

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени  
М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ СТОЛКНОВЕНИЯ СОБЫТИЙ ПРИ  
ПОМОЩИ ДЕТЕКТОРА ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
МНОГОЦЕЛЕВОГО ДЕТЕКТОРА НА УСКОРИТЕЛЬНОМ  
КОМПЛЕКСЕ ИОННОГО КОЛЛАЙДЕРА НА БАЗЕ НУКЛОТРОНА  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.»**

Выполнил студент 409 группы:  
Барышников Виктор Михайлович

---

подпись студента

Научный руководитель:  
профессор, доктор физ.-мат. наук  
Ольшевский Александр Григорьевич

---

подпись научного руководителя

Научный консультант:  
научный сотрудник ЛФВЭ ОИЯИ  
Румянцев Михаил Михайлович

---

подпись научного консультанта

Допущен к защите \_\_\_\_\_  
Заведующий кафедрой академик РАН  
Матвеев В.А.

---

подпись зав. кафедрой

Москва 2021.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТ MPD НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA И ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СИСТЕМА TOF ДЕТЕКТОРА MPD.....	5
1.1. Эксперимент MPD.....	5
1.2. Требования к времяпролетной системе TOF.....	7
1.2.1. Базовые требования.....	7
1.2.2. Эффективность разделения частиц TOF.....	7
1.2.3. Оценка загруженности и скорости счета.....	10
1.3. Детектор для TOF.....	11
1.3.1. Детектор.....	11
1.3.2. Конструкция детектора.....	12
1.3.3. Испытания детектора.....	14
1.4. Механическая конструкция системы TOF.....	16
1.5. Считывающая электроника и система сбора данных.....	19
1.5.1. Предусилители для TOF.....	19
1.5.2. Время-цифровой преобразователь TDC72VHL.....	20
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ СТОЛКНОВЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE НА LHC.....	21
2.1. Описание эксперимента.....	21
2.2. Выбор событий и треков.....	22
2.3. Методы определения времени столкновения от события к событию.....	23
2.4. Измерение времени столкновения детектором TOF.....	23
2.5. Комбинация измерений.....	24
ГЛАВА 3. ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ СТОЛКНОВЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD.....	26
3.1. Моделирование столкновений тяжелых частиц и реконструкция полученных данных.....	26
3.2. Выбор событий и треков.....	27
3.3. Методы определения времени столкновения.....	27
3.4. Измерение времени столкновения детектором TOF MPD.....	28
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	31
4.1. Эффективность определения сорта частиц.....	31
4.2. Результаты программного измерения времени столкновения и разрешения времени столкновения.....	35
4.3. Влияние разрешения измеренного времени столкновения детектором TOF MPD на эффективность идентификации частиц.....	38

4.4. Вычислительные ресурсы, требуемые для программного метода определения времени столкновения.....	39
ВЫВОДЫ.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	42
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	43

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей эксперимента MPD является изучение свойств горячей и плотной барионной материи при столкновениях легких и тяжелых ионов в диапазоне энергий сверхпроводящего коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Многоцелевой детектор разработан способен регистрировать фотоны, электроны и заряженные адроны. MPD должен обеспечивать высокоточные измерения всех свойств частиц, которые родились в результате столкновений ядер. Одна из главных целей детектора — определение типов частиц. В этом процессе задействованы разные системы детектора: время-проекционная камера (Time Projection Chamber — TPC), система идентификации частиц на основе времени пролета (Time-Of-Flight — TOF), калориметр (Electromagnetic Calorimeter — Ecal) и быстрый передний детектор (Fast Forward Detectors — FFD) (Рисунок 1).

Цели и задачи настоящей работы:

- 1) Ознакомление с программным обеспечением FairRoot, FairSoft, MpdRoot для моделирования столкновений тяжелых частиц в эксперименте MPD и реконструкции полученных данных от детекторов;
- 2) Разработка и реализация программных методов определения времени столкновения ионов в эксперименте MPD, анализ полученных данных.

Методы исследования:

- Изучение и анализ научной литературы по данной тематике, ознакомление с методами определения времени пролета частиц и времени столкновения события, применяемых в отечественных и зарубежных экспериментах;
- Моделирование, обработка и анализ полученных данных.

Актуальность:

- Амбициозные физические цели MPD требуют превосходных возможностей идентификации частиц с максимально возможным охватом фазового пространства. Идентификация заряженных адронов (PID) при промежуточных импульсах 0,1 — 2 ГэВ/с достигается с помощью измерений времени пролета (TOF), которые дополняются информацией о потерях энергии ( $dE / dx$ ) от детекторных систем TPC и IT. Более точное и эффективное определение времени столкновения новыми программными методами позволит качественнее решить поставленные задачи в эксперименте MPD.

# ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТ MPD НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA И ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СИСТЕМА TOF ДЕТЕКТОРА MPD.

## 1.1. Эксперимент MPD.

NICA (англ. Nuclotron-based Ion Collider fAcility) — сверхпроводящий коллайдер протонов и тяжёлых ионов, строящийся с 2013 года на базе Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ), в городе Дубна Московской области.

Многоцелевой детектор (MPD) предназначен для исследования горячей и плотной барионной материи при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне атомных масс 1 — 197 с энергией столкновения в системе центра масс до  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ (для Au79+).

Центральный детектор установки MPD состоит из цилиндрической части и двух торцевых частей, расположенных внутри магнитного поля. Цилиндрическая часть представляет собой набор различных детекторных систем, окружающих точку взаимодействия и предназначенных для реконструкции и идентификации как заряженных, так и нейтральных частиц в области псевдобыстрот  $|\eta| \leq 1.3$ . Детекторы в торцевых частях идентифицируют частицы и измеряют параметры в диапазоне псевдобыстрот  $1.3 < |\eta| < 2$ . Пучки ионов сталкиваются внутри прямого отрезка вакуумной камеры ускорителя, область столкновения пучков имеет размер  $|z| \leq 25$  см.

Цилиндрическая часть, показанная на рис. 1, состоит из различных детекторов, окружающих точку взаимодействия. Она включает в себя:

- Время-проеционная камера (Time Projection Chamber — TPC) и кремниевый внутренний трекер (silicon Inner Tracker — IT). Оба субдетектора (IT и TPC) должны обеспечивать точное нахождение треков, определение импульса, реконструкцию вершин;
- Времяпролетный детектор (TOF) и электромагнитный калориметр (EMCal).



## 1.2. Требования к времяпролетной системе ТОФ.

### 1.2.1. Базовые требования.

Основные требования к системе ТОФ:

- Высокая гранулярность для обеспечения загрузки системы ниже 15%;
- Хорошее координатное разрешение положения точек взаимодействия (hits — “хиты”) для обеспечения эффективного согласования ТОФ с ТРС;
- Высокая геометрическая эффективность и эффективность регистрации частиц (лучше 95%);
- Разделение пионов и каонов до  $p_t < 1.5$  ГэВ / с;
- Разделение протонов и антипротонов с  $p_t < 3$  ГэВ / с;
- Элементы детектора ТОФ должны работать в магнитном поле 0.5 Тл.

### 1.2.2. Эффективность разделения частиц ТОФ.

Для идентификации заряженной частицы (реконструкции массы) необходимо измерить следующие параметры: импульс частицы, длину ее трека и время полета от точки взаимодействия до ТОФ-детектора:

$$m^2 = \frac{p^2}{c^2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\beta} \right)^2 - 1 \right] \quad (1)$$

где  $m$  — масса частицы,  $p$  — импульс,  $\beta = (L / Tc)$  — скорость частицы относительно скорости света. Ширина пиков в распределении  $m^2$  зависит как от разрешения по импульсу, так и от разрешения времени пролета. Аналитическая форма для ширины  $m^2$  как функции разрешения по импульсу  $\sigma_p$  и разрешения времени пролета определяется с помощью уравнения (1). Ошибка определения длины трека  $L$  приводит к увеличению ширины временного распределения, которая включается в разрешение ТОФ,  $\sigma_t$ ,

$$\sigma_{m^2}^2 = 4 \cdot m^4 \cdot \left( \frac{\sigma_p}{p} \right) + 4 \cdot p^4 \cdot \left( \frac{\sigma_t}{\beta_t} \right) \quad (2)$$

Импульсные спектры вторичных частиц при энергиях столкновения NICA, возникающих в областях псевдобыстрот  $|\eta| < 1.2$  и  $1.2 < |\eta| < 2$  для минимальной (4 ГэВ) и максимальной (11 ГэВ) энергий столкновения представлены на рис. 2. Средний импульс пионов для энергии 4 ГэВ составляет около 300 МэВ / с, а для 11 ГэВ — около 400 МэВ / с.

Как известно из общей теории относительности, частица с массой  $m$  и импульсом  $p$  имеет скорость:

$$\beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}} \quad (3)$$

Время прохождения расстояния  $L$  для любой частицы со скоростью  $\beta$  определяется выражением:

$$T = \frac{L}{c \cdot \beta} \quad (4)$$

Используя эти уравнения можно сказать, что мощность сепарации частиц с использованием метода времени пролета определяется как число стандартных отклонений между распределениями времени пролета двух частиц с разными массами, но с одинаковым импульсом и длиной трека:

$$N_{\sigma_{TOF}} = \frac{\Delta T}{\sigma_{TOF}} = \frac{L}{c \cdot \sigma_{TOF}} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{m_1^2}{p^2}} - \sqrt{1 + \frac{m_2^2}{p^2}} \right) \quad (5)$$

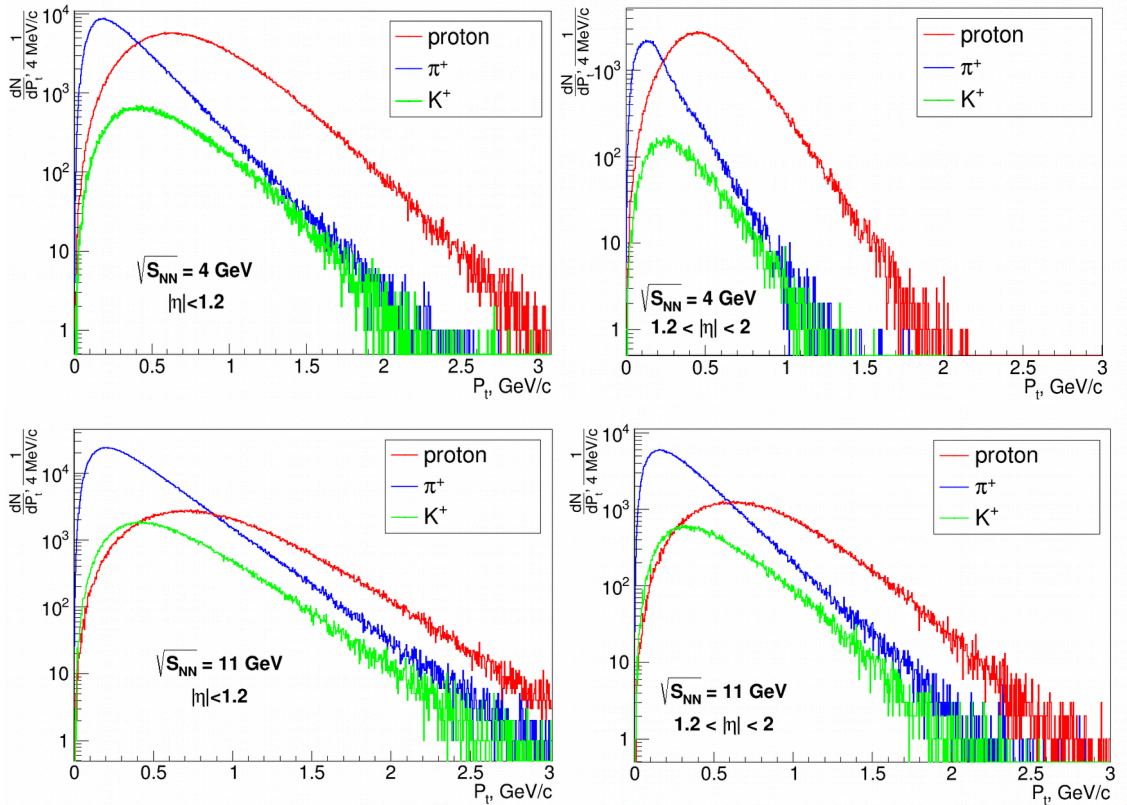


Рисунок 2 — Импульсные спектры пионов, каонов и протонов в двух областях псевдобыстрот:  $|\eta| < 1.2$  (слева) и  $1.2 < |\eta| < 2$  (справа) и для двух энергий центра масс: 4 ГэВ (вверху) и 11 ГэВ (внизу).



Эффективность разделения частиц можно оценить, подставив известные значения в уравнение (2). Наименьшая длина трэка за время измерения времени полета на MPD — 1.5 м. Общее временное разрешение системы TOF лучше 100 пс. Эти условия позволяют надежно разделить пионы, каоны и протоны во всем интервале импульсов рожденных частиц для энергий NICA (рис. 3а, 3б).

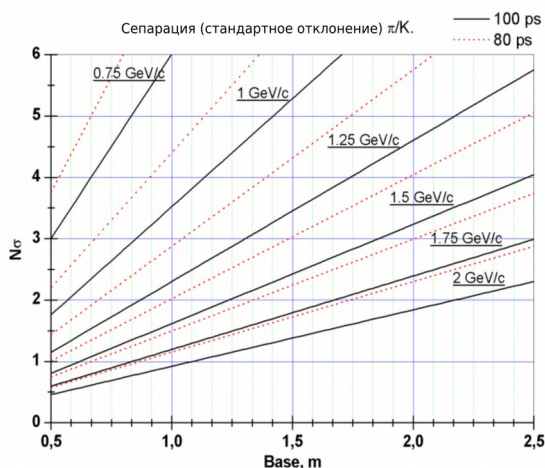


Рисунок 3а — Разделение пионов и каонов в единицах стандартного отклонения в зависимости от базы TOF для разрешений TOF: 80 и 100 пс.

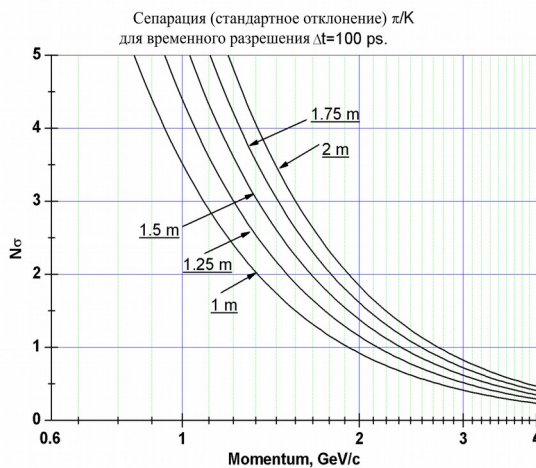


Рисунок 3б — Разделение пионов и каонов в зависимости от импульсов вторичных частиц для различных фиксированных баз (временное разрешение 100 пс).

На рис. 4 представлена доля (в процентах) пионов и каонов в зависимости от импульса. Эти распределения получены для спектров частиц из рис. 2. Можно сделать вывод, что система TOF может разделять пионы на уровне 99% и каоны — почти 98% до импульса 1.5 ГэВ / с

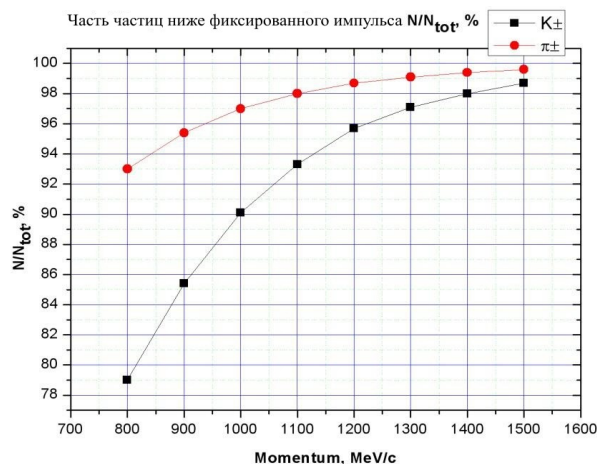


Рисунок 4 — Часть пионов и каонов ниже определенного импульса ( $\sqrt{s}_{NN} = 11$  ГэВ).

### 1.2.3. Оценка загруженности и скорости счета.

Для моделирования использовались взаимодействия Au-Au с полной энергией  $4.5 + 4.5$  ГэВ / п от генератора UrQMD и GEANT4 для отслеживания частиц в детекторе. Диапазон прицельных параметров для минимального смещения:  $b = 0$  — 15.8 фм, для центрального столкновения:  $b = 0$  — 3 фм.

Моделирование загруженности для системы TOF для всех заряженных частиц показано на рис. 5. Максимальная загруженность не превышает 14% даже с учетом вторичных частиц и перекрестных помех на полосах.

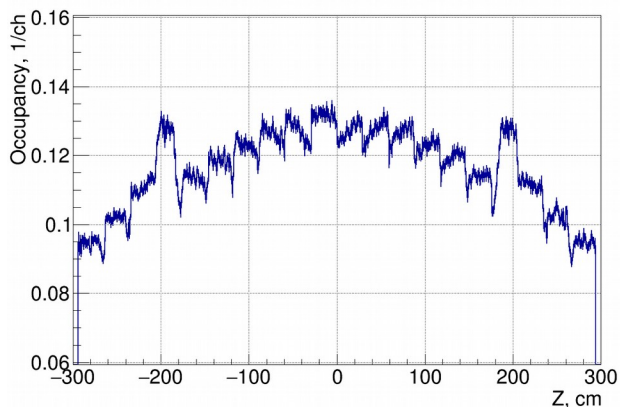


Рисунок 5 — Расчетная средняя загруженность системы TOF как функция Z на одно событие Au-Au с энергией 11 ГэВ.

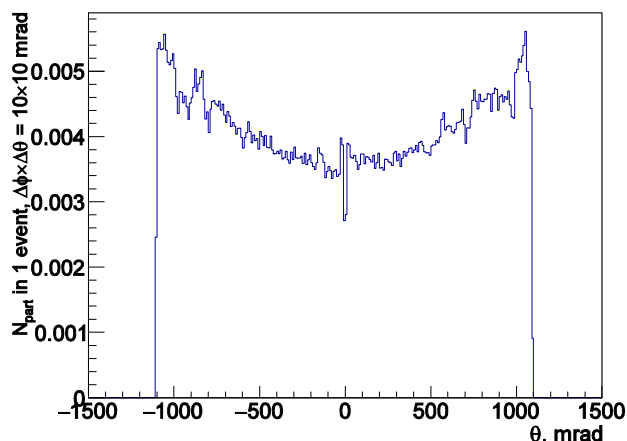


Рисунок 6 — Зависимость кратности заряженных частиц на одно взаимодействие с минимальным смещением от  $(\theta - \pi / 2)$ .

Для оценки скорости частиц использовалась ожидаемая светимость для столкновений  $\text{Au} + \text{Au}$   $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Частота столкновений для событий с минимальным смещением была принята как:

$L \times \sigma = 1 \cdot 10^{27} \times 6 \text{ барн} = 1 \cdot 10^{27} \times 6 \cdot 10^{-24} = 6000 \text{ Гц}$ . Частота взаимодействия при центральных столкновениях ниже 1 кГц. Из рис. 6 видно, что 0.005 заряженных частиц пересекают поверхность  $2.6 \text{ см}^2$  за один раз. Число заряженных частиц, пересекающих  $1 \text{ см}^2$  поверхности TOF за секунду, составляет всего  $N = 6000 \text{ Гц} * 0.005 / 2.6 = 11.5 \text{ Гц} / \text{см}^2$ . Таким образом, система TOF MPD должна продемонстрировать надежную работу при потоке частиц ниже  $12 \text{ Гц} / \text{см}^2$ .

### 1.3. Детектор для TOF.

#### 1.3.1. Детектор.

В TOF используются многозачорные резистивные плоские (плоскопараллельные) камеры (Multigap Resistive Plate Chamber — MRPC), которые широко применяются в таких экспериментах с тяжелыми ионами, как ALICE, PHENIX, STAR, HADES и TOF CBM. Столь широкое использование этого детектора обусловлено тем, что такой детектор имеет хорошие временные характеристики и в то же время достаточно доступен.

МРПК состоит из набора резистивных пластин, разделенных одна от другой с помощью прокладок равного размера, образующих серию газовых зазоров. На внешние поверхности внешних резистивных электродов нанесено высоковольтное покрытие. Внутренние пластины являются электрически неоднородными. Напряжение на внутренних пластинах возникает из-за потока электронов и ионов, создаваемого в газовом зазоре. Резистивные электроды гасят полосу и предотвращают искровой пробой. МРПК работает с высоким

коэффициентом усиления в лавинном режиме. Пластины из флоат-стекла (электрически неоднородные стекла) используются в качестве резистивных плоских электродов.

### 1.3.2. Конструкция детектора.

В качестве детектора МРПК был выбран последний и наиболее удачный стриповый прототип с активной площадью  $600 \times 300 \text{ мм}^2$ . Основными особенностями этого детектора являются три стека и считывание данных из внутреннего стека (рис. 7). Используемая конструкция МРПК с тремя стеками хорошо согласует импеданс между полосой, кабелем и входом предусилителя.

Каждый стек детектора состоит из 5 газовых промежутков шириной 200 мкм, разделенных тонким стеклом с толщиной 280 мкм. Такая толщина стекла была выбрана по двум причинам. Во-первых, это уменьшает радиационную длину детектора, а, во-вторых, улучшает быстродействие детектора. Активная площадь МРПК определяется размером стекла ( $300 \times 600 \text{ мм}^2$ ). Считывание сигналов производится с 24 полосковых электродов («стрипов») шириной 10 мм, которые располагались только на внутренних считывающих электродах. Дифференциальный импеданс такой линии составляет 55 Ом, что позволяет считывать сигнал при помощи двойной параллельной витой пары напрямую в усилитель NINO без использования согласующих резисторов. При этом дисперсии биполярного сигнала не наблюдается и отражение от концов линии стрипов минимально.

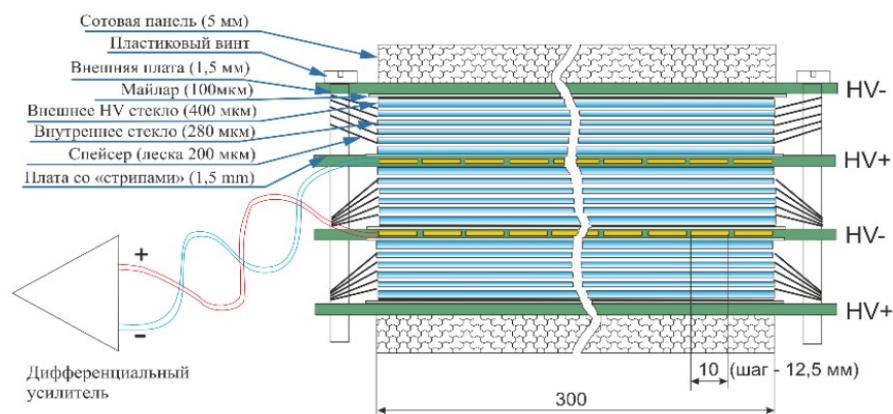


Рисунок 7 — Схема трехсекционной МРПК.

Важной особенностью «стрипового» детектора с тройным стеклом является то, что считывающие полосы расположены только внутри детектора. Наружные платы не металлизированы. Это обеспечивает симметрию между двумя полосами и обеспечивает одинаковую скорость сигналов на анодной и катодной полосах и, как результат, предотвращает дисперсию сигнала.

Габаритные размеры МРПК составляют  $650 \times 330 \times 25 \text{ мм}^3$ , что соответствует печатной плате со считывающими электродами (рис. 8). Печатная плата состоит из 24 полосок шириной 10 мм и длиной 640 мм. Для уменьшения перекрестных помех зазор между полосами составляет 2,5 мм. Таким образом, шаг электродов в этом случае составляет 12,5 мм. Активная поверхность одной полоски составляет около  $80 \text{ см}^2$ . Средняя загрузка этой области (см. рис. 5) не должна превышать 15% для центральных столкновений Au-Au с энергией  $\sqrt{S_{\text{NN}}} = 11 \text{ ГэВ}$ .

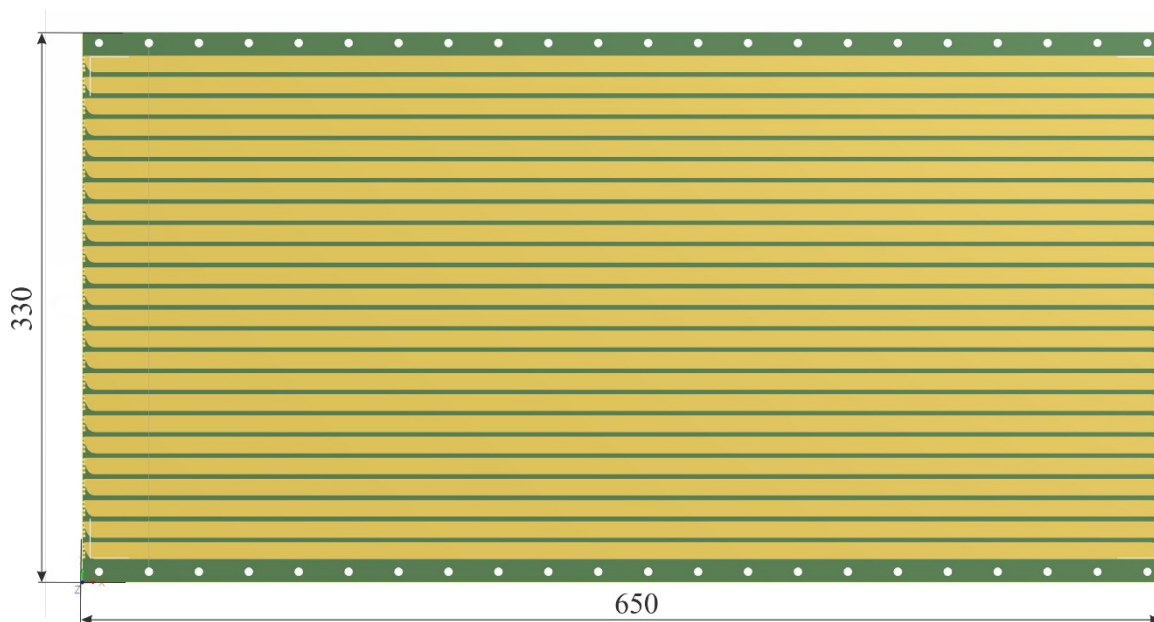


Рисунок 8 — Плата считывания с 24 полосами.

Подводящие электроды выполнены на внутреннем слое печатной платы. Это необходимо для лучшей гальванической изоляции полос от высоковольтного слоя. Сигналы выводятся на внешний слой анодной и катодной плат таким образом, что дифференциальный сигнал считывается через один контактный разъем PLH (рис. 9), который объединяет обе платы.



Рисунок 9 — Контактный разъем PLH на одной полосе печатной платы.

Дифференциальный аналоговый сигнал передается с обоих концов полосы по сдвоенной витой паре (рис. 10) с импедансом 55 Ом на входную электронику. Двустороннее считывание обеспечивает лучшее временное разрешение и определение координаты частицы вдоль полосы с пространственным разрешением  $\sim 5$  мм. Для придания жесткости конструкции на внешнюю часть внешних печатных плат приклеивается сотовая панель из арамидного волокна толщиной 5 мм.

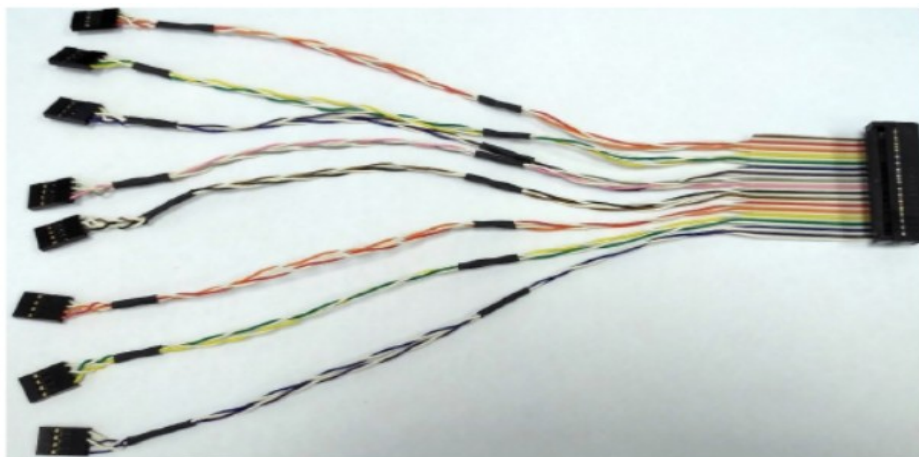


Рисунок 10 — Кабельная сборка с двумя витыми парами для передачи сигналов на электронику.

### 1.3.3. Испытания детектора.

Детекторы были испытаны на пучке дейтронов нуклотрона с энергией 3,5 ГэВ / нуклон. Зависимость временного разрешения и эффективности от приложенного высокого напряжения для различных порогов дискриминатора NINO представлена на рис. 11. Наилучшее временное разрешение для протестированного прототипа составляет 40 пс с эффективностью выше 98%.

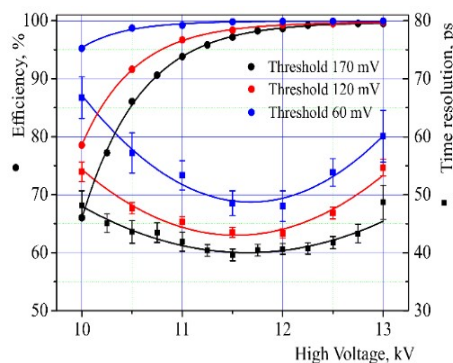


Рисунок 11 — Зависимости эффективности (●) и временного разрешения (■) трехсекционной МРПК при трех разных порогах дискриминации NINO.



Устройство позиционирования позволяет перемещать детектор в направлениях X и Y с точностью до 20 мкм и вращаться в двух плоскостях (XZ и YZ). Временное разрешение вдоль полосы измерялось путем перемещения МРПК в горизонтальном направлении. (рисунок 12).

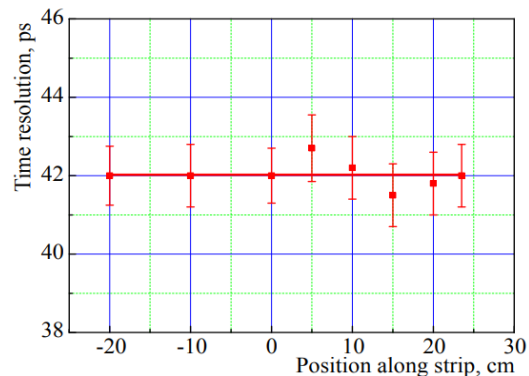


Рисунок 12 — Зависимость временного разрешения от положения частиц вдоль полосы.

Моделирование GEANT показывает, что вторичные частицы могут попадать в TOF-детекторы MPD под углами до 60 градусов. Зависимость временного разрешения от угла между направлением луча и линией поперек полосы представлена на рисунке 13. Во время поворота детектора наблюдались небольшие изменения, но временное разрешение не превышало 50 пс.

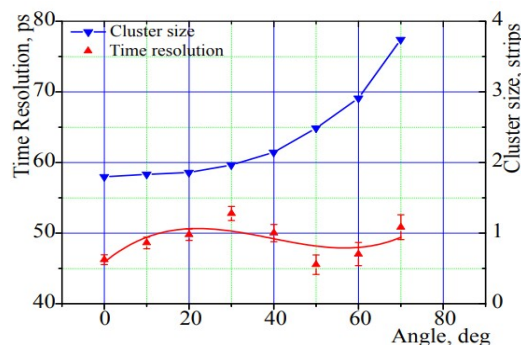


Рисунок 13 — Временное разрешение и зависимость размера кластера от угла частиц.

Также была изучена скоростная способность МРПК с тремя стеками. Частоту частиц определяли сцинтилляционным счетчиком, который считывали на скалере MSC16V с временной выборкой 1 мкс. Наблюдалось, что эффективность и временное разрешение снижались во время облучения (рисунок 14). Эффективность упала с 92% до 74% в течение 1 секунды, когда поток дейтронов составляет около 3 кГц / см<sup>2</sup>. График эффективности МРПК и временного разрешения как функции среднего за 1 секунду потока частиц представлен на рисунке 15.

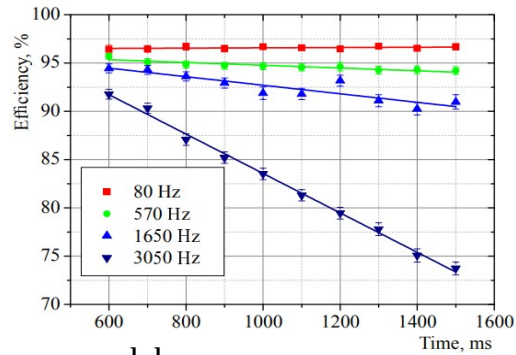


Рисунок 14 — Ухудшение эффективности детектора из-за потока частиц.

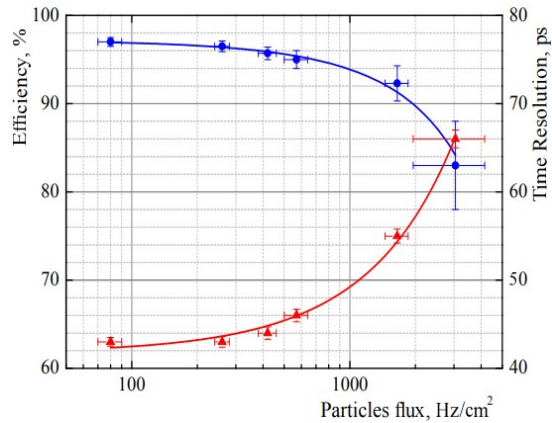


Рисунок 15 — Средняя эффективность и временное разрешение в зависимости от интенсивности.

#### 1.4. Механическая конструкция системы TOF.

Цилиндрическая часть TOF MPD расположена в цилиндре между время-проекционной камерой (TPC) и электромагнитным калориметром (ECal). Внутренний радиус бареля составляет около 1,5 м от оси пучка, а внешний радиус — 1,7 м. Активная поверхность цилиндрической части MPD TOF перекрывает диапазон псевдобыстрот  $|\eta| \leq 1,4$  и  $\sim 330^\circ$  по углу  $\varphi$ . Общая площадь цилиндрической системы TOF составляет около  $52 \text{ м}^2$ . Система детекторов TOF организована по модульному принципу.



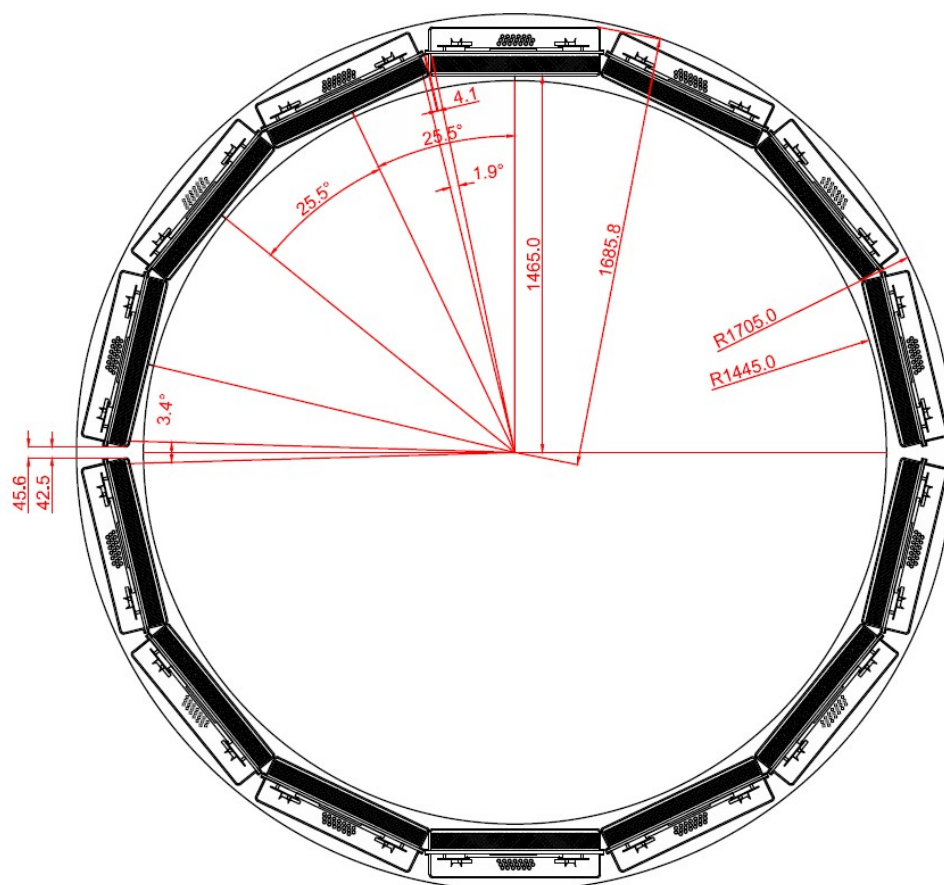


Рисунок 16 — Основные размеры цилиндра TOF в направлении  $\phi$ .

Детектор разделен по  $\phi$  на 14 пар модулей длиной  $\sim 5,9$  м. Максимальное расстояние между двумя модулями не превышает 5 мм. Специальная форма модуля минимизирует мертвую зону внутри сектора. Мертвая зона между модулями в направлении  $\phi$  обусловлена ограниченным пространством. Это не позволяет ставить модули с перекрытием по полному азимуту. Широкие зазоры в горизонтальной плоскости необходимы для опорных конструкций для крепления ТРС.

Каждый модуль TOF состоит из двух отдельных боксов. Внутренняя область бокса заполнена газовой смесью и содержит 10 МРПК. На внешней стороне находятся платы электроники (Front End Electronic — FEE), кабели, газовые и высоковольтные разъемы. Оба бокса изготовлены из алюминиевого профиля и сот толщиной 5 мм. Такая же сотовая панель толщиной 10 мм расположена между внутренним и внешним объемами. В ней есть специальные отверстия для интерфейсной платы (Interface Card — IC), которая обеспечивает передачу сигналов от МРПК к предусилителям. На этой панели также предусмотрены отверстия для газовых и высоковольтных разъемов. МРПК расположены внутри мододулей, как показано на рис. 17. Специальные алюминиевые фиксаторы (рис. 18) служат для установки детекторов в нужное положение.

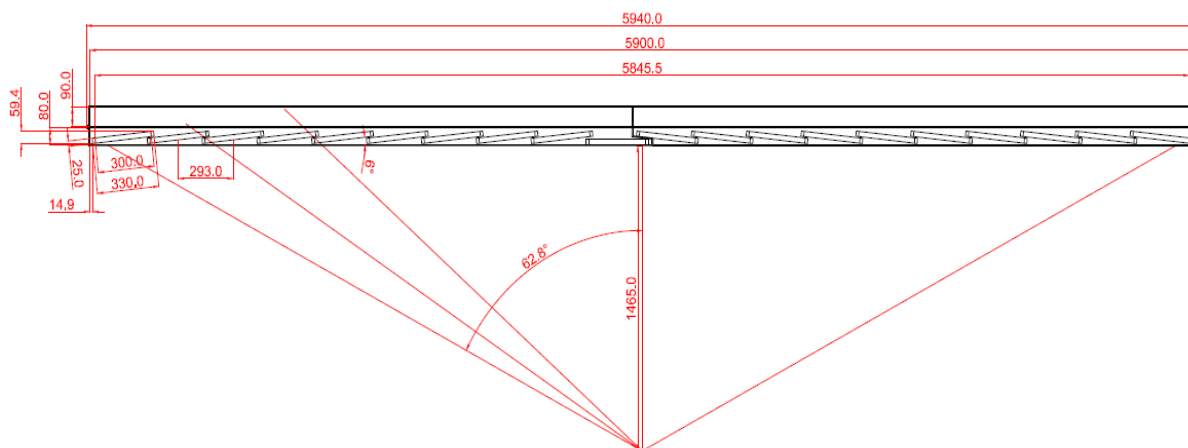


Рисунок 17 — Расположение МРПК внутри газовых боксов вдоль направления луча.

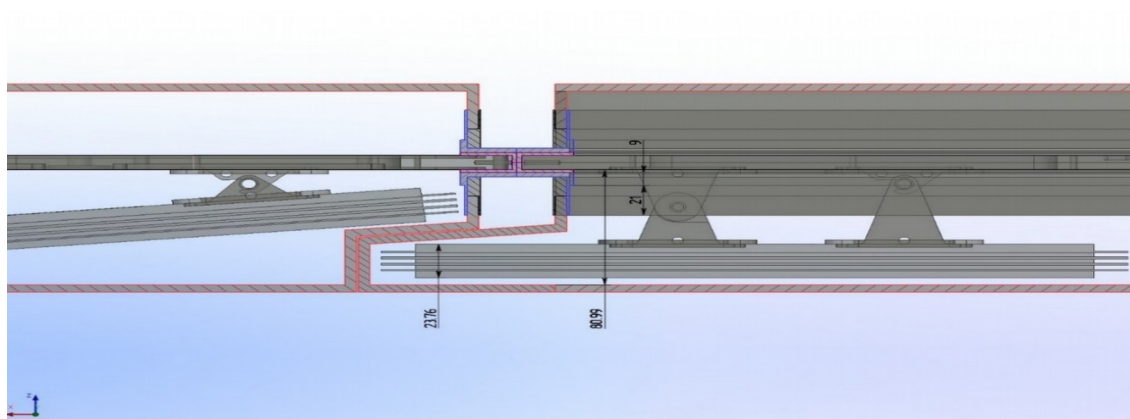


Рисунок 18 — Крепление МРПК внутри газового бокса с помощью специальных элементов.

Соседние МРПК расположены внутри модуля таким образом, чтобы создать перекрытие 1-2 полосы считывания между двумя соседними МРПК на краю активной области: это обеспечит взаимную калибровку МРПК через треки, пересекающие обе МРПК. Сигналы от стрипов МРПК передаются на электронику (FEE) через интерфейсные карты. Микросхемы сделаны из небольших печатных плат и будут прикреплены к верхней крышке бокса, закрывая таким образом газовый объем. Каждая IC (Interface Cards) будет иметь с одной стороны разъемы, обращенные к МРПК, и разъемы для FEE с другой стороны. Для повышения безопасности системы периметр IC залит эпоксидным клеем.

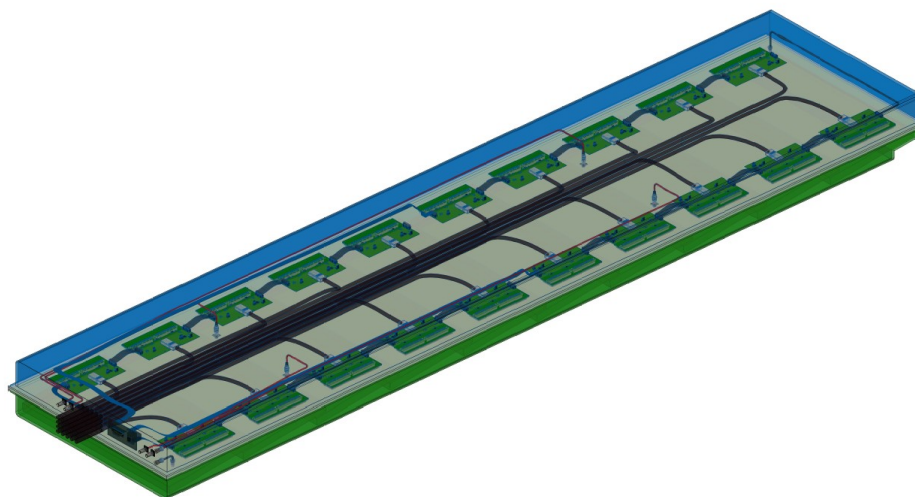


Рисунок 19 — Расположение FEE, кабелей и разъемов внутри модуля.

### 1.5. Считывающая электроника и система сбора данных.

Очень важной частью системы измерения времени пролета является считывающая электроника. Для полного использования превосходных временных характеристик МРПК (многозачерной резистивной пластинчатой камеры) необходима электроника со специальными характеристиками. Сигналы от МРПК должны усиливаться и распознаваться как можно быстрее и без потерь.

Время начала и окончания сигнала должно быть оцифровано и измерено с точностью, намного превосходящей временное разрешение детектора. Считывающая электроника для TOF MPD будет состоять из электроники (FEE) и системы сбора данных (DAQ).

#### 1.5.1. Предусилители для TOF.

Для TOF MPD была разработана 24-канальная плата предусилителя на базе ASIC NINO (специализированная интегральная схема NINO). Эта плата предусилителя адаптирована для двустороннего считывания стрипов МРПК в эксперименте MPD. Габаритные размеры предусилителя 196,5 x 89 мм<sup>2</sup>.

Свойства платы предусилителя MPD TOF:

- стабилизация напряжение питания;
- входной импеданс согласован с импедансом МРПК;
- защита входных каналов от перегрузки;
- конденсаторы на входах для считывания двусторонних стрипов;
- возможность использования в качестве триггера (параллельный выход «или»);
- контроль и управление порогом чувствительности;

- контроль и управление напряжением;
- термоконтроль панели и газового пространства.

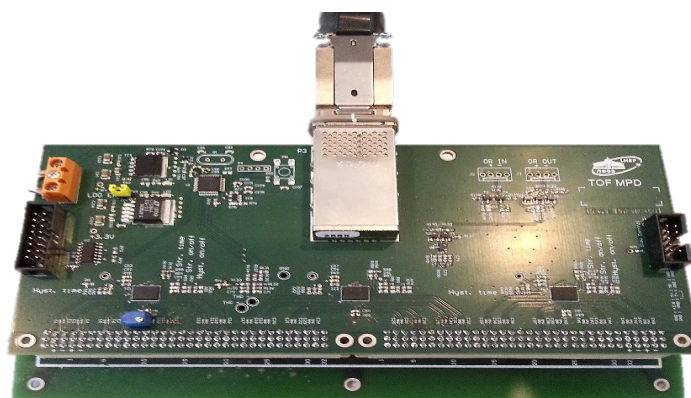


Рисунок 20 — 24-канальная плата предварительного усилителя на базе NINO с выходом разъема СХР.

### 1.5.2. Время-цифровой преобразователь TDC72VHL.

Для считывания TOF MPD был разработан новый время-цифровой преобразователь VME64x TDC72VHL (рис. 21) на базе микросхемы HPTDC. Он используется для оцифровки сигналов LVDS, поступающих с выхода усилителя NINO. Один модуль VME имеет 72 дифференциальных входа (100 Ом) и оснащен разъемами того же типа, что и на предусилителе. К одному такому модулю можно подключить три усилителя. Временная дискретизация TDC72VHL составляет 24,4 пс на ячейку. TDC72VHL обеспечивает возможность точной синхронизации «White Rabbit» (расширение Ithernet, которое обеспечивает субнаносекундную синхронизацию по сетям Ethernet 1G с синхронизацией и передачей данных между его различными элементами) с другими устройствами синхронизации и может работать в автономном режиме.



Рисунок 21 — Время-цифровой преобразователь TDC72VHL с входным разъемом СХР.

## ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ СТОЛКНОВЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE НА LHC.

### 2.1. Описание эксперимента.

Основной задачей эксперимента ALICE на LHC является изучение свойств сильно взаимодействующего плотного и горячего вещества, созданного в столкновениях тяжелых ионов с высокой энергией. Многие физические анализы основаны на способности детектора ALICE выполнять идентификацию частиц (PID — Particle IDentification) с использованием различных и дополнительных методов. В диапазоне промежуточных импульсов (от 0,5 до 3-4 ГэВ / с) эта задача в основном выполняется с использованием измерений времени полета, которые основаны на точном определении времени столкновения события, длины и импульса трека, а также прибытия времени треков до детектора Time-of-Flight (TOF).

Измерение длины трека и импульса определяется внутренней системой слежения (ITS) и время-проекционной камерой (TPC). ITS состоит из шести цилиндрических слоев кремниевых детекторов, расположенных на радиальном расстоянии от 3,9 до 43 см от оси пучка. TPC представляет собой цилиндрическую камеру большого объема с высокой степенью детализации, которая окружает ITS, охватывающую область  $85 < r < 247$  см и  $-250 < z < 250$  см в радиальном направлении «r» и продольном направлении «z» соответственно. Эти детекторы, охватывающие интервал псевдобыстрот  $0,9 \leq \eta \leq 0,9$  для треков, достигающих внешнего слоя TPC, также предоставляют информацию PID посредством измерений удельной потери энергии ( $dE / dx$ ).

Измерение времени пролета частиц основано на детекторе TOF. С другой стороны, время столкновения  $t_{ev}$  определяется с помощью информации, поступающей как TOF, так и от детектора T0.

Детектор T0 состоит из двух массивов черенковских счетчиков T0A и T0C, расположенных по обе стороны от точки взаимодействия на расстоянии 374 см и - 70 см и охватывающих область псевдобыстрот  $4.61 \leq \eta \leq 4.92$  и  $- 3.28 \leq \eta \leq - 2,97$  соответственно. Детектор T0 обеспечивает измерение времени столкновения  $t_{ev}$ . Он также обеспечивает триггер столкновения и контролирует яркость, обеспечивая быструю обратную связь. Измеренное временное разрешение детектора T0 составляет  $\sim 50$  пс для одиночных событий MIP и достигает  $\sim 25$  пс при более высоких кратностях. TOF детектор имеет временное разрешение  $\sim 80$  пс.

Для последующего обсуждения также важен детектор V0. Он состоит из двух сцинтилляционных матриц, построенных вокруг пучка, охватывающих

диапазоны псевдобыстрот  $2,8 \leq \eta \leq 5,1$  (V0A) и  $-3,7 \leq \eta \leq 1,7$  (V0C), которые используются для запуска и выбора событий. В p-Pb столкновениях он также используется для определения кратности столкновений, в то время как в Pb-Pb столкновениях он используется для определения центрального положения по суммированным амплитудам сцинтилляторов V0.

Идентификация частиц с помощью детектора TOF основана на сравнении времени пролета частицы от первичной вершины до детектора TOF и ожидаемого времени при данной гипотезе массы  $t_{\text{exp},i}$  ( $i = e, \mu, \pi, K, p, d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}$ ). Первое определяется как разница между временем пролета  $t_{\text{TOF}}$ , измеренным самим детектором TOF, и временем столкновения  $t_{\text{ev}}$ . Ожидаемое время — это время, которое потребуется частице массы  $m_i$ , чтобы пройти от точки взаимодействия к TOF. Чтобы учесть потерю энергии и последующее изменение импульса трека,  $t_{\text{exp},i}$  рассчитывается как сумма малых приращений времени  $\Delta t_{i,k}$ , каждое из которых является временем, которое тратит частица массы  $m_i$  и импульса  $p_k$  на прохождение вдоль каждого шага распространения к длины  $\Delta l_k$  во время процедуры реконструкции пути:

$$t_{\text{exp},i} = \sum_k \Delta t_{i,k} = \sum_k \frac{\sqrt{p_k^2 + m_i^2}}{p_k} \Delta l_k \quad (6)$$

Следовательно, основной переменной для определения частиц при помощи TOF является  $t_{\text{TOF}} - t_{\text{ev}} - t_{\text{exp},i}$ . Её разрешение:

$$\sigma_{\text{PID},i}^2 = \sigma_{t_{\text{TOF}}}^2 + \sigma_{t_{\text{ev}}}^2 + \sigma_{t_{\text{exp},i}}^2 \quad (7)$$

Неопределенность ( $\sigma_{\text{exp},i}$ ), связанная с отслеживанием и реконструкцией, которая включает в себя оценки потерь энергии в материале, зависит от импульса и от вида частиц. Неопределенность времени столкновения события ( $\sigma_{t_{\text{ev}}}$ ) зависит от метода, используемого для его определения в данном событии.

Простейшая оценка определения частиц (PID) для данной гипотезы массы  $m_i$  затем строится как величина по следующим образом:

$$n\sigma_{\text{TOF},i} = \frac{t_{\text{TOF}} - t_{\text{ev}} - t_{\text{exp},i}}{\sigma_{\text{PID},i}} \quad (8)$$

## 2.2. Выбор событий и треков.

События должны иметь первичную вершину. При анализе использовались только события с восстановленной первичной вершиной в пределах 10 см от номинальной точки взаимодействия вдоль направлений пучка. Кроме того,



события с несколькими реконструированными вершинами были отклонены. Наконец, так как время столкновения является измерением, которое необходимо для идентификации частиц с помощью метода времени полета, выполняемого детектором TOF, то выбираются события, по крайней мере, с одним треком, связанным с попаданием в детектор TOF.

Таким образом, попадание частицы в TOF является минимальным требованием, которому должен удовлетворять ее трек, чтобы ее можно было идентифицировать с помощью процедуры времени полета.

### 2.3. Методы определения времени столкновения от события к событию.

Поскольку пучки частиц имеют небольшой, но конечный размер и неизвестно, какая из частиц в пучках столкнулась, время столкновения имеет естественный разброс от события к событию относительно номинального пересечения пучка. Следовательно, время столкновения  $t_{ev}$  должно измеряться для каждого события отдельно. Если описанные ниже пошаговые процедуры не могут быть использованы,  $t_{ev}$  устанавливается в ноль. Обычно это нулевое значение называется  $t_{ev}^{Fill}$ . Предполагается, что это значение равно нулю, поскольку  $\langle t_{ev} \rangle$  уже вычтено как часть описанной процедуры калибровки. Его разрешение напрямую связано с разбросом вершин вдоль направления луча, оцененным ITS за проход и полученным через  $\sigma t_{ev}^{Fill} = \sigma_{vertex} / c$ . Следовательно, если  $t_{ev}$  не может быть вычислено для каждого события,  $t_{ev}$  принимается за  $t_{ev}^{Fill}$ . Это становится тогда доминирующим членом в разрешении TOF PID (см. уравнение 7).

Чтобы улучшить характеристики TOF PID для каждого события, уменьшая  $\sigma t_{ev}$  в уравнении 7,  $t_{ev}$  может быть вычислено самим TOF ( $t_{ev}^{TOF}$ ), с помощью детектора T0 ( $t_{ev}^{T0}$ ) или их комбинацией ( $t_{ev}^{Best}$ ).

### 2.4. Измерение времени столкновения детектором TOF.

Время столкновения оценивается детектором TOF ( $t_{ev}^{TOF}$ ) для каждого события с помощью процедуры минимизации  $\chi^2$ . Если в событие  $n_{tracks}$  совпадает с соответствующими попаданиями в TOF и удовлетворяет необходимым требованиям, можно определить конкретные комбинации масс  $\vec{m}_i$ , назначая независимо для каждого трека массу  $\pi$ , K или p. Индекс  $i$  указывает на одну из возможных комбинаций ( $m_1, m_2, \dots, m_{n_{tracks}}$ ) среди  $3^{n_{tracks}}$  индексов.

Для каждого трека оценивается следующий вес:

$$W_i = \frac{1}{\sigma_{\text{TOF}}^2 + \sigma_{t_{\text{exp},i}}^2} \quad (9)$$

Затем время события выводится следующим образом, где индекс трека опущен для простоты:

$$t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}(\vec{m}_i) = \frac{\sum_{n_{\text{tracks}}} W_i (t_{\text{TOF}} - t_{\text{exp},i})}{\sum_{n_{\text{tracks}}} W_i} \quad (10)$$

Разрешение задается следующим образом:

$$\sigma_{t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}}(\vec{m}_i) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{n_{\text{tracks}}} W_i}} \quad (11)$$

Затем вычисляется следующий  $\chi^2$ :

$$\chi^2(\vec{m}_i) = \sum_{n_{\text{tracks}}} \frac{((t_{\text{TOF}} - t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}(\vec{m}_i)) - t_{\text{exp},i})^2}{\sigma_{\text{TOF}}^2 + \sigma_{t_{\text{exp},i}}^2} \quad (12)$$

Комбинация  $\vec{m}_i$ , которая минимизирует этот  $\chi^2$ , используется для вывода  $t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}$  с помощью уравнения 10.

Эта процедура уточняется двумя способами. Чтобы избежать возможных смещений PID, которые важны, особенно в событиях с низкой кратностью, трек нельзя использовать для вычисления  $t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}$  для выполнения PID для самого трека. Это означает, что, в принципе, каждый трек должен быть удален из выборки перед вычислением  $t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}$ , повторяя эту процедуру для каждого трека. Такой подход приведет к чрезмерному требованию вычислительных ресурсов при большом количестве треков. Поэтому для оптимизации процедуры треки разделены на десять интервалов по импульсам.  $t_{\text{ev}}^{\text{TOF}}$  вычисляется для каждого импульсного интервала с использованием только треков, принадлежащих другим девяти импульсным интервалам. Наконец, чтобы избежать чрезмерной вычислительной нагрузки из-за комбинаторики, эта оценка выполняется путем разделения выборки треков в событии на несколько подвыборок, после чего берется средневзвешенное значение результатов.

## 2.5. Комбинация измерений.

Для каждого события  $t_{\text{ev}}$  получается путем объединения в одну оценку ( $t_{\text{ev}}^{\text{Best}}$ ) результатов различных доступных методов.



Если измерение  $t_{ev}$  может быть обеспечено только детектором TOF или T0,  $t_{ev}^{Best}$  будет соответствовать  $t_{ev}^{TOF}$  или  $t_{ev}^{T0}$  соответственно. Если они оба доступны, то  $t_{ev}^{Best}$  оценивается по их средневзвешенному значению, где веса являются обратной величиной квадрата разрешения времени столкновения. Если оба метода недоступны то  $t_{ev}$  определяется  $t_{ev}^{Fill}$ .

## ГЛАВА 3. ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ СТОЛКНОВЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD.

Эксперименты MPD и ALICE предназначены для изучения свойств горячей и плотной барионной материи при столкновениях легких и тяжелых ионов и имеют схожую структуру детекторов. В частности, детектор TOF MPD был создан на основе опыта ALICE. Стоит так же отметить то, что программное обеспечение для этих мегапроектов разрабатывалось и разрабатывается на базе ПО Root.

Все это позволило использовать общую идею определения времени столкновения детектором TOF, взятую из рассмотренной ранее одноименной статьи эксперимента ALICE.

### 3.1. Моделирование столкновений тяжелых частиц и реконструкция полученных данных.

Для моделирования столкновений тяжелых частиц, ядер золота, при энергии до  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ на нуклон в системе центра масс в эксперименте MPD и реконструкции полученных данных от детекторов использовался пакет программ Mpdroot, который базируется на FairRoot, FairSoft и Root. В частности, были задействованы программы RunMC и Reco.

RunMC отвечает за моделирование столкновений тяжелых частиц. RunMC использовался вместе с GEANT-3, AuAuss11\_5mb1\_mer.r12.gz и генератором LAQGSM. Данные, полученные при помощи генератора событий LAQGSM, содержат полную информацию об образованных в событиях частицах: тип частицы, ее импульс и другие кинематические характеристики. AuAuss11\_5mb1\_mer.r12.gz — отвечает за данные для столкновения ядер золота в центре масс энергии до  $\sqrt{S_{NN}} = 11$  ГэВ. С помощью пакета программ GEANT-3 и AuAuss11\_5mb1\_mer.r12.gz продукты реакции от столкновения ядер  $Au^{79+}$  проходили через виртуальную установку MPD с использованием метода Монте-Карло. Далее, пакет программ Mpdroot позволил смоделировать отклики детекторов системы MPD. Пришлось несколько модернизировать часть из программ добавив время столкновения  $t_{ev}$  потому, что на данный момент детектор, отвечающий за данные измерения, (по своему назначению — аналог детектора T0 эксперимента ALICE) в ПО Mpdroot не реализован.

Reco — программа для выполнения реконструкции информации о частицах и их треках.

### 3.2. Выбор событий и треков.

Требования для событий и треков:

1. Попадание частицы в систему TOF, так что бы детектор зарегистрировал ее, является минимальным требованием, которому должен удовлетворять трек частицы, чтобы ее можно было идентифицировать с помощью процедуры времени полета.

2. Треки должны иметь первичную вершину. Кроме того, события с несколькими реконструированными вершинами были отклонены. В пакете программ Mrdroot это реализовано с помощью параметра MotherId, который для треков с единственной первичной вершиной равен -1.

3. Так как время столкновения является измерением, которое необходимо для идентификации частиц с помощью метода времени полета, выполняемого детектором TOF, то выбираются только события с минимальным количеством треков. В реализованном методе минимальное количество треков равно 8:

1) при разбиение треков на импульсные интервалы в каждом интервале должно быть минимум 4 трека;

2) при конечном вычисление  $t_{ev}$  и  $\sigma_{t_{ev}}$  необходимо минимум 2 интервала.

4. И TOF и TPC системы детекторов не регистрирует нейтральные частицы, следовательно можно их смело выбраковать. В программе это реализовано с помощью системы условий.

5. Доля треков ионов и составных частиц мала по сравнению с общим числом треков частиц ( $< 7\%$ ), удовлетворяющих предыдущим условиям, следовательно треками ионов и составных частиц можно пренебречь. Это реализовано с помощью системы условий  $|M\_propagation| \leq 1.8 * M\_proton$  и  $PdgCode < 10000$ .

6. Доля треков фотонов мала по сравнению с общим числом треков частиц ( $< 7\%$ ), удовлетворяющих предыдущим условиям, следовательно треками фотонов можно пренебречь. Это реализовано с помощью условия  $PdgCode \neq 22$  ( $pdgcode\_photon$ ).

### 3.3. Методы определения времени столкновения.

Поскольку в реальности пучки имеют небольшой, но конечный размер и неизвестно, какая из частиц в пучках столкнулась, время столкновения имеет естественный разброс относительно номинального пересечения пучков. Следовательно, время столкновения  $t_{ev}$  должно измеряться для каждого события отдельно.

Если описанные ниже процедуры определения времени столкновения не могут быть выполнены, то  $t_{ev}$  устанавливается в нуль. Обычно это нулевое значение называется  $t_{ev}^{Fill}$ . Его разрешение напрямую связано с разбросом вершин вдоль направления луча:

$$\sigma_{t_{ev}^{Fill}} = \frac{\sigma_{vertex}}{c}$$

На данный момент  $\sigma_{t_{ev}^{Fill}}$  с помощью Mpdroot определить нельзя.

### 3.4. Измерение времени столкновения детектором TOF MPD.

Время столкновения оценивается детектором TOF ( $t_{ev}^{TOF}$ ) для каждого события с помощью процедуры минимизации  $\chi^2$ .

Чтобы избежать возможных смещений идентификации частиц (PID), которые важны, особенно в событиях с низкой кратностью, трек нельзя использовать для вычисления  $t_{ev}^{TOF}$  для выполнения PID на самой дорожке. Это означает, что, в принципе, каждый трек должен быть удален из выборки перед вычислением  $t_{ev}^{TOF}$ , повторяя эту процедуру для каждого трека. Такой подход приведет к чрезмерному требованию вычислительных ресурсов при большом количестве треков. Поэтому для оптимизации процедуры было решено разделять треки на интервалы по импульсам таким образом, чтобы в каждом интервале было минимум 4 трека, но не больше 20. Если для события интервалов получилось больше 1, то приоритет отдается большему количеству треков в интервале, а если только один интервал, то стараемся его разбить на пару, но так что бы в каждом было минимум 4 трека. Чтобы избежать чрезмерной вычислительной нагрузки из-за комбинаторики, оценка  $t_{ev}^{TOF}$  и  $\sigma_{t_{ev}^{TOF}}$  для события выполняется путем разделения выборки треков в событии на несколько подвыборок, после чего берется средневзвешенное значение результатов.

Для события, в котором  $N_{tracks}$  треков совпадают с соответствующими попаданиями в детектор TOF и удовлетворяют базовым требованиям, нужно  $N_{tracks}$  треков разделить по импульсам на  $N_{interval}$  интервалов, в каждом интервале будет  $n_{tracks, j}$ ,  $j = 1, \dots, N_{interval}$ . Для каждого из интервалов можно определить конкретные комбинации масс  $\vec{m}_{j,i}$ , назначая независимо для каждого трека две массы из набора  $\pi^\pm, K^\pm, p$  так что бы что квадраты этих масс являлись ближайшими к  $m_{proposed}^2$  (это сделано так, потому что из-за некоторых смоделированных естественных неточностей измерений подкоренное выражение в  $m_{proposed}$  может быть  $< 0$ ). Индекс  $j$  указывает на интервал, индекс  $i$  указывает на одну из возможных комбинаций ( $m_1, m_2, \dots, m_{n_{tracks, j}}$ ) среди  $2^{n_{tracks, j}}$  индексов.

$m_{proposed}^2$  вычисляются следующим образом:

$$m_{proposed}^2 = p^2 \cdot \text{module} \left[ \left( \frac{t \cdot c}{L} \right)^2 - 1 \right]; \quad (13)$$

Для каждого трека из  $j$ -го интервала оценивается  $t_{exp, j, i}$  и  $\sigma_{t_{exp, j, i}}$ , а затем вес  $W_{j, i}$  ( $j = 1, \dots, N_{interval}$ ):

$$t_{exp, j, i} = \frac{\sqrt{m_{j, i}^2 \cdot c^2 + p_{j, i}^2}}{p_{j, i} \cdot c} \cdot L_{j, i} \quad (14)$$

$$\left( \begin{array}{l} \sigma_{t_{exp, j, i}} = \sqrt{\left( \frac{\partial t_{exp, j, i}}{\partial p_{j, i}} \right)^2 \cdot \sigma_{p_{j, i}}^2 + \left( \frac{\partial t_{exp, j, i}}{\partial L_{j, i}} \right)^2 \cdot \sigma_{L_{j, i}}^2} \\ \left( \frac{\partial t_{exp, j, i}}{\partial p_{j, i}} \right) = \frac{L_{j, i}}{c} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{p_{j, i}^2 + m_{j, i}^2 \cdot c^2}} - \frac{\sqrt{p_{j, i}^2 + m_{j, i}^2 \cdot c^2}}{p_{j, i}^2} \right] = \left[ \frac{L_{j, i}}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{p_{j, i}^2 + m_{j, i}^2 \cdot c^2}} - \frac{1}{p_{j, i}} \cdot t_{exp, j, i} \right] \\ \frac{\partial t_{exp, j, i}}{\partial L_{j, i}} = \frac{\sqrt{m_{j, i}^2 \cdot c^2 + p_{j, i}^2}}{p_{j, i} \cdot c} = \frac{t_{exp, j, i}}{L_{j, i}} \end{array} \right) \quad (15)$$

Считаем, что погрешность измерения длины трека очень мала  $\sigma_{L_{j, i}} = 1 \text{ см} \ll 150\text{-}170 \text{ см}$  (внутренний и внешний радиусы TOF системы соответственно).

$$W_{j, i} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{TOF}^2 + \sigma_{t_{exp, j, i}}^2}} \quad (16)$$

Время столкновения вычисляется следующим образом:

$$t_{ev, j, i}^{TOF}(\vec{m}_{j, i}) = \frac{\sum_{n_{tracks, j}} W_{j, i} \cdot (t_{TOF} - t_{exp, j, i})}{\sum_{n_{tracks, j}} W_{j, i}} \quad (17)$$

Разрешение времени столкновения задается следующим образом:

$$\sigma_{t_{ev, j, i}}^{TOF}(\vec{m}_{j, i}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{n_{tracks, j}} W_{j, i}}} \quad (18)$$

Затем вычисляется следующий  $\chi^2$ :

$$\chi_j^2(\vec{m}_{j, i}) = \sum_{n_{tracks, j}} \frac{(t_{TOF} - t_{ev}^{TOF}(m_{j, i}) - t_{exp, j, i})^2}{\sigma_{TOF}^2 + \sigma_{t_{exp, j, i}}^2} \quad (19)$$

В этих выражениях  $t_{TOF}$  и  $\sigma_{TOF}$  есть ни что иное, как время пролета частицы, вычисленное с помощью детектора TOF, и разрешение детектора TOF.

Комбинация  $\vec{m}_{j,i}$ , которая минимизирует этот  $\chi_j^2$ , используется для вывода  $t_{ev,j}^{TOF}$  с помощью уравнения (17) и  $\sigma t_{ev,j}^{TOF}$  с помощью уравнения (18) для каждого импульсного интервала.

Теперь  $\tilde{t}_{ev,\tilde{j}}^{TOF}$  и соответственно  $\tilde{\sigma} t_{ev,\tilde{j}}^{TOF}$  пересчитываются для каждого  $j$ -го импульсного интервала с использованием треков, принадлежащих другим импульсным интервалам ( $\tilde{j} = 1, \dots, N_{\text{interval}}$ ):

$$\tilde{t}_{ev,\tilde{j}}^{TOF} = \frac{\sum_{j=1 \wedge j \neq \tilde{j}}^{N_{\text{interval}}} t_{ev,j}^{TOF} \cdot \left(\frac{1}{\chi_j^2}\right)}{\sum_{j=1 \wedge j \neq \tilde{j}}^{N_{\text{interval}}} \left(\frac{1}{\chi_j^2}\right)} \quad (20)$$

$$\tilde{\sigma} t_{ev,\tilde{j}}^{TOF} = \frac{\sum_{j=1 \wedge j \neq \tilde{j}}^{N_{\text{interval}}} \sigma_{t_{ev,j}^{TOF}} \cdot \left(\frac{1}{\chi_j^2}\right)}{\sum_{j=1 \wedge j \neq \tilde{j}}^{N_{\text{interval}}} \left(\frac{1}{\chi_j^2}\right)} \quad (21)$$

$$\tilde{W}_{\tilde{j}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1 \wedge j \neq \tilde{j}}^{N_{\text{interval}}} \left(\frac{1}{\chi_j^2}\right)}} \quad (22)$$

Для того что бы получить  $t_{ev}^{TOF}$  и  $\sigma t_{ev}^{TOF}$  нужно:

$$t_{ev}^{TOF} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{interval}}} \tilde{t}_{ev,j}^{TOF} \cdot \left(\frac{1}{\tilde{W}_j}\right)}{\sum_{j=1}^{N_{\text{interval}}} \left(\frac{1}{\tilde{W}_j}\right)} \quad (23)$$

$$\sigma t_{ev}^{TOF} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{interval}}} \tilde{\sigma} t_{ev,j}^{TOF} \cdot \left(\frac{1}{\tilde{W}_j}\right)}{\sum_{j=1}^{N_{\text{interval}}} \left(\frac{1}{\tilde{W}_j}\right)} \quad (24)$$

Следует отметить, что  $\sigma_{t_{ev,j}^{TOF}}$  должно зависеть от кратности треков в интервале, потому что, согласно уравнению 18, оно масштабируется как

$$\sim \sqrt{\frac{1}{n_{\text{tracks},j}}}$$

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.

### 4.1. Эффективность определения сорта частиц.

Сорт частиц определяется следующими способами:

1. С помощью процедуры минимизации  $\chi^2$ , приведенной ранее. В этом случае сравниваются Pdgcode предсказанной частицы и ее реальный Pdgcode. Комбинация гипотез масс, которая минимизирует  $\chi^2$ , используется для вычисления эффективности определения сорта частиц (включая вопрос частица/античастица) в импульсных интервалах и в событиях.

$$efficiency_{interval} = \frac{\text{кол} - \text{во правильно предсказанных сортов частиц в интервале}}{\text{общее кол} - \text{во частиц в интервале}}$$

$$efficiency_{event} = \frac{\text{кол} - \text{во правильно предсказанных сортов частиц в событие}}{\text{общее кол} - \text{во частиц в событие}}$$

Так же, исходя из соображения того, что в приведенном выше программном алгоритме определения времени столкновений нигде не используется информация о том, является ли данная частицей или античастицей, аналогичные эффективности будут приведены при определении сорта частиц не рассматривая вопрос «частица/античастица».

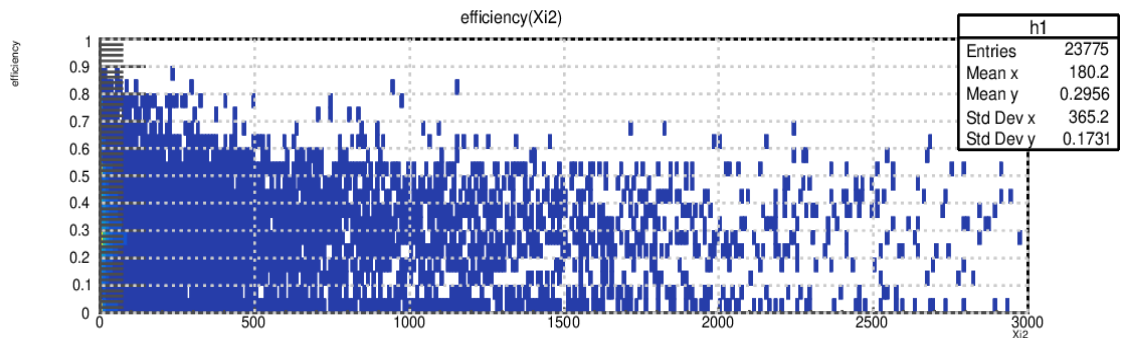


Рисунок 22 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от  $\chi^2$ .

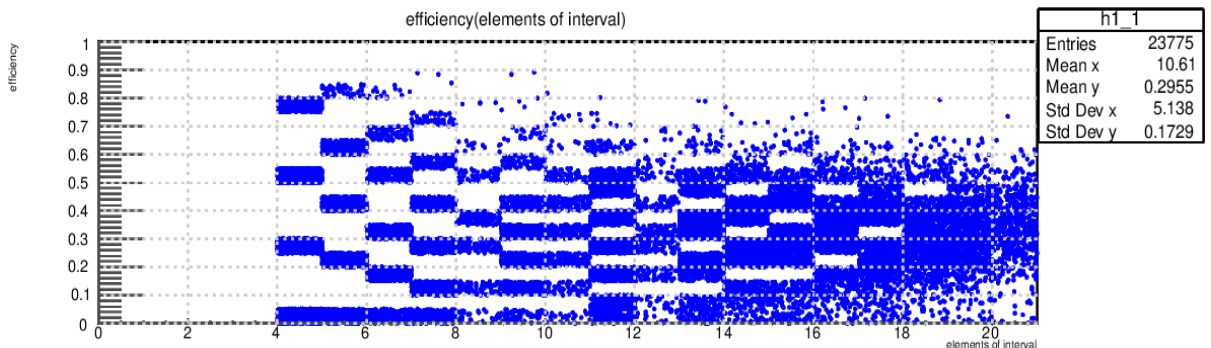


Рисунок 23 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от кол-ва треков в интервалах.

Если на рисунке 23 сделать проекции на ось Y для каждого бина [так что бы по оси ординат было количество всех треков (соответствующих бину и

определенной эффективности), а по оси абсцисс была эффективность], то будет заметно, что полученное распределение соответствует распределению Гаусса. Построим новый график, отмечая для каждого интервала  $\mu$  и погрешность  $\sigma$ .

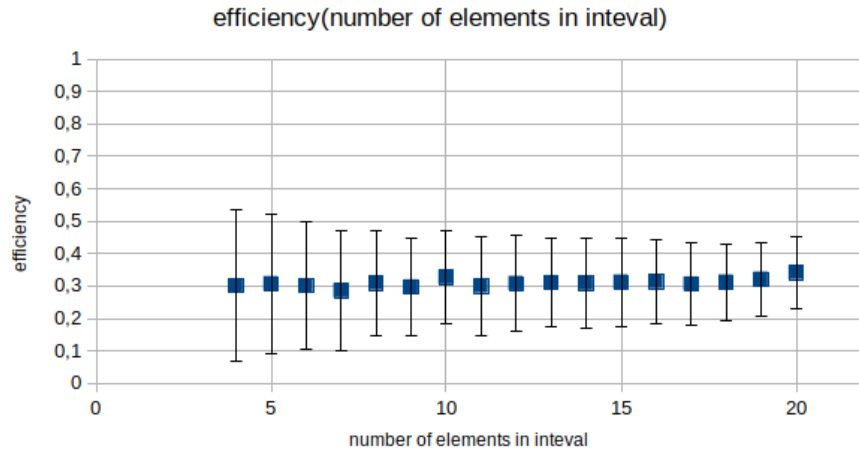


Рисунок 24 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от кол-ва треков в интервалах.

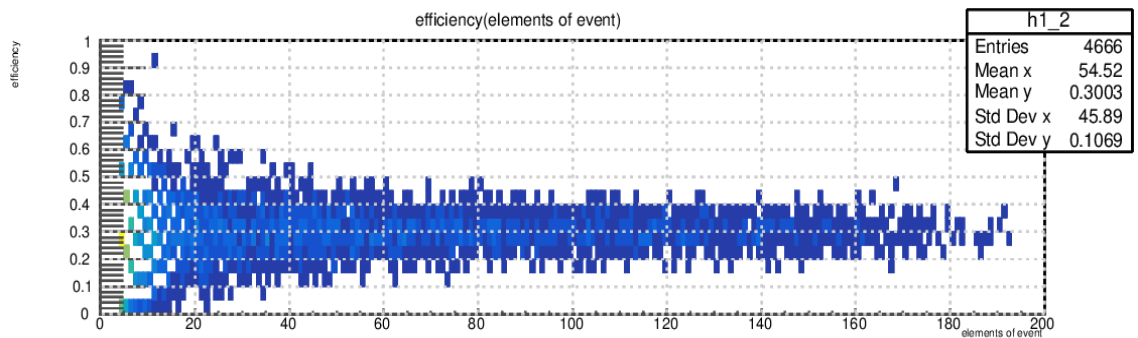


Рисунок 25 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от кол-ва треков в событие, удовлетворяющих необходимым требованиям.

Рассмотрим теперь полученные графики при определении сорта частиц не рассматривая вопрос «частица/античастица».

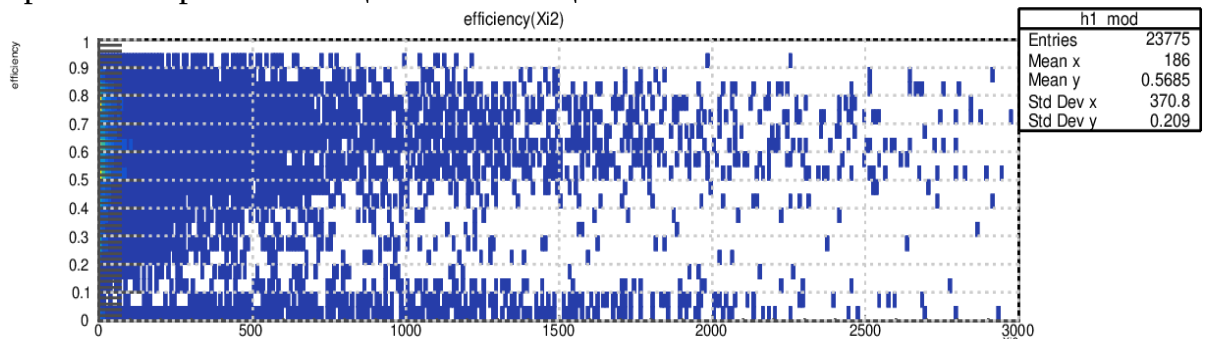


Рисунок 26 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от  $\chi^2$ .



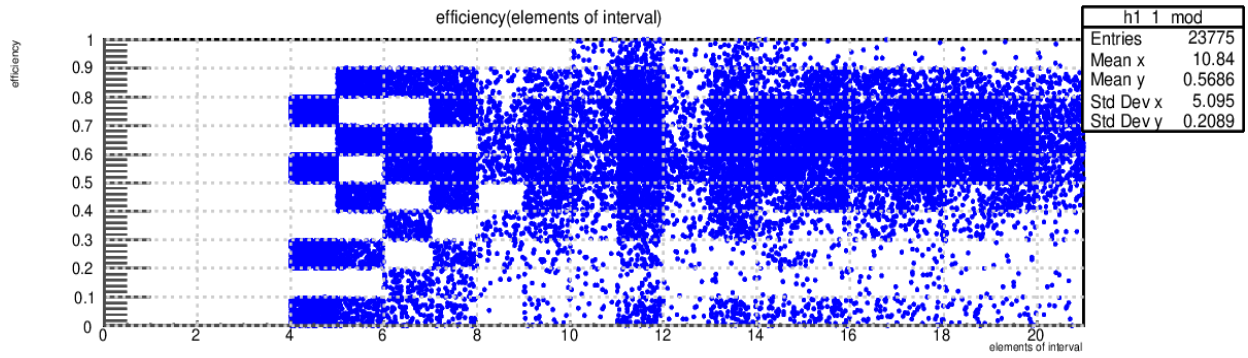


Рисунок 27 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от кол-ва треков в интервалах.

Если на рисунке 27 сделать проекции на ось  $Y$  для каждого бина [так что бы по оси ординат было количество всех дорожек (соответствующих бину и определенной эффективности), а по оси абсцисс была эффективность], то будет заметно, что полученное распределение соответствует распределению Гаусса. Построим новый график, отмечая для каждого интервала  $\mu$  и погрешность  $\sigma$ .

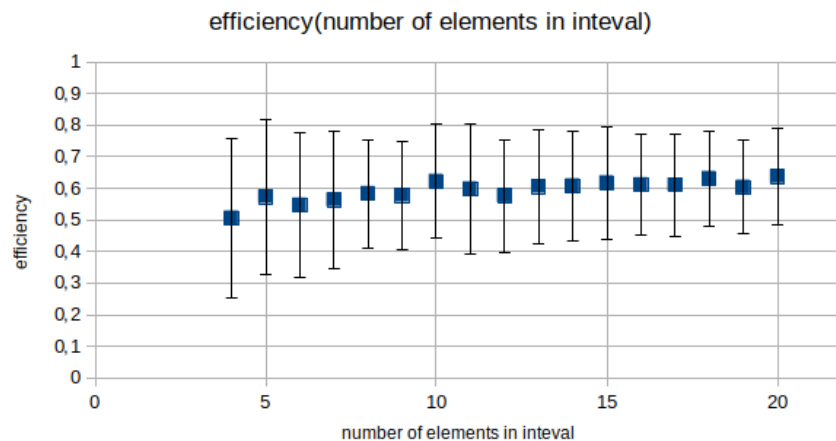


Рисунок 28 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от кол-ва треков в интервалах.

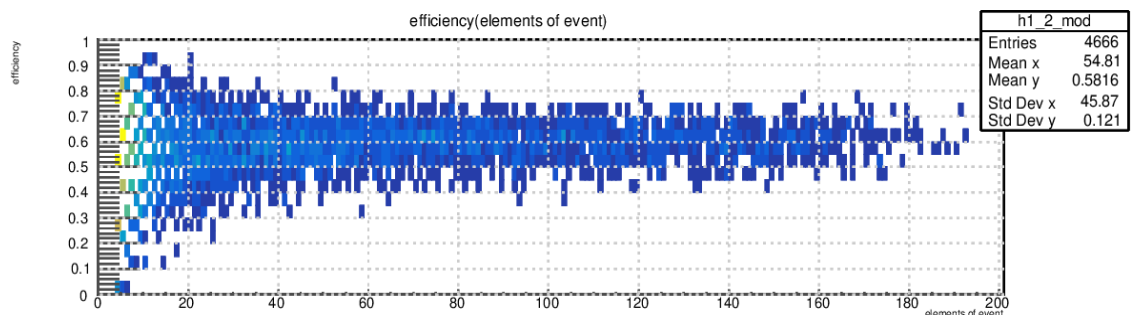


Рисунок 29 — Зависимость эффективности определения сорта частиц от кол-ва треков в событие, удовлетворяющих необходимым требованиям.

Как видно по рисункам 26-29, эффективность способа определения массы частицы стремится к более чем 60% при увеличении количества треков в интервале и в событие.

2. Метод  $3\sigma$ . Он заключается в том, что для каждой частицы считаются следующие величины:

$$\sigma_{PID}^2 = \sigma_{TOF}^2 + \sigma_{t_{ev}^{TOF}}^2 + \sigma_{t_{exp}}^2 \quad (25)$$

$$n \sigma_{TOF} = \frac{t_{TOF} - t_{ev} - t_{exp}}{\sigma_{PID}} \quad (26)$$

$t_{TOF}$ ,  $t_{ev}^{TOF}$ ,  $t_{exp}$  - время пролета частицы, время столкновения вычисленные детектором TOF и предполагаемое время пролета, вычисленное по формуле (14) для гипотезы массы частицы после процедуры минимизации  $\chi^2$ .  $\sigma_{t_{TOF}}$ ,  $\sigma_{t_{ev}^{TOF}}$  и  $\sigma_{t_{exp}}$  — разрешения времени пролета и времени столкновения, вычисленные с помощью детектора TOF и разрешение предполагаемого времени пролета, вычисленное по формуле (15).

Если полученное значение  $|n \sigma_{TOF}| < 3$ , то можно считать, что с вероятностью 0,9973 мы правильно определили сорт частицы.

Для этого метода так же вычисляются:

$$efficiency_{interval}^{n \sigma_{TOF}} = \frac{\text{кол} - \text{во правильно предсказанных сортов частиц в интервале}}{\text{общее кол} - \text{во частиц в интервале}}$$

$$efficiency_{event}^{n \sigma_{TOF}} = \frac{\text{кол} - \text{во правильно предсказанных сортов частиц в событие}}{\text{общее кол} - \text{во частиц в событие}}$$

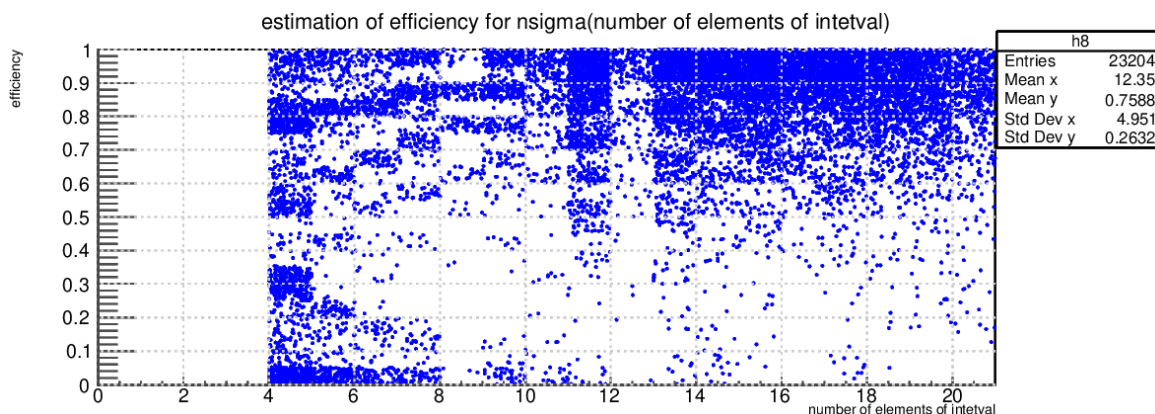


Рисунок 30 — Зависимость эффективности определения сорта частиц методом  $3\sigma$  от кол-ва треков в интервале, удовлетворяющих необходимым требованиям.

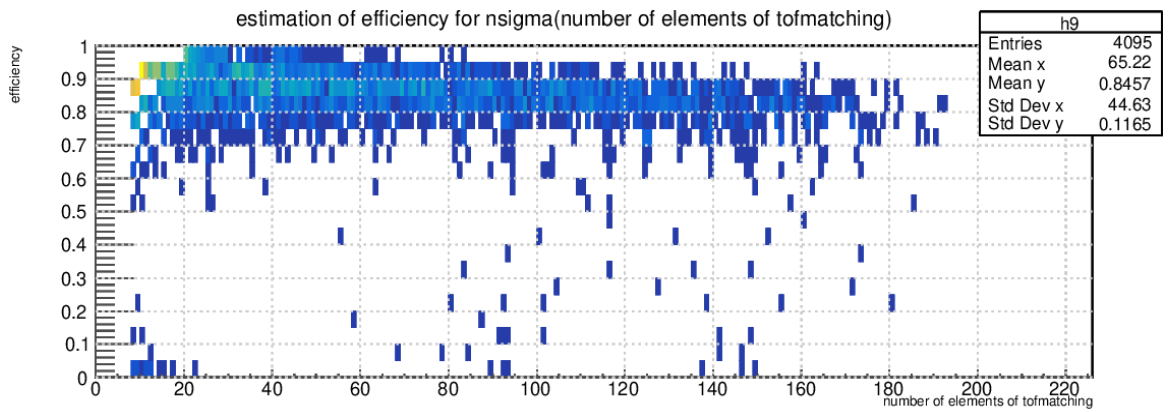


Рисунок 31 — Зависимость эффективности определения сорта частиц методом  $3\sigma$  от кол-ва треков в событие, удовлетворяющих необходимым требованиям.

Как видно по рисункам 30-31 эффективность определения сорта частиц методом  $3\sigma$  достаточно высока и неявным образом зависит от количества треков в интервале.

#### 4.2. Результаты программного измерения времени столкновения и разрешения времени столкновения.

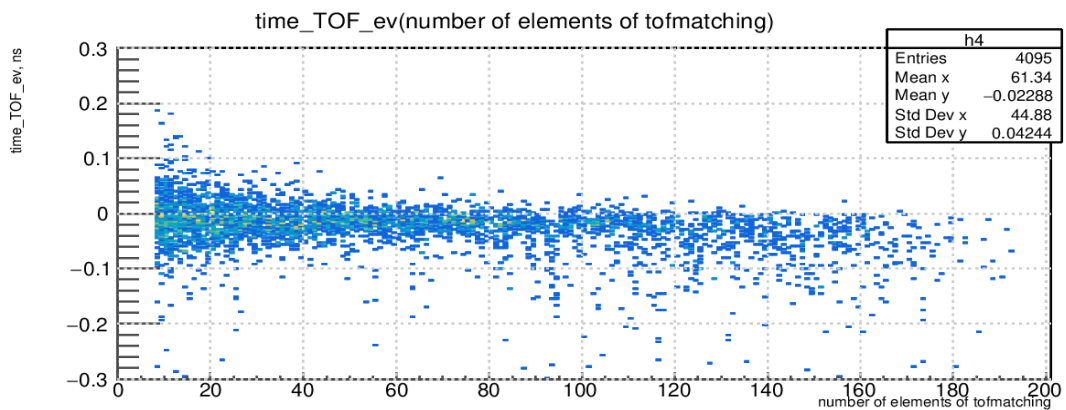


Рисунок 32 — График зависимости  $t_{ev}^{TOF}$  от количества треков в событие, удовлетворяющих базовым требованиям, для столкновений  $Au^{79+} — Au^{79+}$  при  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ на нуклон в системе центра масс.

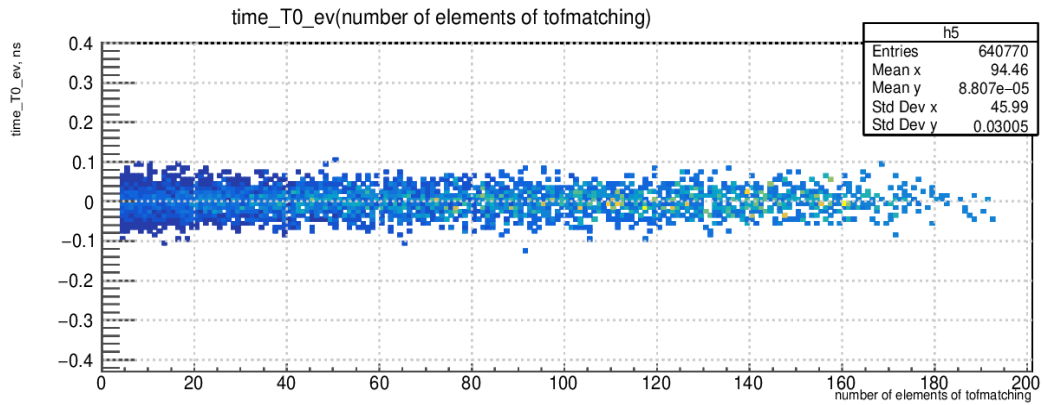


Рисунок 33 — График зависимости  $t_{ev}^{T0}$  от количества треков в событие, удовлетворяющих базовым требованиям, для столкновений  $Au^{79+} — Au^{79+}$  при  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ на нуклон в системе центра масс.

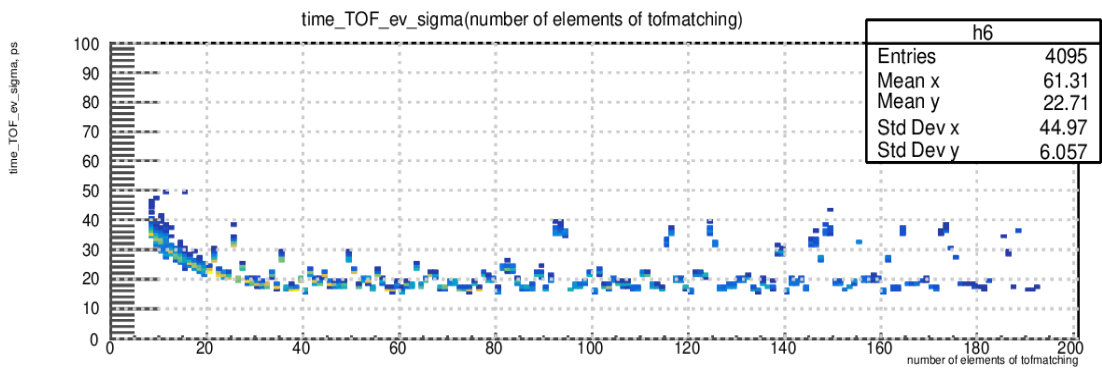


Рисунок 34 — График зависимости  $\sigma_{t_{ev}^{TOF}}$  от количества треков в событие, удовлетворяющих базовым требованиям, для столкновений  $Au^{79+} — Au^{79+}$  при  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ на нуклон в системе центра масс.

Как видно, при разрешении детектора TOF 60 пс, полученное разрешение времени столкновения не превышает 50 пс, а в лучших случаях меньше 20 пс.

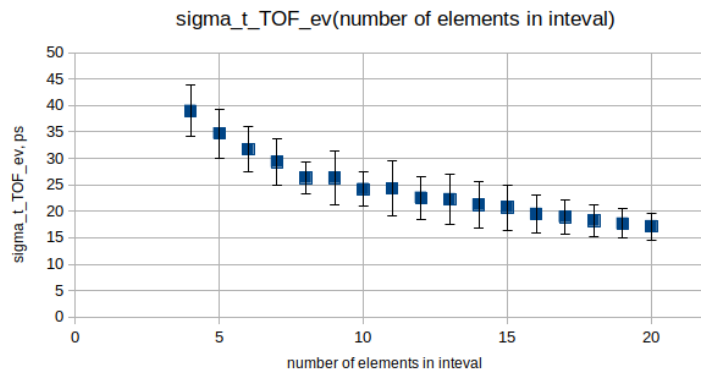


Рисунок 35 — График зависимости  $\sigma_{t_{ev}^{TOF}, j}$  от количества треков в импульсном интервале, удовлетворяющих базовым требованиям, для столкновений  $Au^{79+} — Au^{79+}$  при  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ на нуклон в системе центра масс.

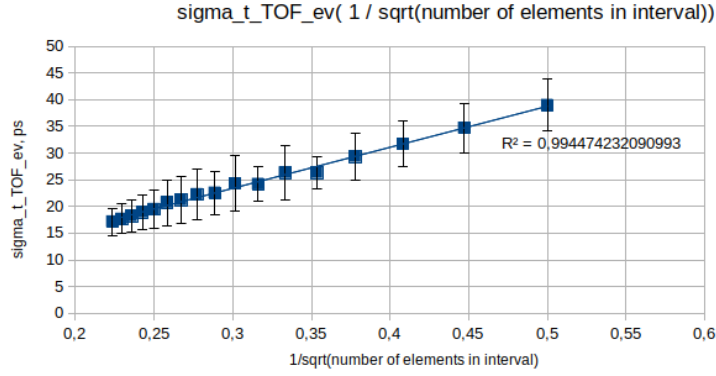


Рисунок 36 — График зависимости  $\sigma_{ev,j}^{TOF}$  от  $1/\sqrt{n}$  (количество треков в импульсном интервале).

Как видно по рисункам 35 и 36,  $\sigma_{ev,j}^{TOF} \sim \sqrt{\frac{1}{n_{tracks,j}}}$ . Таким образом разрешение времени столкновения для события с малой кратностью не превышает 50 пс и с увеличением треков в интервале убывает до значений меньше 20 пс. Таким образом, имеет смысл уменьшать количество интервалов, тем самым увеличивая количество треков в оставшихся. Но стоит помнить об обратной стороне медали — максимальное время затраченное на выполнение алгоритма  $\sim 2^{n_{tracks,j}}$ . Стоит использовать такое разбиение, при котором метод будет выдавать удовлетворяющее разрешение времени столкновения при оптимальном времени выполнения.

Аналогичные результаты для разрешения времени столкновений, определенного детектором TOF, были получены в эксперименте ALICE.

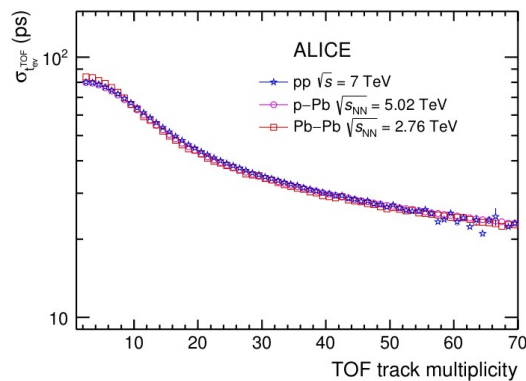


Рисунок 37 — График зависимости  $\sigma_{ev}^{TOF}$  от количества треков в событии.

### 4.3. Влияние разрешения измеренного времени столкновения детектором TOF MPD на эффективность идентификации частиц.

В этом разделе оценивается влияние на производительность PID программного метода, используемого для определения времени столкновения событий. Это изучается с помощью разделительной способности К-п и р-К:

$$n \sigma_{i,j} = \frac{(t_{\text{exp},i} - t_{\text{exp},j})}{\sigma_{\text{PID},j}(t_{\text{ev}}^{TOF})}, \text{ где } i, j = \pi, K, p$$

$$\sigma_{\text{PID},j}^2(t_{\text{ev}}^{TOF}) = \sigma_{\text{TOF}}^2 + \sigma_{t_{\text{ev}}}^2 + \sigma_{t_{\text{exp},i}}^2$$

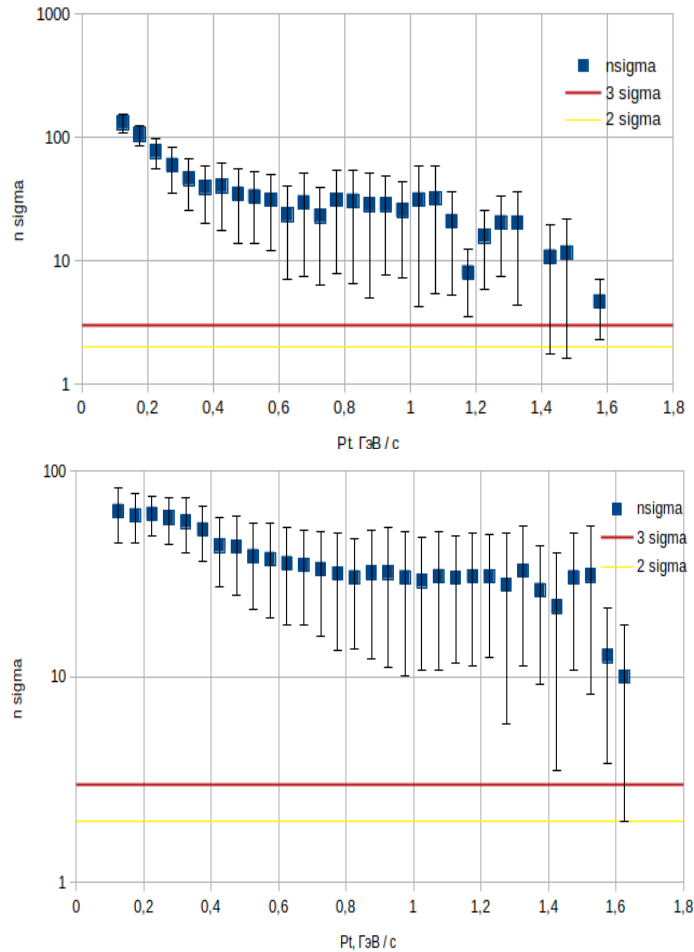


Рисунок 38 — Разделительные способности К-п (вверху) и р-К (внизу) как функции поперечного импульса трека

Если требуется разделение при  $3\sigma$ , для К-п это достижимо только до 1,4 ГэВ/с, а для р-К может быть достигнуто только до 1,6 ГэВ/с.

#### 4.4. Вычислительные ресурсы, требуемые для программного метода определения времени столкновения.

Время выполнения программного метода определения времени столкновений, в котором при разбиении по интервалам возможно не больше 20 треков в одном, может достигать почти 14 секунд. Из этого можно сделать выбор что дальнейшее увеличение количества треков в одном интервале не целесообразно.

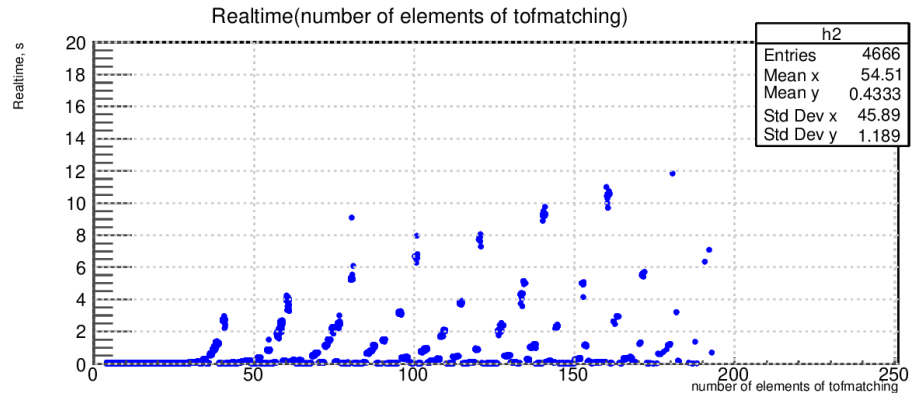


Рисунок 39 — График зависимость RealTime от количества треков в событие, удовлетворяющих необходимым условиям.

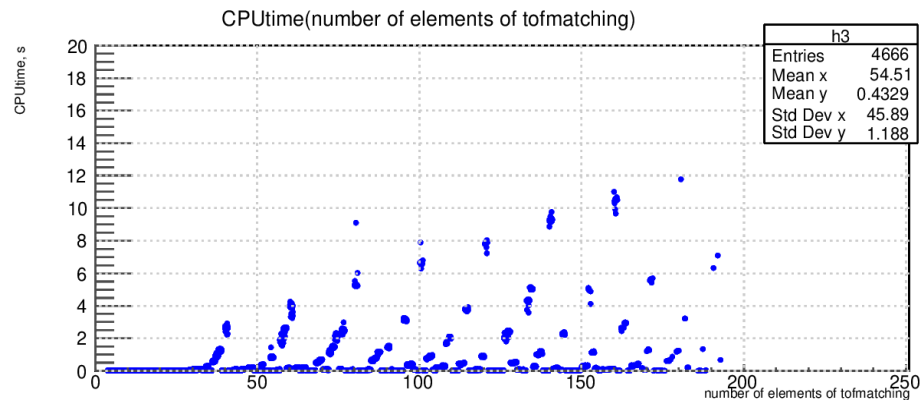


Рисунок 40 — График зависимость CPUTime от количества треков в событие, удовлетворяющих необходимым условиям.

## ВЫВОДЫ

Определение времени столкновения событий в эксперименте MPD необходимо для идентификации частиц в широком диапазоне скоростей и до полного импульса 3 ГэВ / с методом времени пролета. Оно может быть предоставлено для каждого события самим детектором TOF (  $t_{ev}^{TOF}$  ) при помощи разработанного программного метода определения времени столкновения.

При разрешении времени детектора TOF 60 пс разрешение времени столкновения событий этим же детектором для события с малой кратностью не превышает 50 пс и с увеличением треков убывает до значений меньше 20 пс. Использованное разбиение вьюорки на интервалы по импульсам для каждого события, при котором в каждом интервале минимум 4 трека и максимум 20 с приоритетом для большего количества треков, позволяет программному методу вычислять хорошее разрешение времени столкновения при оптимальном времени выполнения.

Показано влияние разработанного метода определения времени столкновения на характеристики TOF PID. Если требуется разделение при  $3\sigma$ , для К-п это достижимо только до 1,4 ГэВ/с, а для р-К может быть достигнуто только до 1,6 ГэВ/с.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена разработке и реализации программного метода определения времени столкновения каждого из событий в эксперименте MPD и анализу полученных данных.

В ходе работы было выполнено следующее:

- Рассмотрены времяпролетная система TOF детектора MPD и ее составляющие, их устройство, параметры и характеристики;
- Изучены методы определения времени столкновения, примененные в эксперименте ALICE на LHC;
- Изучены и применены основные принципы работы программного обеспечения MpdRoot для моделирования столкновений тяжелых частиц в эксперименте MPD и реконструкции полученных данных от детекторов;
- Разработан и реализован программный метод определения времени столкновения системой TOF в эксперименте MPD. Проведен анализ полученных данных и оптимизация параметров метода;
- Применены возможности графического построения результатов ПО Root;
- Изучены влияние разрешения измеренного времени столкновения детектором TOF MPD на производительность идентификации частиц, а так же потребляемые вычислительные ресурсы, требуемые для программного метода определения времени столкновения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Development of the MRPC for the TOF system of the MultiPurpose Detector. V.A. Babkin, S.N. Bazylev, I.S. Burdenyuk, M.G. Buryakov, A.V. Dmitriev, P.O. Dulov, V.M. Golovatyuk, S.P. Lobastov, M.M. Rumyantsev, A.V. Schipunov, A.V. Shutov, I.V. Slepnev, V.M. Slepnev, A.V. Terletskiy, S.V. Volgin. Joint Institute for Nuclear Research, October 4, 2018.
2. The MultiPurpose Detector (MPD), Conceptual Design Report, v1.4. [http://nica.jinr.ru/files/CDR\\_MPD/MPD\\_CDR\\_en.pdf](http://nica.jinr.ru/files/CDR_MPD/MPD_CDR_en.pdf)
3. Technical Design Report of the Time of Flight System (TOF). TOF Group of the MPD Collaboration. 2018.
4. Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC. EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH, CERN, ALICE Collaboration. 27 September 2016.
5. Performance of the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC. A. Akindinov et al. 2013.
6. Time Projection Chamber for Multi-Purpose Detector at NICA Technical Design Report. (rev.07). A.Averyanov, A.Bazhazhin, V.F.Chepurnov, V.V.Chepurnov, G.Cheremukhina, S.Chernenko, O.Fateev, Yu.Kiriushin, A.Kolesnikov, V.Kolesnikov, A.Korotkova, F.Levchanovskiy, J.Lukstins, S.Movchan, A.Pilyar, S.Razin, A.Ribakov, O.Rogachevskii, V.Samsonov, S.Vereschagin, Yu.Zanevsky, S.Zaporozhets, A.Zinchenko and V.Zruev. Laboratory of High Energy Physics, JINR Dubna. 2018.
7. Applications of silicon strip and pixelbased particle tracking detectors. Philip Allport. Nature Reviews Physics 1, 567–576. 02 August 2019. <https://doi.org/10.1038/s42254-019-0081-z>
8. <https://root.cern/manual>
9. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/methods/pid.htm>
10. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/introduction/particltab.htm>
11. <https://home.fnal.gov/~mrenna/lutp0613man2/node44.html>
12. [http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/det\\_c/ALICE.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/det_c/ALICE.htm)
13. <http://sv-journal.org/2014-1/01/index.php?lang=en>

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Программный метод и программа для чтения полученных данных и построения графиков находятся: [https://github.com/VictorBaryshnikov/Mpdroot\\_t\\_TOF\\_ev.git](https://github.com/VictorBaryshnikov/Mpdroot_t_TOF_ev.git)