

# Экспериментальная установка СТРЕЛА

## для изучения зарядово-обменных процессов

В. В. Глаголев,<sup>1</sup> Д. А. Кириллов,<sup>1</sup> Г. Мартинска,<sup>2,\*</sup>

Я. Мушински,<sup>1,3</sup> Н. М. Пискунов,<sup>1</sup> Й. Урбан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Объединенный институт ядерных исследований*

*Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

<sup>2</sup>*Университет им. П. Й. Шафарика*

*Словакия, 04154, Кошице, Шробарова 2*

<sup>3</sup>*Институт экспериментальной физики САН*

*Словакия, 04001, Кошице, Ватсонова 47*

Описывается экспериментальная установка СТРЕЛА, предназначенная для исследования зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных столкновениях в области энергий выше 1 ГэВ. Установка представляет одноплечевой магнитный спектрометр, основными элементами которого являются дрейфовые камеры. Было проведено тестовое облучение в пучке дейтронов импульса 3.5 ГэВ/с на ускорительном комплексе Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ. Разработаны и протестированы на реальных событиях алгоритмы для поиска и реконструкции треков в дрейфовых камерах. Полученное значение пространственного разрешения камер лежит в диапазоне 90–120 мкм, что позволяет осуществить изучение интересующего нас процесса.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В теории нуклон-нуклонного рассеяния фундаментальное значение имеет извлечение комплексных амплитуд матрицы рассеяния. Для получения всех амплитуд необходимо проводить так называемый полный опыт, в результате которого получен такой набор экспериментальных наблюдаемых, который позволяет провести исчерпывающее описание процесса. Полный эксперимент включает в себя, в том числе, измерения с

---

\* Electronic address: [gabriela.martinska@upjs.sk](mailto:gabriela.martinska@upjs.sk)

поляризованными частицами-снарядами, а также с поляризованными мишенями. Это весьма большая и трудоемкая задача.

Однако, в некоторых случаях возможно определить отдельные амплитуды матрицы рассеяния, либо их совокупность, путем выбора некоторых экспериментальных условий. Одной из возможностей является изучение реакции перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$  с использованием неполяризованных протонов и неполяризованных дейтронов, которая при некоторых условиях определяется только зависящими от спина компонентами амплитуд. Появилась возможность оценить спин-зависящую часть амплитуды  $np \rightarrow pn$  рассеяния в рамках импульсного приближения, изучая дифференциальное сечение этой реакции при малых передачах импульса. Эта идея была предложена и формализована математически в целом ряде теоретических работ [1–3]. Экспериментально такую серию работ пытались решать, в основном, в пучках сепарированных нейтронов от стриппинга ускоренных дейтронов.

Целесообразным оказалось провести анализ экспериментальных данных, в которых ускоренные дейтроны падали на протонную мишень. При такой постановке опыта дейтроны монохроматичны, а вторичные два протона — продукты перезарядки дейтрона на протоне, являются быстрыми и вылетают в переднем направлении под малыми углами. Такой эксперимент был проведен на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ с использованием в качестве одновременно детектора и мишени водородной пузырьковой камеры. До начала наших исследований другие эксперименты с пучком дейтронов практически отсутствовали.

На основе анализа экспериментальных данных было определено дифференциальное сечение реакции перезарядки  $(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} |_{t=0} = 30.2 \pm 4.1$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>. В пучке дейтронов получено отношение  $R_{np \rightarrow pn}$  дифференциальных сечений перезарядки при нулевой передаче импульса ( $t = 0$ ) в реакции  $dp \rightarrow (pp)n$  и  $np \rightarrow pn$ . В рамках импульсного приближения полученное значение  $R_{np \rightarrow pn} = 0.55 \pm 0.08$  свидетельствует о преобладающем вкладе спин-зависящей части сечения  $np \rightarrow pn$  рассеяния [4] и согласуется с данными других экспериментов в области близких энергий [5].

Изучение реакции перезарядки, проведенное с помощью камерной методики, позволило предложить схему электронного эксперимента для изучения реакции перезарядки на дейтроне в области энергий выше 1 ГэВ. В работе [6] было впервые предложено исследование зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных соударениях на уско-

рителе Нуклотрон с целью изучения спиновых эффектов в неполяризованных пучках дейтронов с помощью электронной методики, для получения статистически обеспеченного результата по определению вклада спин-зависящей части амплитуды элементарного  $np$ -рассеяния.

Выбор конкретной геометрии эксперимента был выполнен на основе реальных событий и расчетов методом генерации Монте—Карло с помощью программного пакета GEANT3. Опираясь на данные по реакции  $dp \rightarrow X$ , полученные на водородной пузырьковой камере, был промоделирован вариант эксперимента для спектрометра, используя в качестве входных данных реальные события  $dp$ -взаимодействий. Для оценки фоновых условий были взяты все наблюдавшиеся каналы реакций, информация о которых содержится на DST камерного эксперимента. Фон от других реакций, кроме изучаемой реакции  $dp \rightarrow ppn$ , которые могли дать два положительно заряженных трека (например  $dp \rightarrow ppn\pi^0$ ) в направлении вперед при ограниченной апертуре оказался пренебрежимо малым [7].

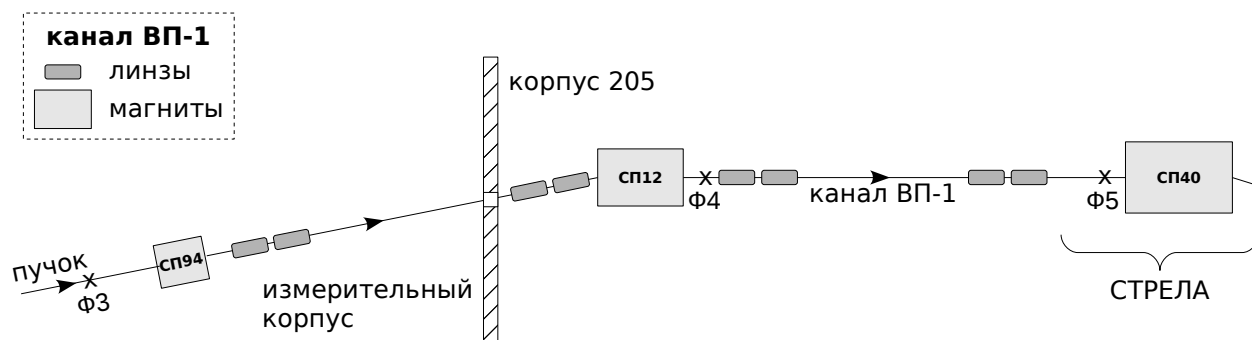
В результате моделирования была предложена схема установки СТРЕЛА [8], электронного эксперимента для изучения реакции перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$  с целью определения спин-зависящей части амплитуды элементарной перезарядки  $np \rightarrow pn$ . Были необходимы детекторы с хорошим пространственным разрешением и быстрая современная электроника для считывания большого потока информации. Не менее важной задачей был выбор системы отбора и регистрации событий.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА СТРЕЛА

Установка представляет одноплечевой магнитный спектрометр, который расположен в зале корпуса №205 ЛФВЭ ОИЯИ. Пучок дейтронов, выведенный из ускорителя Нуклотрон, транспортируется и фокусируется магнитной оптикой канала ВП-1 на мишень установки, которая находится в области перед фокусом Ф5, рис. 1.

Основными элементами установки СТРЕЛА являются:

- блоки дрейфовых камер в качестве координатных детекторов,
- электроника считывания информации,
- сцинтилляционные счетчики используемые для запуска установки,



**Рис. 1.** Канал ВП-1 выведенного пучка из ускорителя Нуклотрон с фокусами  $\Phi 3$ – $\Phi 5$ .

Транспортировка дейтронного пучка, до мишени установки СТРЕЛА, обеспечивается отклоняющими дипольными магнитами и фокусирующими квадрупольными линзами.

- анализирующий магнит.

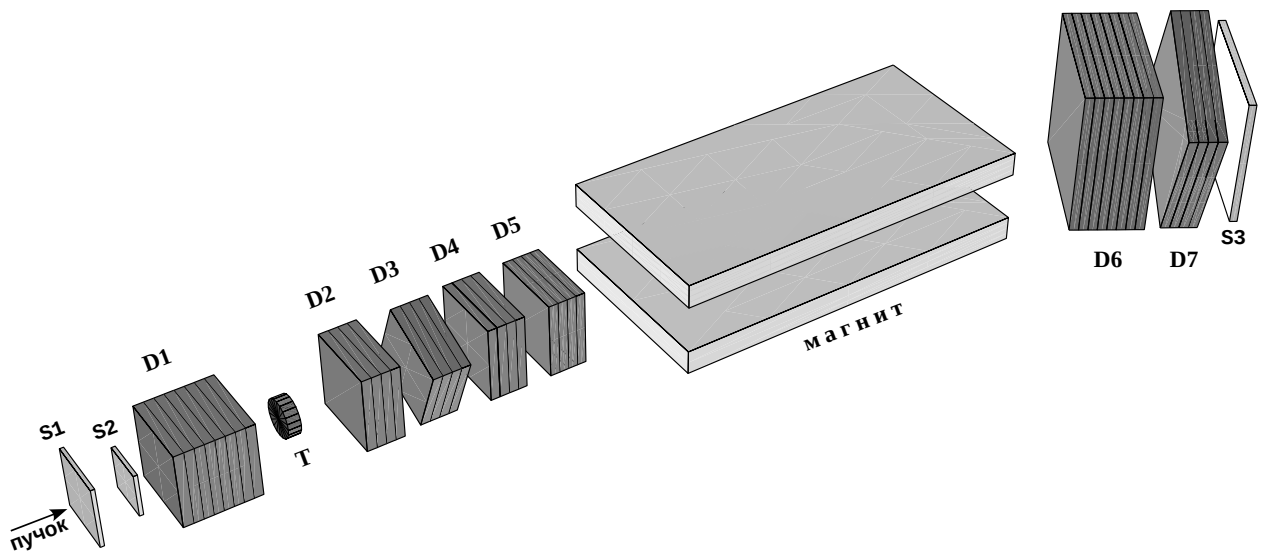
Для определения координат траекторий первичной и вторичных частиц в эксперименте применяются дрейфовые камеры, которые объединяются в блоки. На рис. 2 приведена схема расположения всех блоков дрейфовых камер, анализирующего магнита, мишени и сцинтилляционных (триггерных) счетчиков на выведенном пучке дейтронов из ускорительного комплекса Нуклотрона.

В настоящее время используется 36 плоскостей дрейфовых камер, объединенных в 7 блоков. Каждый блок состоит из четырех или восьми объединенных плоскостей дрейфовых камер с различной ориентацией проволок.

Длина дрейфового промежутка во всех камерах равна 21 мм. Камеры в блоке располагаются таким образом, что сигнальные проволочки в соседних плоскостях сдвинуты относительно друг друга на 21 мм в направлении перпендикулярном оси пучка. Такое расположение нитей позволяет устранить лево-правую неоднозначность в определении пространственных координат треков частиц.

Координатная система дрейфовых камер выбрана следующим образом: ось  $z$  для блоков камер D1–D5 направлена по пучку падающих дейтронов, а для блоков камер D6–D7, помещенных после магнита, по направлению максимума вылета протонов стриппинга; оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскостях камер так, что вместе с осью  $z$  составляют правую тройку; координаты  $u$  и  $v$  используются для повернутых камер вместо  $x$  и  $y$ .

В таблице 1 приведена структура всех блоков дрейфовых камер с их регистрируемы-



**Рис. 2.** Схема расположения дрейфовых камер и анализирующего магнита на экспериментальной установке СТРЕЛА. D1–D5 — блоки «маленьких» дрейфовых камер с размером рабочей области  $12.5 \times 12.5 \text{ см}^2$ , D6–D7 — блоки «больших» камер с размером  $25.0 \times 25.0 \text{ см}^2$ , S1–S3 — сцинтилляционные счетчики, Т — мишень.

ми координатами и количеством сигнальных проволок в каждой плоскости камеры, штриховая координата используется для сдвинутых проволок.

До мишени располагается первый блок дрейфовых камер (D1) с размером рабочей области  $12.5 \times 12.5 \text{ см}^2$ , имеющий четыре плоскости  $y$ -координат и четыре плоскости  $x$ -координат. Первый блок служит для определения треков пучковых дейтронов, падающих на мишень.

За мишенью располагаются четыре блока дрейфовых камер с такими же размерами («маленькие» камеры). Первый блок (D2) имеет две плоскости  $y$ -координат и две плоскости  $x$ -координат, второй блок (D3) — две плоскости  $u$ -координат и две плоскости  $v$ -координат.  $uv$ -координаты повернуты на  $22.5^\circ$  относительно  $xu$ -координат вокруг оси  $z$ , проходящей через центры блоков камер в направлении падающего пучка. Такой набор камер после мишени позволяет надежно идентифицировать два близко проходящих трека. Далее следует блок дрейфовых камер (D4) с четырьмя плоскостями  $x$ -координат, и последний блок (D5) имеет две плоскости  $y$ -координат и две плоскости  $x$ -координат. Расстояние между центрами двух крайних блоков D2 и D5 равно 65 см, между блоком

Расположение блока	До мишени									
Блок	D1									
Координата	$y$	$y'$	$y$	$y'$	$x$	$x'$	$x$	$x'$		
Число проволочек	4	3	4	3	4	3	4	3		
Расположение блока	За мишенью									
Блок	D2				D3				D4	
Координата	$y$	$y'$	$x$	$x'$	$u$	$u'$	$v$	$v'$	$x$	$x'$
Число проволочек	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Расположение блока	За магнитом									
Блок	D6								D7	
Координата	$y$	$y'$	$y$	$y'$	$x$	$x'$	$x$	$x'$	$u$	$u'$
Число проволочек	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6

**Таблица 1.** Конфигурация блоков дрейфовых камер на установке СТРЕЛА.  $uv$ -координаты повернутые относительно  $xu$ -координат вокруг оси  $z$ , штриховая координата означает сдвинутую плоскость камеры.

D1 и блоком D2, расположенными до и за мишенью, равно 90 см.

За анализирующим магнитом располагаются два блока дрейфовых камер с размерами рабочей области  $25.0 \times 25.0 \text{ см}^2$  («большие» камеры). Ось  $z$  данных блоков (D6–D7) повернута на угол приблизительно  $14^\circ$  относительно оси  $z$  блоков камер (D1–D5), которые расположены перед отклоняющим магнитом. Первый блок (D6) имеет четыре плоскости  $y$ -координат и четыре плоскости  $x$ -координат, а второй блок (D7) — две плоскости  $u$ -координат и две плоскости  $v$ -координат (повернутых также на  $22.5^\circ$  относительно  $xu$ -координат). Расстояние между центрами блоков дрейфовых камер D6 и D7 равно 30 см.

Число всех регистрируемых сигналов с проволочек составляет 162. На каждой камере установлены платы с микросхемами, в которых осуществляется усиление, формирование и дискриминация входных сигналов от сигнальных проволочек дрейфовых камер. Сформированные сигналы поступают на входы TDC модулей для оцифровки. Полученная информация передается по оптической линии в персональный компьютер

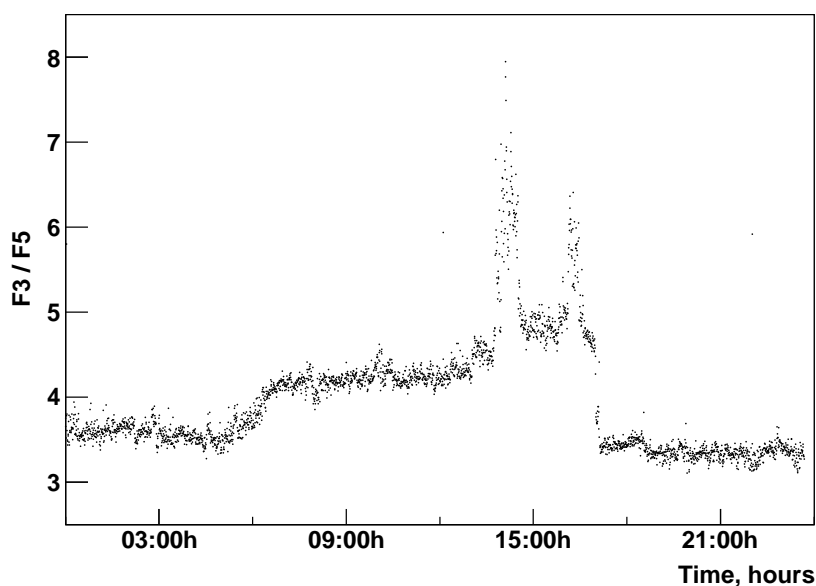
для дальнейшей обработки.

На установке СТРЕЛА, для организации системы сбора экспериментальных данных (DAQ), используются несколько модулей быстрой электроники в формате стандарта VMEbus [9]. Данный стандарт предполагает создание высокопроизводительных вычислительных систем модульного типа на основе унифицированной магистрали. Он обладает достаточной универсальностью и расширяемостью.

TDC модули (время-цифровые преобразователи) применяются для преобразования (оцифровки) времени сформированных импульсных сигналов с дрейфовых камер. На данный момент используются три TDC модуля. Один 64-канальный модуль (тип PhTDC) и два 96-канальные модуля (тип TDC-96). Данные модули разработаны на базе специализированной интегральной схемы HPTDC [10]. Это 32-канальный чип время-цифрового преобразования с разрешением до 25 пс и с оцифровкой обоих фронтов импульсов.

Система запуска установки или отбора событий (триггерная система) должна обеспечить набор событий реакции развала дейтрона при нулевом (близком к нулю) угле рассеяния дейтрона на протоне. В нашем случае регистрируются два протона с близкими импульсами из реакции перезарядки дейтрона на протоне  $dp \rightarrow (pp)n$  (развал дейтрона с зарядовым обменом) и однопротонные события из реакции прямого развала дейтрона  $dp \rightarrow (pn)p$ . Запуск установки осуществлялся с помощью триггерных счетчиков — три сцинтилляционных счетчика S1–S3 (рис. 2), которые определяют аксептанс установки и вырабатывают сигнал для открытия временного окна регистрации сигналов с дрейфовых камер и запуска системы сбора данных.

Установка СТРЕЛА была облучена в пучке дейтронов с импульсом 3.5 ГэВ/с. Система стабилизации интенсивности выведенного пучка из ускорителя обеспечивает равномерную интенсивность не ниже  $\sim 10^7$  частиц в секунду. Так как дрейфовые камеры могут работать при интенсивности не больше  $\sim 10^6$  частиц в секунду, то для уменьшения интенсивности использовался стальной коллиматор с отверстием прямоугольной формы размером  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> и длиной 1.2 м, устанавливаемый в районе фокуса Ф3 после поворотного магнита СП-94 канала ВП-1 (рис. 1). Применение коллиматора позволило при интенсивности пучка в фокусе Ф3 на уровне  $\sim 10^7$  частиц в секунду обеспечить интенсивность пучка дейтронов на мишени установки в районе фокуса Ф5 на уровне не больше  $\sim 5 \times 10^5$  частиц в секунду.



**Рис. 3.** Изменение интенсивности выведенного дейтронного пучка на накали ВП-1 в течение времени набора данных. Показано отношение счетов ионизационных камер, помещенных в фокусе Ф3 и Ф5 в зависимости от времени.

Контроль интенсивности выведенного пучка осуществлялся с помощью ионизационных камер. В процессе набора экспериментальных данных выявились нестабильности выведенного пучка дейтронов. На рис. 3 приведено отношение счетов с ионизационных камер расположенных в фокусах Ф3 и Ф5 в зависимости от времени набора статистики. Выбросы интенсивности пучка приводили иногда к сбоям работы источников высоковольтного питания дрейфовых камер. Использование коллиматора косвенно решает и задачу получения лучшей временной структуры пучка.

### 3. ВРЕМЯ ДРЕЙФА

Выбор дрейфовых камер в качестве координатных детекторов спектрометра обусловлен возможностью получения высокого пространственного разрешения и более надежного отбора двух близко проходящих треков частиц. Изучение характеристик блоков дрейфовых камер экспериментальной установки СТРЕЛА было проведено при облучении полиэтиленовой мишени диаметром 5 см коллимированным пучком дейтронов с импульсом 3.5 ГэВ/с на канале ВП-1 ускорительного комплекса Нуклотрона ЛФВЭ



ОИЯИ. Аппаратура установки облучалась в течение почти двух суток. В результате облучения аппаратуры было набрано несколько миллионов триггеров для последующего анализа.

Все блоки дрейфовых камер продуваются одинаковой трехкомпонентной газовой смесью аргона (72 %), изобутана (25 %) и этилового спирта (3 %), которая позволяет получить при напряженности электрического поля  $\sim 1.5$  кВ/см режим постоянной скорости дрейфа электронов и высокую линейную зависимость времени дрейфа от координаты трека почти по всему объему камеры. Замкнутая циркуляционная газовая система обеспечивает продув каждого блока камер и выдерживает, с достаточной точностью, стабильность газовых компонент в смеси. Средняя скорость потока смеси в системе приблизительно  $100 \text{ см}^3/\text{мин}$  [11]. С используемой трехкомпонентной смесью достигается стабильная работа камер и высокая эффективность регистрации трековых частиц.

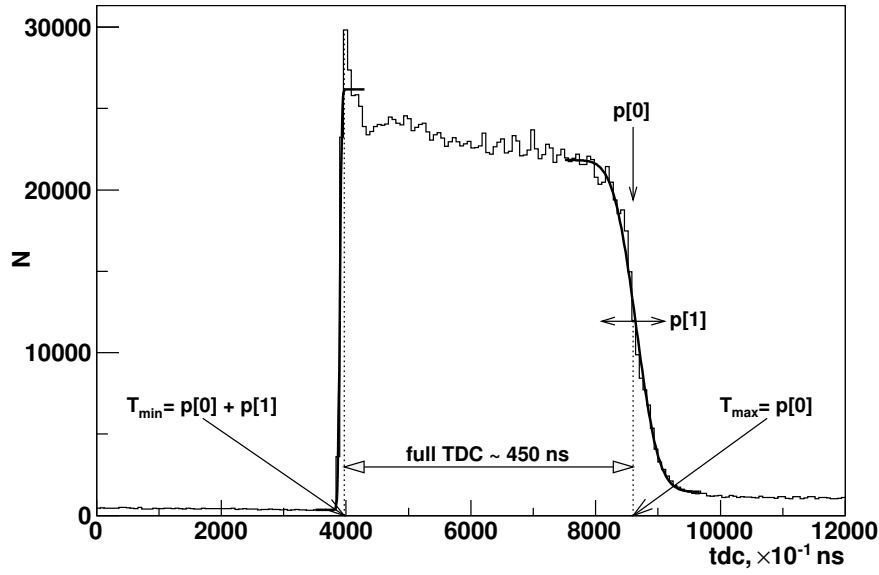
Применение дрейфовых камер требует нахождения соотношения между измеренным временем дрейфа проходящей частицы и его преобразованием в расстояние относительно данной сигнальной проволоочки. Сначала используется «интегральное» преобразование, после чего происходит поиск и реконструкция трека. Для получения более корректного соотношения между временем дрейфа и расстоянием используется итеративная процедура автокалибровки.

Временной спектр TDC одного из каналов показан на рис. 4. Минимальное и максимальное время дрейфа ( $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ) для каждого канала (проволоочки) определяется аппроксимацией его временного спектра функцией

$$N(t) = p[2] + p[3] \operatorname{erfc} \left[ \frac{(t - p[0])}{\sqrt{2} p[1]} \right], \quad (1)$$

отдельно для минимального времени,  $T_{min} = p[0] + p[1]$ , и отдельно для максимального,  $T_{max} = p[0]$ .  $\operatorname{erfc}(x)$  — дополнительная функция ошибок [12]. Параметры  $p[2]$  и  $p[3]$  можно использовать для качественной проверки фита. Среднее полное время дрейфа составляет  $\sim 450$  нс.

Соотношение между измеренным временем дрейфа и минимальным расстоянием между анодной проволоочкой и треком частицы имеет важнейшую роль при реконструкции трека в дрейфовых камерах. Задача состоит в определении функции преобразования времени дрейфа  $t$  в расстояние  $r$ , так называемое  $r(t)$ -отношение, зависящее от



**Рис. 4.** Временной спектр  $TDC$  одного из каналов (проволочек) дрейфовой камеры. Сплошные линии — аппроксимация распределения в области минимального  $T_{min}$  и максимального  $T_{max}$  времени функцией (1).

многих параметров: напряженности электрического поля, состава газовой смеси, давления, температуры, геометрии дрейфовой камеры [13].

Если предположить, что поток падающих частиц является равномерным, а эффективность во всей области чувствительности проволоочки постоянна, то скорость дрейфа можно выразить как

$$v_d(t) = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dN} \frac{dN}{dt} = const \frac{dN}{dt}, \quad const = \frac{dr}{dN} = \frac{R}{N_{tot}}, \quad (2)$$

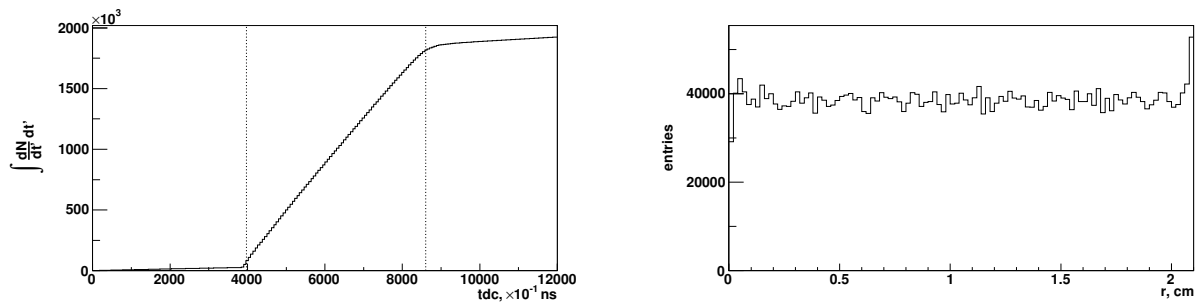
где  $R$  — длина дрейфового промежутка (21 мм),  $N_{tot}$  — полное число событий и  $dN/dt$  — временное распределение (рис. 4).

Таким образом, функцию преобразования времени дрейфа  $t$  в расстояние  $r$  можно выразить как

$$r(t) = \int_{T_{min}}^{T_{max}} v_d(t') dt' = \frac{R}{N_{tot}} \int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{dN}{dt'} dt'. \quad (3)$$

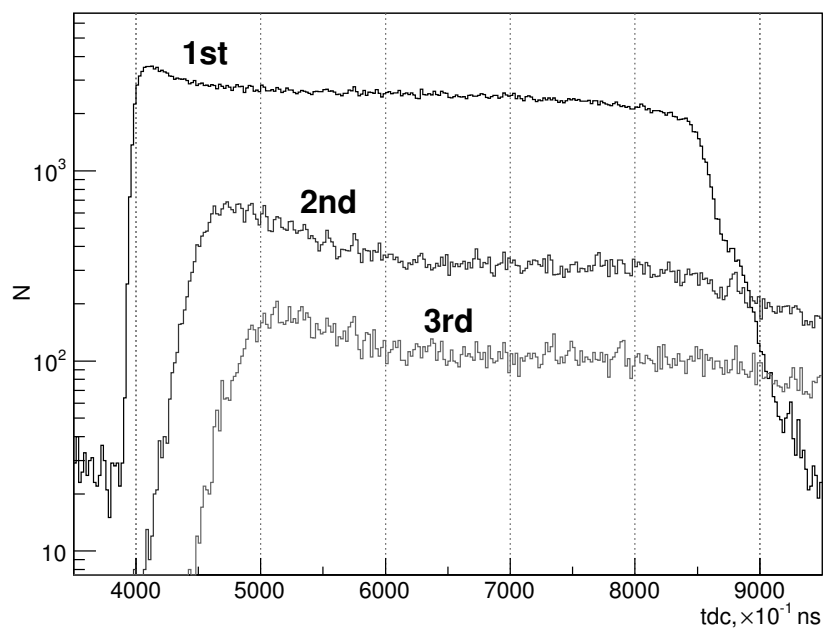
Заметим, что так полученное  $r(t)$ -отношение (рис. 5) будет корректироваться (поправляться) в итеративном процессе автокалибровки [14].

В связи с тем, что вторичные частицы могли попасть в один и тот же самый дрейфовый промежуток камер, расположенных сразу после мишени, важно определить воз-



**Рис. 5.** На рисунке слева интегрированное время дрейфа  $t$  проволочки из рис 4. Справа — преобразованное расстояние  $r$  между проволочкой и треком.

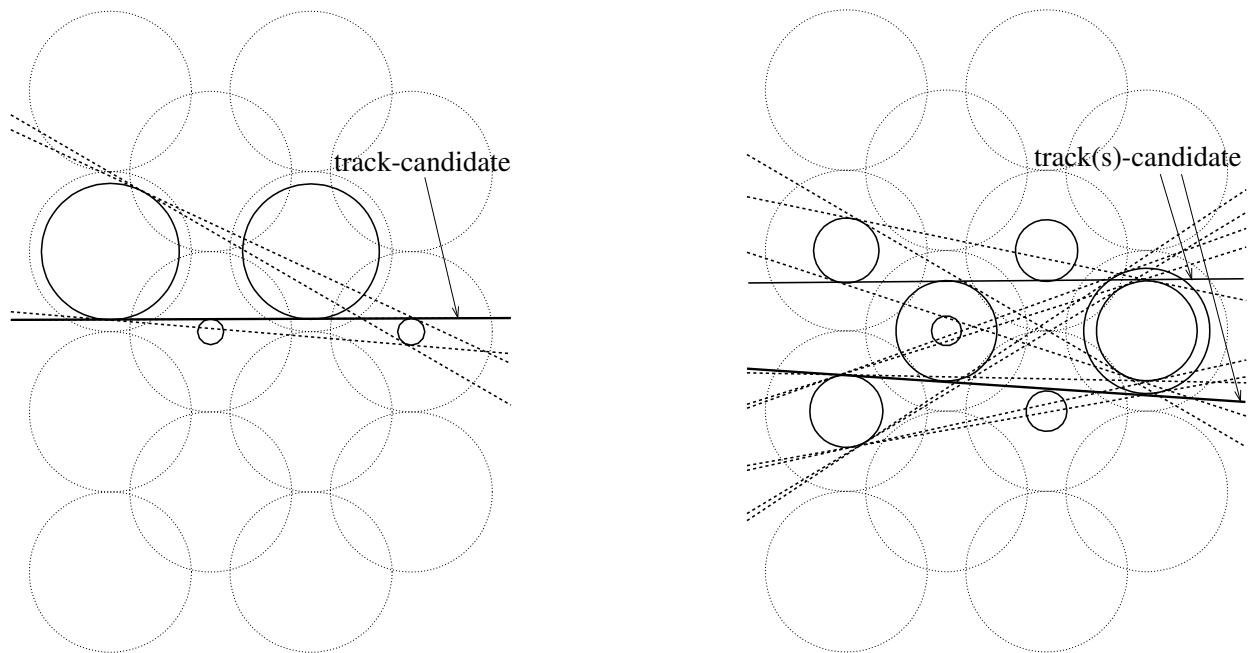
возможность регистрации двух (или более) временных сигналов с одной проволочки. На рис. 6 показаны распределения времени дрейфа для одной из проволочек «маленькой» камеры после прохождения через нее более чем одной частицы (трека). Видно, что минимальное временное разрешение между следующими друг за другом сигналами порядка 50 нс, что соответствует минимальному расстоянию между треками  $\sim 2$  мм. Такое разрешение удовлетворяет требованиям эксперимента СТРЕЛА.



**Рис. 6.** Распределения  $TDC$  для одной из проволочек «маленькой» дрейфовой камеры после прохождения первой (1st), второй (2nd) и третьей (3rd) частицы через нее.

#### 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЕКОВ В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ

Поиск и реконструкция трека происходит отдельно для каждого блока дрейфовых камер одной плоскости  $xz$  или  $yz$ -координат. В зависимости от конкретной задачи, можно программным путем соединять (или разделять) блоки камер в один мультиблок. В одном блоке (или мультиблоке) должно быть не менее трех слоев сигнальных проволок, для возможности однозначного определения трека. На рис. 7 показан пример двух разных событий в одной плоскости камеры, состоящей из четырех слоев проволок.



**Рис. 7.** Пример проекции однотрекового (слева) и двухтрекового (справа) события в одной плоскости блока первой дрейфовой камеры, состоящей из четырех слоев проволок. Штриховые окружности представляют максимальную длину дрейфового промежутка, сплошные — расстояние трека от сигнальной нити. Для визуального изображения дрейфового промежутка используются окружности, центры которых проходят через сигнальные проволоки.

Последовательность поиска трека в упрощенном виде можно изложить следующим образом:

1. Поиск пары сработавших проволок из разных слоев камеры, имеющих наибольшее расстояние. Для пары окружностей, представляющих расстояние проекции

трека от сигнальной нити, вычисляются параметры всех четырех касательных, рис. 7.

2. Для каждой касательной вычисляются трековые остатки  $\Delta r_i$  (residuals), которые можно определить как  $\Delta r_i = r_i - |D_i|$ , где  $r_i$  — расстояние полученное преобразованием ( $r(t)$ -отношение) времени дрейфа  $t_i$ , а  $D_i$  — расстояние трека (касательной) от  $i$ -й проволочки, рис. 8. Если такое расстояние больше, чем заданное минимальное  $|\Delta r| > \Delta r_{min}$ , то сработавшая проволочка не учитывается.  $\Delta r_{min}$  обычно на порядок больше, чем пространственное разрешение камеры.
3. Если число сработавших проволочек  $N_{hits}$  камеры, удовлетворяющих предыдущему условию, для касательной не менее заданного  $N_{hits} \geq N_{min}$ , то касательная переходит в разряд кандидатов в трек. Для нашего примера (рис. 7)  $N_{min}$  равно 4.
4. Если кандидатов несколько, то оставляется тот, у которого сумма расстояний  $\Delta r$  минимальна.
4. Производится реконструкция трека и возвращение к 1. пункту, т.е. поиску последующей пары в данном блоке дрейфовой камеры. Сработавшие проволочки, которые вошли в восстановленный трек, не удаляются, и их можно использовать для поиска и реконструкции следующего трека.

Трек-кандидат используется в процедуре реконструкции, восстановления трека. Проекцию прямого трека в плоскости перпендикулярной к проволочкам блока дрейфовой камеры можно параметризовать как уравнение прямой

$$X = aZ + b \quad (4)$$

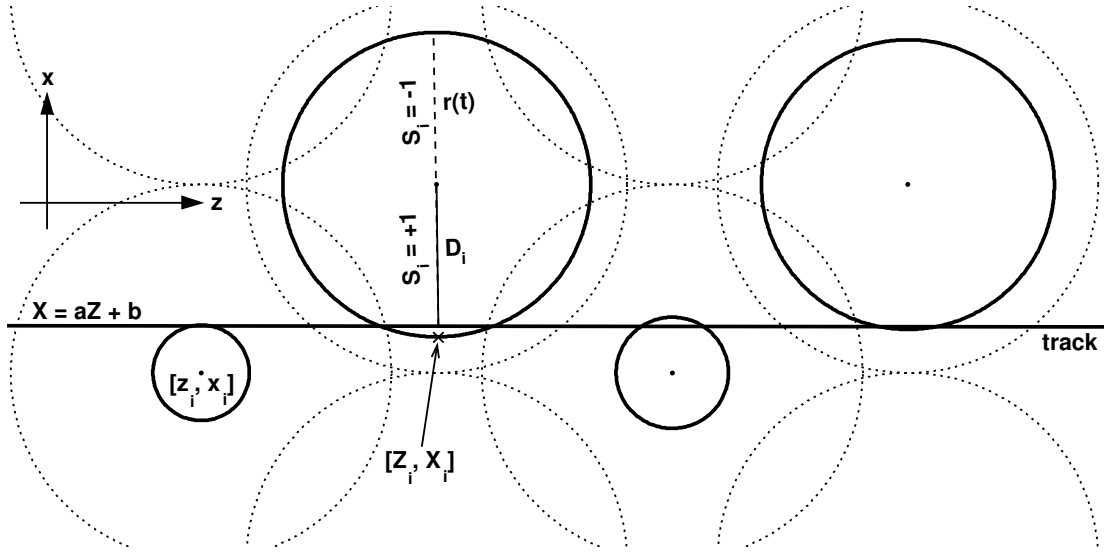
с параметрами  $a$  и  $b$ , рис. 8.

Предположим, что трек имеет  $N$  сработавших проволочек с координатами  $(z_i, x_i)$  для  $i = 1, \dots, N$ . Тогда расстояние между треком и  $i$ -й проволочкой можно выразить как

$$D_i = \frac{az_i - x_i + b}{\sqrt{1 + a^2}}. \quad (5)$$

Задача реконструкции трека состоит в получении параметров прямой  $a$  и  $b$  путем минимизации  $\chi^2$ -функции

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [|D_i| - S_i r_i]^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[ \left| \frac{az_i - x_i + b}{\sqrt{1 + a^2}} \right| - S_i r_i \right]^2, \quad (6)$$



**Рис. 8.** Определение параметров используемых при реконструкции трека в блоке дрейфовой камеры.

где  $S_i$  имеет в зависимости от положения трека относительно проволочки значение  $\pm 1$  (рис. 8),  $r_i$  — расстояние между треком и  $i$ -й проволочкой, полученное из функции преобразования времени дрейфа  $t$  в расстояние  $r$ . Величины параметров  $a$  и  $b$  получаем итеративным решением двух дифференциальных уравнений  $\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = 0$  и  $\frac{\partial \chi^2}{\partial b} = 0$ . Уравнение (6) можно переписать следующим образом

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{aZ_i - X_i + b}{\sqrt{1+a^2}} \right]^2, \quad (7)$$

где координаты проволочек  $(z_i, x_i)$  заменяем координатами  $(Z_i, X_i)$ , которые вычисляются как

$$Z_i = z_i - S_i r_i \frac{a_0}{\sqrt{1+a_0^2}}, \quad X_i = x_i + S_i r_i \frac{1}{\sqrt{1+a_0^2}}. \quad (8)$$

Минимизируя  $\chi^2$ -функцию (уравнение (7)) методом наименьших квадратов, получаем значения трековых параметров  $a$  и  $b$ . Величину  $a_0$  в итеративном процессе последовательно заменяем новым значением  $a$ . В качестве начального значения  $a_0$  в уравнении (8) используем параметр  $a$  из трека-кандидата (касательной). Для частиц падающих на камеру под небольшими углами можно принять  $a_0 = 0$ . В среднем, после двух-трех итераций параметры  $a$  и  $b$  практически не меняются, и если значение  $\chi^2/ndf$  меньше заданного, то трек считаем восстановленным.

## 5. АВТОКАЛИБРОВКА

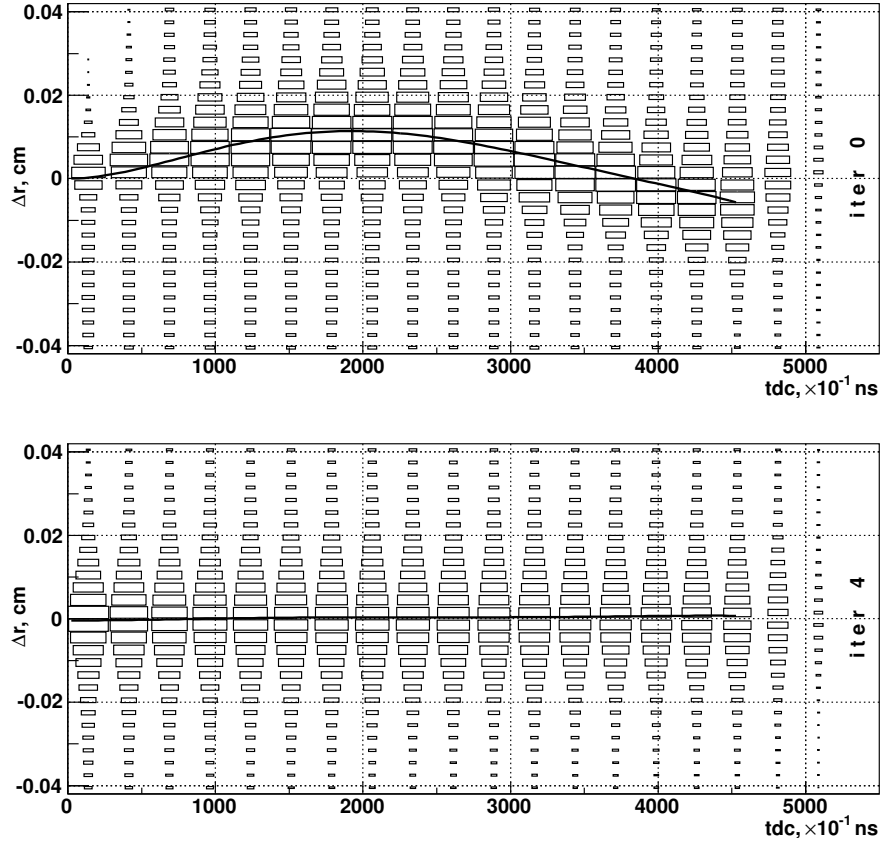
Для реконструкции треков необходимо знать отношение между измеренным временем дрейфа и его преобразованием в расстояние, поэтому получение правильного  $r(t)$ -отношения, является одной из важнейших задач. Итеративную процедуру определения  $r(t)$ -отношения с использованием трековой информации называем автокалибровкой [15, 16].

Отметим, что  $r(t)$ -отношение, полученное в процессе равномерного облучения частицами дрейфового промежутка не учитывает неравномерность напряженности электрического поля вдоль траектории дрейфа электронов, а это, в свою очередь, приводит к изменению величины скорости дрейфа, и соответственно, к дифференциальной нелинейности  $r(t)$ -отношения. Это возможно в конструкции используемых дрейфовых камер, где напряженность электрического поля вдоль траектории дрейфа задается резистивной сборкой, резисторы которой имеют разброс в несколько процентов.

Однако можно предположить приблизительно одинаковые условия в камере, для которой выполняется автокалибровка. При необходимости можно программным путем разделить камеры на меньшие или на группы проволочек, для которых предполагаем те же самые условия. Иногда поиск и реконструкция трека происходит в одном блоке (мультиблоке) камер, но процедура автокалибровки прodelывается для каждой камеры отдельно.

На рис. 9 показана зависимость трекового остатка  $\Delta r$  (residual) от времени дрейфа в большой дрейфовой камере. Распределение трекового остатка (его ширина) в основном определяется пространственным разрешением дрейфовой камеры. Тем не менее,  $\Delta r$  можно использовать при решении таких задач, как юстирование, сбалансирование проволочек в блоках (мультиблоках) камер относительно друг друга или для дополнительной оценки минимального и максимального времени дрейфа ( $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ). Ожидаемое среднее значение трекового остатка  $\Delta r \simeq 0$ .

По горизонтальной оси двумерной зависимости распределения  $\Delta r$  от  $t$  (рис. 9) отложено время дрейфа с шагом гистограммы 27.5 нс. Шаг выбран так, чтобы получить необходимое число временных интервалов. В нашем примере оно равно 20. Для каждого временного интервала создается проекция трекового остатка  $\Delta r$ . Полученные распределения остатков аппроксимируются распределением Гаусса, среднее значение которого



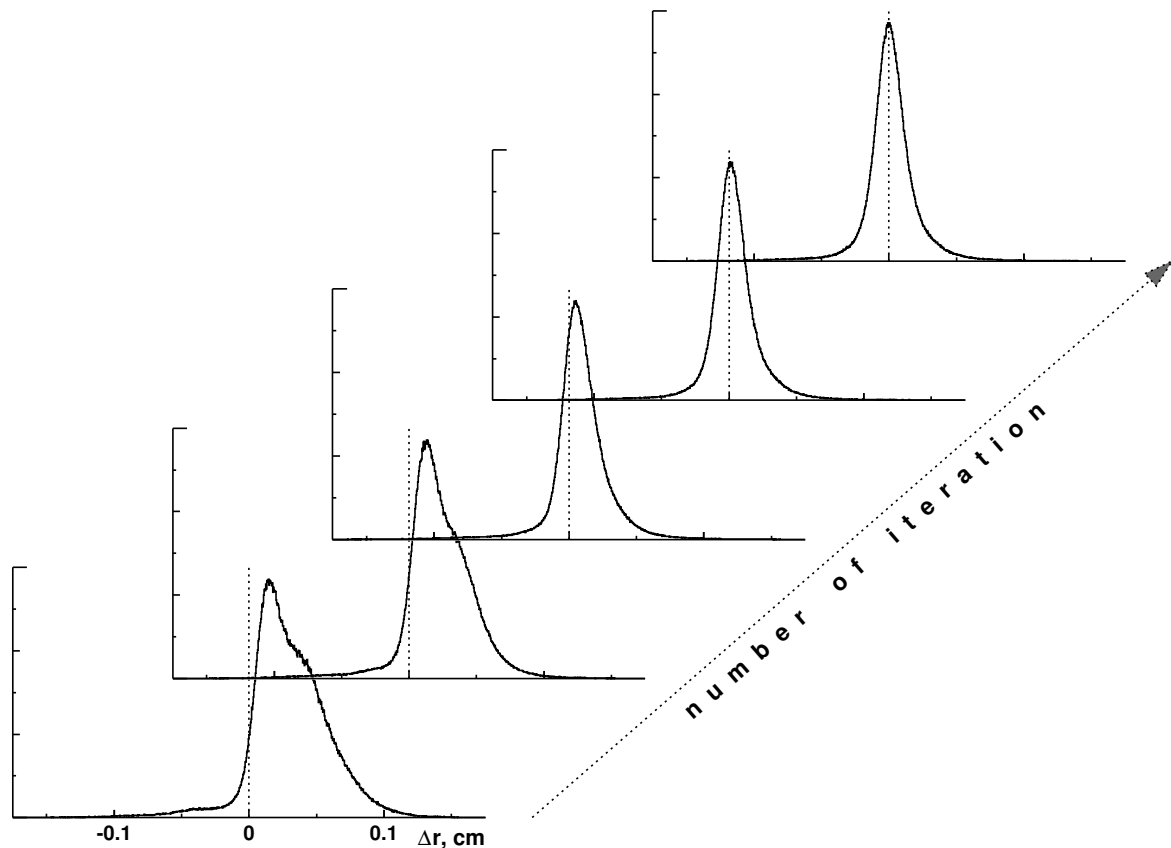
**Рис. 9.** Зависимость распределения трекового остатка  $\Delta r$  от времени дрейфа  $t$  в одной плоскости блока больших дрейфовых камер. На верхнем рисунке исходное  $r(t)$ -отношение (интегральное преобразование времени в расстояние), нижний рисунок — после окончательной, четвертой итерации автокалибровки. Размер прямоугольника пропорционален числу событий. Сплошная линия — аппроксимация средних значений трекового остатка для каждого временного интервала.

представляет поправку  $\delta_i$  к текущему  $r(t)$ -отношению в каждом  $i$ -м временном интервале. Таким образом, получается новая, подправленная функция преобразования времени дрейфа  $t$  в расстояние  $r$ , с которой вновь выполняется реконструкция трека.

В каждом следующем шаге процедуры автокалибровки  $r(t)$ -отношение поправляется в зависимости от предыдущей итерации. Поиск и реконструкция треков проводится повторно до тех пор, пока значения поправок  $\delta_i$  для всех временных интервалов стабилизируются (приблизятся к нулевым значениям). В нашем примере число итераций равно 4–5. Как меняется распределение трекового остатка в зависимости от номера итерации, показано на рис. 10. Видно, что с ростом номера итерации трековый остаток



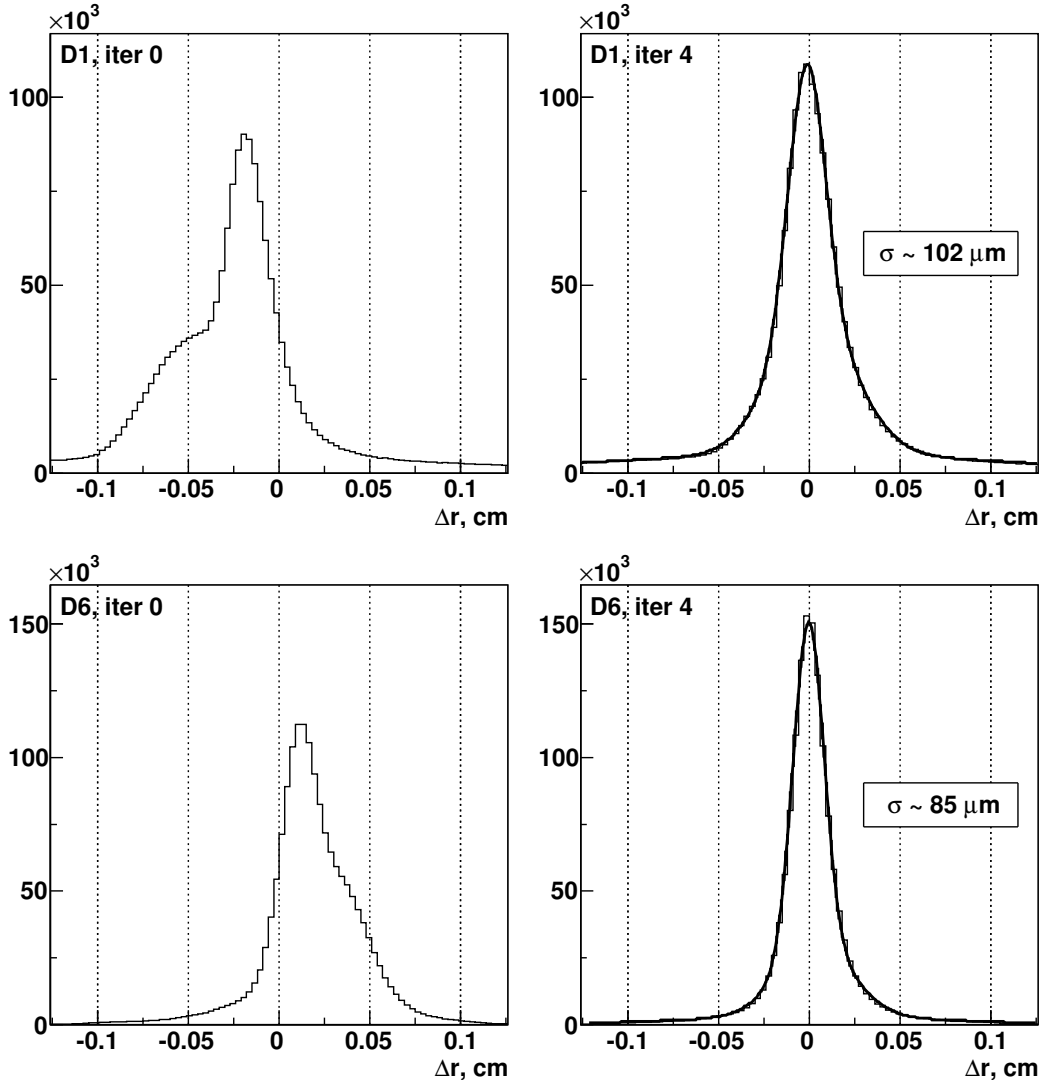
стремится к нулю, а ширина распределения уменьшается.



**Рис. 10.** Изменение распределения трекового остатка  $\Delta r$  в зависимости от номера итерации в блоке больших дрейфовых камер.

Процесс автокалибровки выполняется только с однотрековыми событиями. Желательно, чтобы угловой разброс треков в камере не превышал  $\sim 100$  мрад. Если диапазон наклонов треков, проходящих через камеру большой, то итеративную процедуру автокалибровки делаем отдельно для разных диапазонов углов наклона. Область изменения угла наклона не должна превышать  $\sim 100$ – $150$  мрад.

Пространственное разрешение дрейфовой камеры определяется шириной распределения трекового остатка данной камеры. Для вычисления разрешения  $\sigma$  использовалась аппроксимация двойным распределением Гаусса, рис. 11. Пространственное разрешение дрейфовых камер, используемых на установке СТРЕЛА, лежит в диапазоне  $\sim 90$ – $120$  мкм. Влиянием многократного рассеяния (дейтроны с импульсом 3.5 ГэВ/с) на разрешение можно пренебречь.



**Рис. 11.** Распределения трекового остатка  $\Delta r$  в  $xz$ -плоскости дрейфовой камеры D1 и камеры D6. Слева — распределения с исходным интегральным  $r(t)$ -отношением, справа — после окончательной четвертой итерации автокалибровки, аппроксимированные двойным распределением Гаусса.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе установки СТРЕЛА создан спектрометрический комплекс для изучения реакции с обменом заряда в пучках дейтронов. Применение дрейфовых камер и их пространственная разрешающая способность позволяют идентифицировать два протона из реакции с обменом заряда на дейтроне. Полученные характеристики трековых детекторов позволяют осуществить исследование зарядово-обменных процессов во взаимодействиях дейтронов с протонами на установке СТРЕЛА. Описанная в работе установка

работает с 2007 года.

- 
1. Померанчук И., Док. АН СССР **LXXVIII**, 249 (1951).
  2. G. F. Chew, Phys. Rev. **80**, 196 (1950).
  3. N. W. Dean, Phys. Rev. D **5**, 2832 (1972).
  4. V. V. Glagolev, G. Martinská, J. Mušínský, *et al.*, Cent. Eur. J. of Phys. **6**, 781 (2008).
  5. V. I. Sharov, A. A. Morozov, R. A. Shindin, *et al.*, Eur. Phys. J. A **39**, 267 (2009).
  6. V. V. Glagolev, J. Hlaváčová, A. K. Kacharava, *et al.*, in *Proc. of the XIII Intern. Seminar on HEP Problems, Dubna, 2–7 September 1996* (1996), vol. 1, pp. 179–184.
  7. Базылев С. Н., Глаголев В. В., Главачова Ю., *et al.*, in *Proc. of the Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV, Slovak Republic, Stara Lesna, 14–18 June 1999* (1999), vol. 2.
  8. <http://strela.jinr.ru>.
  9. C. F. Parkman, *VMEbus at CERN - A brief review* (1985).
  10. J. Christiansen, Tech. Rep., CERN/EP - MIC (2004).
  11. N. A. Filatova, S. N. Turgun, V. P. Nigmanov, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **143**, 17 (1977).
  12. <http://root.cern.ch/root/html/TMath.html#TMath:Erfc>.
  13. Пешехонов В. Д., ЭЧАЯ **17**, 1030 (1986).
  14. V. V. Glagolev, G. Martinská, J. Mušínský, *et al.*, in *Proc. of the Intern. Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV, Slovak Republic, Stara Lesna, June 5–11 2009* (2010), pp. 164–174.
  15. C. Bacci, C. Bini, G. Ciapetti, *et al.*, Nucl. Phys. B **54**, 311 (1997).
  16. F. Petrucci, in *Nucl. Science Symp. Conf. Record, 2005 IEEE* (2005), vol. 1, pp. 153–157.