

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЕТЧИКА ДЕТЕКТОРА ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТИМОСТИ НА NICA

*Г. Д. Мильнов^{а, б, 1}, А. Г. Литвиненко^{а, б}, А. И. Малахов^{а, б},
Е. В. Сухов^{а, б}, В. В. Устинов^{а, б}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

В работе приведены результаты исследования временного разрешения сцинтилляционных элементов детектора, предназначенного для измерения абсолютной светимости в точке взаимодействия эксперимента MPD на NICA (ОИЯИ) [1]. Измерения проведены с использованием космического излучения. Обсуждается соответствие полученного временного разрешения задачам измерения светимости и настройки сведения пучков. Показано, что полученное временное разрешение согласуется с концепцией детектора и обеспечивает как измерение абсолютной светимости, так и исследование продольного профиля пучка.

This paper presents the results of the study on the time resolution of the scintillation elements of a detector designed to measure the absolute luminosity at the interaction points at the MPD experiment at the NICA (JINR) [1]. The measurements were carried out using cosmic rays. The correspondence of the obtained time resolution to the problems of luminosity measurement is discussed. It is shown that the obtained time resolution is consistent with the concept of the detector and provides measurement of the absolute luminosity as well as the study of the beam longitudinal profile.

PACS: 29.20.db; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Светимость (\mathcal{L}) определяет среднее число взаимодействий в единицу времени (R) для реакции с известным сечением σ [2]:

$$R = \mathcal{L}\sigma. \quad (1)$$

Для измерения светимости будем использовать единицы размерности сантиметры и секунды ($\dim \mathcal{L} = \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Наряду с интервалом достижимых энергий, светимость является ключевой характеристикой любого коллайдера.

Знание абсолютной светимости необходимо уже на стадии планирования эксперимента для оценки времени набора необходимой статистики. При обработке экспериментальных данных знание абсолютной светимости позволяет получать сечения, не содержащие нормировочных констант (абсолютные величины сечений).

¹E-mail: milnov@jinr.ru

По измеренной скорости счета для реакции с известным сечением абсолютная светимость вычисляется из уравнения (1). Если эффективность детектора и/или сечение не известны, измерение скорости счета дает информацию об относительной светимости $\tilde{\mathcal{L}}$, которая отличается от абсолютной светимости постоянным множителем k :

$$\tilde{\mathcal{L}} = k\mathcal{L}. \quad (2)$$

Знания относительной светимости иногда бывает достаточно для вычисления физических величин по измеренным (экспериментальным) данным. Например, при изучении корреляционных характеристик (потоков, размера области испускания, флуктуации и т. п.). Знания относительной светимости может быть достаточно на начальной стадии настройки сведения пучков. Однако без знания абсолютных сечений невозможно проведение «разностных» измерений и использование моделей без привлечения нормировочных констант [3].

ДЕТЕКТОР ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВИТИМОСТИ В ТОЧКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ MPD NICA

При выборе детектора предполагалось, что он будет использоваться при сведении пучков в точке взаимодействия как для контроля поперечного профиля пучков, так и для контроля относительного положения пучков в поперечной плоскости. Кроме того, этот детектор позволит настроить положения вершины взаимодействия вдоль оси столкновения. Алгоритм определения абсолютной светимости описан в [4] и опирается на скан Ван дер Меера [5], который может быть реализован как отдельно стоящим детектором, так и полностью аналогичным детектором в составе MPD.

Детектор состоит из двух «плеч», расположенных симметрично по обе стороны от точки взаимодействия пучков в детекторе MPD на расстоянии 300 см (рис. 1).

В свою очередь, каждое «плечо» состоит из четырех плоскостей, содержащих по восемь полос органического сцинтиллятора в форме параллелепипеда размером $10 \times 10 \times 100$ мм. Плоскости располагаются вокруг ионопровода, представляющего собой трубу внешним диаметром 10 см (рис. 2) и толщиной стенок 1 мм [1].

Вид одной плоскости показан на рис. 3. Каждая полоса органического сцинтиллятора просматривается с двух сторон кремниевыми фотоумножителями SiPM HAMAMATSU S13360-6025CS [6].

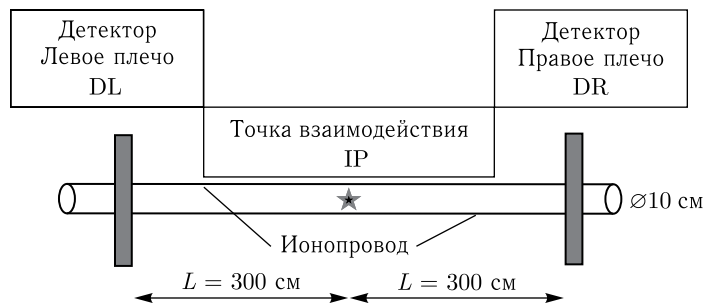


Рис. 1. Расположение двух плеч детектора (DL, DR) вблизи точки взаимодействия (IP). Вид с внешней стороны коллайдера в горизонтальной плоскости перпендикулярно к оси столкновения

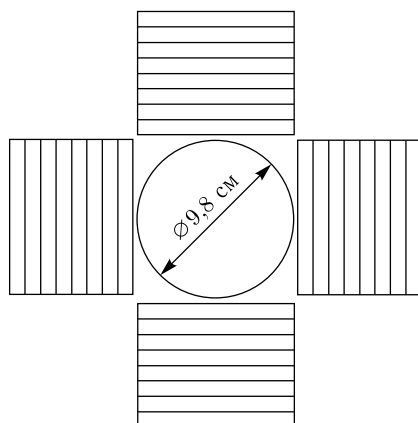


Рис. 2. Фронтальный (со стороны одного из пучков) вид «плеча» детектора (из четырех базовых плоскостей, расположенных вокруг ионопровода (окружность))

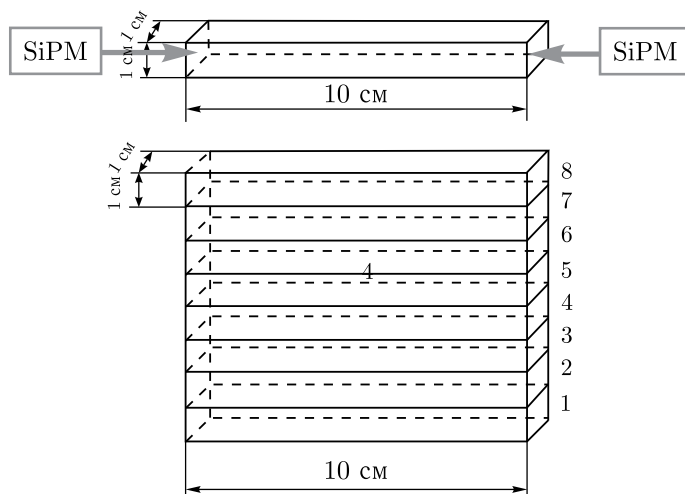


Рис. 3. Фронтальный вид одной плоскости детектора. Место расположения кремниевых фотомножителей показано на отдельной полосе. На остальных полосах SiPM не показаны

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЕТЕКТОРА

Чувствительными элементами детектора являются полосы органического сцинтиллятора из полистирола (PS) с добавлением 1,5%-го р-терфенила и 0,05%-го РОРОР [7]. Детектор должен обладать высоким быстродействием для организации триггера и получения необходимого временного разрешения. Для эффективного подавления фоновых событий от рассеяния пучковых частиц на ядрах остаточного газа достаточно иметь временное разрешение каждого из плеч детектора не хуже чем 400 пс. Разработка детектора требует исследования временных характеристик чув-

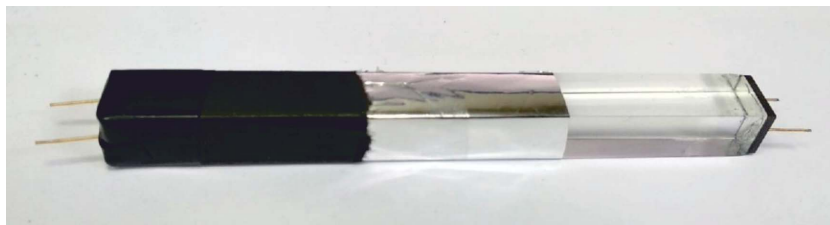


Рис. 4. Полоса органического сцинтиллятора, обернутого светоотражающим материалом и черной бумагой

ствительных элементов (совместно с трактом регистрации). В процессе изготовления разрешение каждого элемента будет тестироваться на стенде.

На данном этапе были исследованы три полосы органического сцинтиллятора заданного размера, указанного выше. Для увеличения сбора света с полос сцинтиллятора каждый элемент был обернут светоотражающим материалом алюминизированным майларом [8]. Поверх сцинтилляционные полосы покрыты черной бумагой для светозащиты (рис. 4).

Для надежного оптического контакта между сцинтиллятором и SiPM кремниевые фотоумножители приклеивались к торцам сцинтиллятора с помощью эпоксидного клея на основе оптического цемента (BC-600).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для исследования сцинтилляционных полос на космическом излучении создан экспериментальный стенд, часть которого изображена на рис. 5.

Временное разрешение счетчика исследовалось при прохождении через него космического мюона. Для выделения вертикального потока мюонов использовались два триггерных счетчика размером $10 \times 10 \times 8$ мм (рис. 5), которые образуют мюонный телескоп [9]. Блок-схема измерений представлена на рис. 6. Триггерные счетчики располагались относительно центра исследуемого сцинтиллятора. Эти счетчики включены в схему совпадения и обеспечивают выработку стартового сигнала для регистри-



Рис. 5. Механическая часть с полосой органического сцинтиллятора и триггерными счетчиками

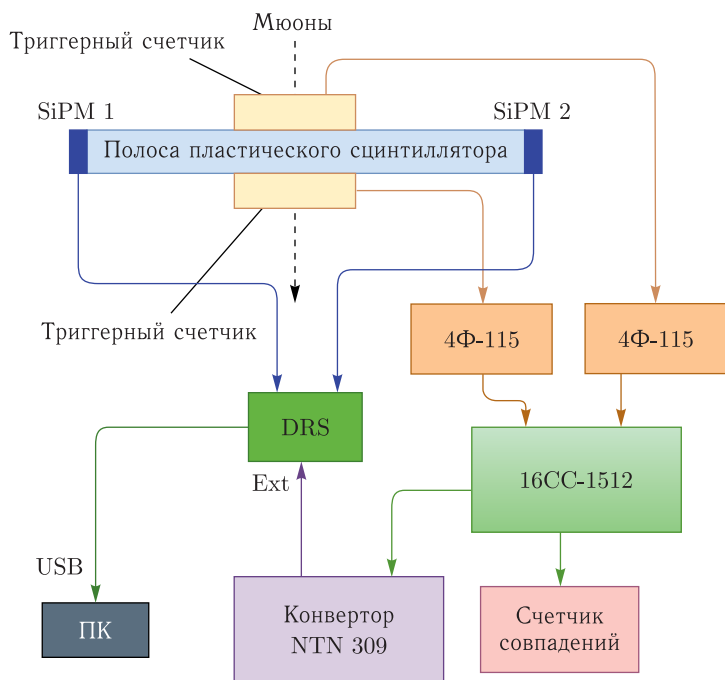


Рис. 6. Блок-схема экспериментального стенда

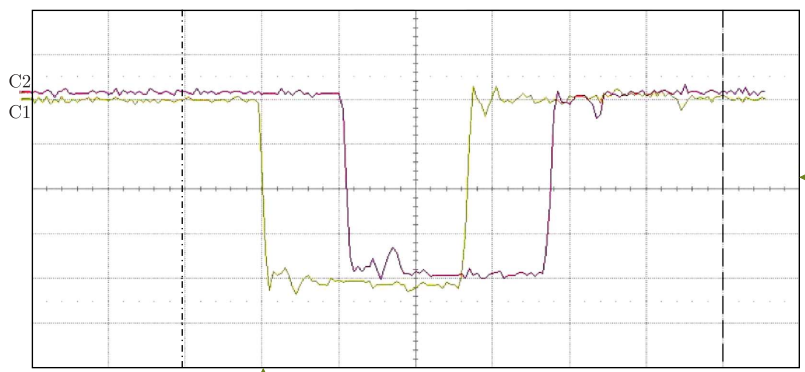


Рис. 7. Положение сигналов на входе на схему совпадений; развертка по горизонтали 20 нс, по вертикали — 200 мВ

рующей электроники. Положение сигналов на входе на схему совпадений показан на рис. 7.

Для набора статистики и получения временных характеристик на стенде использовалась электроника в стандарте САМАС для формирования триггерной логики.

Сигналы с триггерных счетчиков подавались через формирователи 4Ф-115 на схему совпадений 16СС-1512. Далее сформированный стартовый сигнал от 16СС-1512

через преобразователь уровней NTN-309 подавался на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Также с помощью цифрового счетчика КС 014 производился подсчет полезных событий со схемы совпадений. Порог формирователей 4Ф-115 настраивался таким образом, чтобы триггерные счетчики регистрировали только космические мюоны, проходящие через них. При апертуре счетчика 1×1 см, интенсивности ~ 70 вертикальных мюонов в секунду на квадратный метр [10] и пороге формирователей 30 мВ поток регистрируемых частиц через триггерные счетчики должен составлять 0,42 мюона в минуту.

Напряжение на кремниевых фотоумножителях для исследуемого счетчика выбиралось согласно рекомендациям Hamamatsu $V_{op} = V_{br} + 5$ В, где V_{op} — рабочее напряжение, а V_{br} — напряжение пробоя SiPM. Для измерения временного разрешения использовался 4-канальный флэш-АЦП *PSI DRS4 Evaluation board V3*. На DRS4 подавалась пара сигналов с SiPM, которые «просматривают» одну сцинтилляционную полосу с двух торцов. Измерялась разность времени прихода двух сигналов от SiPM:

$$\tau = \text{Time1} - \text{Time0}. \quad (3)$$

Сигналы с АЦП записывались программой сбора данных на основе LabVIEW на персональном компьютере.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На стенде были исследованы три тестовых счетчика в одинаковых условиях. Получено временное разрешение счетчиков согласно выражению (3) не хуже чем 160 пс. Амплитуда регистрируемых сигналов с исследуемых счетчиков лежала в интервале 50–100 мВ (без использования усилителя). Временное разрешение отдельного канала $\sigma(C)$ определялось согласно

$$\sigma_{\tau}^2 = 2\sigma^2(C). \quad (4)$$

На рис. 8–10 представлены результаты измерений для трех сцинтилляционных полос в одной конфигурации. Аппроксимация результатов измерений выполнена функ-

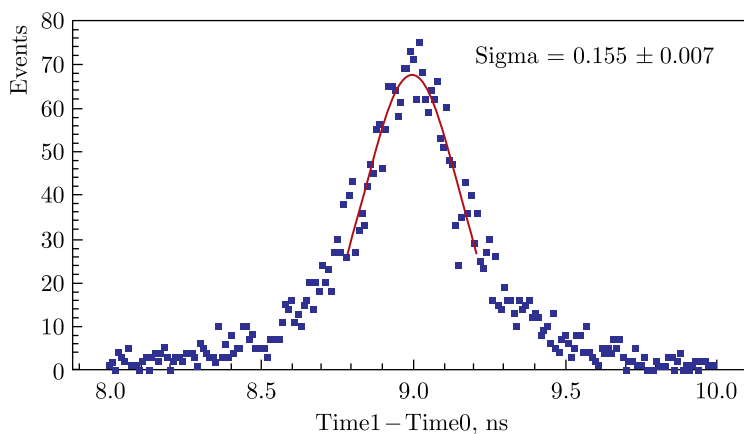


Рис. 8. Спектр для разности времен пролета с двух концов ($\text{Time1} - \text{Time0}$) первого счетчика. Точки — экспериментальные данные, линия — результат фитирования распределением Гаусса

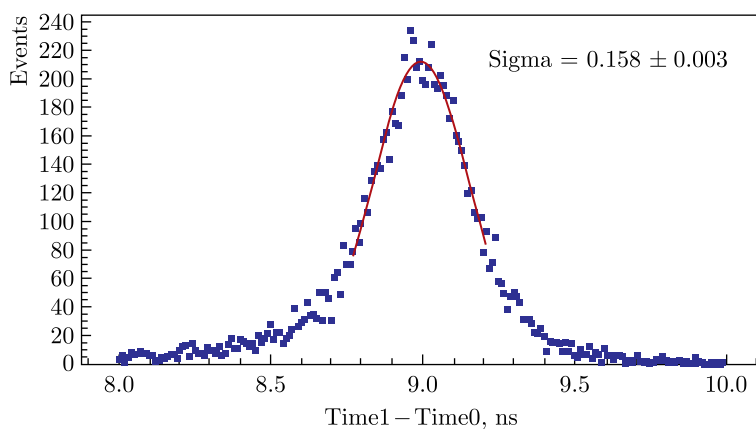


Рис. 9. Спектр для разности времен пролета с двух концов (Time1–Time0) второго счетчика. Точки — экспериментальные данные, линия — результат фитирования распределением Гаусса

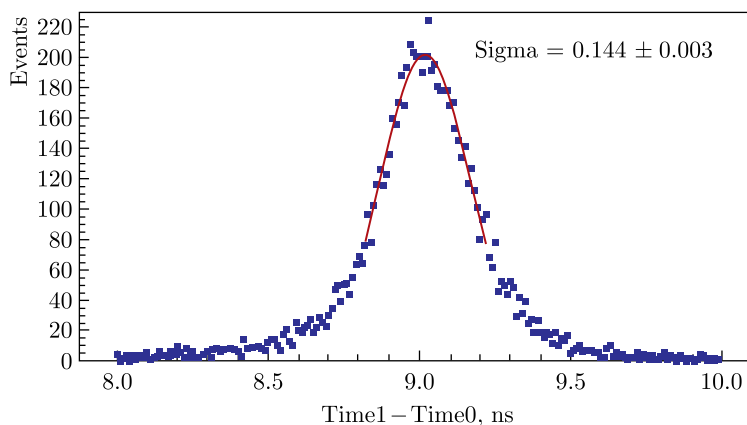


Рис. 10. Спектр для разности времен пролета с двух концов (Time1–Time0) третьего счетчика. Точки — экспериментальные данные, линия — результат фитирования распределением Гаусса

цией Гаусса в пакете ROOT [11]. Из рисунков видно, что стандартное отклонение для всех счетчиков не превышало 160 пс ($\sigma_\tau < 160$ пс). Для временного разрешения сигнала тракта сцинтилятор–SiPM–электроника в соответствии с (4) имеем

$$\sigma(C) = \sigma_\tau / \sqrt{2} < 110 \text{ пс.} \quad (5)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение обсудим соответствие измеренного разрешения по времени пролета задачам, стоящим перед детектором контроля светимости. Полученное разрешение в пересчете на один времяпролетный канал не хуже 110 пс (2). Учет влияния конечного

размера триггерного счетчика (1×1 см) если и ухудшает временное разрешение, то не больше, чем на 5%:

$$\Delta\tau_{\text{tr}} = \Delta x_{\text{tr}}/(\tilde{c}) = 50 \text{ пс}; \quad \sigma_{\tau} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{\tau}^2 + \Delta\tau_{\text{tr}}^2} \approx 160 \cdot (1 + 0,05) \text{ пс}, \quad (6)$$

где $\tilde{c} = 2 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в сцинтилляторе, а Δx_{tr} — разброс продольной координаты попадания из-за конечных размеров триггерных счетчиков. Одной из задач, которые будет решать детектор, является настройка положения максимума распределения вершин взаимодействия вдоль оси пучка. При монтаже МРД максимум этого распределения должен находиться в середине МРД. Определение положения вершины взаимодействия вдоль оси столкновений (Z) в детекторе светимости вычисляется по разности времени пролета для левой и правой половин детектора (если стоять лицом к точке сведения пучков). Время пролета ($\text{ToF}_{1/2}$) до левого и правого плеча детектора, считая, что счетчики расположены на оси столкновения, вычисляются как

$$\text{ToF}_{1/2} = \frac{L_{1/2}}{c\beta_s} + \Delta T_{\text{stop}} = \frac{L_0 \pm z}{c\beta_s} + \Delta T_{\text{stop}} = \frac{L_0}{c\beta_s} \pm \frac{z}{c\beta_s} + \Delta T_{\text{stop}}, \quad (7)$$

где z — расстояние от точки взаимодействия до (центра) левого и правого плеч детектора вдоль оси столкновений (Z). $L_0 = 300$ см — расстояние до центра каждого из плеч от точки сведения пучков. ΔT_{stop} — задержка прихода стопового сигнала, $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света в вакууме и β_s — скорость спектатора в единицах скорости света. Для максимальной энергии $\sqrt{S_{NN}} = 11 \rightarrow \beta_s = 0,981$. Разность времен пролета между плечами τ связана с положением вершины и равна

$$\tau = \text{ToF}_1 - \text{ToF}_2 = \frac{2z}{c} \rightarrow z = \frac{c}{2}\tau. \quad (8)$$

Численно из этого уравнения следует

$$z(\text{см}) = 15\tau(\text{нс}). \quad (9)$$

Даже с учетом фокусировки $\sigma_z \approx 30$ см [3]. Поэтому при $\sigma_{\tau} \approx 0,16$ нс (см. рис. 8–10) Δz равно (4):

$$\Delta z = \frac{c}{2}\sigma_{\tau} \approx 1,5 \cdot 10^8 \cdot 0,16 \cdot 10^{-9} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 2,4 \text{ см}. \quad (10)$$

Поскольку $\Delta z < \sigma_z$, то приведенной точности достаточно для анализа продольного распределения вершин взаимодействия.

Остановимся на еще одном обстоятельстве, которое следует учесть при рассмотрении временного разрешения. Связано это с тем, что в плоскости детектора, перпендикулярной оси пучка, не предполагается определять координаты попадания спектатора (протона или ядерного фрагмента). Учет этих координат ($\{x_1, y_1\}$, $\{x_2, y_2\}$) приводит к изменению пролетных баз по сравнению с (7):

$$L_{1/2} = \sqrt{(L_0 \pm z)^2 + x_{1/2}^2 + y_{1/2}^2} \approx L_0 \pm z + \frac{1}{2} \frac{x_{1/2}^2 + y_{1/2}^2}{L_0 \pm z}. \quad (11)$$

Такое изменение пролетных баз влияет на разность времен пролета:

$$\tau = \frac{2z}{c} + \frac{\Delta L(z, x_1, x_2, y_1, y_2)}{c}. \quad (12)$$

В свою очередь, изменение времяпролетных баз за счет поперечных координат спектатора в детекторе приводит к тому, что выражение (9) для определения продольного положения вершины взаимодействия изменяется и принимает вид

$$z(\text{см}) = 15\tau(\text{нс}) - \frac{1}{2}\Delta L(z, x_1, x_2, y_1, y_2)(\text{см}), \quad (13)$$

и в соответствии с (11) ΔL выразится как

$$\Delta L(z, x_1, x_2, y_1, y_2) = -\frac{x_1^2 + y_1^2}{L_0 + z} + \frac{x_2^2 + y_2^2}{L_0 - z}. \quad (14)$$

Из двух последних равенств следует, что при определении положения вершины возникает неопределенность, связанная с поперечной координатой попадания спектатора в детектор:

$$\Delta z_{\min} < z < \Delta z_{\max}; \quad \Delta z_{\min/\max} = \pm \frac{x_{\max}^2 + y_{\max}^2}{L_0 - 3\sigma_z} = \pm 1,14 \text{ см}, \quad (15)$$

что приводит к неопределенности в измерении продольного положения вершины из-за неопределенности поперечных координат попадания спектатора в детектор:

$$\Delta z_{x,y} = \Delta z_{\max} - \Delta z_{\min} \approx 2,3 \text{ см}. \quad (16)$$

Из результата сравнения этой величины со стандартным распределением вершин следует, что при сохранении принятой концепции детектора достигать временного разрешения лучше чем $\sigma_\tau \approx 0,16$ нс не имеет смысла. Это сразу следует из сравнения (10) и (16).

Технология изготовления не требует специальной оснастки, может быть за исключением полировки сцинтилляционных полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ускорительный комплекс NICA. <https://nica.jinr.ru/complex.php>.
2. *Grafströma P., Kozanecki W.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2015. V. 81. P. 97–148.
3. *Litvinenko A. G.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 204. P. 05004.
4. *Игамкулов З., Кручеру М., Курепин А. Б., Литвиненко А. Г., Литвиненко Е. И., Переседов В. Ф.* // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6(225). С. 535–551.
5. *van der Meer S.* CERN-ISR-PO-68-31. 1968.
6. Кремниевые фотоумножители HAMAMATSU S13360-6025CS. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf.
7. *Кадыков М. Г.* Литьевой полистирольный пластический сцинтиллятор адронного калориметра комплекса «Меченые нейтрино». Препринт ОИЯИ 13-90-16. Дубна, 1990.

8. Отражатель DuPont Майлар. https://dupontteijinfilms.us/wp-content/uploads/2017/01/Mylar_Physical_Properties.pdf.
9. Ustinov V. V., Kutinova O. V., Sukhov E. V. // AIP Conf. Proc. 2021. V.2377. P.030019; <https://doi.org/10.1063/5>.
10. Zyla P. A. et al. (*Particle Data Group*) // Rev. Part. Phys. Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. P.083C01.
11. <https://root.cern.ch/>

Получено 19 января 2022 г.