

СТРОУ-КАМЕРЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА NA64

*В. Ю. Волков^а, П. В. Волков^б, Т. Л. Еник^б,
Г. Д. Кекелидзе^{б, 1}, В. А. Крамаренко^б, В. М. Лысан^б, Д. В. Пешехонов^б,
А. А. Солин^б, А. В. Солин^б*

^а Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

¹ Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского
государственного университета, Минск

Целью настоящей работы является описание характеристик и свойств созданных в ОИЯИ по технологии склеенных строу-трубок трековых детекторов для эксперимента NA64 на выведенном пучке электронов SPS (ЦЕРН), физической задачей которого является поиск проявлений темного сектора и темной материи.

The aim of this work is to describe the properties of tracking detectors created at JINR on the technology of glued straw tubes for the experiment NA64 on the extracted electron beam of the CERN SPS. The physical task of the experiment is to search the phenomenon of the dark sector and dark matter.

PACS: 07.07.Df

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время есть серьезные основания предполагать, что Стандартная модель (СМ) не является полной и что в природе есть частицы, не описываемые в ее рамках. Причиной являются астрономические наблюдения, исходя из которых мы достоверно знаем, что известная нам материя составляет лишь несколько процентов от общей массы вещества во Вселенной. Недостающая масса объясняется двумя источниками: присутствием неизвестной нам формы энергии, получившей название темной энергии, природа которой на сегодня является загадкой, и неизвестными нейтральными частицами, которые ответственны за массу, примерно в 5 раз большую приходящейся на обычное вещество. Эти частицы и образуют то, что называется темной материей, про них достоверно известно лишь то, что они взаимодействуют с обычным веществом крайне слабо, посредством гравитации, что существенно затрудняет их обнаружение.

Основными кандидатами темной материи являются так называемые WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) — массивные частицы, в десятки раз тяжелее протона, участвующие в гравитационном и слабом взаимодействиях. Эксперименты по их регистрации,

¹E-mail: kgd@jinr.ru

как правило, проводятся в подземных лабораториях в условиях максимального подавления фона с помощью сверхчувствительных, работающих, как правило, при низких температурах детекторов. Непрямой способ обнаружения WIMP не менее популярен и заключается в поиске и регистрации нейтрино высоких энергий, которые должны образовываться при аннигиляции WIMP в Солнце. Это одна из задач нейтринных детекторов IceCube на Южном полюсе и Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

В последние годы получили развитие модели, которые предполагают, что темная материя является частью так называемого скрытого сектора, который согласно, например, нобелевскому лауреату Ф. Вилчеку представляет собой совокупность частиц и полей, которые являются синглетами относительно калибровочной группы SM и могут взаимодействовать с нашей материей через определенные порталы. Большую популярность в последнее время приобрели модели, мотивирующие существование векторного портала, т.е. новой векторной частицы, обычно называемой скрытым или темным фотоном, переносящей взаимодействие между обычной и темной материей. Открытие нового дополнительного к гравитации взаимодействия с темной материей безусловно было бы революционным событием в космологии и физике частиц. Замечательным фактом также является то, что расширенная SM, включающая в себя эти новые частицы и взаимодействия, по-прежнему остается перенормируемой, а область масс темного фотона и констант связи с легкой темной материей доступны для поисков на современных ускорителях. Темный фотон, в отличие от частиц темной материи, является нестабильной частицей, которая в зависимости от ее массы может распадаться на более легкие частицы SM (например, e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ -пары) или частицы темной материи. В последнем случае поиск таких частиц весьма затруднителен, так как распад является невидимым.

Эксперимент NA64, основной задачей которого является поиск частиц скрытого сектора во взаимодействиях электронов, мюонов или адронов высокой энергии с активной мишенью, был предложен в ЦЕРН в 2014 г. В 2016 г., после серии тестов, подтвердивших методику измерений, он был утвержден. Экспериментальная установка NA64, предназначенная для проведения исследований на электронном пучке высокой энергии, представляет собой полностью герметичный детектор. Идея измерения основана на полном поглощении энергии сбрасываемого на активную мишень установки пучка (active beam dump) и использовании техники поиска и регистрации событий с недостающей энергией (missing energy technique), которые и являются кандидатами на искомый сигнал частиц темной материи.

Цель реализуемой в настоящее время экспериментальной программы состоит в поиске темного фотона (A') с массой $m_{A'} \leq 1$ ГэВ, который может родиться в реакции $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$ при рассеянии электронов высокой энергии на ядрах (A, Z). Далее темный фотон может распасться на e^+e^- -пару (так называемую видимую моду) либо на пару более легких частиц темной материи χ (невидимую моду). Вероятность этого процесса оценивается как $\leq 10^{-12}$. Проведение измерений на таком высоком уровне чувствительности требует использования высокоинтенсивного пучка и максимально возможного уменьшения фона. Работы, проведенные ЦЕРН по оптимизации канала H4, позволили довести интенсивность пучка электронов до $\sim 10^7$ на сброс длительностью 4,8 с при менее 1% примеси других заряженных частиц. Энергия электронов пучка H4 может настраиваться от 100 до 300 ГэВ. Схема установки для регистрации рождения темного фотона в невидимой моде показана на рис. 1.

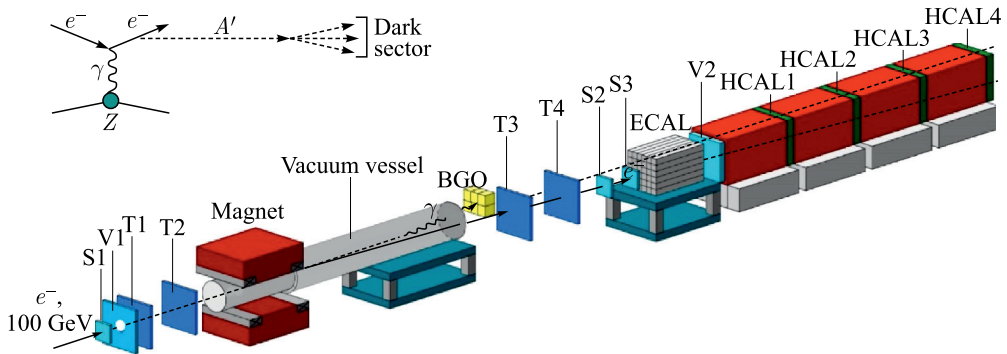


Рис. 1. Схема расположения детекторов на пучке электронов N4 с энергией 100 ГэВ. Сцинтилляционные счетчики S1–S3 и veto-счетчики V1 и V2 формируют триггер. Детекторы регистрации и мечения электронов — координатные станции T1–T4 (MM, GEM, строу) + магнит (1,5 Тл) и детектор синхротронного излучения, который состоит из 8 кристаллов BGO. Вакуумный объем — труба длиной 15 м, установленная для предотвращения поглощения мягкой компоненты синхротронного излучения. Калориметры ECAL и HCAL (fully hermetic) служат для измерения поглощенной энергии и идентификации электронов и адронов

Несмотря на то, что в экспериментах, проводимых ЦЕРН на выведенных пучках, постоянно ведется работа по улучшению оптики каналов транспортировки для обеспечения чистоты вторичных пучков, полностью обеспечить отсутствие примеси других частиц невозможно. Эксперимент NA64 использует пучок электронов с энергией 100 ГэВ, при этом, учитывая вероятность появления искомого сигнала процесса рождения темного фотона, необходимо максимально подавить возможную примесь мюонов и адронов, которые могут его имитировать. При такой энергии стандартная техника отделения электронов от тяжелых заряженных частиц, основанная на детектировании черенковского излучения, не эффективна [8]. Вместо нее было предложено использовать детектирование синхротронного излучения электронов в сильном магнитном поле (мечение) с помощью детектора на основе BGO-кристаллов (SR), расположенного за отклоняющим пучок дипольным магнитом (рис. 2). В этом случае адронная и мюонная примеси исключаются, поскольку энергия излученного фотона обратно пропорциональна массе заряженной частицы в четвертой степени. Электроны низкой энергии, которые могут родиться в пучке из-за распадов примесных мюонов $\mu \rightarrow e\nu\nu$ и пионов $\pi \rightarrow e\nu$, также эффективно исключаются, поскольку энергия синхротронного фотона связана с энергией излучающего электрона соотношением $(\hbar\omega)_\gamma \propto E^3$. Использование этой техники позволило подавить фон, связанный с примесью адронной компоненты в пучке на четыре порядка. Однако, поскольку спектр энергетического распределения синхротронных фотонов достаточно

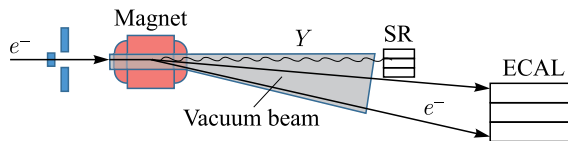


Рис. 2. Метод мечения электронов с использованием синхротронного излучения

широкий, эффективность выделения электронов с энергией 50 ГэВ и выше, которые могут возникать в пучке из-за его взаимодействия с остаточным газом и элементами канала транспортировки, невысока. Это обстоятельство накладывает дополнительные требования на характеристики детекторов, используемых для восстановления треков электронов пучка.

В эксперименте NA64 используются детекторы нескольких типов, обладающих высоким пространственным и временным разрешением: Micromegas (MM), GEM и Straw Tubes (ST).

В качестве мишени используется электромагнитный калориметр ECAL длиной 40 радиационных длин (X_0). Он предназначен для полного поглощения и измерения энергии налетающего электрона. За ним расположен полностью герметичный адронный калориметр HCAL, состоящий из четырех модулей, суммарно составляющих 30 ядерных длин, задачей которого является детектирование энергии мюонов и вторичных адронов, родившихся при взаимодействии электрона с веществом мишени.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР ТИПА ШАШЛЫК

Структура и характеристики электромагнитного калориметра:

— сборка 6×6 ячеек в поперечном направлении, каждая размерами $38,2 \times 38,2 \times 450$ мм;

— ячейка состоит из 150 сэндвич-слоев, каждый сэндвич-слой состоит из свинцовой пластины толщиной 1,5 мм и сцинтилляционной пластины такой же толщины;

— полная длина калориметра составляет 40 радиационных длин (X_0), сэндвич-слои сгруппированы по пучку на две секции: 5 (X_0) (preshower) и 35 (X_0);

— энергетическое разрешение $\Delta E/E \simeq 15\%/\sqrt{E}$;

— подавление адронов $e/\pi \cdot 10^{-3}$ при 100 ГэВ.

Временная и энергетическая информация с каждого модуля оцифровывается для каждого зарегистрированного события. Разделение на две части — предварительную (preshower) и калориметрическую — позволяет получать дополнительную информацию о профиле электромагнитного ливня в продольном и поперечном направлениях, а также улучшить коэффициент подавления адронов на порядок.

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР HCAL

Адронный калориметр HCAL состоит из четырех модулей. Каждый модуль адронного калориметра представляет собой матрицу 3×3 ячейки. Ячейка — это сэндвич из чередующихся слоев железа и сцинтилляционных пластин толщиной 25 и 4 мм соответственно с поперечными размерами 20×20 см. Каждая ячейка состоит из 48 таких слоев и имеет общую толщину $\simeq 7\lambda_{\text{int}}$. Свет от сцинтилляционных пластин в ячейке собирается на фотоумножитель посредством световодов из WLS-волокна.

Экспериментально измеренное энергетическое разрешение в зависимости от энергии пучка в диапазоне ниже 100 ГэВ задается соотношением $\sigma E/E = 0,60/\sqrt{E} + 0,037$. Количество фотоэлектронов, производимых мюонами с энергией ~ 100 ГэВ в калориметре, составляет $\simeq 150-200$. Ширина мюонного пика $\text{RMS} \simeq 25$ фотоэлектронов соответствует выделенной в HCAL энергии $\simeq 8$ ГэВ. Это сравнимо с эффективным порогом

регистрации для сигнала нулевой энергии $\simeq 0,3$ ГэВ, или около 30 фотоэлектронов. Таким образом, вероятность имитации сигнала из-за шумовых флуктуаций фотоэлектронов незначительна для события с выделением энергии в HСAL в районе MIP.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРОВ УСТАНОВКИ

Электромагнитный калориметр ECAL + preshower:

- конструкция модуля: (1,5 мм Pb + 1,5 мм Sc) \times 150 слоев;
- назначение: измерение энергии, измерение профиля ливня, e/π -разделение;
- энергетическое разрешение $\Delta E/E \simeq 0,18/\sqrt{E}$, пространственное разрешение $\simeq 3$ мм, $e/\pi \cdot 10^{-3}$;
- скорость счета до 10^6 электронов за цикл работы ускорителя.

Адронный калориметр HСAL, 4 модуля:

- конструкция модуля: (25 мм Fe + 4 мм Sc) \times 48 слоев;
- назначение: регистрация энергии;
- энергетическое разрешение $\Delta E/E \simeq 0,62/\sqrt{E}$, π -герметичность $\simeq 10^{-9}$;
- скорость счета до 10^5 π -пионов за цикл работы ускорителя.

Сцинтилляционные счетчики S1, S2 и годоскопы H1, H2:

- счетчики толщиной 1 мм, годоскопы — 1 мм;
- назначение: регистрация пар e^-e^+ , реконструкция треков и временная привязка триггера T0;
- пространственное разрешение $\simeq 1$ мм, пространственное разрешение двух треков 1 мм;
- скорость счета до 10^6 π -пионов за цикл работы ускорителя.

Вето-счетчики:

- конструкция: пластиковый сцинтиллятор $5 \times 60 \times 60$ см;
- назначение: регистрация заряженных частиц низкой энергии;
- неэффективность регистрации MIP (минимально ионизирующей частицы) 10^{-4} ;
- скорость счета до 10^5 π -пионов за цикл работы ускорителя.

Детектор синхротронного излучения:

- конструкция: 8 кристаллов BGO гексагональной формы 60 мм, толщиной 200 мм;
- назначение: измерение энергии гамма-квантов в диапазоне 1–30 МэВ;
- энергетическое разрешение $\Delta E/E \simeq 3\%$ для 1 МэВ, временное разрешение $\simeq 2$ нс;
- скорость счета до 10^6 γ -квантов за цикл работы ускорителя.

Вакуумный распадный объем:

- конструкция: диаметр $\simeq 30$ см, длина 15 м, вакуум 10^{-5} Торр;
- назначение: минимизировать взаимодействия вторичных частиц.

Micromegas, 4 камеры:

- диаметр рабочей зоны 80 мм;
- назначение: реконструкция треков;
- разрешение по импульсу при 100 ГэВ — $\Delta P/P \simeq 2\%$;
- скорость счета до 10^5 π -пионов за цикл работы ускорителя.

Строу-детекторы, 4 камеры:

- размер рабочей зоны 200×200 мм, диаметр дрейфовых трубок 6 и 2 мм;
- назначение: реконструкция треков;
- разрешение по импульсу при 100 ГэВ — $\Delta P/P \approx 2\%$;
- скорость счета до 10^6 π -пионов за цикл работы ускорителя.

СОЗДАНИЕ СТРОУ-КАМЕР ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЭКСПЕРИМЕНТА NA64

Для проведения эксперимента по поиску темной материи на электронном пучке были разработаны и изготовлены два вида двухслойных строу-камер с рабочей зоной 20×20 см.

1) Строу-камеры с внутренним диаметром трубок, равным 6,02, с допуском $(-0 + 0,025)$ мм и толщиной стенки 62 мкм, которые были намотаны из двух каптоновых лент. Внутренняя лента — из каптона типа XC160 с резистивностью 370 Ом/квadrat и толщиной 40 мкм. Наружная лента — из каптона типа 100HN толщиной 12,5 мкм с алюминизацией внутренней поверхности толщиной 500 Å. В качестве анода используется позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм.

2) Строу-камеры с внутренним диаметром трубок 2 мм, с допуском $(-0 + 0,025)$ мм. Толщина стенки 67 мкм. Стенки строу намотаны из двух слоев каптона толщиной 25 мкм. На внутренний слой нанесен слой алюминия толщиной 200 нм, а затем защитный слой графитополиуретановой смеси толщиной 6 мкм. Он имеет резистивность 370 Ом/квadrat. Внешний слой состоит из каптона с нанесенным на него слоем меди толщиной 100 нм. Анодом служит позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 20 мкм.

Каждая двухслойная камера содержит две отдельные строу-плоскости трубок, склеенных между собой, со сдвигом на половину диаметра трубки.

С целью обеспечения более равномерной подачи газа, а также уменьшения количества вещества была разработана система подачи газа в рабочий объем камеры, основанная

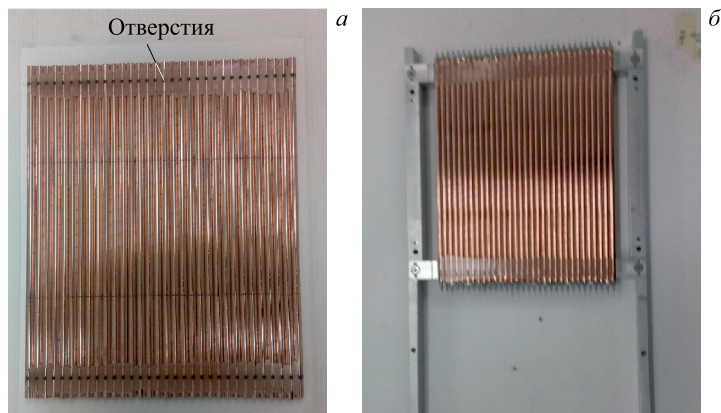


Рис. 3. а) Строу-плоскость с прорезанными отверстиями для ввода газа; б) строу-плоскость, вклеенная в раму

на вводе газа через боковые стенки строу. В каждую плоскость строу газ подается независимо. Для этого в склеенной заранее плоскости, состоящей из строу, лазерным лучом были прорезаны отверстия в каждой строу с обоих концов (рис. 3, а).

К каждому собранному слою строу в районе прорезанных отверстий герметично приклеивается рама камеры, в которой имеется паз для подачи газовой смеси. Каждая плоскость строу вклеивается в алюминиевые элементы рамы камеры, как показано на рис. 3, б, а затем две плоскости соединяются в одну двухслойную камеру со сдвигом плоскостей относительно друг друга на величину радиуса строу.

После сборки плоскостей внутрь строу устанавливаются анодные проволочки, концы которых крепятся в капиллярных трубках, закрепленных пластиковыми концевыми втулками. Анодные проволочки должны быть натянуты для уменьшения гравитационного и электростатического смещения от оси строу. Натяжение проволочек контролируется в процессе сборки. Распределение величины натяжения анодных проволочек приведено на рис. 4 для двух камер с диаметром строу, равным 6 мм.

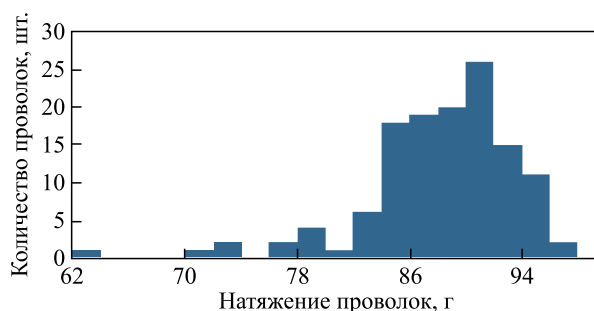


Рис. 4. Натяжение анодных проволочек

Собранные камеры проверялись на герметичность и отсутствие электрических пробоев и утечек. Утечки газовой смеси не превышают $0,5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Электрические утечки определяются в основном платой считывания и не превышают 10–40 нА на камеру.

СЧИТЫВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА КАМЕР (FRONTEND)

Считывание информации с 2-мм камер производится с каждой плоскости независимо через платы считывания информации, содержащие 96 каналов каждая.

Считывание информации с 6-мм камер происходит в шахматном порядке с обеих плоскостей строу через одну плату, содержащую 64 канала.

Каждая из плат считывания содержит одинаковые группы считывания информации с 32 каналов, 3 группы для 2-мм строу и 2 группы для строу диаметром 6 мм. Принципиальная схема группы приведена на рис. 5.

Платы считывания предназначены как для считывания информации со строу, так и для подачи на аноды строу высокого напряжения. Платы изготовлены по многослойной технологии. Информация с камер поступает на 32-канальные усилители-формирователи и 64-канальные время-цифровые преобразователи TDC, смонтированные непосредственно

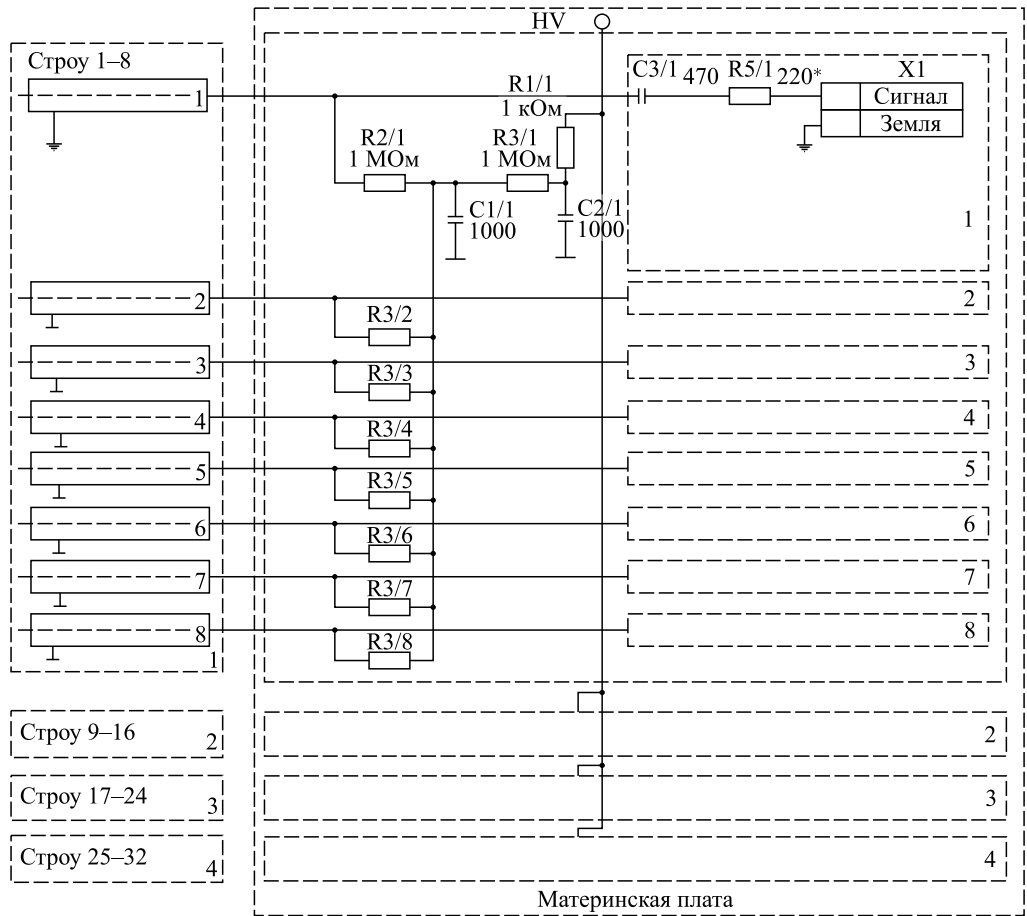


Рис. 5. Схема платы считывания информации с группы в 32 канала

на рамках камер. Далее цифровая информация по оптическим линиям связи мультиплексируется и поступает на систему сбора данных.

ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДУСИЛИТЕЛИ-ФОРМИРОВАТЕЛИ

32-канальные зарядочувствительные предусилители-формирователи разработаны для строу-камер на базе интегральных микросхем AST-1-1 в Институте ядерных проблем Белорусского государственного университета (НИИ ЯП БГУ, Минск). Они имеют следующие параметры: входное сопротивление 50–560 Ом, диапазон регулировки порога срабатывания 1–23 фКл, длительность выходных сигналов LVDS — 70 нс, задержка выходного сигнала — 6 нс, напряжение питания 2,5–3,3 В. Параметры усилителей оптимизируются с учетом характеристик конкретных камер и настраиваются с помощью дополнительных резисторов.

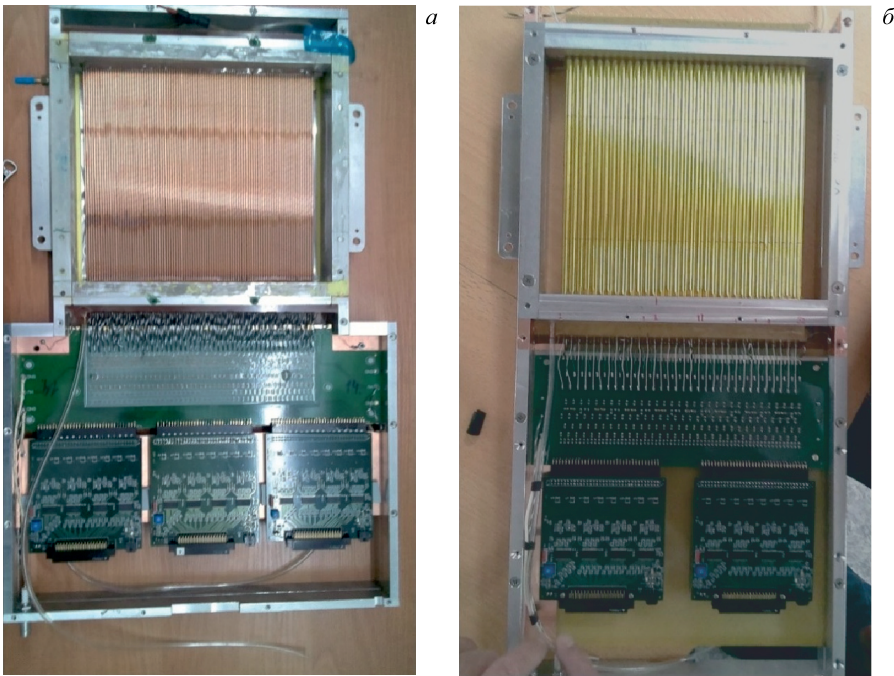


Рис. 6. Собранные камеры с усилителями: а) строу-камера диаметром 2 мм; б) строу-камера диаметром 6 мм

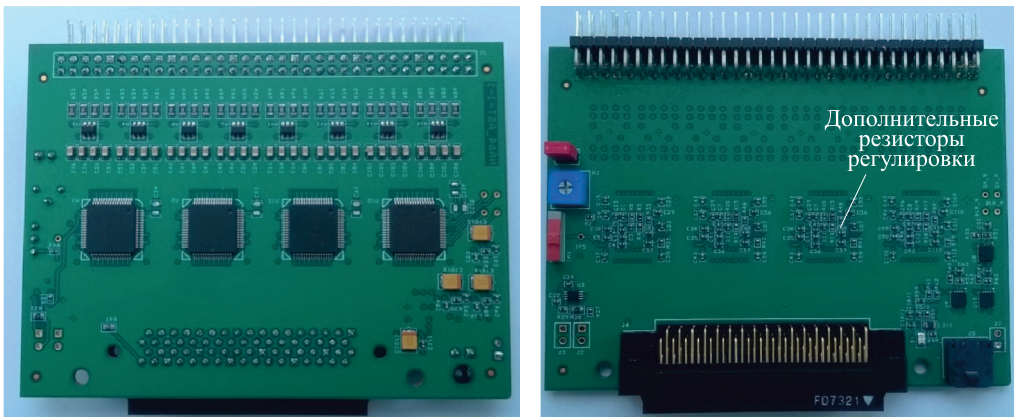


Рис. 7. Внешний вид усилителей-формирователей

Внешний вид собранных камер без время-цифровых преобразователей представлен на рис. 6. Блок-схема и внешний вид плат усилителей приведен на рис. 7 и 8.

На рис. 9 представлены осциллограммы выходного сигнала, иллюстрирующие работу усилителя с большими нагрузками. Исследование проводилось с помощью сигналов генератора длительностью 20 нс и амплитудой 10 мВ, которые подавались на тестовый

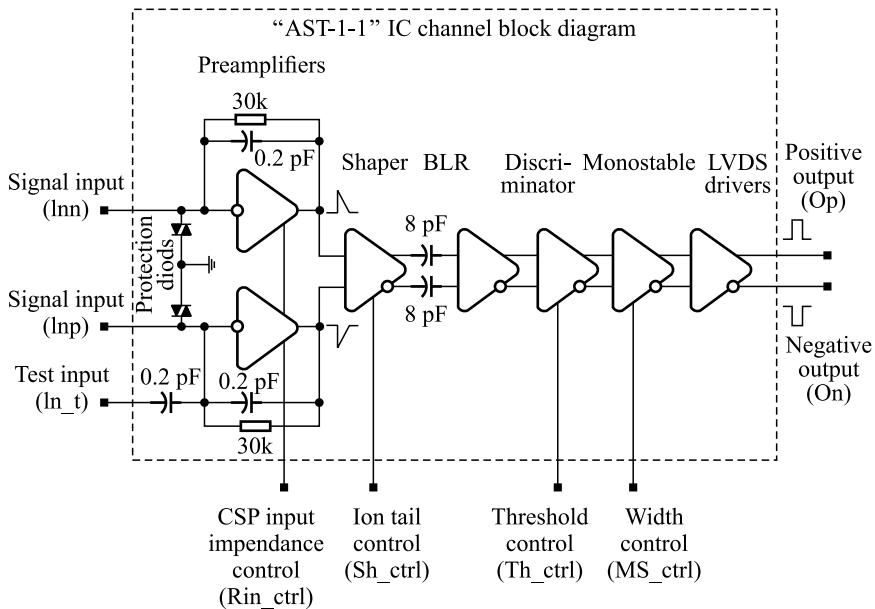


Рис. 8. Блок-схема усилителей

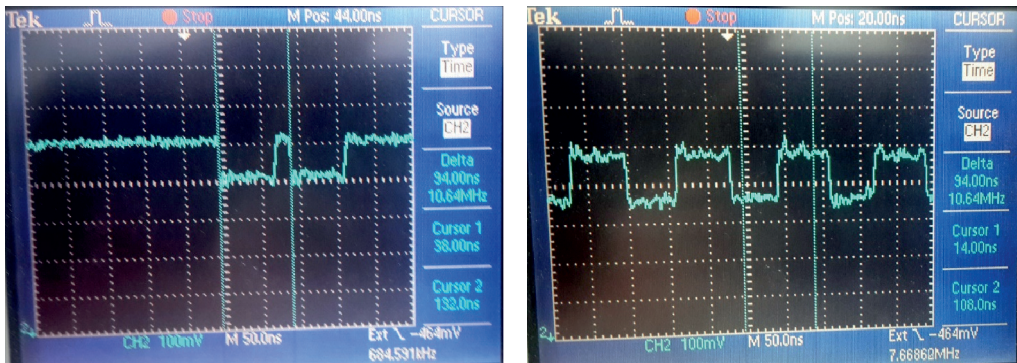


Рис. 9. Выходной сигнал с усилителя при больших нагрузках

вход через 10 кОм на все 32 канала усилителя. При установке длительности выходного сигнала LVDS 60 нс и величине порога 100 мВ усилитель позволяет работать с нагрузками 10 МГц.

На картах усилителя предусмотрена возможность отключения схемы формирования длительности сигнала LVDS. В этом случае возникает зависимость длительности выходного сигнала от амплитуды сигнала детектора. Зависимость длительности сигнала с отключенным формированием от анодного напряжения на детекторе представлена на рис. 10. Для режима строу-детектора диаметром 6 мм с газовой смесью 20% CO₂ при повышении высокого напряжения выше 1540 В наблюдается двойное сигнала усилителя.

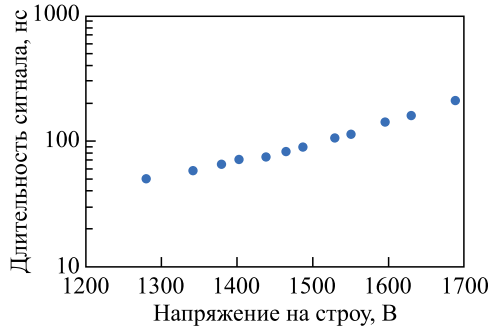


Рис. 10. Зависимость длительности сигнала усилителя от анодного напряжения

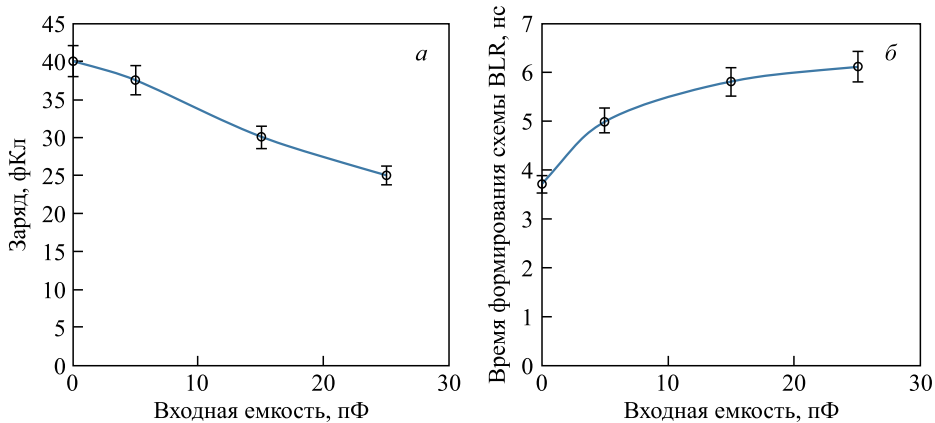


Рис. 11. Зависимость коэффициента преобразования (а) и времени формирования схемы BLR (б) от входной емкости детектора

Усилители имеют схему компенсации ионной компоненты сигнала BLR. На рис. 11 показаны зависимости коэффициента преобразования и времени формирования схемы BLR от входной емкости детектора при напряжении питания микросхемы 3,3 В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ 2-ММ СТРОУ-КАМЕР НА РАДИОАКТИВНОМ ИСТОЧНИКЕ

Измеренные характеристики камер с дрейфовыми трубками диаметром 2 мм показаны на рис. 12 и 13. Амплитудные характеристики получены с помощью радиоактивного источника ^{55}Fe . Испытания в режиме измерения времени дрейфа проводились с радиоактивным источником ^{106}Ru . Измерения амплитудных и дрейфовых спектров показали принципиальную работоспособность детектора в диапазоне давлений до 3 абс. атм. Полное время дрейфа находится в пределах (26 ± 4) нс и его RMS $(5 \pm 0,3)$ нс.

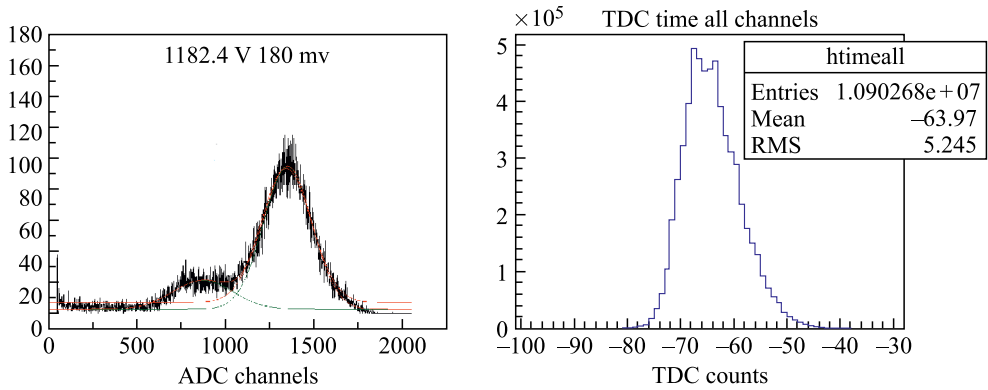


Рис. 12. Амплитудный и временной спектры в детекторе с трубками диаметром 2 мм. Дрейфовый спектр получен в следующих условиях: давление в трубках 3 абс. атм., газовая смесь Ag/CO₂ 80/20 %, высокое напряжение на детекторе 1800 В

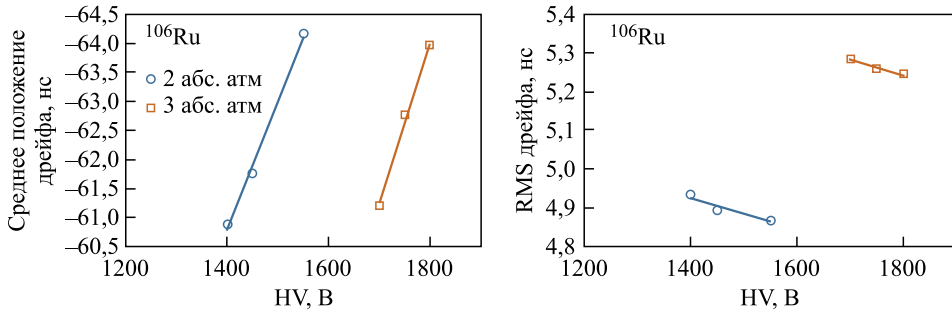


Рис. 13. Изменение скорости дрейфа в 2-мм строу-детекторе в зависимости от давления

ТЕСТЫ СТРОУ-КАМЕР С ТРУБКАМИ ДИАМЕТРОМ 6 ММ НА ПУЧКЕ ЭЛЕКТРОНОВ H4 В ЦЕРН

В ходе сеансов на электронном пучке канала SPS были исследованы характеристики строу-камер с трубками диаметром 6 мм. Камеры располагались на пучке до и после магнита и включались в реконструкцию треков и анализ фона в невидимой моде эксперимента. На рис. 14 показан общий вид камер, установленных на пучке.

На рис. 15 и 16 представлены профиль пучка и распределение времени дрейфа, измеренные в условиях большой интенсивности пучка электронов $4,5 \cdot 10^6$ (e^-) за сброс (4,8 с).

Оценивалась эффективность регистрации треков плоскостями строу по нулевым отсчетам в кластерной диаграмме, а также по соотношению двойных $N(c12)$ и одиночных $N(c11)$ кластеров. Использовалась информация во время настройки аппаратуры на пучке электронов SPS (ЦЕРН) без реконструкции треков. Все камеры собраны компактно на

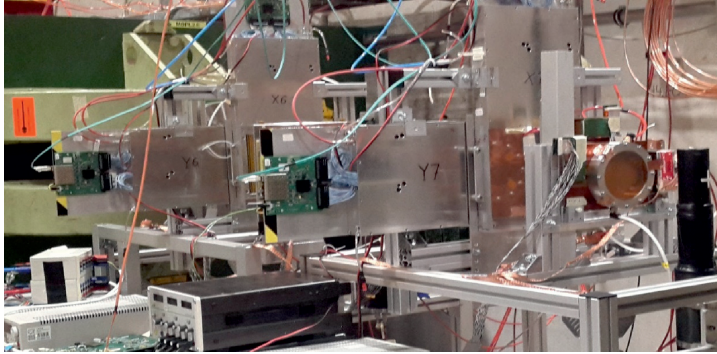


Рис. 14. Камеры на канале H4 ускорителя SPS (ЦЕРН)

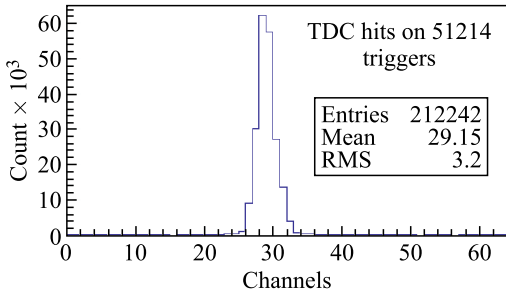


Рис. 15. Профиль пучка электронов 100 ГэВ

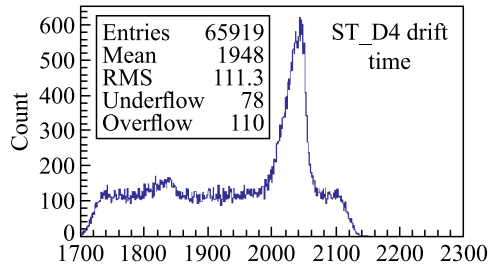


Рис. 16. Распределение времени дрейфа

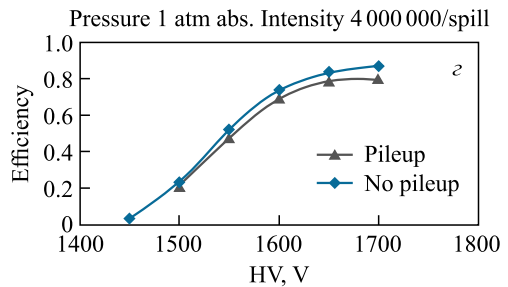
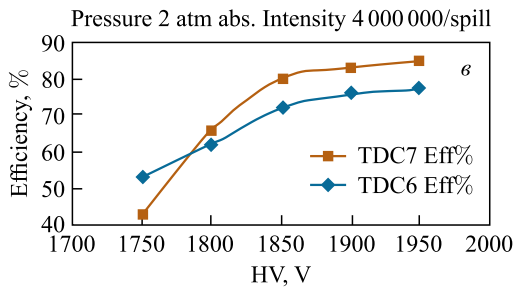
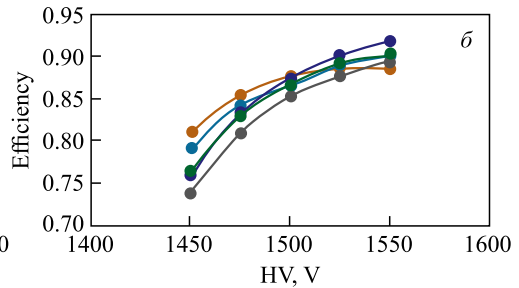
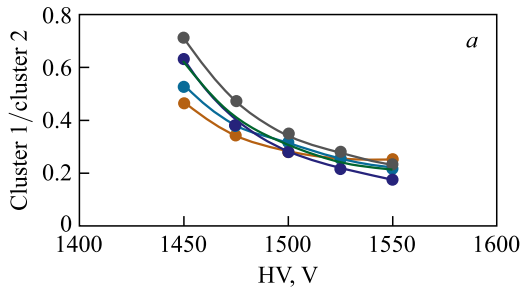


Рис. 17. Оценка эффективности регистрации строу-камер по кластерам во время настройки на пучке электронов: *а, б*) по четырем камерам; *в, з*) при повышенном давлении газа в камерах

подставке для настройки Run 3610–3669. Эффективность (рис. 17) оценивалась по формуле

$$\varepsilon = \frac{2 \frac{N(\text{cl2})}{N(\text{cl1})}}{1 + 2 \frac{N(\text{cl2})}{N(\text{cl1})}}.$$

КЛАСТЕРЫ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТРОУ-КАМЕРЫ

На основе набранной экспериментальной статистики была проведена реконструкция треков пучка электронов совместно с камерами Micromegas. Выделялся трек, реконструированный детекторами Micromegas в центре пучка. Был проведен анализ распределения кластеров срабатываний в соседних строу-трубках. Кластером считается событие, в котором имеется срабатывание в любых трех соседних строу-трубках (рис. 18).

- CL1 (1600 событий) — это срабатывание только в 37-й строу-трубке, т.е. трек прошел между 36-й и 38-й строу-трубками, в щель между ними. Эффективный размер щели в слое строу (неэффективность слоя): $(\text{CL1} \cdot 2) / \text{CL2} = 1600 \cdot 2 / 29\,100 \rightarrow 11\%$. В геометрических размерах: $6 \text{ мм} \cdot 0,11 = 0,66 \text{ мм}$.

- CL2 (29 100 событий) — это срабатывание в 37-й строу-трубке и рядом, т.е. трек прошел через оба слоя. Сработали трубки 36 + 37 или 37 + 38. Эффективность камеры: $(\text{CL2} + 2 \cdot \text{CL1}) / \text{Entry} = (29\,100 + 2 \cdot 1600) / 33\,196 \rightarrow 97,3\%$.

- CL3 (2400 событий) — это сработали 37-я, 36-я и 38-я трубки одновременно. Таких событий $2400 / 33\,196 \rightarrow 7,2\%$. Можно предположить, что эти события идут от взаимодействий частиц пучка в канале, от перекрестных наводок в каналах регистрации и от частиц пучка с интенсивностью $1\,000\,000 \text{ с}^{-1}$, которые могут попасть в 100-нс интервал ворот ТДС. Вероятность таких событий $w \sim n \cdot \Delta t = 10^6 \cdot 10^{-7} = 0,1$.

Была получена предварительная $r-t$ -зависимость для 6-мм строу, работающих на газовой смеси с 20%-м содержанием CO_2 (рис. 19). Анализ $r-t$ -зависимости показал удовлетворительную работу всех систем регистрации строу-камер. Произведена оценка

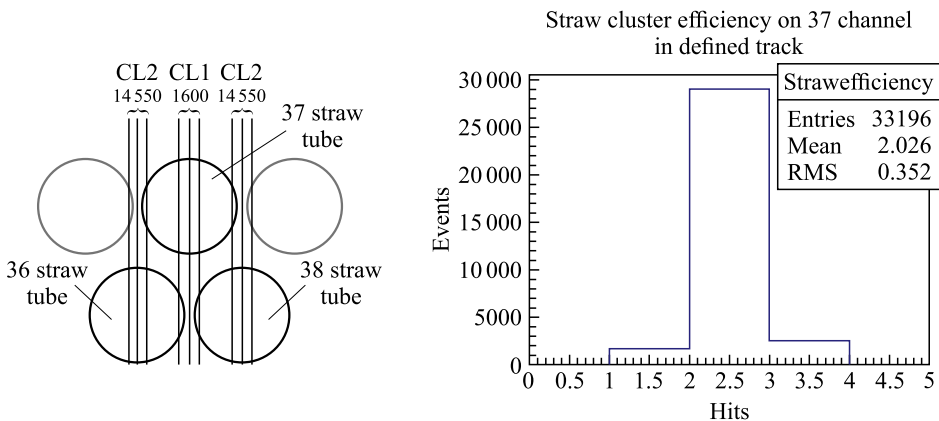


Рис. 18. Кластерный анализ

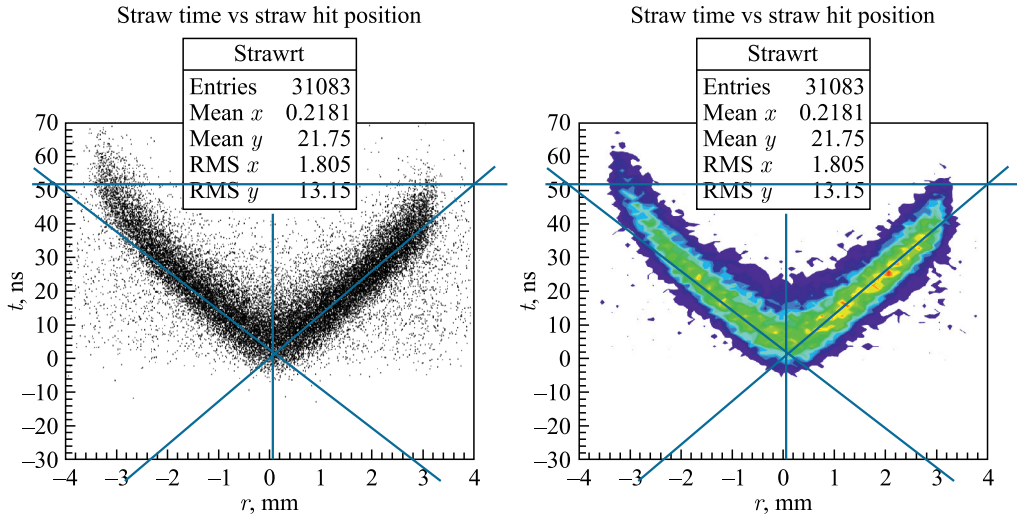


Рис. 19. r - t -зависимость строу, полученная по реконструкции треков с помощью детекторов Micromegas

скорости дрейфа для этой газовой смеси, которая равна $(14,5 \pm 0,5)$ нс/мм. Также оценена координатная точность строу-трубок, которая составила ~ 250 мкм. Следует отметить, что реконструкция проводилась с использованием информации, полученной с детекторов Micromegas, которые имеют собственное координатное разрешение на уровне 200–250 мкм и находились от строу-камеры на расстоянии около 18 м, поэтому эти результаты носят предварительный характер. Для их уточнения потребуется более точное измерение расположения детекторов (Alignment), а также понижение порогов усилителей и уменьшение шумов электроники строу-камер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строу-камеры разрабатывались и создавались в 2015–2017 гг. В сентябре 2017 г. получены первые результаты работы строу-камер на пучке в составе аппаратуры эксперимента NA64. В течение последующих двух лет были проведены эксперименты на пучке электронов по исследованию рождения темного фотона в невидимой моде. В течение этого времени успешно выполнены работы по интеграции информации со строу-камер в общую систему сбора данных установки.

Строу-камеры имеют существенное преимущество перед другими трековыми детекторами, Micromegas, GEM и сцинтилляционными счетчиками, расположенными на линии пучка, поскольку содержат малое количество вещества, способны выдерживать достаточно высокие загрузки и имеют большие размеры.

Благодаря широкому акцептансу часть строу-камер была установлена в непосредственной близости от электромагнитного калориметра. В этом случае строу-камеры регистрировали не только пучковый трек, но и треки от фоновых взаимодействий, характеризующиеся большой множественностью частиц. Высокое пространственное, временное разрешение и большой акцептанс строу-камер позволили эффективно выделять фоно-

вые треки от взаимодействий, происходящих в веществе Micromegas и в вакуумной зоне между магнитом и электромагнитным калориметром.

Информация со строу-камер оказала существенное влияние на качество анализа, что позволило снизить уровень фона на два порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spergel D.N., Steinhardt P.J.* Observational Evidence for Self-Interacting Cold Dark Matter // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84, No. 17. P. 3760–3763.
2. *Bertone G., Hooper D., Silk J.* Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints // *Phys. Rep.* 2005. V. 405, No. 5–6. P. 279–390.
3. *Bergström L.* Non-Baryonic Dark Matter: Observational Evidence and Detection Methods // *Reports on Progress in Physics.* 2000. V. 63, No. 5. P. 793–841.
4. *Gninenko S.N.* Search for MeV Dark Photons in a Light-Shining-through-Walls Experiment at CERN // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 075008.
5. *Andreas S., Donskov S.V., Crivelli P., Gardikiotis A., Gninenko S.N., Golubev N.A., Guber F.F., Ivashkin A.P., Kirsanov M.M., Krasnikov N.V., Matveev V.A., Mikhailov Yu.V., Musienko Yu.V., Polyakov V.A., Ringwald A., Rubbia A., Samoylenko V.D., Semertzidis Yu.K., Zioutas K.* Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS. arXiv:1312.3309 [hep-ex]. CERN-SPSC-2013-034/SPSC-P348. 2013.
6. *Shehtman L.* Private Communication. 2014.
7. *Пешихонов В.Д.* Координатные детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок // *ЭЧАЯ.* 2015. Т. 46, вып. 1. С. 167–218.
8. *Dermenev A.V.* On Detection of Narrow Angle e^+e^- Pairs from Dark Photon Decays // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2015. V. 62, No. 6. P. 3283–3287.
9. *Bodlak M., Frolov V., Jary V., Huber S., Konorov I., Levit D., Mann A., Novy J., Paul S., Virius M.* New Data Acquisition System for the COMPASS Experiment // *JINST.* 2013. V. 8. P. C02009.
10. *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.).* Search for Invisible Decays of Sub-GeV Dark Photons in Missing-Energy Events at the CERN SPS // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 011802.
11. *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.).* Search for Vector Mediator of Dark Matter Production in Invisible Decay Mode // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 97. P. 072002.
12. *Volkov V., Volkov P.* The Improvement of the Reconstruction of the Invisible Mode Data Sample 2018. NA64-NOTE-19-02-v1. 2019.
13. *Jaeckel J., Ringwald A.* The Low-Energy Frontier of Particle Physics // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2010. V. 60, No. 1. P. 405–437.
14. *Hewett J.L., Weerts H., Brock R. et al.* Fundamental Physics at the Intensity Frontier. arXiv:1205.2671 [hep-ex].
15. *Archilli F., Babusci D., Badoni D. et al.* Search for a Vector Gauge Boson in ϕ Meson Decays with the KLOE Detector // *Phys. Lett. B.* 2012. V. 706, No. 4–5. P. 251–255.
16. *Aubert B., Karyotakis Y., Lees J.P. et al.* Search for Dimuon Decays of a Light Scalar Boson in Radiative Transitions $Y \rightarrow \gamma A0$ // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103, No. 8. P. 081803–081807.
17. *Gninenko S.N.* Constraints on Dark Photons from π^0 Decays // *Phys. Rev. D.* 2013. V. 87, No. 3. P. 035030-035034.
18. *Agakishiev G., Balanda A., Belver D. et al.* Searching a Dark Photon with HADES // *Phys. Lett. B.* 2014. V. 731. P. 265–271.