



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2022–6

А.В. Рязанцев¹, С.И. Букреева¹, А.Н. Васильев^{1,2}, А.М. Горин¹,
Ю.М. Гончаренко¹, В.В. Моисеев¹, В.В. Мочалов^{1,2},
П.А. Семёнов^{1,2}

**Сцинтилляционный волоконный годоскоп
эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном
комплексе У-70**

Направлено в ПТЭ

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

² НИЯУ МИФИ

Протвино 2022

Аннотация

Рязанцев А.В. и др. Сцинтилляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2022–6. – Протвино, 2022. – 11 с., 8 рис., библиогр.: 9.

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

Abstract

Ryazantsev A.V. et al. Scintillating Fiber Hodoscope for the SPASCHARM Experiment at the U-70 accelerator complex: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2022–6. – Protvino, 2022. – p. 11, fig. 8, refs.: 9.

The paper describes a high-resolution scintillating fiber hodoscope using multi-anode photomultipliers and presents its characteristics when operating as the part of an experimental setup in the beam channel 14 of the U-70 accelerator complex. The technology for manufacturing of fiber bundles and their installation in the detector structure is described in detail, and a diagram of the anode signals discriminator is given.

Памяти профессора Кей-Ичи Куроды
(Лаборатория экспериментальной физики в г.Анси, Франция) посвящается

Введение

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ на ускорительном комплексе У- 70 проводится поляризационный эксперимент СПАСЧАРМ, нацеленный на исследование спиновой зависимости сильного взаимодействия [1]. В настоящее время эксперимент проходит на канале 14, где вторичные адронные пучки получаются от внутренней мишени У-70. На этом канале ранее был успешно проведён ряд экспериментов с поляризованной мишенью, и имеется вся пучковая аппаратура необходимая как для формирования первичного триггера, так и для определения типа частицы и её 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 трёх 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 20×20 мм² 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 применённой 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 составлены из пластиковых сцинтилляционных волокон 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 с шагом 0,88 мм, изготовленные с высокой точностью в металлической пластине. 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 таким образом, что каждая пара волокон в месте склейки оказывается надёжно 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.

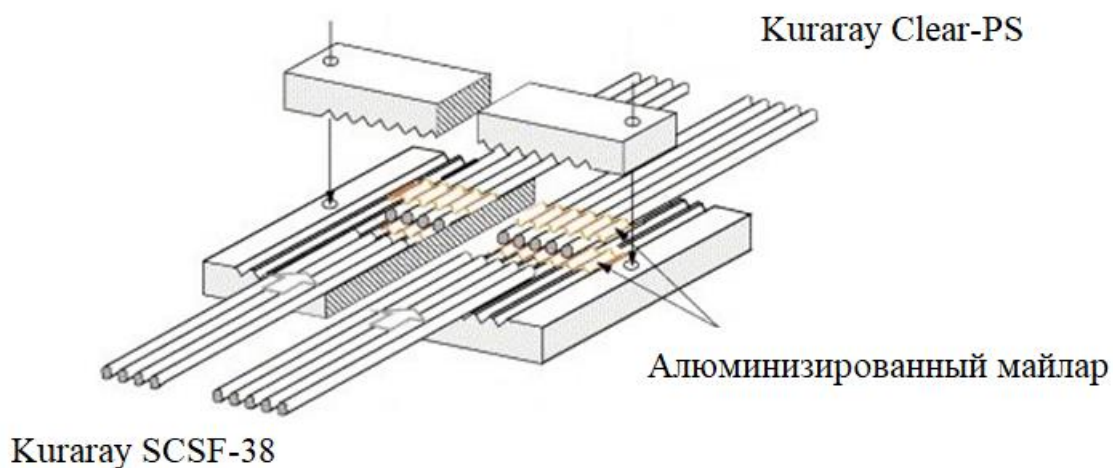


Рис. 1. Технология склейки пластиковых волокон.

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, после полного высыхания краски получается один целый слой, в котором сцинтилляционные волокна расположены строго параллельно с шагом 0,44 мм. По справочным данным Kuraray толщина оболочки используемых волокон составляет 2% от их диаметра. Следовательно, диаметр ядра 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}Sr пере-

мещался поперёк сцинтилляционных волокон, а сигнал регистрировался фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), к фотокатоду которого пристыковывались все транспортные волокна, собранные вместе. Сигнал с анода ФЭУ передавался на микроамперметр, подключённый 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 слоёв с нанесением между ними той же краски и оставлением под прессом до её полного высыхания. После этого сформированная кассета обрезается до требуемого размера, её торец полируется, и на него приклеивается зеркальная плёнка для улучшения светосбора.

Описанная процедура позволяет создавать волоконные кассеты с любым количеством слоёв, обеспечивая необходимый световыход. Количество волокон в каждом слое, т.е. число каналов регистрации, определяется планируемой схемой состыковки транспортных волокон с фотоприёмником. В качестве последнего хорошо зарекомендовали себя 16-анодные ФЭУ фирмы Hamamatsu Photonics [7], обеспечивающие высокую эффективность регистрации сигналов с кассет, состоящих из пяти слоёв. Для эксперимента DIRAC была разработана механическая конструкция годоскопа, 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 размер чувствительной зоны $\sim 42 \times 42$ мм² и представляет собой два одинаковых однокоординатных детектора, размещённых 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, закреплённых в светонепроницаемом алюминиевом корпусе, к которому присоединены два модуля с фотоэлектронными умножителями. Транспортные волокна длиной ~ 250 мм, по пять штук на канал, вклеены в адаптер из чёрного 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 трёх пружин.

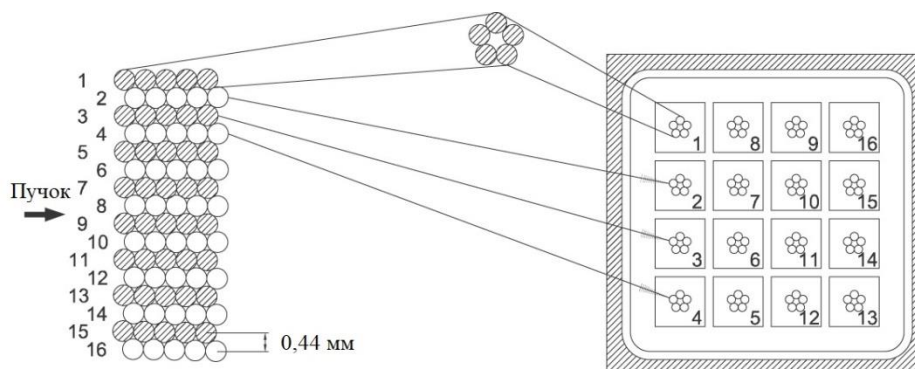


Рис. 2. Схематическое изображение части сцинтилляционной волоконной кассеты и расположения волокон на окне фотокатода 16- анодного ФЭУ Hamamatsu R7600-200-M16.

Регистрация сцинтилляционных сигналов осуществляется 16-анодными ФЭУ Hamamatsu R7600-200-M16 с бищелочным фотокатодом UBA (Ultra Bialkali), имеющим рекордные показатели квантовой эффективности. Внутри модуля каждый из трёх 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 разъёме CENC-36F. По шесть таких разъёмов закреплены на панелях вертикальной и горизонтальной плоскостей годоскопа для коммутации печатных плат 16-канальных дискриминаторов.

Принципиальная схема одного канала дискриминатора приведена на Рис. 3. В дискриминаторе предусмотрена дистанционная регулировка общего для всех 16 каналов порога срабатывания компаратора, и приведённый к входу порог установлен на уровне 10 мВ. Длительность сформированного выходного парафазного LVDS сигнала, передающегося по скрученной паре плоского кабеля в систему сбора данных, составляет 40 нс. Сигналы поступают на входы время-цифрового преобразователя (ВЦП) EM-4 в кейт системы «ЕвроМИСС» [8].

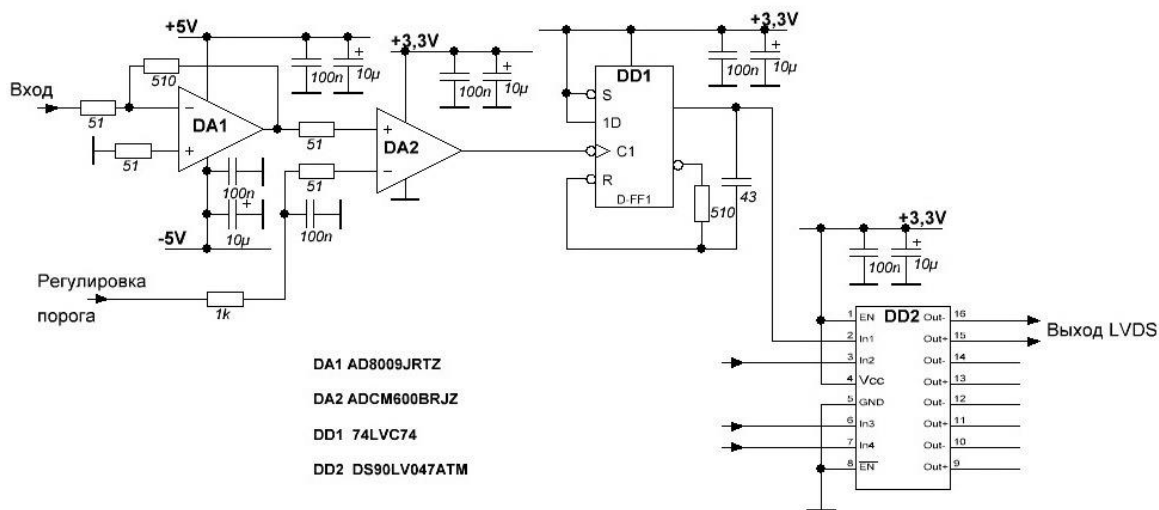


Рис. 3. Принципиальная схема дискриминатора.

Для настройки и диагностики детектора предусмотрено использование аналоговых сигналов с последних динодов ФЭУ, выведенных через конденсаторы на панельные разъёмы РЦ-00, которые установлены рядом с 36-контактными разъёмами. Сигнал с последнего динода имеет положительную полярность и представляет собой сумму сигналов всех 16 каналов ФЭУ.

Высоковольтные делители ФЭУ изготовлены из SMD 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.



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

Экспериментальные результаты

Представленные данные получены в ходе тестового сеанса в апреле 2022 года на выведенном в канал 14 пучке отрицательно заряженных пионов 26,5 ГэВ/с. Триггер для системы сбора данных формируется из совпадения сигналов от трёх сцинтилляционных пучковых счётчиков. Два из них имеют диаметр 100 мм и расположены на оси пучка до годоскопа. Третий счётчик 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 временные спектры, представляющие собой сумму всех времён прихода сигналов с годоскопа по триггеру во временном окне 300 нс на 96 каналов ВЦП по координате X (а) и на 96 каналов по координате Y (б).

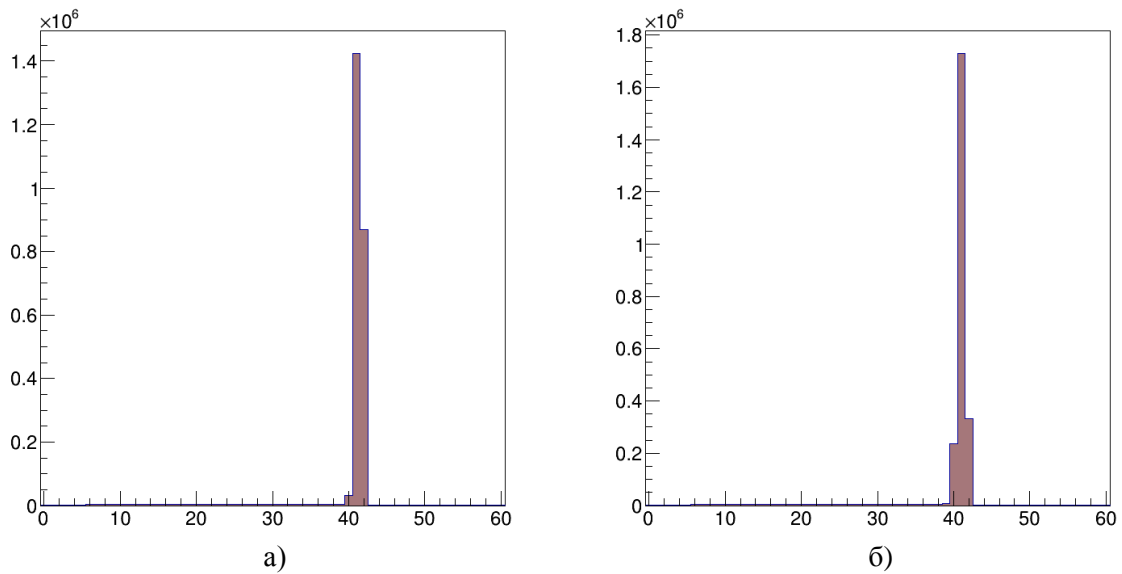


Рис. 5. Временные спектры (шкала абсцисс: 1 деление = 5 нс) – сумма времён 96 каналов ВЦП:
 а) по координате X; б) по координате Y.

Анализ результатов проводился для всех событий временных спектров во временном окне 50 нс (с 35 по 45 деления шкалы абсцисс). Профили пучка по обеим координатам годоскопа показаны на Рис. 6.

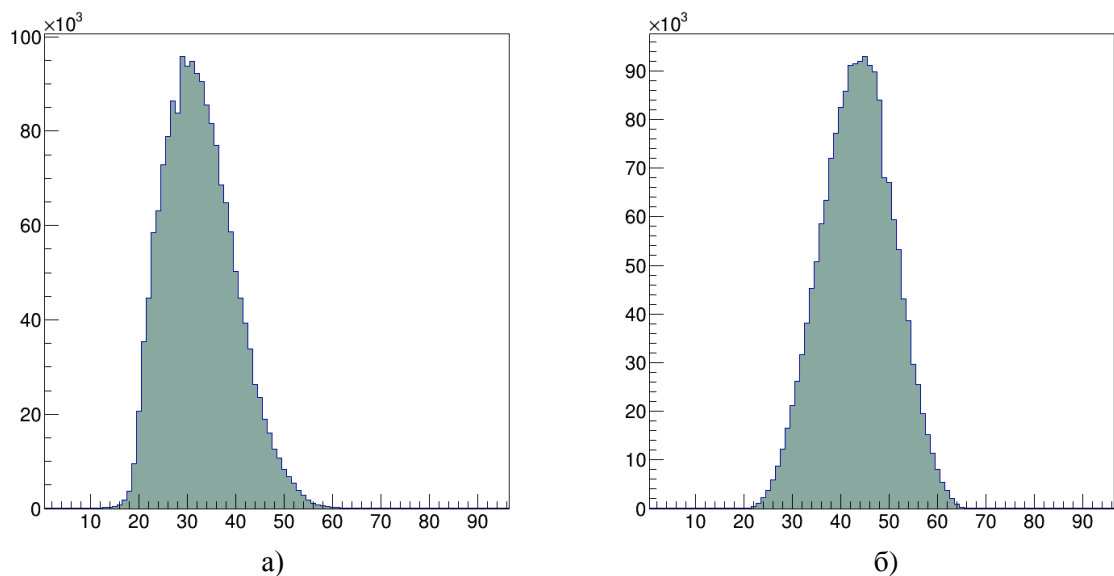


Рис. 6. Профили пучка - статистика числа событий в каналах годоскопа: а) по координате X;
 б) по координате Y.

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

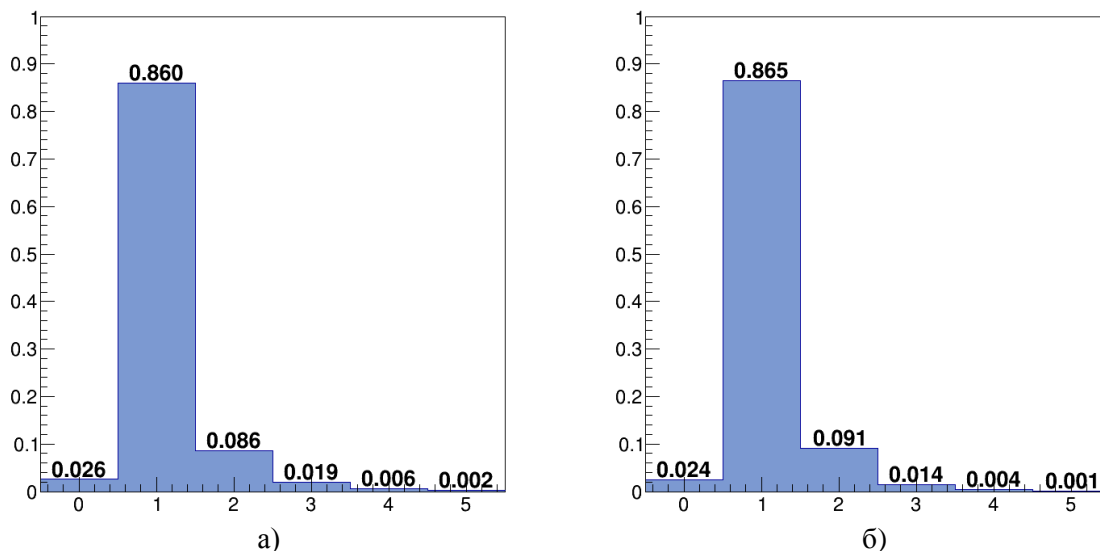


Рис. 7. Нормированные распределения множественности: а) - по координате X ,б) - по координате Y.

Практическое применение детектора проиллюстрировано на Рис. 8. На нём показан 3D-плот, где приведено распределение частиц в центре протяжённого образца мишени диаметром 20 мм, вычисленное по данным от трёх 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.

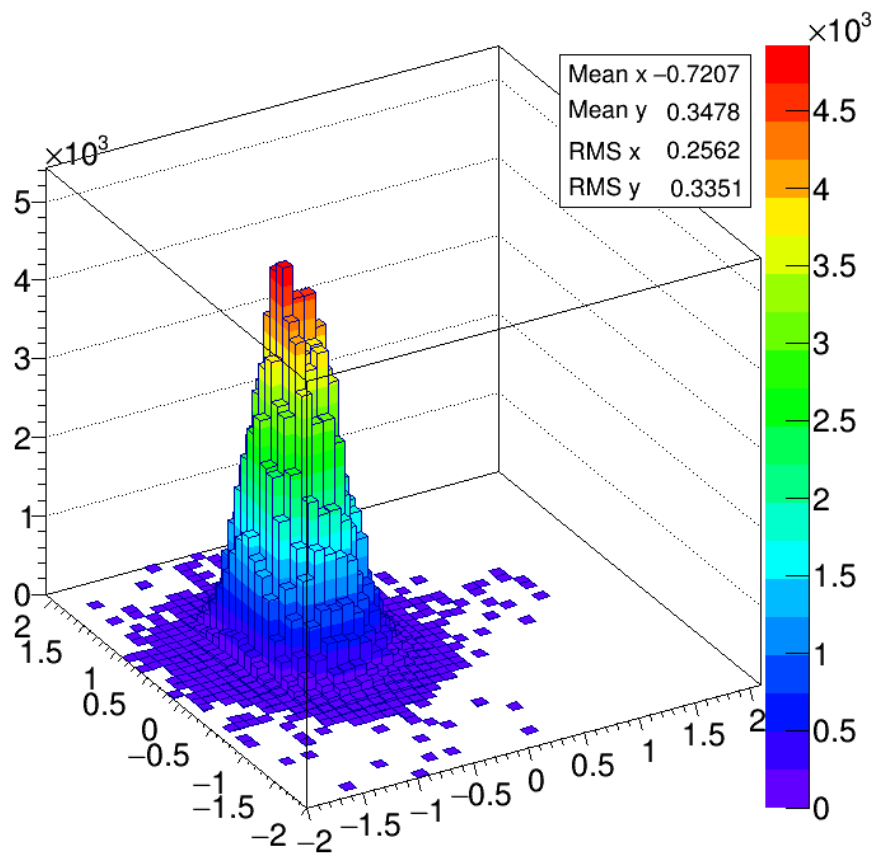


Рис. 8. Координаты частиц в центре мишени, вычисленные по данным системы из трёх годоскопов. Шкалы горизонтальных осей приведены в сантиметрах.

Заключение

Представленный в настоящей работе сцинтилляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ имеет координатное разрешение лучше 500 микрон. Эффективность каждой из плоскостей годоскопа составляет $\sim 97,5\%$. Находясь в непосредственной близости к поляризованной мишени и имея отличное координатное разрешение, он является решающим детектором для мониторинга прецизионного наведения пучка частиц в канале на центр поляризованной мишени. В течение ряда сеансов работы на пучке этот годоскоп показал высокую надёжность 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.

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] В.В. Абрамов и др., Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ, Препринт ИФВЭ 2019-12, 2019, Протвино, 144 стр.
- [2] В.Д. Апокин и др., Установка ПРОЗА-М для исследования односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на ускорительном комплексе ИФВЭ – ПТЭ, №4, 1998, стр.23.
- [3] V. Agoritsas et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 44 (1995) 323.
- [4] B. Adeva et al., Nucl. Instrum. And Meth. A 515 (2003) 467.
- [5] S. Horicawa et al., Nucl. Instrum. And Meth. A 516 (2004) 34.
- [6] <https://www.kuraray.com>
- [7] <https://www.hamamatsu.com>
- [8] С.И. Букреева и др., Электронная система «ЕвроМИСС» для физических установок ИФВЭ – ПТЭ, № 6, 2014, стр. 23.
- [9] <https://www.caen.it>

Рукопись поступила 14 сентября 2022 г.

А.В. Рязанцев и др.

Сцинтилляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	26.09.2022	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1.	Уч.– изд.л. 1,2.	Тираж 60.	Заказ 6.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2022-6,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2022
