



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2013-18
ОЭФ

А.И. Макаров¹, А.П. Останков², В.Д. Самойленко²,
В.К. Семенов^{1,2}, С.А. Холоденко², А.А. Худяков¹

**Исследование временных характеристик счетчиков
триггерного годоскопа заряженных частиц
для эксперимента NA62**

Направлено в *ПТЭ*

¹ Институт ядерных исследований РАН

² Институт физики высоких энергий

Протвино 2013

Аннотация

Макаров А.И. и др. Исследование временных характеристик счетчиков триггерного годоскопа заряженных частиц для эксперимента NA62: Препринт ИФВЭ 2013-18. – Протвино, 2013. – 17 с., 19 рис., 3 табл.

Проведены измерения временного разрешения нескольких прототипов ячеек для нового годоскопа заряженных частиц установки NA62. Рассмотрены варианты прямого светосбора с грани и с угла сцинтиллятора, а также светосбор с помощью волокон. В качестве фотодетекторов использовались кремниевые фотодиоды SiPM, компактный ФЭУ R7400U и ФЭУ с хорошей квантовой эффективностью в зеленой области R7899-20. Измерения проводились на космических мюонах и пучковом гало 21-го канала в зоне установки ОКА. Полученное, усредненное по площади, временное разрешение для ячейки $100 \times 100 \text{ мм}^2$ составляет ≈ 600 пс для считывания волокнами и ≈ 300 пс для прямого светосбора с грани сцинтиллятора.

Abstract

Makarov A.I. et al. Time resolution studing of counters for new charged hodoscope for NA62 experiment: IHEP Preprint 2013-18. – Protvino, 2013. – p. 17, figs. 19, tables 3.

Time resolution measurements of prototypes for a new Charge Hodoscope were performed. Different variants of the light collection such as direct light from the brink and from the corner of the scintillator and the light collection by WLS-fibers were considered. As photodetectors we have used silicon photomultipliers SiPM, compact PMT R7400U and green-extended PMT R7899-20. The measurements were performed with cosmic muons and beam halo at channel 21 in the installation of OKA experiment. Reached averaged time resolution for cell $100 \times 100 \text{ мм}^2$ is about ≈ 600 ps for fiber readout and ≈ 300 ps for direct light collection from the edge.

Введение

Эксперимент NA62[1] нацелен на изучение ультраредкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Особенность этого распада заключается в том, что он сильно подавлен и точно рассчитывается в Стандартной Модели (СМ), $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 7.81 \cdot 10^{-11}$ [2], и поэтому его наблюдение служит хорошей проверкой СМ и может позволить обнаружить физические процессы за рамками СМ. Современное экспериментальное значение брэнчинга распада составляет $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 1.73_{-1.05}^{+1.15} \times 10^{-10}$ [3], что не позволяет провести точную проверку предсказаний СМ. Эксперимент NA62 планирует достичь 10% точности при измерении вероятности распада.

Схема установки представлена на Рис. 1.

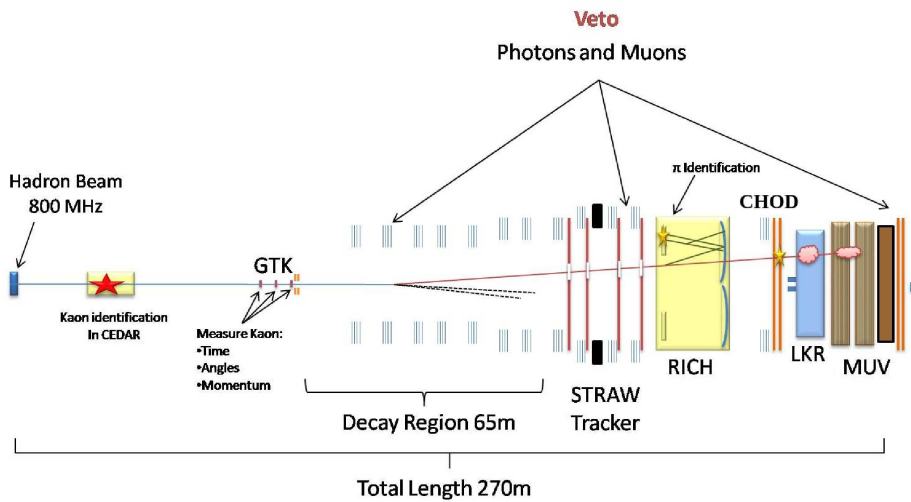


Рис. 1. Схема установки эксперимента NA62.

С экспериментальной точки зрения распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ исключительно сложен, т.к. он чрезвычайно редкий и в конечном состоянии содержится только одна детектируемая частица. Поэтому для выделения распада и подавления фоновых событий используется набор вето-счетчиков и разработанная многоуровневая триггерная система.

- L0 trigger — аппаратный триггер, основан на сигналах с годоскопа заряженных частиц — CHOD, жидко-криптонового калориметра — LKR и отсутствии сигнала с мюонного годоскопа — MUV3. В триггер нулевого уровня также входят сигналы от пучкового дифференциального Черенковского счетчика CEDAR и RICH. После получения позитивного отклика начинается вычитывание данных основных детекторов.
- L1 Trigger — программный триггер, осуществляет проверку данных и основан на корреляциях независимых подсистем.
- L2 Trigger — программный триггер, основан на частично реконструированных событиях.

Для идентификации пионов используется RICH-детектор. Вето-сигнал на мюоны вырабатывает быстрый сцинтилляционный годоскоп MUV3. В качестве вето-детектора на гамма-кванты — жидко-криптоновый калориметр (LKR). В случае гамма-квантов с большими углами вето-сигнал приходит с одной из 12 станций охранной системы LAV, установленных на распадном объеме. В качестве вето-системы на события с большой множественностью, в том числе и события с возможной конверсии фотонов на зеркалах RICH, используется годоскоп заряженных частиц CHOD, расположенный между RICH и LKR.

Помимо этого годоскоп планируется использовать как времязадающий счетчик совместно с сигналом RICH при отборе одотрековых событий на триггере нулевого уровня.

Основным требованием к годоскопу является временное разрешение ≈ 600 пс, обеспечивающее эффективность 98% при общей планируемой загрузке в 30 МГц. Дополнительное требование — малое количество вещества.

Очевидно, что оптимальной для этой цели является "падовая" структура годоскопа, позволяющая иметь разумную, не более 500 кГц, загрузку на канал при хорошем временном разрешении.

Целью данной работы является изучение нескольких вариантов счетчиков годоскопа с хорошим временным разрешением.

Прототипы счетчиков годоскопа

Падовая структура годоскопа подразумевает сборку отдельных сцинтилляционных счетчиков. Рассматривая возможные геометрические размеры счетчика, необходимо учитывать не только требование хорошего временного разрешения, но также и загрузку отдельного счетчика, вероятность попадания двух частиц в один счетчик, а также общее число каналов годоскопа. В ходе работы мы рассматривали следующие размеры сцинтиллятора:

- $90 \times 90 \times 20 \text{ мм}^3$
- $100 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$
- $150 \times 150 \times 20 \text{ мм}^3$
- $180 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$
- $270 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$

Сцинтиллятор с квадратным сечением по пучку ($90 \times 90 \text{ мм}^2$, $100 \times 100 \text{ мм}^2$ и $150 \times 150 \text{ мм}^2$) дает возможность регистрировать свет не только через оптическое волокно, но также рассматривать вариант прямого светосбора с грани сцинтиллятора, что позволяет регистрировать большее число фотоэлектронов.

Использование же больших ячеек с прямоугольным по пучку профилем ($180 \times 100 \text{ мм}^2$ и $270 \times 100 \text{ мм}^2$) позволяет в значительной мере сократить общее число каналов годоскопа, что может быть реализовано в областях небольшой загрузки — на периферии детектора. При этом считывание осуществляется волокнами, расположенными перпендикулярно короткой стороне (100 мм), что позволяет сохранить хорошее временное разрешение.

Исследуемые в ходе работы образцы изготовлены из сцинтиллятора BC-408[4], имеющего короткое время высвечивания и большую длину затухания, а также из схожих по характеристикам аналогов: EJ-200 [5] и производимого в ИФВЭ [6].

В ходе работы изучались варианты светосбора при помощи спектросмещающих волокон (WLS-волокон) (Рис. 2 а) и прямого светосбора с угла (Рис. 2 б) и с грани (Рис. 2 в) сцинтиллятора.

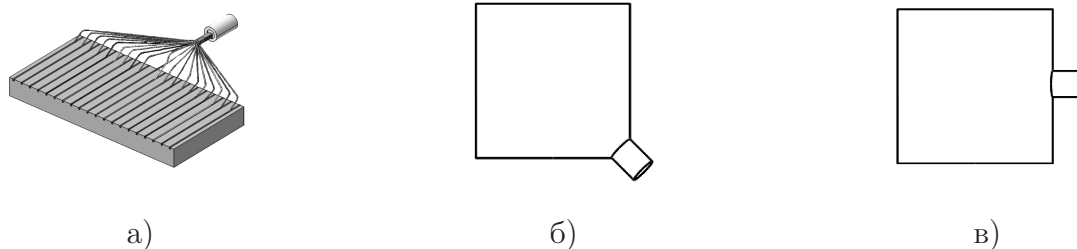


Рис. 2. Варианты светосбора.

Светосбор при помощи WLS-волокон

При сборе света через волокна используется быстрое спектросмещающее волокно BCF-92 диаметром 1 мм со временем высвечивания 2.7 нс. Его спектральные характеристики приведены на Рис. 3. Для регистрации света можно использовать кремниевые фотомножители SiPM, либо ФЭУ.

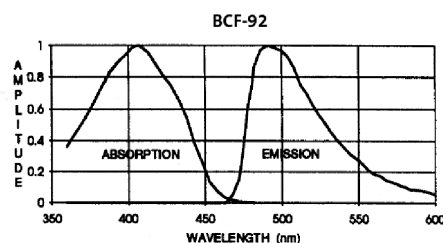
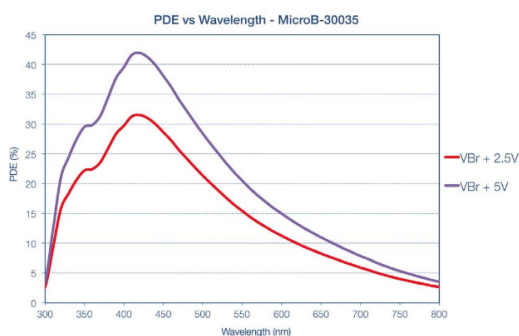


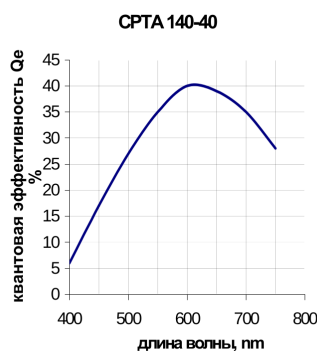
Рис. 3. Спектры поглощения и испускания WLS-волокна BCF-92.

Мы использовали кремниевые фотомножители с размером чувствительной области $3 \times 3 \text{ мм}^2$ CPTA 140-40 [9], производства ЦПТА (Москва), и MicroFB-30035 производства SensL (Ирландия) [10]. В ходе работы использовались усилители производства ЦПТА. Квантовая эффективность обоих типов кремниевых фотомножителей представлена на Рис. 4(а,б). Размер чувствительной области фотодиода ограничивает число волокон девятью, но позволяет размещать фотоприемник непосредственно в апертуре годоскопа.

Как эталон, в отдельном измерении был использован фотомножитель Hamamatsu R7899-20 с рабочим диапазоном 185-650 нм и квантовой эффективностью 15% при 520 нм. Его размер не позволяет использовать его в апертуре детектора, хотя в принципе можно рассмотреть вариант вывода света прозрачным волокном за апертуру годоскопа.



а) SensL B-Series



б) CPTA 140-40

Рис. 4. Квантовая эффективность кремниевых фотомножителей.

Прямой светосбор

Альтернативным вариантом является прямой светосбор. В качестве фотоприемника использовался малогабаритный фотоумножитель Hamamatsu R7400U [8] с диаметром чувствительной области 10 мм (модель часто применяемая для RICH-детекторов, спектральная чувствительность представлена на Рис. 5), а также кремниевый фотоумножитель MicroFB-60035 с чувствительной областью $6 \times 6 \text{ мм}^2$.

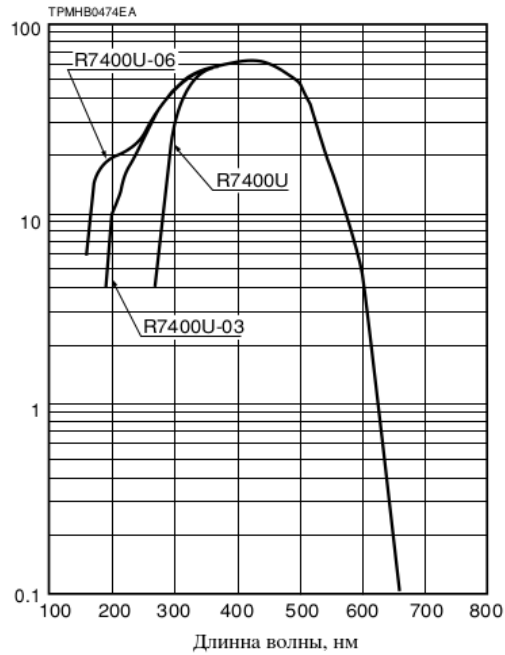


Рис. 5. Спектральная чувствительность ФЭУ типа R7400.

В Таблице 1 представлены рассмотренные прототипы и варианты светосбора.

Таблица 1. Рассмотренные прототипы с прямым светосбором

Размер	Сцинтиллятор	Волокна	С Грани	С Угла
$90 \times 90 \text{ мм}^2$	ИФВЭ	—	+	—
$100 \times 100 \text{ мм}^2$	EJ-200	+	+	+
$150 \times 150 \text{ мм}^2$	ИФВЭ	+	+	+
$150 \times 150 \text{ мм}^2$	BC-408	+	+	+
$180 \times 100 \text{ мм}^2$	BC-408	+	—	—
$270 \times 100 \text{ мм}^2$	EJ-200	+	—	—

Read-out электроника

Основное требование к годоскопу — хорошее временное разрешение, полученное в режиме «on-line», поэтому во всех представленных далее измерениях для минимизации зависимости времени срабатывания от амплитуды сигнала (walk-эффекта) использовался формирователь со следящим порогом.

Вычисление собственного временного разрешения

Для получения собственного временного разрешения исследуемого счетчика S_H необходимо также иметь два запускающих счетчика (S_1, S_2), один из которых будет времязадающим. Временное разрешение системы триггерных счетчиков, т.е. распределение времени срабатывания счетчика S_2 относительно S_1 описывается Гауссианом с разрешением σ_{tr} ,

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_{S_1}^2 + \sigma_{S_2}^2 \quad (1)$$

где $\sigma_{S_1}, \sigma_{S_2}$ — собственные временные разрешения счетчиков S_1 и S_2 соответственно.

Аналогичным образом можно записать еще два уравнения с разрешением исследуемого счетчика относительно запускающих счетчиков S_1 и S_2 ($\sigma_{S_H S_1}$ и $\sigma_{S_H S_2}$). После решения системы из трех уравнений получим собственное разрешение исследуемого счетчика:

$$\sigma_{S_H} = \sqrt{\frac{(\sigma_{S_H S_1}^2 + \sigma_{S_H S_2}^2 - \sigma_{tr}^2)}{2}} \quad (2)$$

Вычисление числа фотоэлектронов

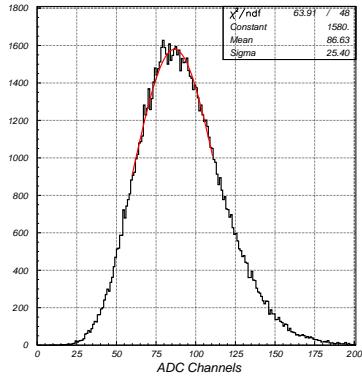
Для получения числа зарегистрированных фотоэлектронов была проведена калибровка с помощью светодиода и нейтральных оптических светофильтров разной плотности.

На Рис. 6 представлены примеры амплитудных спектров для фотоумножителя R7400U (слева) и кремниевого фотоприемника SiPM (справа), полученные при облучении их светодиодом.

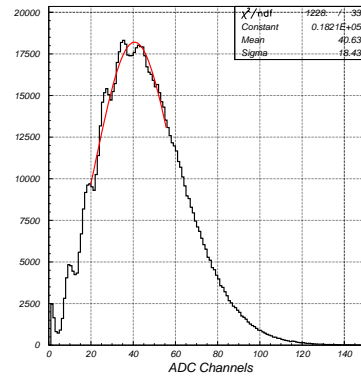
При небольших амплитудах в кремневых фотоумножителях хорошо видны отдельные фотоэлектронные пики (Рис. 6 справа), при больших амплитудах число фотоэлектронов $N_{ph.e.}$ можно вычислять следующим образом:

$$N_{ph.e.} = \frac{\langle A \rangle^2}{RMS^2}, \quad (3)$$

где $\langle A \rangle$ — средняя амплитуда за вычетом пьедестала.



PMT R7400U



SiPM

Рис. 6. Амплитудные спектры, полученные при облучении ФЭУ (слева) и кремниевого фотоприемника (справа) светодиодом.

По амплитудным спектрам, полученным при облучении фотоприемников светодиодом, определено число фотоэлектронов. На Рис. 7 и Рис. 8 приведены зависимости вычисленного числа фотоэлектронов от средней амплитуды в АЦП, которые хорошо фитируются линейной функцией. Полученные калибровочные данные позволяют переводить записываемую амплитуду сигнала из каналов АЦП в фотоэлектроны.

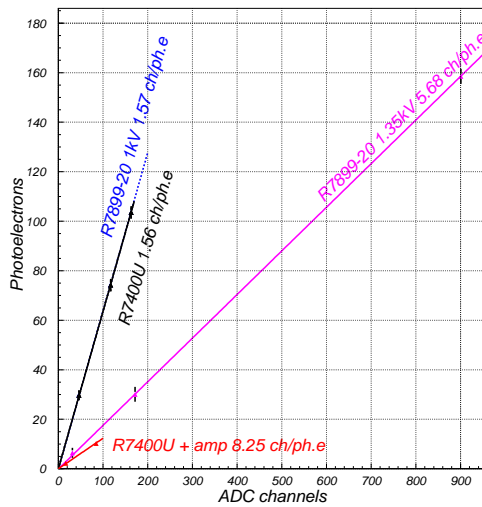


Рис. 7. Калибровочная зависимость числа фотоэлектронов от средней амплитуды сигнала для фотоумножителей.

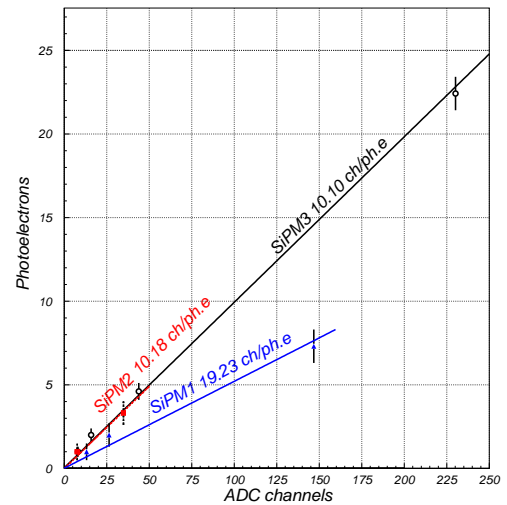


Рис. 8. Калибровочная зависимость числа фотоэлектронов от средней амплитуды сигнала для SiPM.

Стенд для измерений на космических мюонах

Схема стенда для измерений с космическими мюонами показана на Рис. 9.

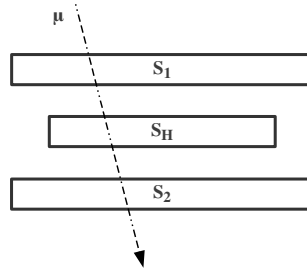


Рис. 9. Схема расположения счетчиков на стенде при измерениях на космических мюонах: S_1 , S_2 - запускающие сцинтилляционные счетчики $115 \times 115 \times 15$ мм³, S_H - исследуемый счетчик триггерного годоскопа.

Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 , размером $115 \times 115 \times 15$ мм³, поступают на дискриминатор, и совпадения сформированных сигналов вырабатывают триггер для запуска временных и амплитудных преобразователей. При этом сформированный сигнал с счетчика S_1 задержан на 10 нс относительно сигнала с счетчика S_2 , таким образом счетчик S_1 является времязадающим.

На Рис. 10 представлена используемая триггерная схема.

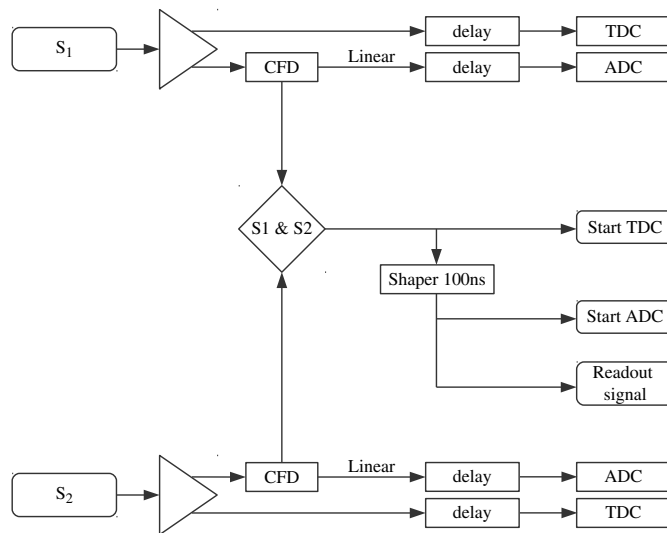


Рис. 10. Блок-схема триггерной и регистрирующей электроники.

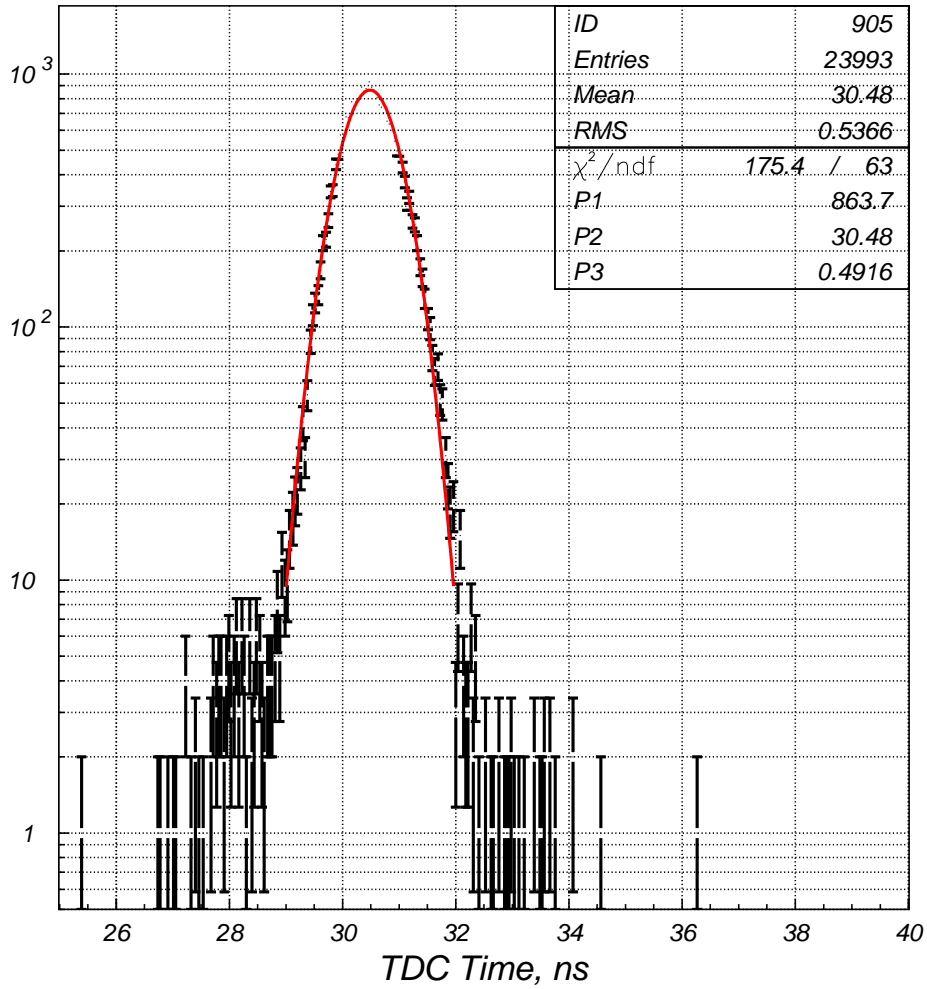


Рис. 11. Временное разрешение системы пучковых счетчиков:
временной спектр запускающего счетчика S_2 относительно счетчика S_1 .

Временное разрешение пары запускающих счетчиков σ_{tr} представлено на Рис. 11 и составляет 490 ± 5 пс. Таким образом, собственное временное разрешение запускающих счетчиков, при условии их тождественности, составляет $490/\sqrt{2} \approx 350$ пс.

Стенд для измерения на пучковом гало

Второй этап измерений производился во время весеннего сеанса 2013 года на пучковом гало 21-го канала У-70 (зона установки ОКА).

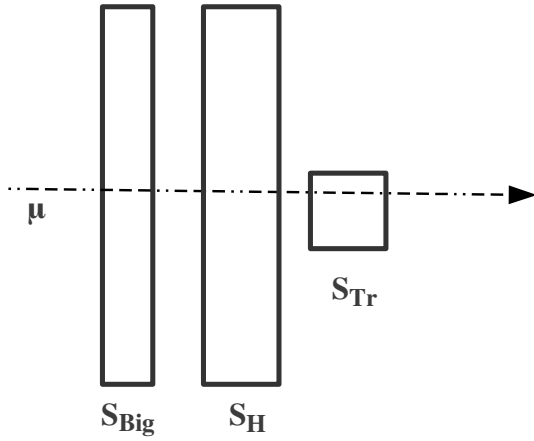


Рис. 12. Схема расположения счетчиков при работе на пучковом гало.

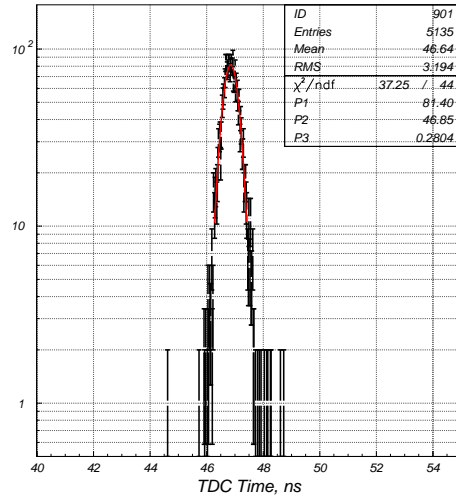


Рис. 13. Временной спектр счетчика S_{Big} относительно счетчика S_{Tr} .

На Рис. 12 схематически изображено расположение счетчиков. В качестве времяпределющего использовался черенковский счетчик S_{Tr} , изготовленный из плексигласа размерами $20 \times 20 \times 20$ мм³. Сигнал сцинтиляционного счетчика S_{Big} подавался на времяцифровой преобразователь и использовался для выделения частиц гало пучка, проходящего через прототип счетчика, уже на стадии обработки данных. Исследуемый образец S_H находился в светоизолированном ящике (2), расположенном между счетчиками S_{Tr} и S_{Big} .

Триггерный сигнал формировался без схемы совпадений исключительно по сигналу с быстро запускающего счетчика S_{Tr} . Выбранный на нем порог позволял хорошо отделять шумы. Так, система сбора данных считала около 30 событий во время сброса (1.3 с) и 1-2 события между сбросами (9 с).

Временное разрешение системы пучковых счетчиков составляет 280 ± 5 пс (Рис. 13). Учитывая, что собственное временное разрешение счетчика S_{Big} составляет ≈ 250 пс, собственное разрешение запускающего счетчика $\sigma_{Trig} \approx 120$ пс.

Результаты измерений временного разрешения

Нами были исследованы два варианта светосбора для элементов триггерного годоскопа — со спектросмещающим волокном (Wave Length Shifter – WLS) и с прямым оптическим контактом между фотоприемником и счетчиком. Полученные результаты изложены ниже.

Светосбор с волокон

В этом варианте светосбора девять WLS-волокон длиной 40 см фиксировались в счетчике оптическим клеем или просто были вставлены в канавки, нами были рассмотрены оба способа крепления. В качестве фотоприемника использовались как кремниевые фотоумножители SiPM площадью $3 \times 3 \text{ мм}^2$, так и "эталонный" ФЭУ R7899-20. При измерениях с SiPM порог формирователя был установлен на уровне 2 фотоэлектронов, что значительно снизило скорость счета их шумов до $\sim 30 \text{ кГц}$ [11].

В качестве примера, на Рис. 14 представлено временное разрешение для образцов $100 \times 100 \text{ мм}^2$ и $270 \times 100 \text{ мм}^2$, полученное с ФЭУ R7899-20 с вклеенными волокнами. Также на гистограммах приведены значения:

σ_{FIT} — результат фитирования записанного временного спектра функцией Гаусса, σ_{CAL} — собственное временное разрешение (результат вычисления по формуле (2)).

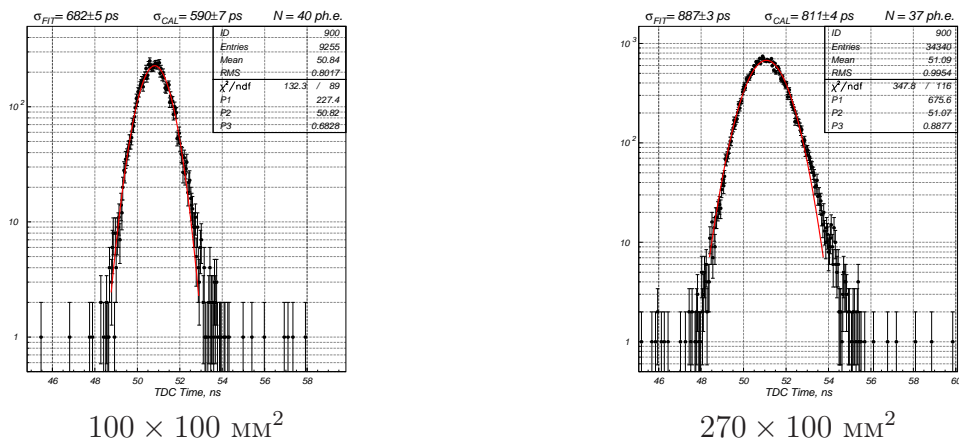


Рис. 14. Временной спектр исследуемого счетчика при волоконном светосборе с использованием ФЭУ R7899-20.

В Таблице 2 представлены результаты измерений временного разрешения, усредненного по площади триггерных счетчиков ($115 \times 115 \text{ мм}^2$), при светосборе с WLS-волокон. Величина соответствующего световыхода указана в скобках в числе фотоэлектронов, определенных по калибровочным зависимостям (Рис. 7, 8). Результаты, полученные с использованием светосбора волокнами на пучковом гало 21-го канала, совпадают с результатами измерений на космических мюонах.

Таблица 2. Временное разрешение при светосборе с волокон, усредненное по площади запускаяющих счетчиков ($115 \times 115 \text{ мм}^2$)

Геометрия	Not Glued	Glued		
	SiPM CPTA	SiPM CPTA	SiPM SensL	R7899-20
$100 \times 100 \text{ мм}^2$	$890 \pm 5 \text{ пс}$ (21 ф.э.)	$745 \pm 15 \text{ пс}$ (33 ф.э.)	$625 \pm 15 \text{ пс}$ (28 ф.э.)	$590 \pm 10 \text{ пс}$ (40 ф.э.)
$150 \times 150 \text{ мм}^2$	$1075 \pm 20 \text{ пс}$ (19 ф.э.)	—	—	—
$180 \times 100 \text{ мм}^2$	—	$1045 \pm 10 \text{ пс}$ (18 ф.э.)	—	—
$270 \times 100 \text{ мм}^2$	$1560 \pm 20 \text{ пс}$ (12 ф.э.)	$1120 \pm 20 \text{ пс}$ (22 ф.э.)	$865 \pm 10 \text{ пс}$ (24 ф.э.)	$810 \pm 5 \text{ пс}$ (37 ф.э.)

Из результатов видно, что клеивание волокон дает прибавку в числе фотоэлектронов примерно в 1.5-2 раза и тем самым улучшает временное разрешение на $\sim 30\%$. Кроме того, результаты с ФЭУ R7899-20 и SensL SiPM B-Series заметно превосходят результаты, полученные с CPTA 140-40 благодаря большему числу фотоэлектронов и значительно более быстрому сигналу.

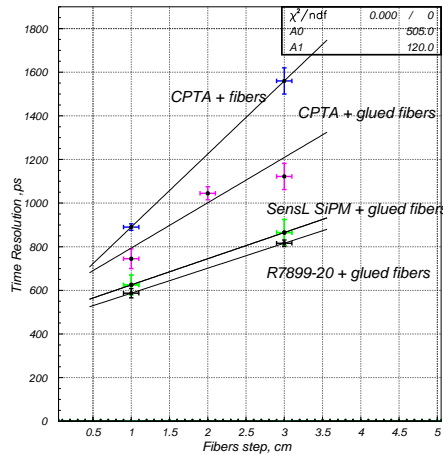


Рис. 15. Зависимость временного разрешения от расстояния между волокнами.

На Рис. 15 представлены зависимости временного разрешения от шага волокон. Так, при использовании SiPM и несклеенных волокон разрешение ухудшается на 350 пс при изменении на один сантиметр расстояния между волокнами. При склеенных волокнах этот показатель уменьшается до 220 пс/см, а при использовании фотоумножителя R7899-20 и SensL B-Series SiPM временное разрешение ухудшается на 115 пс/см и 122 пс/см соответственно.

Прямой светосбор

Прямой светосбор — основная альтернатива съему сигнала с волокон, которая позволяет получить большее число фотоэлектронов и, как следствие — лучшее временное разрешение. На Рис. 16 приведены результаты измерений временного разрешения при прямом светосборе с помощью фэу R7400U для образцов $90 \times 90 \times 20 \text{ мм}^3$ и $100 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$.

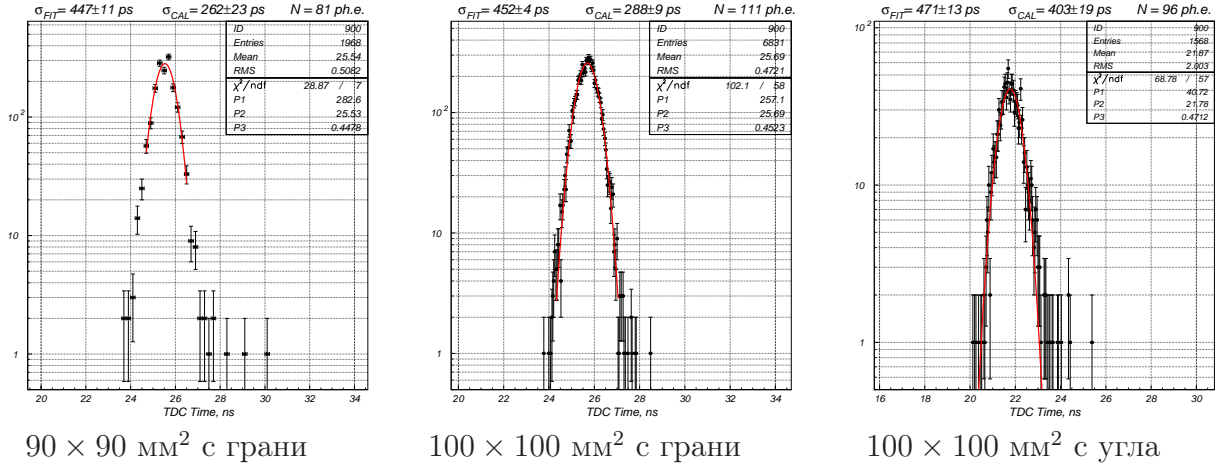


Рис. 16. Временные спектры исследуемых счетчиков при прямом светосборе с фэу R7400U.

В Таблице 3 приведена сводка временных разрешений для различных образцов и фотодетекторов. Временное разрешение с грани образца $100 \times 100 \text{ мм}^2$ хуже, чем для меньшего по площади образца $90 \times 90 \text{ мм}^2$. Временное разрешение с угла хуже, чем разрешение с грани.

Таблица 3. Временное разрешение при прямом светосборе, усредненное по площади триггерных счетчиков ($115 \times 115 \text{ мм}^2$)

Геометрия	с грани		с угла	
	R7400-U	SensL SiPM	R7400-U	SensL SiPM
$90 \times 90 \text{ мм}^2$	$260 \pm 25 \text{ пс}$	$370 \pm 15 \text{ пс}$	—	—
$100 \times 100 \text{ мм}^2$	$290 \pm 10 \text{ пс}$	$320 \pm 15 \text{ пс}$	$400 \pm 20 \text{ пс}$	$420 \pm 15 \text{ пс}$
$150 \times 150 \text{ мм}^2$	—	$355 \pm 5 \text{ пс}$	—	—

Вариант прямого светосбора как с грани образца $100 \times 100 \text{ мм}^2$, так и со срезанного угла более подробно измерялся на пучковом гало 21-го канала. Маленький запускаящий счетчик перемещался изменяя положение выделенного мюонного пучка в изучаемом прототипе. Рассмотренные области схематично изображены на Рис.17 а-б.



Рис. 17. Положения выделенного мюонного пучка во время измерений на пучковом гало 21-го канала.

В ходе измерений наблюдалась зависимость среднего времени прихода сигнала от координаты центра пучка (Рис. 18). Для прямого светосбора координата пучка соответствует расстоянию между центром пучка и фотоумножителем. В случае волоконного светосбора в качестве координаты пучка использовалось расстояние до центра сцинтиллятора. Точки, относящиеся к измерениям для варианта просматривания сцинтиллятора с угла, выделены другим цветом. Расстояние до ближайшего к ФЭУ угла при прямом светосборе (синяя область на Рис. 17а) рассчитана в предположении попадания света на ФЭУ через отражение (пунктирная линия).

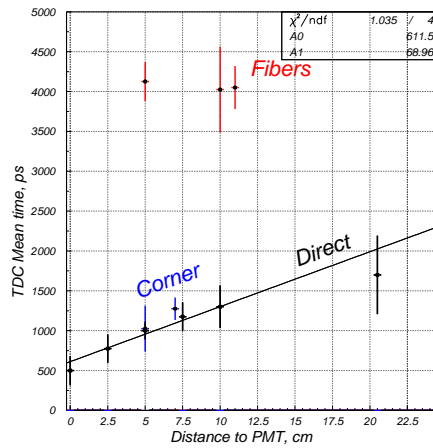


Рис. 18. Зависимость среднего времени прихода сигнала (в каналах ВЦП) от положения координаты центра пучка в исследуемом образце (см. текст).

Для прямого светосбора наблюдается линейная зависимость положения среднего времени от координаты пучка. Наклон прямой составляет 69 ± 22 пс/см, который согласуется с расчетной величиной, определяемой скоростью распространения света в пластике с показателем преломления $n = 1.59$.

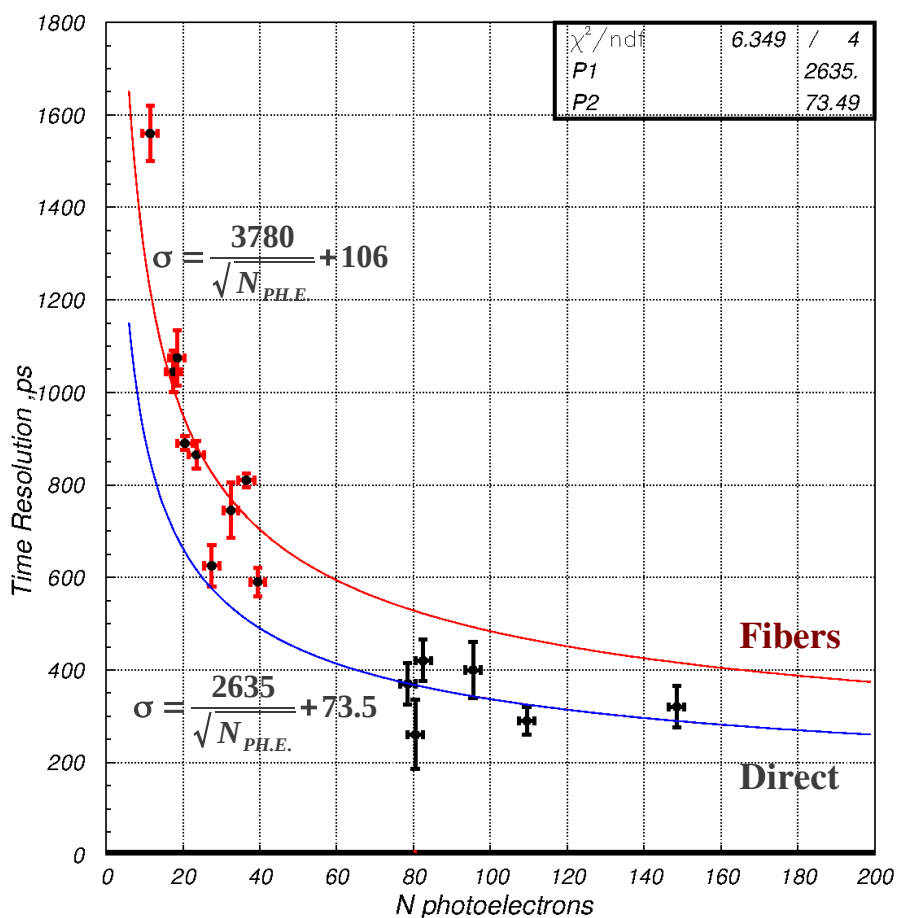


Рис. 19. Зависимость собственного временного разрешения от числа фотоэлектронов: красные точки — временное разрешение с использованием светосбора с волокон, черные точки — временное разрешение с прямым светосбором, кривая — фитирующая функция $\sigma = \frac{p_1}{\sqrt{N_{ph.e.}}} + p_2$.

На основе полученных результатов для всех типов сцинтилляторов, фотоприемников и варианта светосбора построена зависимость временного разрешения от числа регистрируемых фотоэлектронов (Рис. 19, точки — результаты измерений, кривая — фит функции $\sigma = \frac{p_1}{\sqrt{N_{ph.e.}}} + p_2$). Полученные экспериментальные данные по временному разрешению для всех рассмотренных типов светосбора примерно следуют ожидаемой корневой зависимости от числа регистрируемых фотоэлектронов.

Основные результаты и выводы

В ходе работы проведено исследование на космических мюонах и на фоновых мюонах установки ОКА прототипов элементов (счетчиков) годоскопа заряженных частиц для установки NA62. Рассмотрены следующие варианты сцинтилляторов толщиной 20 мм:

$90 \times 90 \text{ мм}^2$, $100 \times 100 \text{ мм}^2$, $150 \times 150 \text{ мм}^2$, $180 \times 100 \text{ мм}^2$, $270 \times 100 \text{ мм}^2$.

Съем информации осуществлялся WLS-волоконными, просматриваемыми силиконовыми ФЭУ (SiPM $3 \times 3 \text{ мм}^2$) и "эталонным" ФЭУ R7899-20. Кроме того, подробно изучен вариант съема, наряду с малогабаритным фотоумножителем, и с помощью SiPM с чувствительной областью $6 \times 6 \text{ мм}^2$, пристыкованным напрямую к грани сцинтиллятора или к одному из его срезанных углов.

В результате измерений получена зависимость временного разрешения от расстояния между волокнами и числа фотоэлектронов, регистрируемых фотоприемниками, которые могут быть полезными при проектировании аппаратуры, подобной рассмотренной в этой работе.

Наилучшее разрешение при использовании волокон достигнуто при работе с "эталонным" ФЭУ Hamamatsu R7899-20, которое составляет 590 ± 10 пс при шаге между волокнами — 1 см. С увеличением шага разрешение ухудшается на 115 пс за каждый сантиметр расстояния между волокнами. При работе с кремниевыми фотоумножителями полученное временное разрешение, примерно, на 30-50 пс хуже.

При прямом светосборе разрешение сильно зависит от размера счетчика и квантовой эффективности фотоумножителя в области 420 нм. Лучший результат получен с мини-ФЭУ R7400U и составляет 260 ± 25 пс для счетчика размером $90 \times 90 \text{ мм}^2$. Использование SiPM в варианте прямого светосбора несколько ухудшает временное разрешение, но позволяет в значительной мере уменьшить количество вещества в апертуре годоскопа и сократить его стоимость.

Полученное временное разрешение для вариантов светосбора в рассмотренных прототипах счетчиков годоскопа заряженных частиц (New CHOD) открывает возможность использования последнего в триггере нулевого уровня (в L0-trigger) эксперимента NA 62.

В заключение авторы выражают благодарность В.Ф. Образцову и В.Н. Болотову за постоянный интерес и поддержку работы, Г.И. Бритвичу, В.И. Рыкалину, А.М. Горину, Е.Н. Гущину, Н.А. Кузьмину, В.П. Новикову и В.И. Якимчуку за помощь в организации и эксплуатации измерительных стендов, К.Г. Качнову за высококвалифицированное выполнение оптико-механических работ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 12-02-91513-ЦЕРН_a.

Список литературы

- [1] NA62 Collaboration. NA62 Technical Design Document. NA62-10-07. 2010.
- [2] J. Brod, M. Gorbahn and E. Stamou, Phys. Rev. D 83, 034030 (2011).
- [3] A.V. Artamonov et al., Phys. Rev. D 79, 092004 (2009).
- [4] <http://www.detectors.saint-gobain.com/Plastic-Scintillator.aspx>
- [5] <http://www.eljentechnology.com>
- [6] http://ihep.ru/htec/db/index.php?d=scint_bulk
- [7] <http://www.detectors.saint-gobain.com/fibers.aspx>
- [8] http://ctf3-tbts.web.cern.ch/ctf3-tbts/instr/PMT/R7400U_TPMH1204E07.pdf
- [9] <http://www.cpta-apd.ru>
- [10] <http://sens1.com/products-page/bseries/>
- [11] V. Duk et al., CHOD in the Technical Run 2012. NA62 Internal note NA62-13-06.

Рукопись поступила 10 октября 2013 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

А.И. Макаров и др.

Исследование временных характеристик счетчиков триггерного годоскопа
заряженных частиц для эксперимента NA62.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Подписано к печати 18.10.2013. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,3. Уч.-изд.л. 1,82. Тираж 80. Заказ 36. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2013–18, И Ф В Э, 2013
