

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.12

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка программного обеспечения отдельных модулей для реконструкции событий  
установки ОКА:  
Разработка алгоритма реконструкции треков

Научный руководитель \_\_\_\_\_ А. В. Охотников  
м.н.с.  
Научный консультант \_\_\_\_\_ С. Р. Слабоспицкий  
д.ф.-м.н., в.н.с.  
Студент \_\_\_\_\_ Л. И. Лапшин

# Содержание

1	ОБЗОР ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКТОРОВ НА УСТАНОВКЕ ОКА . . . . .	3
1.1	Дрейфовые камеры . . . . .	3
1.2	Пропорциональные камеры . . . . .	3
1.3	Падовый годоскоп . . . . .	4
1.4	Другие элементы . . . . .	5
2	ОБЗОР МЕТОДОВ ТРЕКИНГА . . . . .	6
2.1	Поиск треков . . . . .	6
	Глобальный метод — анализ через преобразование Хафа . . . . .	6
	Локальный метод — фильтрация Калмана . . . . .	6
2.2	Фитирование . . . . .	7
	Глобальный метод — метод Пирсона . . . . .	7
	Локальный метод — фильтрация Калмана . . . . .	7
3	НАПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ТРЕКИНГА . . . . .	8
3.1	Выбор методов . . . . .	8
3.2	Описание алгоритма . . . . .	8
3.3	Передача данных . . . . .	8
4	ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ . . . . .	10
4.1	Охранная система . . . . .	10
4.2	Электромагнит СП-40 . . . . .	10
4.3	Падовый годоскоп . . . . .	10
4.4	Численная оценка . . . . .	11
5	ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА . . . . .	13
5.1	Подготовка данных . . . . .	13
5.2	Анализ смоделированных данных . . . . .	13
5.3	Анализ результата . . . . .	14
6	ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	16

## РЕФЕРАТ

В данной работе рассматривается разработка алгоритма реконструкции треков заряженных частиц для экспериментальной установки ОКА (ИФВЭ, Протвино). Целью работы является создание прототипа программной реализации алгоритма, способного обрабатывать данные с дрейфовых камер и падового годоскопа, а также оценка его эффективности на смоделированных данных.

В работе выполнен обзор трековой системы установки ОКА и основных методов трекинга, включая преобразование Хафа, фитирование с помощью хи-квадрат и фильтрацию Калмана. На основе анализа кинематики частиц и технических характеристик детекторов выбраны глобальные методы: преобразование Хафа для поиска треков и метод наименьших квадратов (хи-квадрат) для фитирования параметров. Алгоритм реализован на языке C++ с использованием фреймворка ROOT. Проведена численная оценка параметров треков исходя из геометрии установки и анализа фрагмента данных.

Проверка эффективности осуществлялась на смоделированных данных для распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$  (500000 событий). Полная корректная реконструкция с отклонением параметров не более 20% достигнута в  $\approx 16,5\%$  событий от числа принципиально возможных. Выявлено, что основным ограничением является непригодность алгоритма к специфике данных. Предложены направления дальнейшего улучшения алгоритма, включая использование адаптивной сетчатки и комбинирование с фильтрацией Калмана. Работа выполнена в рамках модернизации программного обеспечения реконструкции событий установки ОКА.

## 1 ОБЗОР ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКТОРОВ НА УСТАНОВКЕ ОКА

Эксперимент ОКА (ОКА) представляет собой установку, предназначенную для исследования редких распадов каонов ( $K^+$ -мезонов). Установка включает в себя наборы детекторов для реконструкции треков частиц и их энергий, идентификации частиц, электромагнит для отклонения частиц, систему калибровки пучка и охранную систему[1].

В контексте разработки алгоритма трекинга необходимо разобрать элементы экспериментальной установки, позволяющие получать данные о геометрическом месте точек отдельных треков. Все элементы можно разделить на группы:

### 1.1 Дрейфовые камеры

На установке размещены 4 трёхслойных дрейфовых камер (см. рис. 1), заполненных газовой смесью. В результате пролёта частицы через дрейфовую камеру образуется электронная лавина, по длительности сигнала определяется расстояние от центра камеры (анодной проволоки) до трека частицы. Благодаря наличию нескольких слоёв труб в детекторе, расположенных в шахматном порядке, возможно определение координаты частицы с точностью, превышающей ширину трубки. Результатом анализа сигналов является точка в плоскости  $XZ$  или  $YZ$  в зависимости от ориентации детектора. Дрейфовые камеры предоставляют основную информацию для точной реконструкции треков продуктов распада.



Рис. 1: Внешний вид дрейфовой камеры

### 1.2 Пропорциональные камеры

Принципиально, пропорциональная камера (см. рис. 2) представляет собой однослойную дрейфовую камеру с меньшими геометрическими размерами труб, что обеспечивает большую точность при более простой обработке данных. Пропорциональные камеры расположены до распадного объёма, а данные, полученные с них, используются для определения трека нераспавшегося каона и калибровки пучка.

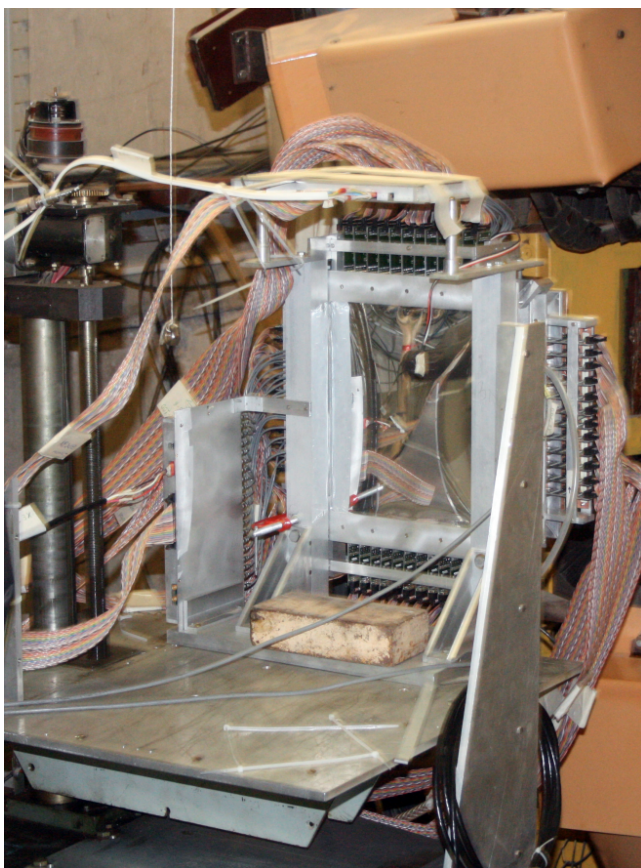


Рис. 2: Пропорциональная камера в разборе

### 1.3 Падовый годоскоп

Один падовый годоскоп расположен после дрейфовых камер. Он состоит из 16 независимых секций, размером  $478 \times 478$  мм<sup>2</sup> каждая из которых включает в себя 16 ячеек сцинтиллятора, с проходящим внутри wls-волоконном. На выходе из сцинтиллятора wls-волокна, через разъем, передают сигнал на прозрачное волокно, которое подключено к ФЭУ. Таким образом, годоскоп позволяет получить информацию о прохождении заряженной частицы через одну из 256 ячеек (см. рис. 3)[2], расположенных в плоскости XY. Кроме того, 4 ближайших к оси экспериментальной установки пада состоят из 9 сцинтилляторов каждый, что предоставляет большую точность измерения координат. При этом 4 ближайших к оси экспериментальной установки сцинтиллятора удалены для беспрепятственного прохождения пучка нераспавшихся каонов.

Падовый годоскоп необходим для соединения хитов, полученных с разных (ориентированных в плоскостях ZX или ZY) дрейфовых камер в один трек<sup>1</sup> Другими словами, он необходим для разрешения XY-неоднозначности. Тем не менее, прибор не предоставляет большую точность измерения, поэтому служит только для определения принадлежности хитов к трекам, но не для реконструкции точных параметров трека.

Кроме описанного выше, данные с падового годоскопа имеют и другие применения в анализе. Так, число сработавших ячеек позволяет определить число продуктов распада

---

<sup>1</sup>Альтернативно, можно было бы использовать дрейфовые камеры, повернутые под углом к осям X и Y. Однако на экспериментальной установке это не реализовано.

в событии; временное разрешение годоскопа позволяет отсеивать события, связанные со случайными совпадениями.

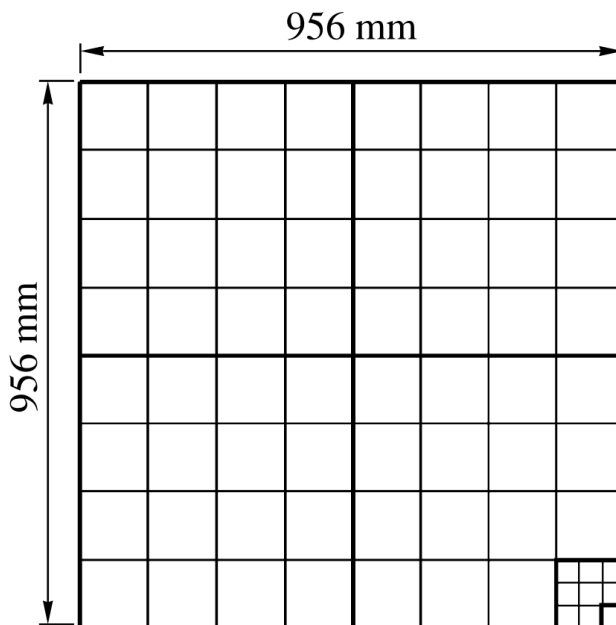


Рис. 3: Схема квадранта падового годоскопа в плоскости ХУ

Подобный годоскоп, но состоящий всего из 4 ячеек, расположен в конце установки (за системой калориметров) и служит детектором мюонов.

#### 1.4 Другие элементы

Помимо детекторов, предназначенных именно для определения точных параметров треков, на установке есть и другие устройства, данные с которых необходимы для реконструкции событий. К ним относится охранная система (см. раздел 4.1), электромагнитный и адронный калориметры (GAMS-2000 и HСAL соответственно), электромагнит, отклоняющих продукты распада от начальной траектории (см. раздел 4.2), система черенковских счётчиков для идентификации частиц.

## 2 ОБЗОР МЕТОДОВ ТРЕКИНГА

Любой алгоритм трекинга включает 3 этапа обработки данных: определение принадлежности хитов к одному треку (finding, assignment), вычисление точных параметров трека (фитирование, подгонка) и отбор кандидатов. В свою очередь, методы нахождения треков и фитирования в целом делятся на глобальные, анализирующие сразу все хиты, и локальные, анализирующие за раз только небольшую часть хитов. Ниже представлен разбор наиболее распространённых методов[3][4].

### 2.1 Поиск треков

Глобальный метод — анализ через преобразование Хафа

Преобразование Хафа заключается в переходе от пространства точек хита ( $x, y, z$  в ДПСК,  $\rho, \theta, \phi$  в сферической системе координат, и другие), в которых трек задаётся набором параметров, к пространству параметров, в котором все кривые задаются набором координат точек хита. При этом каждому хиту соответствует кривая в пространстве параметров. Если множество кривых пересекает некоторую область параметров, то допустимо предположение, что эти точки (или часть из них) принадлежат одному треку с параметрами, близкими к параметрам области пересечения. Эта область может быть определена рядом методов, например искусственной сетчаткой (созданием матрицы-аккумулятора в пространстве параметров), сдвигом области поиска и другими.

Метод удобен для использования в случае известной формы треков, поскольку позволяет провести аналитическое преобразование Хафа. Сложность метода в таком случае (при использовании метода искусственной сетчатки)  $O(N \cdot n_a \cdot n_b)$ , что может оказаться неприемлемым в случае большого  $n_a, n_b$ .

Локальный метод — фильтрация Калмана

Фильтрация Калмана представляет собой метод определения принадлежности хитов одному треку посредством перебора хитов в каждой плоскости и выбора хита, соответствующего минимальной сумме отклонения от предсказанного, на основе предыдущих хитов, хита и отклонения от экспериментально полученных хитов. Метод осуществляется в несколько этапов: задание начальных параметров, итеративный проход вдоль всех хитов, сглаживание (повторный проход в обратном направлении).

Метод удобен для использования в случае неизвестной формы треков, однако может оказаться более сложным. Сложность (при отсутствии необходимости использовать дополнительные методы комбинаторики)  $O(N^2)$ .

## 2.2 Фитирование

Глобальный метод — метод Пирсона

Метод Пирсона (хи-квадрат) заключается в минимизации суммы отклонений гипотетического трека от экспериментально полученных хитов с весом, обратно пропорциональным неопределённости измерения:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(y_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2}$$

Метод удобен для использования в случае известной формы треков, поскольку позволяет найти абсолютный минимум функционала аналитически. В таком случае сложность  $O(N)$ .

Локальный метод — фильтрация Калмана

Фильтрация Калмана может быть использована не только для поиска треков (см. подраздел 2.1), но и для фитирования. Алгоритм совпадает с алгоритмом для фитирования, однако особое значение в этом случае имеет последний этап анализа хитов — сглаживание, поскольку это действие проводится именно для более точного определения параметров трека.

Метод может быть безальтернативным в случае сложных или неизвестных траекторий треков, но в остальных случаях сложен и предоставляет недостаточно точные (в сравнении с методом Пирсона) данные.

### 3 НАПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ТРЕКИНГА

Ниже представлены этапы написания алгоритма, вычисляющего параметры трека на основе экспериментальных точек: набор точек  $ZX$ ,  $ZY$  и  $ZXY$ .

#### 3.1 Выбор методов

Методы нахождения треков и фитирования выбираются так, чтобы лучше всего соответствовать кинематике частиц в эксперименте и техническим характеристикам установки.

Каждая частица, являющаяся продуктом распада каона, создаёт два линейных трека: до и после электромагнита. Параметры, определяемые по движению частицы в магнитном поле, могут быть рассчитаны на основе изменения угла импульса при прохождении магнита. Наибольшее значение имеет тот факт, что в отсутствии сильного магнитного поля продукты распада движутся по линейным траекториям. Это обстоятельство позволяет значительно упростить код, используя аналитические выражения. Глобальные методы нахождения треков и фитирования — преобразование Хафа и хи-квадрат — позволяют это сделать.

При достаточно тщательном отборе кандидатов (что достигается подбором параметров при нахождении треков через преобразование Хафа), фильтрация может быть произведена перебором, нахождением наилучшего хи-квадрат, проверкой соответствия наборов хитов экспериментальной установке.

#### 3.2 Описание алгоритма

Алгоритм был написан на языке программирования C++ на основе фреймворка ROOT, являющегося стандартом в физике высоких энергий. Необходимые объекты (хиты, треки, бины искусственной сетчатки) были реализованы с помощью классов. Работа программы предусматривает отдельное нахождение треков в плоскостях  $ZX$  и  $ZY$  (данные с дрейфовых камер), сшивку через хиты с тремя координатами (данные с падового годоскопа) и аналитическое нахождение параметров трека отдельно в двух плоскостях в соответствии с линейной независимостью членов в сумме критерия хи-квадрат. При написании была учтена необходимость настройки параметров преобразования Хафа (пределы значений, число бинов по обеим осям, степень перекрытия), что позволяет проводить пробный анализ смоделированных данных для определения необходимых параметров. Отбор кандидатов реализован посредством отбора треков с наибольшим числом хитов и наименьшим значением хи-квадрат; отбор кандидатов может быть дополнен дополнительными проверками на основе готовых методов.

#### 3.3 Передача данных

Разработка быстрого и удобного метода передачи экспериментальных данных для анализа затрагивает вопрос разработки новой архитектуры всей программы реконструк-

ции событий на установке ОКА и требует длительной работы. Поэтому на данный момент для передачи данных (смоделированных) используется вспомогательный код.

## 4 ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Оценка параметров трека играет важную роль в алгоритме реконструкции: характерные значения позволяют не только производить отладку, проверяя физичность получающихся значений, но и оптимизировать работу программы (что особо важно при использовании преобразования Хафа).

В эксперименте движение продуктов распада описывается двумя прямыми, соединенными дугой внутри электромагнита (без учёта множественного рассеяния на детекторах и пренебрежимо малых потерь при ускоренном движении в электромагните), поэтому параметры треков могут быть оценены из геометрии экспериментальной установки. На установке есть несколько устройств, определяющих ограничения геометрии трека[5].

### 4.1 Охранная система

Охранная система включает в себя детекторы на границе распадного объёма и боковой гамма-детектор (БГД, BGD, GAMS-EGS).

Первый набор детекторов включает в себя 670 сцинтилляционных детекторов из скандия и свинца, данные с которых снимаются с помощью wls-волокна, сгруппированного в 300 каналов. Назначение этой части охранной системы — отсеять события, в которых продукты распада двигались против оси установки или перпендикулярно ей.

Второй детектор — боковой гамма-детектор — представляет собой гамма-калориметр, состоящий из 1050 блоков свинцового стекла, с окном размером  $80 \times 80$  см<sup>2</sup>. Детектор позволяет отсекал события, в которых гамма-кванты вышли из распадного объёма под слишком большим углом к оси установки.

### 4.2 Электромагнит СП-40

Электромагнит расположен в центре установки (формально,  $z = 0$ ), до и после него установлены дрейфовые камеры, позволяющие восстановить 2 прямые, из которых состоит трек. Апертура магнита составляет  $200 \times 140$  см<sup>2</sup>, что задаёт верхние границы для отклонения частиц от оси детектора. Стоит учитывать, что отклонение частиц от начального направления при прохождении через электромагнит значительно для измерения импульса, но достаточно мало, чтобы не учитывать его при оценке геометрических параметров (этим обусловлена геометрия установки, в которой падовый годоскоп расположен на том же расстоянии от электромагнита, что и распадный объём, измеряя при этом координаты в меньшей области; конкретные характерные значения отклонений могут быть получены из моделирования).

### 4.3 Падовый годоскоп

Роль падового годоскопа и его устройство описаны ранее (см. раздел 1.3). Отметим здесь, что его область измерения координат на порядок меньше, чем размеры апертуры магнита, что значительно уменьшает верхние границы параметров возможных треков.



таким детектором является падовый годоскоп. Поскольку треки различимы только при прохождении через разные ячейки годоскопа, число бинов при анализе определяется диапазонами значений параметров, при которых треки проходят через одну и ту же ячейку. Диапазон  $b$  определяется сдвигом трека вдоль измеряемой координаты ( $x$  или  $y$ ), в то время как диапазон  $a$  можно определить по формуле:

$$\Delta a = \arctg\left(\frac{x+119.5}{12931}\right) - \arctg\left(\frac{x}{25562}\right), \quad x \in (-956; 836.5) \text{ с шагом } 119.5$$

Проведя численный расчёт, были получены характерные значения:

$$\Delta a = 0.025, \quad \Delta b = 0.1195$$

Тогда число бинов:

$$N_a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{\Delta a} \approx 6, \quad N_b = \frac{b_{\max} - b_{\min}}{\Delta b} \approx 26$$

Также можно оценить необходимую степень перекрытия:

$$\frac{a_{\max} - a_{\min}}{N_a \cdot \Delta a} = 0.99 \Rightarrow 1\%, \quad \frac{b_{\max} - b_{\min}}{N_b \cdot \Delta b} = 0.96 \Rightarrow 4\%$$

## 5 ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Для того чтобы проверить эффективность написанного кода, необходимо проверить его работу на смоделированных данных. При этом есть возможность оценивать правильность реконструкции, поскольку смоделированные данные могут включать истинные значения параметров треков и информацию о принадлежности конкретных хитов определённым трекам. Вся работа проводилась в несколько этапов.

### 5.1 Подготовка данных

Как было сказано ранее (см. раздел 3.3), разработка всего алгоритма реконструкции треков возможна только в контексте полной переработки архитектуры программы реконструкции эксперимента ОКА. Поскольку текущая работа связана лишь с реконструкцией треков по хитам, для проверки эффективности алгоритма необходимо подготовить вспомогательную программу, которая будет предоставлять смоделированные данные в удобной форме.

Действующая программа моделирования распадов тесно связана с устаревшей программой реконструкции, в связи с чем получение необходимых данных проблематично. Поэтому для первичной проверки эффективности алгоритма было принято решение частично использовать уже реконструированные данные. Этот подход не позволяет получить полную информацию о том, как алгоритм может работать с экспериментальными данными, но позволяет увидеть общие проблемы при его использовании на характерных для эксперимента данных.

Для проверки работы алгоритма был выбран распад  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ <sup>2</sup>. Помимо того, что трёхчастичный распад позволяет проверить правильность нахождения множества треков, он не относится к редким распадам, так что статистика для него является более достоверной.

### 5.2 Анализ смоделированных данных

Для проверки эффективности алгоритма проводилась реконструкция треков на основе смоделированных данных.

Из всех событий необходимо было удалить события, в которых точная реконструкция треков была принципиально невозможна. В наших данных этому соответствовал случай прохождения нескольких треков через одну ячейку годоскопа (поскольку в этом случае остаётся неразрешённой проблема XY-неоднозначности (см. раздел 1.3)).

При обработке оставшихся событий проводилось сопоставление наборов хитов в реконструированных треках с наборами хитов в истинных треках один к одному. В случае точного совпадения хитов реконструированных треков с хитами истинных треков событие считалось обработанным корректно.

---

<sup>2</sup>Слабый распад через виртуальный  $W^+$ , образующийся при распаде  $\bar{s} \rightarrow \bar{u} + W^+$ .  $B \approx 5.59\%$ . Также в тройке самых частых распадов:  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ,  $B \approx 56.55\%$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ,  $B \approx 22.67\%$

Для корректно обработанных событий определялось среднее по выборке относительное отклонение параметров треков от истинных. Для того чтобы оставить только события с параметрами треков, близкими к истинным, далее рассматривались только события, в которых отклонение не превышало заранее заданного значения (20% для результата, представленного в отчёте).

При обработке небольшой части данных были уточнены значения параметров в преобразовании Хафа (см. раздел 4). Так, диапазон свободного параметра оказался примерно в 2 раза меньше оценённого сверху. Соответственно, необходимое число бинов в разбиении искусственной сетчатки вдоль оси свободного параметра в 2 раза меньше.

$$b \in (-0.75; 0.75) \text{ м} \quad N_b = 13$$

В результате обработки всего набора данных были получены следующие значения эффективности работы текущей версии алгоритма:

- Всего событий: 500000
- Из них принципиально возможен полный трекинг: 477923 (удалено  $\approx 4.4\%$ )
- Из них событий с полностью правильной реконструкцией и значениями параметров, достаточно близкими к истинным: 78779 (всего  $\approx 16.5\%$ )

Помимо этого, среди корректно реконструированных событий есть случаи значительного ( $\gtrsim 10$ ) относительного отклонения параметров от истинных.

### 5.3 Анализ результата

Результат неудовлетворительный, однако его можно объяснить логикой алгоритма и спецификой данных.

Типичный вид данных после преобразования Хафа представлен на рисунке 5. Специфика заключается в том, что два из трёх треков почти всегда имеют близкие параметры, в то время как параметры третьего далеки от параметров первых двух. Это создаёт сложность при анализе в пространстве Хафа с помощью искусственной сетчатки постоянного биннинга: слишком малое число бинов не позволяет различить два близких трека, а слишком большое число бинов усложняет алгоритм и, кроме того, не гарантирует решение проблемы. Примеры преобразования Хафа для таких случаев представлены на рисунках 6а и 6б.

Проанализировав типичный вид данных, можно понять, почему алгоритм с постоянным биннингом искусственной сетчатки не позволяет получить корректный результат: обособленный трек, обычно, реконструируется без проблем, в то время как два близлежащих трека находятся фильтрацией большого числа кандидатов (фактически, перебором). При этом нахождение истинных треков по наименьшему  $\chi^2$  не гарантирует правильный результат, поскольку треки фактически становятся неразличимы в пределах погрешности.

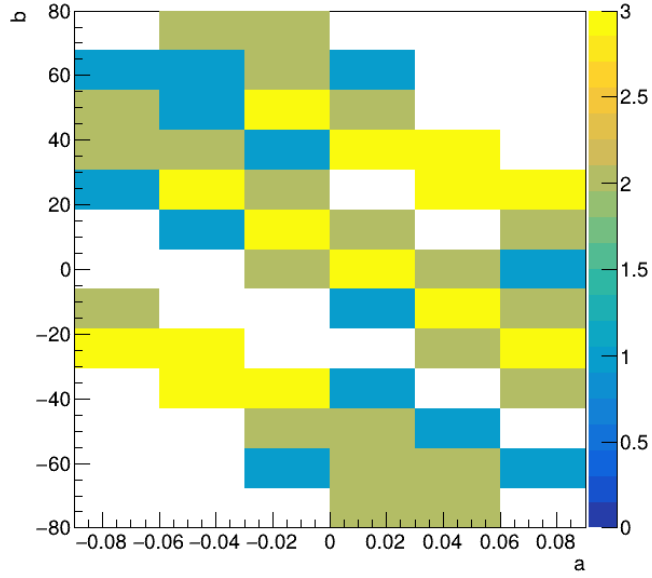
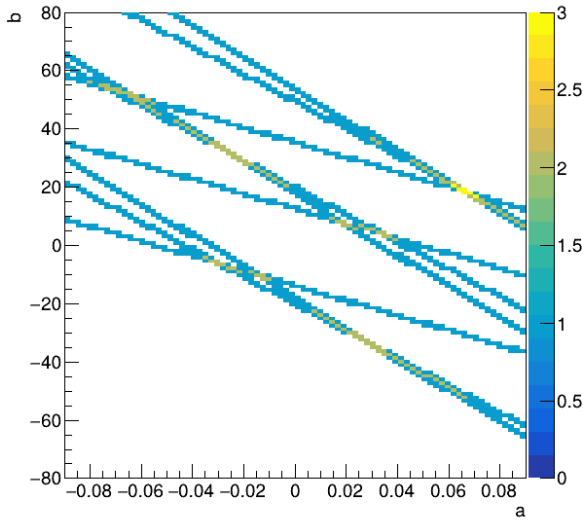
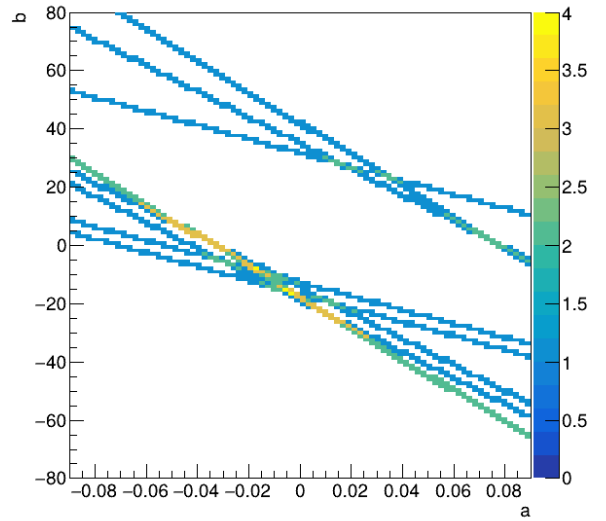


Рис. 5: Пример вида пространства параметров в результате преобразования Хафа для смоделированного  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$  распада



(a) Пример данных, наиболее удобный для анализа



(b) Пример данных, непригодных для анализа

Рис. 6: Примеры результата преобразования Хафа для смоделированного  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$  распада  
(создано исключительно для демонстрации)

## 6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы был разработан прототип алгоритма реконструкции треков для экспериментальной установки ОКА, ориентированный на обработку данных с дрейфовых камер и падового годоскопа.

На основе анализа кинематики частиц в эксперименте и технических характеристик детекторов были выбраны глобальные методы: преобразование Хафа для поиска треков и метод хи-квадрат для фитирования. Это позволило использовать аналитические выражения для линейных треков, что упростило программную реализацию.

Алгоритм реализован на языке C++ с использованием фреймворка ROOT. Обеспечена раздельная обработка проекций ZX и ZY, сшивка треков через трёхмерные хиты падового годоскопа, а также возможность автоматической настройки параметров преобразования Хафа (диапазоны значений, число бинов, степень перекрытия).

Исходя из геометрии установки ОКА и технических характеристик детекторов, были сперва оценены, а позже уточнены при обработке экспериментальных данных параметры преобразования Хафа. Оценены численные оценки диапазонов параметров треков: коэффициент наклона  $a \in (-0,08; 0,08)$ , свободный член  $b \in (-0.75; 0.75)$  м, число бинов  $N_a = 6$ ,  $N_b = 13$ , степень перекрытия 5%.

Алгоритм был протестирован на смоделированных данных для распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$  (500000 событий). Из общего числа событий полный трекинг принципиально возможен в 477923 случаях ( $\approx 95,6\%$  после удаления событий с XY-неоднозначностью). Полностью корректная реконструкция с отклонением параметров не более 20% достигнута в 78779 событиях, что составляет  $\approx 16,5\%$  от числа принципиально возможных.

Анализ результата обработки смоделированных данных позволил найти возможные причины неудовлетворительного результата. Предполагается, что алгоритм не соответствует специфике данных: постоянный биннинг при анализе результата преобразования Хафа не позволяет различить два близлежащих трека без кратного увеличения числа бинов для анализа.

Проблема может быть решена несколькими способами. Во-первых, модернизацией алгоритма на основе преобразования Хафа (изменение метода самого преобразования Хафа, например использование взвешенного преобразования, реализованного в ROOT; изменение метода поисков треков, например использование модернизированного преобразование Хафа с построением дерева по бинам разного размера), во-вторых, использованием дополнительных данных при реальном анализе (данные с калориметров HCAL, GAMS-2000 и с охранной системы), в-третьих, пересмотром выбора методов, лежащих в основе (рассмотрение локального метода поиска треков на основе фильтрации Калмана).

Помимо этого, среди корректно реконструированных событий есть случаи значительного отклонения параметров от истинных, что требует дополнительного обсуждения.

## Список литературы

- [1] Victor Kurshetsov. Status of "oka" experiment. Доклад, ИИЕР-Protvino, 2009.
- [2] V. F. Kurshetsov E. N. Gushchin. Matrix hodoscopes for the oka (protvino) and na62 (sps, cern) experimental setups. Article, Physics of Atomic Nuclei, 2011.
- [3] Rudolf Frühwirth and Are Strandlie. Pattern Recognition, Tracking and Vertex Reconstruction in Particle Detectors. Institute of High Energy Physics Austrian Academy of Sciences Wien, Austria; Norwegian University of Science and Technology Gjøvik, Norway, 2021.
- [4] Nils Braun. Combinatorial Kalman Filter and High Level Trigger Reconstruction for the Belle II Experiment. 2019.
- [5] О. П. Ющенко. Исследования  $ke3$  распада в эксперименте ОКА. Доклад, ИИЕР-Protvino, 2018.
- [6] А. В. Охотников. Калибровка детекторов установки ОКА ускорителя У-70. Дипломная работа магистра, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2022.