

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.6

*Памяти профессора Kei-Ichi Kuroda (Laboratoire d'Annecy-le-Vieux  
de Physique des Particules (LAPP), France) посвящается*

### СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ГОДОСКОП ЭКСПЕРИМЕНТА СПАСЧАРМ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

© 2023 г. А. В. Рязанцев<sup>a,\*</sup>, С. И. Букреева<sup>a</sup>, А. Н. Васильев<sup>a,b</sup>, А. М. Горин<sup>a</sup>,  
Ю. М. Гончаренко<sup>a</sup>, В. В. Моисеев<sup>a</sup>, В. В. Мочалов<sup>a,b</sup>, П. А. Семенов<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Институт физики высоких энергий им. А.А. Логонова Национального исследовательского центра  
“Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

<sup>b</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

\*e-mail: ryazants@ihep.ru

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 29.10.2022 г.

Принята к публикации 12.12.2022 г.

Представлен сцинтилляционный волоконный годоскоп высокого разрешения с использованием многоанодных фотоэлектронных умножителей. Подробно изложена технология изготовления волоконных кассет и их монтажа в корпус детектора, приведены функциональная схема дискриминатора анодных сигналов, а также характеристики годоскопа при работе в составе экспериментальной установки на пучках канала 14 ускорительного комплекса У-70.

DOI: 10.31857/S0032816223030096, EDN: ISFXRQ

#### ВВЕДЕНИЕ

В ИФВЭ Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” на ускорительном комплексе У-70 проводится поляризационный эксперимент СПАСЧАРМ (Спиновые асимметрии в образовании чармония), нацеленный на исследование спиновой зависимости сильного взаимодействия [1]. В настоящее время эксперимент проходит на канале 14, где вторичные адронные пучки получают от внутренней мишени У-70. На этом канале ранее был успешно проведен ряд экспериментов с поляризованной мишенью, и имеется вся пучковая аппаратура, необходимая как для формирования первичного триггера, так и для определения типа частицы и ее координат на мишени установки при обработке данных [2]. Также создан эскизный проект нового адронного канала 24А с медленным выводом высокоинтенсивного пучка из кольца У-70 [1].

Точность, с которой вычисляются координаты частицы, определяется пространственным разрешением системы из трех двухкоординатных сцинтилляционных годоскопов, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга вдоль оси пучка до его входа в мишень, и, в

первую очередь, разрешением ближайшего к мишени годоскопа. Детектор, использовавшийся ранее в этом месте установки, перекрывал площадь  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> и имел по 10 каналов регистрации в горизонтальной и вертикальной координатах с шагом дискретизации 2 мм. Для эксперимента СПАСЧАРМ было решено разработать и изготовить новый годоскоп с использованием пластиковых сцинтилляционных волокон, который имел бы заметно лучшее координатное разрешение.

В данной работе описана конструкция созданного детектора, приведены его технические характеристики и результаты использования на пучке в составе экспериментальной установки.

#### КОНСТРУКЦИЯ ГОДОСКОПА

Годоскоп изготовлен по технологии, разработанной в рамках сотрудничества RD-17 в ЦЕРН [3] и успешно примененной при создании детекторов для экспериментов DIRAC и COMPASS [4, 5]. Волоконные кассеты, на основе которых он собран, были изготовлены для построения и тестирования прототипа детектора DIRAC. Они состоят из пластиковых сцинтилляционных во-

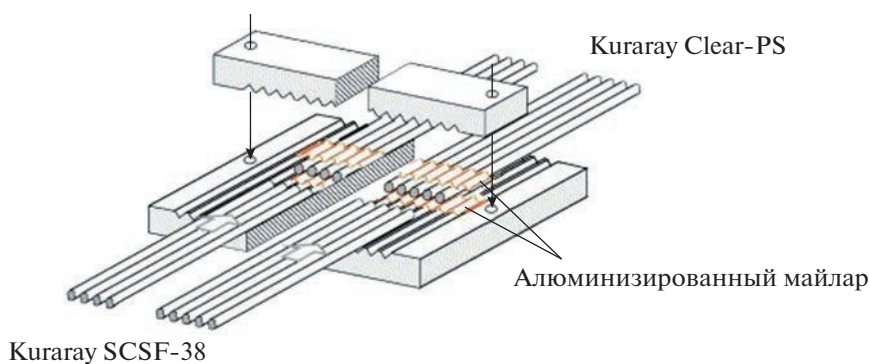


Рис. 1. Технология склейки пластиковых волокон.

локон с однослойной оболочкой типа SCSF-38 диаметром 0.5 мм производства японской фирмы Kuraray [6], склеенных с транспортными волокнами Kuraray Clear-PS того же диаметра.

Процедура склейки волокон показана на рис. 1. Сцинтилляционные и транспортные волокна укладываются в параллельные канавки треугольного сечения, изготовленные с высокой точностью в металлической пластине с шагом 0.88 мм. Под место склейки подкладывается полоска алюминизированного майлара толщиной 3 мкм. На полированные торцы волокон наносится оптическая эпоксидная смола, после чего волокна под микроскопом аккуратно сдвигаются до полного контакта. Место соединения накрывается такой же полоской майлара и прижимается металлической пластиной с канавками так, что каждая пара волокон в месте склейки оказывается надежно зафиксированной внутри канала квадратного сечения. Таким образом, после затвердевания смолы волокна образуют половинный слой (полуслой), находясь в месте соединения на расстоянии 0.88 мм друг от друга.

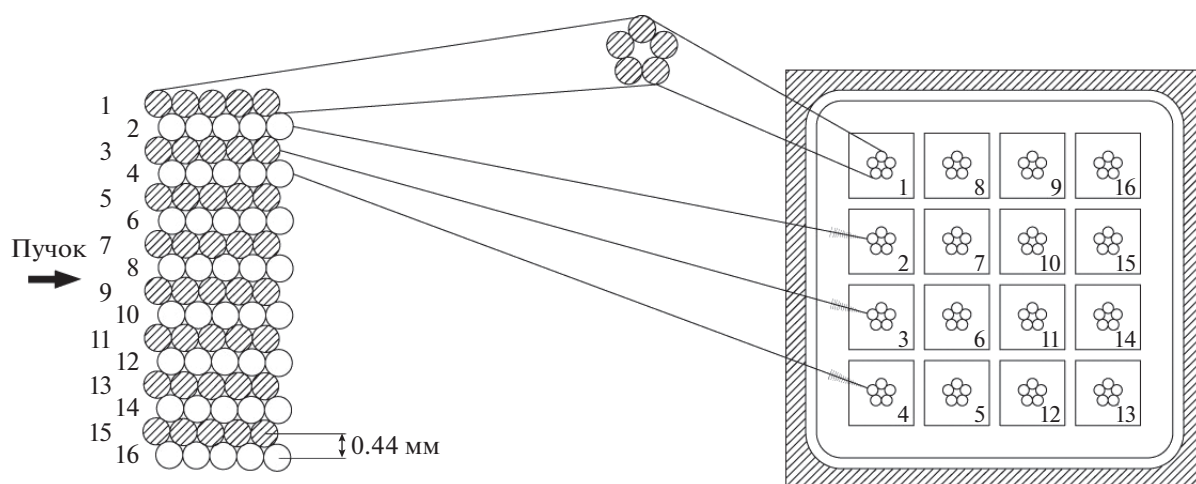
Полный слой формируется из двух таких склеек с использованием другого приспособления, также имеющего канавки для фиксирования волокон, изготовленные с таким же шагом. Длина этих канавок такова, что сцинтилляционные волокна могут быть полностью уложены и зафиксированы в них в слегка натянутом состоянии. Сначала укладывается один половинный слой, и сцинтилляционные волокна покрываются белой вододисперсионной краской. Второй половинный слой укладывается после высыхания краски поверх первого с поперечным смещением в полшага укладки так, чтобы линии склейки волокон в верхнем и нижнем полуслоях находились на расстоянии примерно 2 мм друг от друга для обеспечения прочности этой зоны. Предварительно на майлар наносится тонкий слой краски. Волокна второго полуслоя также слегка натягиваются, после чего краска наносится одновременно на все сцинтилляционные волокна. Таким образом, по-

сле полного высыхания краски получается один целый слой, в котором сцинтилляционные волокна расположены строго параллельно с шагом 0.44 мм. Согласно справочным данным Kuraray, толщина оболочки используемых волокон составляет 2% от их диаметра. Следовательно, диаметр керна равен 0.48 мм, и при выбранном шаге укладки соседние волокна слегка перекрываются, что гарантирует отсутствие зон нечувствительности в кассете.

Качество склейки в каждом изготовленном слое проверялось на специально созданной для этого установке. Коллимированный радиоактивный источник  $^{90}\text{Sr}$  перемещался поперек сцинтилляционных волокон, а сигнал регистрировался фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), к фотокатоду которого пристыковывались все транспортные волокна, собранные вместе. Сигнал с анода ФЭУ передавался на микроамперметр, подключенный к самописцу. Таким образом, каждый изготовленный слой имел свой «паспорт качества». Измерения показали, что на склейке в среднем теряется не более 10% света.

Кассета формируется из нескольких слоев с нанесением между ними той же краски, после чего оставляется под прессом до полного высыхания краски. Сформированная таким образом кассета обрезается до требуемого размера, ее торец полируется, и на него приклеивается зеркальная пленка для улучшения светосбора.

Описанная процедура позволяет создавать волоконные кассеты с любым количеством слоев, обеспечивая необходимый световыход. Количество волокон в каждом слое, т.е. число каналов регистрации, определяется планируемой схемой стыковки транспортных волокон с фотоприемником. В качестве последнего хорошо зарекомендовали себя 16-анодные ФЭУ фирмы Hamamatsu Photonics [7], обеспечивающие высокую эффективность регистрации сигналов с кассет, состоящих из пяти слоев. Для эксперимента DIRAC была разработана механическая конструкция годо-



**Рис. 2.** Схематическое изображение части сцинтилляционной волоконной кассеты и расположения волокон на окне фотокатода 16-анодного ФЭУ Hamamatsu R7600-200-M16.

скопа, в которой три ФЭУ составляли один модуль. Соответственно для каждого модуля изготавливалась кассета на 48 каналов регистрации, имеющая ширину 21.2 мм.

Годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ имеет площадь чувствительной зоны  $\sim 42 \times 42$  мм<sup>2</sup> и представляет собой два одинаковых однокоординатных детектора, размещенных взаимно перпендикулярно на общей раме в непосредственной близости друг от друга. Каждый детектор составлен из двух пятислойных волоконных кассет по 48 каналов, обеспечивающих 96 каналов регистрации, закрепленных в светонепроницаемом алюминиевом корпусе, к которому присоединены два модуля с ФЭУ. Транспортные волокна длиной  $\sim 250$  мм, по пять штук на канал, вклеены в адаптер из черного полиметилметакрилата для состыковки с окном фотокатода ФЭУ по схеме, показанной на рис. 2. Плоскость адаптера, примыкающая к фотокатоду, отполирована, а сам адаптер после сборки годоскопа оказывается плотно поджатым к ФЭУ с помощью трех пружин.

Регистрация сцинтилляционных сигналов осуществляется 16-анодными ФЭУ Hamamatsu R7600-200-M16 с бишелочным фотокатодом UBA (Ultra Bialkali), имеющим рекордные показатели квантовой эффективности. Внутри модуля каждый из трех ФЭУ находится в магнитном экране, составленном из пластин листовой стали СТ-3 толщиной 1.5 мм. Анодные сигналы выводятся кабелями с волновым сопротивлением 50 Ом и собираются на 36-контактном разъеме. По шесть таких разъемов закреплены на панелях вертикальной и горизонтальной плоскостей годоскопа для коммутации печатных плат 16-канальных дискриминаторов.

Функциональная схема одного канала дискриминатора приведена на рис. 3. В дискриминаторе

предусмотрена дистанционная регулировка общего для всех 16-ти каналов порога срабатывания компаратора, и приведенный к входу порог установлен на уровне 10 мВ. Длительность сформированного выходного парафазного LVDS (Low-voltage differential signaling) сигнала, передаваемого по скрученной паре плоского кабеля в систему сбора данных, составляет 40 нс. Сигналы поступают на входы времяцифрового преобразователя ЕМ-4 в крейт системы “ЕвроМИСС” [8].

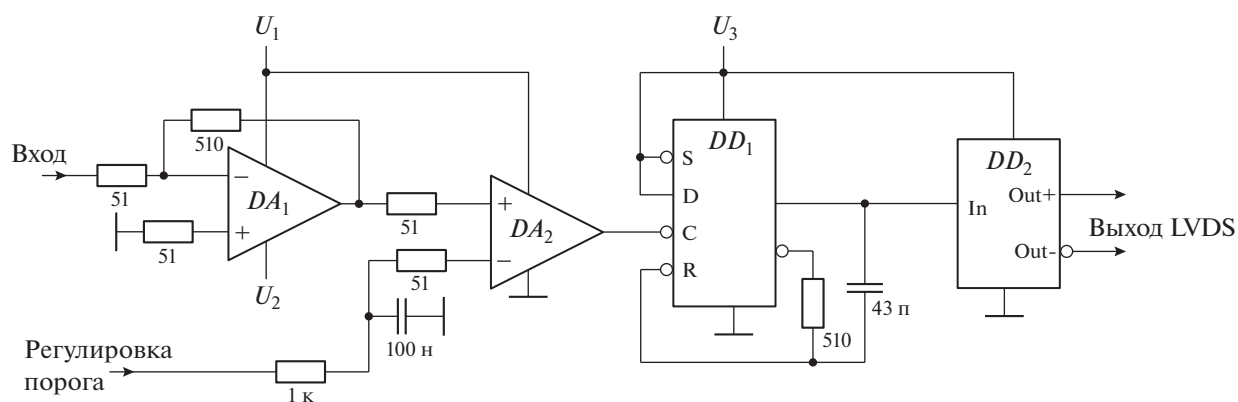
Для настройки и диагностики детектора предусмотрено использование аналоговых сигналов с последних динодов ФЭУ, выведенных через конденсаторы на панельные высокочастотные разъемы для коммутации коаксиальных кабелей, которые установлены рядом с 36-контактными разъемами. Сигнал с последнего динода имеет положительную полярность и представляет собой сумму сигналов всех 16-ти каналов ФЭУ.

Высоковольтные делители ФЭУ изготовлены из SMD (Surface mounted device) компонентов. Фотоэлектронные умножители запитаны от многоканального высоковольтного источника питания CAEN [9]. Предварительно ФЭУ были сгруппированы таким образом, чтобы в одном модуле оказались приборы с близкими по значению коэффициентами усиления. Это позволило использовать всего четыре высоковольтных канала — по одному на модуль. Подпитка последних динодов не предусмотрена в силу относительно невысокой загрузки годоскопа при работе в составе установки.

Фотография полностью смонтированного в рабочем положении годоскопа приведена на рис. 4.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

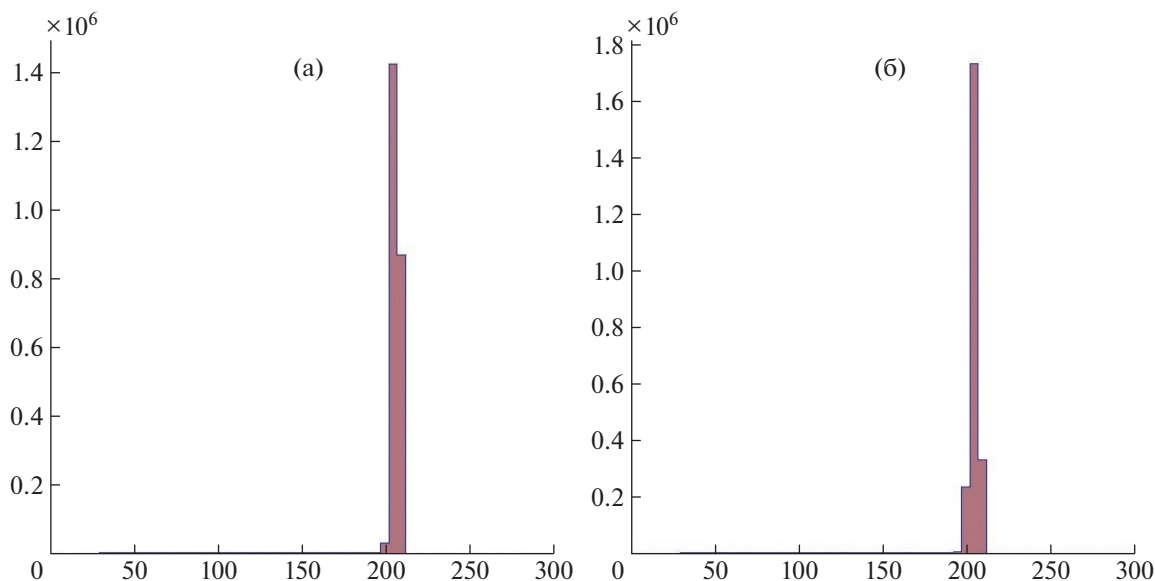
Представленные ниже данные получены в ходе тестового сеанса в апреле 2022 года на выведен-



**Рис. 3.** Функциональная схема дискриминатора.  $DA_1$  – усилитель,  $DA_2$  – компаратор,  $DD_1$  – формирователь длительности,  $DD_2$  – преобразователь уровня.



**Рис. 4.** Фотография сцинтилляционного волоконного годоскопа в составе экспериментальной установки СПАСЧАРМ на канале 14.



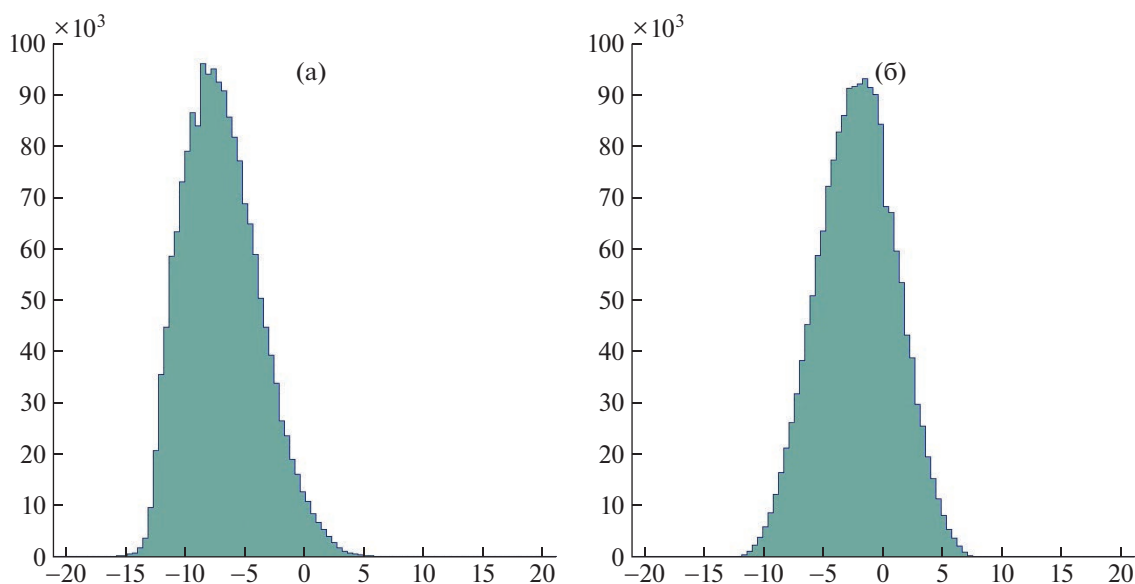
**Рис. 5.** Суммарные спектры времен регистрации сигналов со всех каналов годоскопа относительно триггера: **а** — по координате  $X$ , **б** — по координате  $Y$ . Горизонтальная шкала приведена в наносекундах.

ном в канал 14 пучке отрицательно заряженных пионов с импульсом 26.5 ГэВ/с. Триггер для системы сбора данных формируется из совпадения сигналов от трех сцинтилляционных пучковых счетчиков. Два из них имеют диаметр 100 мм и расположены на оси пучка до годоскопа. Третий счетчик диаметром 14 мм расположен между годоскопом и криостатом поляризованной мишени, непосредственно перед его входным окном.

Фокус пучка по обеим координатам находится в центре мишени, на расстоянии  $\sim 3.4$  м от годоскопа.

На рис. 5 приведены суммарные спектры времен регистрации сигналов со всех каналов годоскопа относительно триггера по координате  $X$  (рис. 5а) и по координате  $Y$  (рис. 5б) во временном окне 300 нс.

Анализ результатов проводился для всех событий временных спектров во временном окне 50 нс



**Рис. 6.** Профили пучка — статистика числа событий в каналах годоскопа: **а** — по координате  $X$ , **б** — по координате  $Y$ . Горизонтальная шкала приведена в миллиметрах.

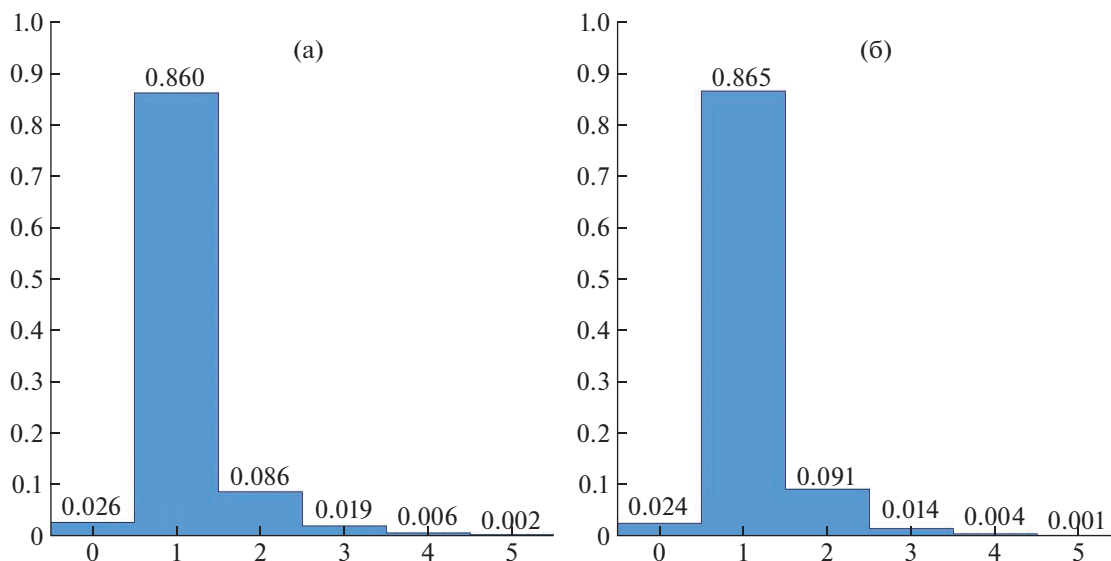


Рис. 7. Нормированные распределения множественности: а – по координате X, б – по координате Y.

(в интервале 175–225 нс, см рис. 5). Профили пучка по обеим координатам годоскопа показаны на рис. 6.

Важной характеристикой годоскопа, наряду с координатным разрешением, является эффективность. На рис. 7 приведены нормированные

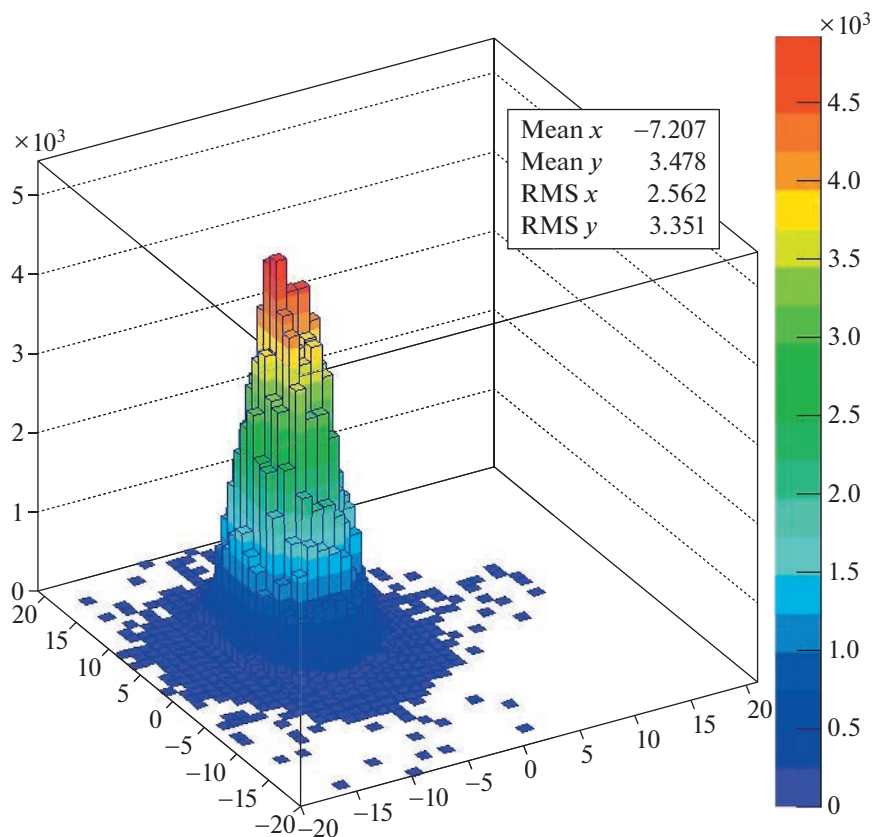


Рис. 8. Распределение частиц по координатам в центре мишени, вычисленное по данным системы из трех годоскопов. Шкалы горизонтальных осей приведены в миллиметрах.

распределения множественности — вероятностные распределения количества хитов в каждой из плоскостей на один триггер в заданном временном окне. Из этих гистограмм видно, что неэффективность годоскопа (нулевая множественность) составляет ~2.5%.

Практическое применение детектора проиллюстрировано на рис. 8. На нем показан 3D-плот с распределением частиц в центре протяженного образца мишени диаметром 20 мм, вычисленным по данным от трех годоскопов установки в их системе координат. Координатная сетка дана с шагом 1 мм. По вертикали отложено количество частиц, попавших в ту или иную зону поперечного сечения мишени.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в настоящей работе сцинтиляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ имеет координатное разрешение лучше 500 мкм. Эффективность каждой плоскости годоскопа составляет ~97.5%. Находясь в непосредственной близости к поляризованной мишени и имея отменное координатное разрешение, он является решающим детектором для мониторингирования прецизионного наведения пучка частиц в канале на центр поляризованной мишени. В течение ряда сеансов работы на пучке этот годоскоп показал высокую надежность функционирования и стабильность параметров.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает признательность администрации НИЦ “Курчатовский институт”—ИФВЭ за содействие в приобретении дорогостоящих многоанодных ФЭУ и благодарит сотрудников конструкторского отдела, цеха опытного производства и отдела электроники и автоматизации за качественное и своевременное выполнение работ по разработке и изготовлению различных компонентов детектора.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в НИЦ “Курчатовский институт”—ИФВЭ при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00164).

Работа выполнена в НИЦ “Курчатовский институт”—ИФВЭ при частичной финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки (программа Приоритет-2030 в НИЯУ МИФИ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abramov V.V., Azhgirey I.L., Borisov A.A., Bukreeva S.I., Vasiliev A.N., Garkusha V.I., Goncharenko Yu.M., Gorin A.M., Derevshchikov A.A., Zapolsky V.N., Isaev A.N., Kalugin N.K., Kachanov V.A., Kozhin A.S., Likhoded A.K. et al. // *Physics of Particles and Nuclei*. 2023. V. 54. № 1. P. 69. <https://doi.org/10.1134/S1063779623010021>
2. Апокин В.Д., Беликов Н.И., Васильев А.Н., Гончаренко Ю.М., Грачев О.А., Гришин В.Н., Давиденко А.М., Деревшиков А.А., Ильин Ю.А., Кормилицын В.А., Матуленко Ю.А., Медведев В.А., Мельник Ю.М., Мещанин А.П., Михалин Н.Е. и др. // *ПТЭ*. 1998. № 4. С. 23.
3. RD17 — FAROS Collaboration. Agoritsas V. et al. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 1995. V. 44. P. 323. [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(95\)80051-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(95)80051-4)
4. DIRAC Collaboration. Adeva B. et al. // *Nucl. Instrum. and Methods. A*. 2003. V. 515. P. 467. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.08.114>
5. Horikawa S., Daito I., Gorin A., Hasegawa T., Horikawa N., Iwata T., Kuroda K., Manuilov I., Matsuda T., Miyachi Y., Riazantsev A., Sidorov A., Takabayashi N., Toeda T. // *Nucl. Instrum. and Methods. A*. 2004. V. 516. P. 34. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.07.038>
6. <https://www.kuraray.com>
7. <https://www.hamamatsu.com>
8. Букреева С.И., Емельянов Н.М., Исаев А.Н., Карпиков Ю.Д., Киселев Ю.С., Петров В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Шаланда Н.А., Якимчук В.И. // *ПТЭ*. 2014. № 6. С. 23. <https://doi.org/10.7868/S003281621405005X>
9. <https://www.caen.it>