациями, связанными с размерами пучка протонов, то временной разброс сигналов $\sigma(T_i, x = 0) = \sigma(T_1 - T_2)/\sqrt{2}$. Значения $\sigma(T_i - T_0, x = 0)$ и $\sigma(T_1 - T_2, x = 0)$ позволили определить временное разрешение $\sigma(T_0)$ триггерного счетчика. Его среднее значение оказалось равным (66 ± 3) пс. Оно было использовано для оценок временного разброса $\sigma(T_i)$ сигналов с ФЭУ и временного разрешения $\sigma(T)$ счетчика при всех x .

Рис. 5. Зависимость $\sigma(T_1 - T_2)$ от x для ВС-404 без оптического контакта с ФЭУРис. 6. Зависимость $\sigma(T_i - T_0)$ от x для ВС-404 без оптического контакта с ФЭУ

Оказалось, что, как и можно было ожидать, у краев счетчика $\sigma(T)$ слабо зависит от типа сцинтиллятора (длины поглощения света и качества полировки его поверхности) и составляет 48 пс (ВС-408*), 52 пс (ВС-404*), 65 пс (ВС-408) и 68 пс (ВС-404) (см. прим. к табл. на с. 74). Оно достигает максимума в центре счетчика, равного 63 пс для ВС-408*, 71 пс для ВС-408, 76 пс для ВС-404* и 85 пс для ВС-404. Погрешности приведенных величин составляют $\sim 7\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная конструкция, примененный способ регистрации сигналов и разработанные методы обработки и анализа данных позволили достичь в сцинтилляционном счетчике длиной 2 м весьма высоких разрешений как по амплитуде, так и по времени. Их зависимость от энергии протона была исследована для 40-см счетчика с ВС-404 в работе [5]. Оптимальным решением является использование в счетчике имеющегося у нас сцинтиллятора ВС-404 при оптическом контакте с ФЭУ. Такой счетчик обеспечит измерение энергии протонов отдачи в области дифракционного конуса упругого рассеяния с точностью лучше 3 %, что позволит провести поиск его «тонкой» структуры.

Авторы выражают благодарность В. Е. Балакину за предоставленную возможность работы на ускорителе Физико-технического центра ФИАН в Протвино, Т. С. Щепанюку, обеспечившему стабильную работу ускорителя, И. Н. Белякову и О. Н. Ромашову, а также Т. З. Гуровой и Д. А. Стояновой за помощь в проведении эксперимента и подготовке данной публикации.

Работа выполнена при поддержке гранта 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. Antipov Yu. M., Bezzubov V. A., Gorin Yu. P. et al. Measurements of π^+p , K^+p and pp Elastic Scattering // Czech. J. Phys. B. 1976. V. 26. P. 382;
Антипов Ю. М., Беззубов В. А., Горин Ю. П. и др. Упругое рассеяние π^+ -, K^+ -мезонов и протонов на протонах в области импульсов 29–65 ГэВ/с. Препринт ИФВЭ ПЭФ 76-95. Серпухов, 1976.
3. <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/Physcial%20Constants%20chart.pdf>
4. Nassalski A., Moszynski M., Syntfeld-Kazuch A., Swiderski T. Non-Proportionality of Organic Scintillators and BGO // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. P. 1069.
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. 5, № 9–10. С. 847; Препринт ИФВЭ ОЭФ 2014-17. Протвино, 2014. 15 с.