

Интеграция торцевого времяпролётного детектора ETOF MPD в программный пакет ACTS

 MPD / NICA / JINR

 ACTS

Веретенников К.И.

Научный руководитель: В.А. Бабкин

Научный консультант: Е.Л. Крышень

МГУ им. М.В. Ломоносова

физический факультет,
кафедра физики элементарных частиц

1. Ускорительный комплекс NICA и эксперимент MPD

Комплекс NICA

NICA (Nuclotron-based Ion Collider facility) — ускорительный комплекс, создаваемый в **ОИЯИ, Дубна**, предназначенный для изучения столкновений тяжёлых ионов при энергиях до $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ.

Основные задачи:

- Изучение QCD-фазовой диаграммы и области критической точки
- Исследование свойств сверхплотной барионной материи
- Поиск аномалий в области низких энергий столкновения

Эксперимент MPD

MPD (MultiPurpose Detector) — универсальный детектор для регистрации продуктов столкновения тяжёлых ионов в широком диапазоне псевдобыстрот и импульсов.

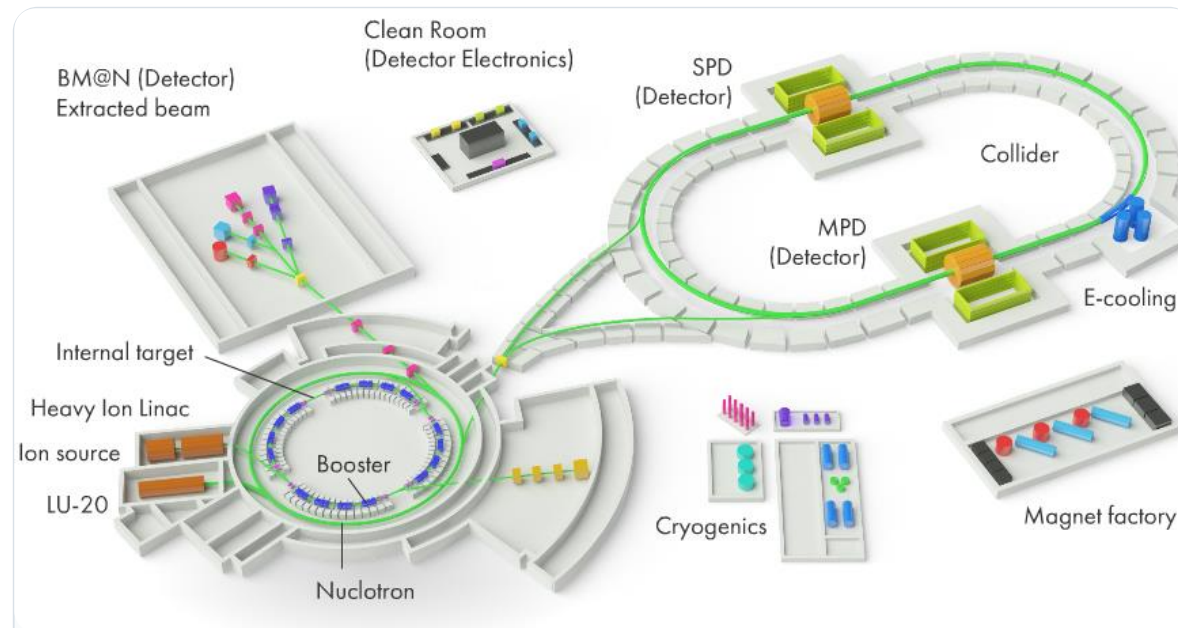


Схема ускорительного комплекса NICA

Два этапа реализации

Этап 1

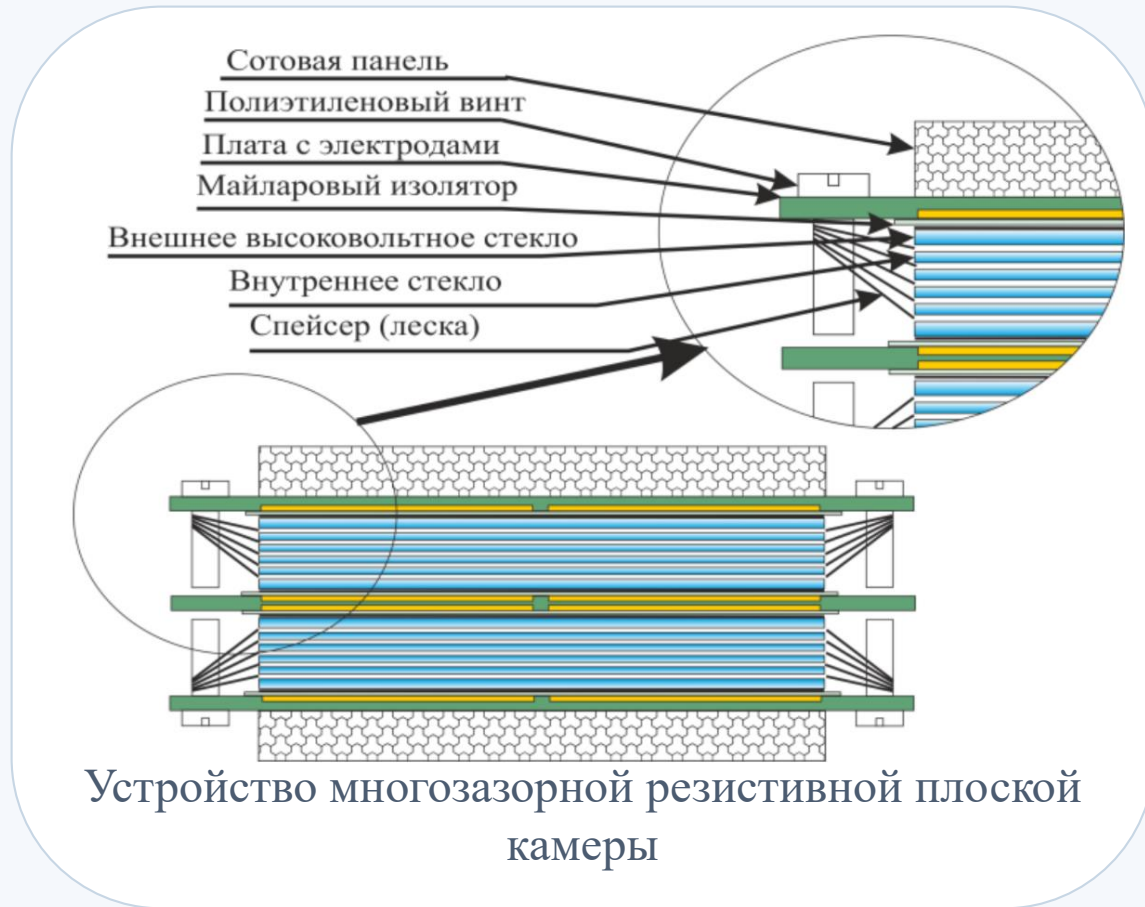
Базовая конфигурация MPD с баррельной TOF

Этап 2

Расширение акцептанса до $|\eta| < 2$

3. Идентификация частиц по времени пролёта

Импульс берётся из трековой системы, время прихода измеряется TOF/ETOF



Ключевые соотношения

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{L}{ct} \quad m^2 = p^2 \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right)$$

где β – скорость, p – импульс, L – длина траектории, t – время пролета, m – масса частицы.

Для оценки разделения двух частиц с массами m_1 и m_2 при одинаковом импульсе можно использовать разность времён пролёта:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\sqrt{1 + \frac{m_1^2 c^2}{p^2}} - \sqrt{1 + \frac{m_2^2 c^2}{p^2}} \right)$$

Точность PID определяется одновременно временем пролёта, длиной траектории и импульсным разрешением трековой системы.

4. Форвардный апгрейд MPD

Цель второй стадии

Расширение области измерений

Вторая стадия детектора MPD предусматривает **расширение акцептанса установки по псевдобыстроте до $|\eta| < 2$** для проведения измерений в форвардной области.

Расширение области покрытия:

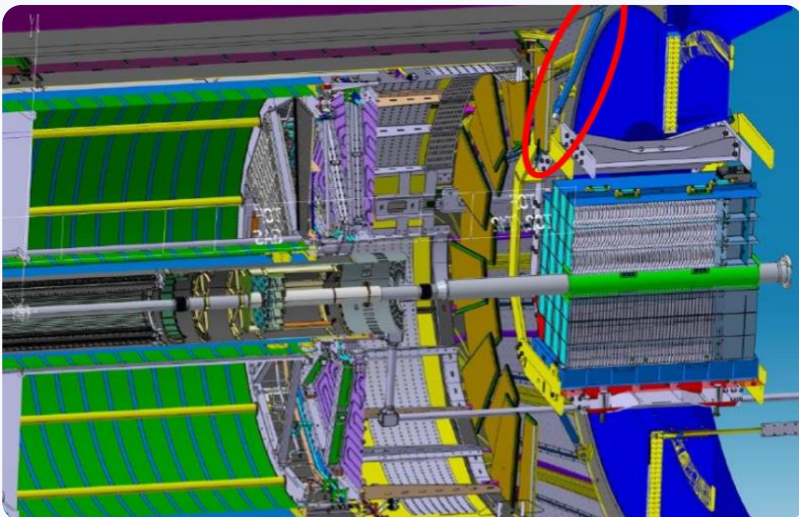
$|\eta| < 1.4$

Базовая конфигурация

$|\eta| < 2$

Вторая стадия

- Увеличение статистики регистрируемых частиц
- Расширение кинематического диапазона измерений



Расположение торцевой времяпролётной системы ETOF в детекторе MPD с обозначенным креплением FHCa1

Необходимые компоненты

1. Форвардный трекер

Трековая система на базе строу-трубок для восстановления траекторий и измерения импульсов частиц в форвардной области.

2. ETOF

Торцевая времяпролётная система для идентификации частиц по времени пролёта.

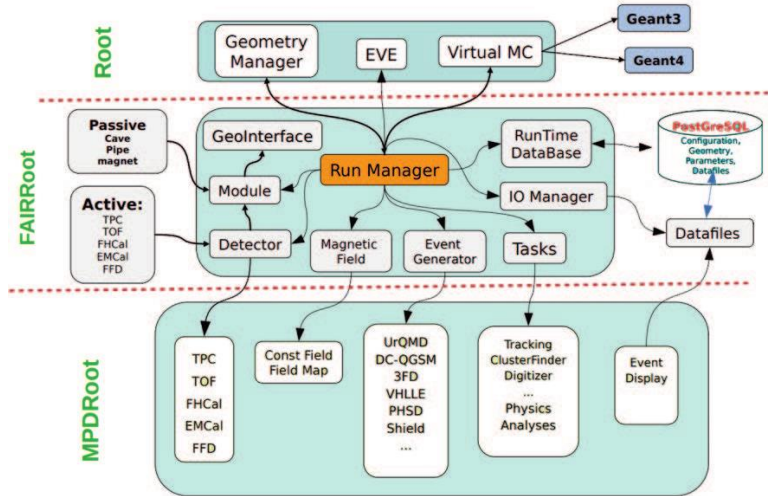
3. Программная интеграция

Единая цепочка реконструкции событий в программном пакете ACTS.

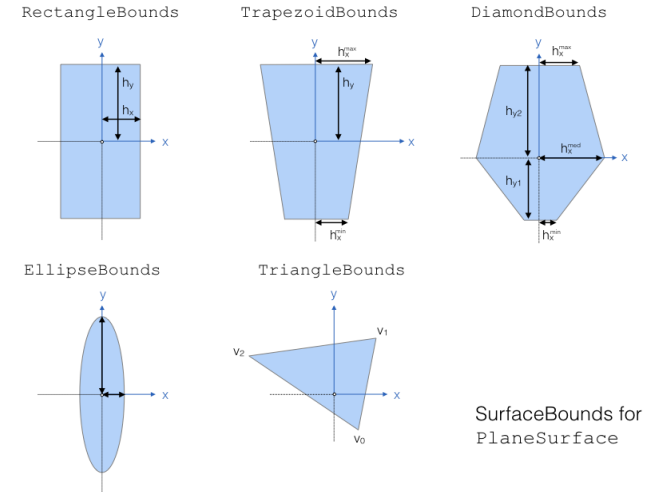
Для проведения измерений в расширенной области необходимо разработать **трековую и времяпролётную систему** для измерения импульсов и идентификации частиц.

5. MPDRoot и ACTS

Интеграция требует согласовать MPDRoot-данные с программным пакетом ACTS



Общая схема программного пакета MPDRoot



Типы плоских поверхностей ACTS

MPDRoot – основной программный пакет эксперимента MPD для моделирования и анализа данных. Пакет построен на основе ROOT и FairRoot и объединяет описание геометрии детектора, генераторы событий, транспорт частиц через вещество, реконструкционные алгоритмы и средства физического анализа.

- Основные объекты: MCTrack, Point, Hit



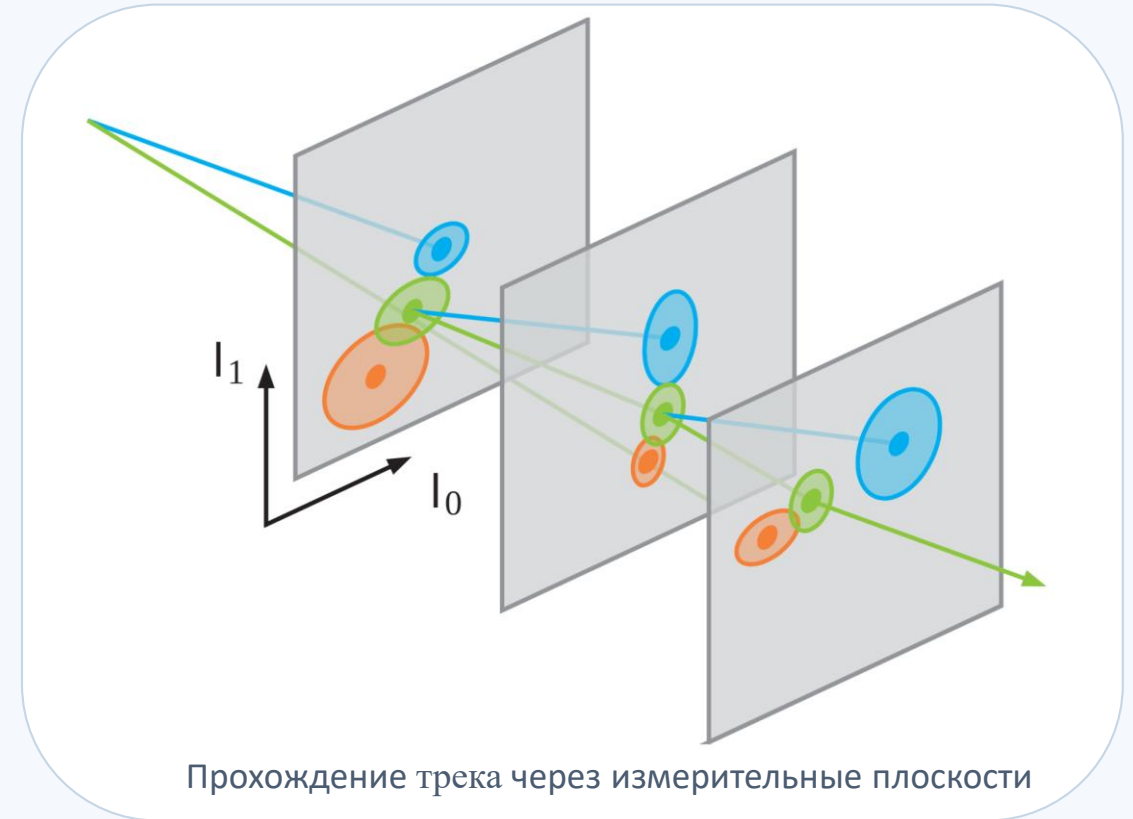
A Common Tracking Software

A Common Tracking Software – детектор-независимый фреймворк для описания геометрии, навигации, экстраполяции и реконструкции треков.

- Основные объекты: Measurement, SpacePoint, Seed, Track

6. Общий процесс реконструкции трека в ACTS

Измерения последовательно превращаются в пространственные точки, затравки, кандидаты и итоговые треки



Цепочка реконструкции: Measurement → SpacePoint → Seed → CKF track candidates → ambiguity resolution → Track.

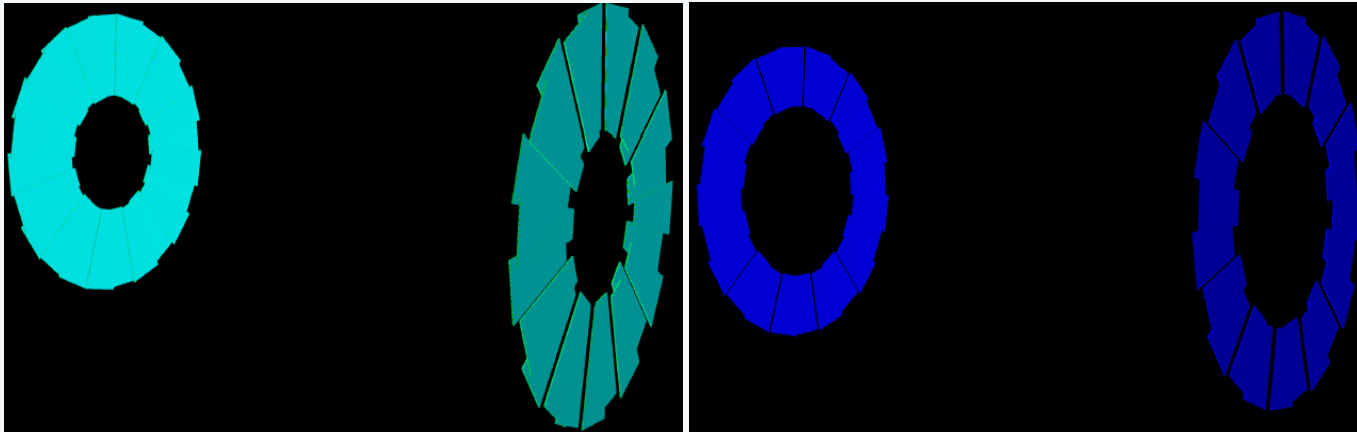
7. Форвардный апгрейд MPD: расположение ETOF

Расположение ETOF

Торцевые TOF детекторы расположены на расстоянии **3 метров от точки столкновения** по оси пучка ($z = \pm 300$ см).

Ограничения

Длина торцевой времяпролётной системы по оси z и количество стрипов ограничены механическими конструкциями (опорными элементами калориметра FHCaI). Область покрытия: $1.4 < \eta < 1.95$.



Изменения геометрии торцевой времяпролётной системы:

- Количество стрипов в одном сегменте: $64 \rightarrow 48$

Зона покрытия детекторов

Barrel TOF

$|\eta| < 1.44$

Баррельная времяпролётная система в базовой конфигурации

ETOФ

$1.43 < \eta < 1.95$

Торцевая времяпролётная система ($z = 3$ м)

Форвардный трекер

$1.55 < \eta < 1.95$

Трековая система на строу-трубках

Ключевая задача

Корректная **экстраполяция восстановленного трека** к плоскостям ETOF и его сопоставление с прохождением частицы через торцевой детектор.

8. Результаты форвардного трекера на строу-трубках

Принцип работы детектора

1. Measurements (1D измерения)

Каждая строу-трубка даёт одномерную координату прохождения частицы

2. Space points (Пространственные точки)

Комбинирование измерений из разных слоёв для восстановления трёхмерных координат

3. Seeding (посев треков)

Использование точек для начальной реконструкции траекторий частиц

Источник

Доклад: Крышень Е.Л., MPD collaboration meeting, 30 October 2025

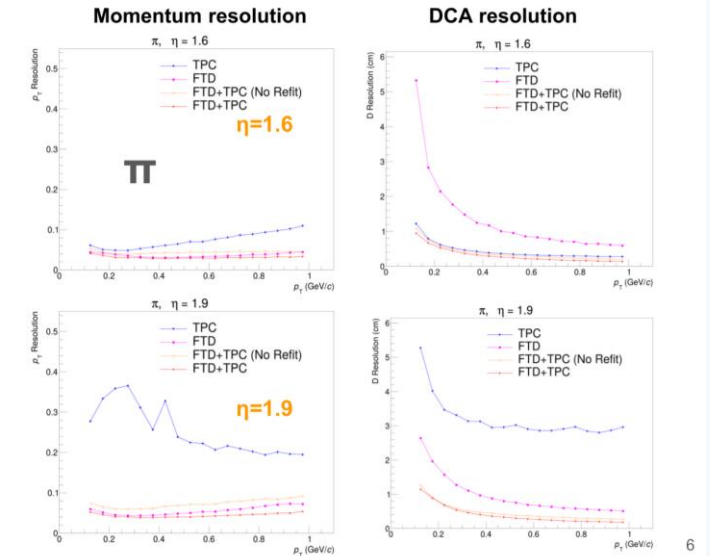
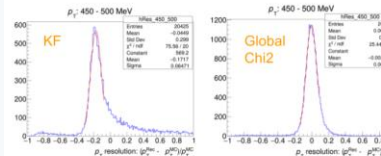
Физическая аргументация

Хорошее качество трека в форвардной области делает сопоставление с ETOF реалистичной задачей.

Ключевые результаты

- TPC tracking resolution is reasonable up to $\eta \sim 1.5$
- FTD helps to extend track reconstruction up to $\eta \sim 2.0$
- Best results with combined TPC+FTD tracking

Resolution from TPC-only fit for pions at eta = 1.6



Поперечное разрешение

< 5%

Дрт/рТ

При импульсе

~1

ГэВ/с

Область псевдобыстроты

1.6 < |η| < 1.9

9. Результаты моделирования ЕТОФ: расчёт осцирапсу

Моделирование

Выполнено моделирование работы ЕТОФ с использованием программной среды **MPDRoot** для оценки загрузки каналов детектора.

Генератор событий

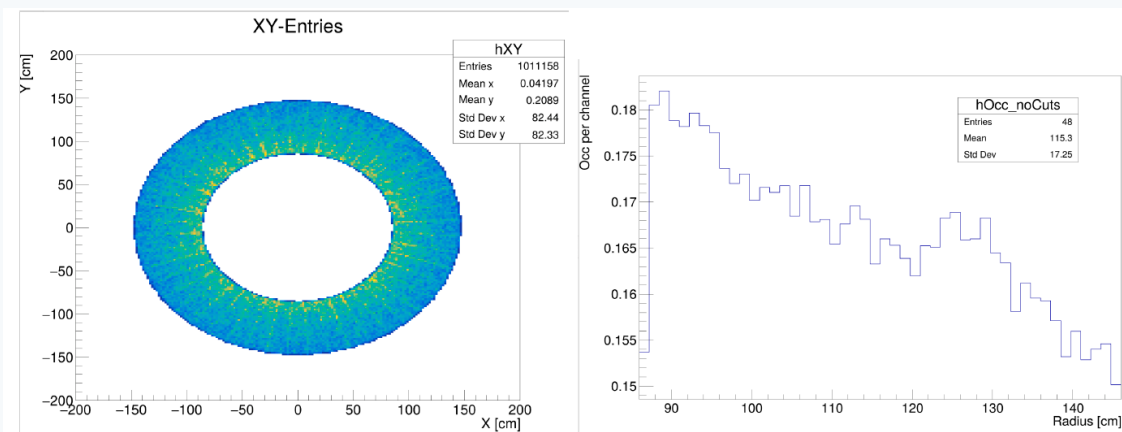
UrQMD — модель релятивистской динамики ультрарелятивистских ядерных столкновений

Тип столкновения

$\text{Bi}+\text{Bi}$ $\sqrt{S_{NN}} = 9$ ГэВ — центральные столкновения ионов висмута

Цель моделирования

Оценка осцирапсу (заполненности каналов), для оценки эффективности восстановления точек прохождения через детектор



Итоговые результаты

Результаты моделирования показали **умеренную загрузку каналов** в центральных событиях при максимальных энергиях столкновения ионов в коллайдере.

Проверка геометрии

Обновлённая геометрия встроена в полную геометрию MPD и проверена на отсутствие пересечений.

Реализуемость сопоставления

Подтверждена реализуемость процедуры сопоставления треков частиц в торцевом трекере с их координатами пролёта через ЕТОФ

Эффективность идентификации

Эффективность идентификации в данной области определяется не только временным разрешением, но и точностью измерения импульса.

Результаты задают конфигурацию ЕТОФ для переноса в программный пакет ACTS

10. Структура реализации

Основные компоненты разделены по геометрии, конвертации, трекингу и сопоставлению

Основные файлы реализации

Файл	Назначение
MpdFtdDetector.h и MpdFtdDetector.cxx	Построение геометрии при помощи программного пакета ACTS: задание трекинговых объёмов, слоёв, чувствительных поверхностей и геометрических идентификаторов.
MpdFtdToActsConverter.h и MpdFtdToActsConverter.cxx	Преобразование объектов MPDRoot в объекты ACTS.
MpdEtofHitProducerIdeal.h и MpdEtofHitProducerIdeal.cxx	Реконструкция: преобразование MCPoint в Hit.
MpdFtdActsTracker.h и MpdFtdActsTracker.cxx	Реконструкция средствами ACTS: запуск конвертера, формирование пространственных точек, сидирование, оценка начальных параметров, построение треков алгоритмом Калман-фильтра и удаление неоднозначных трек-кандидатов. Этот класс также задаёт порядок передачи треков и измерений детектора ETOF в алгоритм сопоставления.
MpdFtdMatcher.h и MpdFtdMatcher.cxx	Алгоритм сопоставления измерений ETOF и треков: отбор измерений на соответствующих поверхностях, выбор ближайшего измерения по локальным невязкам и запись диагностической информации.
runFtdTracking.C и validateEtofTrackMatching.C	Макросы для запуска реконструкционного сценария и последующей проверки результатов сопоставления треков с измерениями на поверхности ETOF.
dumpMpdActsGeometryObj.C и plotMpdActsGeometry.C	Экспорт и визуализация ACTS-геометрии

Такая структура разделяет несколько уровней задачи. Геометрические классы отвечают за положение поверхностей и их идентификаторы. Конвертер отвечает за перенос данных из MPDRoot в ACTS. Алгоритм сопоставления проверяет, можно ли использовать построенные треки в формате ACTS для сопоставления с измерениями детектора ETOF. Благодаря такому разделению ошибки в геометрии, конвертации и сопоставлении можно анализировать независимо.

11. Преобразование данных

Преобразование MCTrack в SimParticle

Для каждой монте-карло частицы из MPDRoot считываются:

- PDG-код
- заряд
- масса
- начальные координаты
- время рождения
- компоненты импульса.

Затем эти величины переводятся в систему единиц, используемую в ACTS.

Для сохранения связи между объектами используется идентификатор Barcode.

Преобразование MCPoint в SimHit

Объект MCPoint создаётся на этапе моделирования прохождения частицы через чувствительный объём. Он содержит:

- координаты
- Время
- импульс
- идентификатор исходного монте-карло трека.

В ACTS аналогом такой информации является SimHit, привязанный к определённой поверхности.

В текущей реализации используется упрощение: один и тот же импульс записывается как состояние частицы до и после прохождения чувствительного объёма.

Преобразование HIT в Measurements

Measurement должен быть задан в локальной системе координат поверхности. Поэтому глобальные координаты хита необходимо преобразовать. Пусть (x_{hit}, y_{hit}) — координаты хита в глобальной системе, а (Y_C, X_C) — центр соответствующей поверхности. Сначала вычисляется смещение относительно центра:

$$\Delta x = x_{hit} - X_C \quad \Delta y = y_{hit} - Y_C$$

Затем выполняется поворот в локальную систему поверхности:

$$\begin{pmatrix} loc0 \\ loc1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$$

Здесь ϕ — угол ориентации поверхности. Координаты loc0 и loc1 затем записываются в объект измерения ACTS.

12. Интеграция ETOF в программный пакет ACTS

Вместе с координатами измерения необходимо преобразовать и ковариационную матрицу. Если в глобальной системе ковариационная матрица для координат (x,y) имеет вид:

$$C_{glob} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{pmatrix}$$

то в локальной системе поверхности она вычисляется по стандартному правилу преобразования ковариаций:

$$C_{loc} = J C_{glob} J^T$$

где

$$J = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}$$

В явном виде элементы локальной матрицы равны

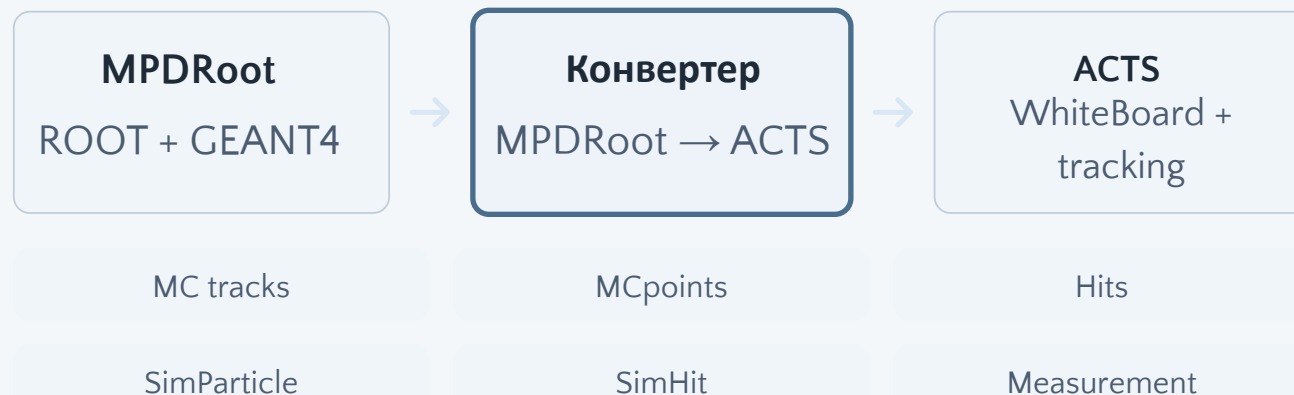
$$\sigma_{loc0}^2 = \cos^2\varphi\sigma_x^2 + \sin^2\varphi\sigma_y^2$$

$$\sigma_{loc1}^2 = \sin^2\varphi\sigma_x^2 + \cos^2\varphi\sigma_y^2$$

$$cov(loc0, loc1) = \sin\varphi\cos\varphi(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)$$

Наличие недиагонального элемента после поворота является естественным: даже если ошибки независимы в глобальной системе координат, в повернутой локальной системе они в общем случае становятся коррелированными.

Преобразование объектов: MPDRoot → ACTS



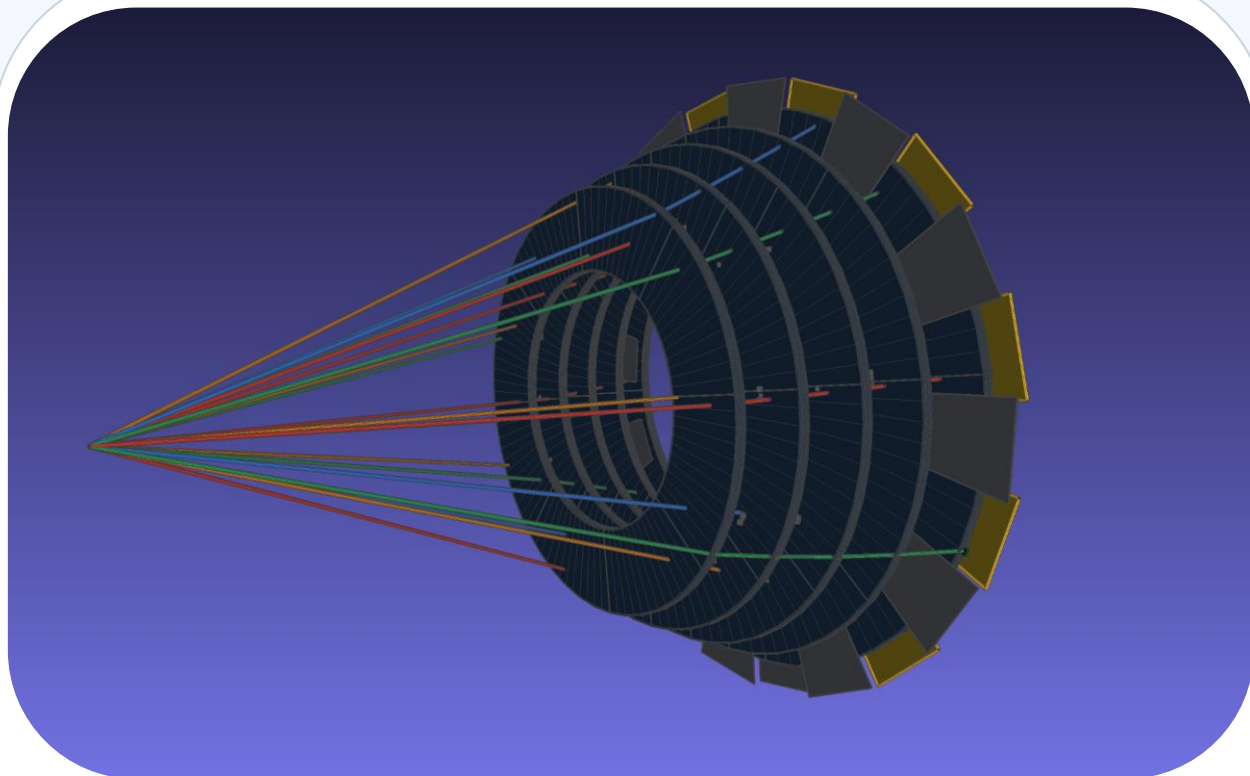
Принцип работы конвертера

1. Геометрия ETOF → Surface / Layer / Volume+ Geold

2. MCTrack → SimParticle
Point → SimHit
Hit → Measurement

Цель: подготовить объекты, описывающие ETOF, к экстраполяции реконструированных треков, процедуре их сопоставления со срабатываниями ETOF и проверки корректности моделирования в ACTS

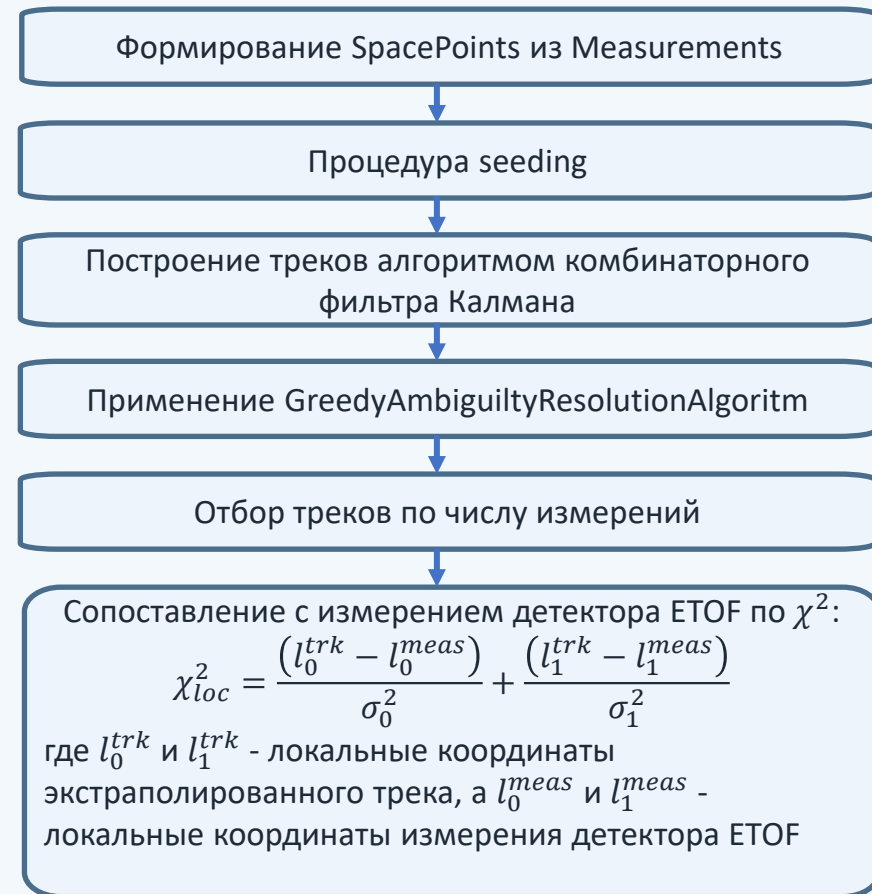
13. Реконструкция и сопоставление с ЕТОФ: Пространственное сопоставление



Визуализация экстраполированных треков через геометрии детекторов FTD и ETOF

Экспериментально: максимальное расстояние между треком и измерением 5 мм

Цепочка реконструкции и сопоставления трека

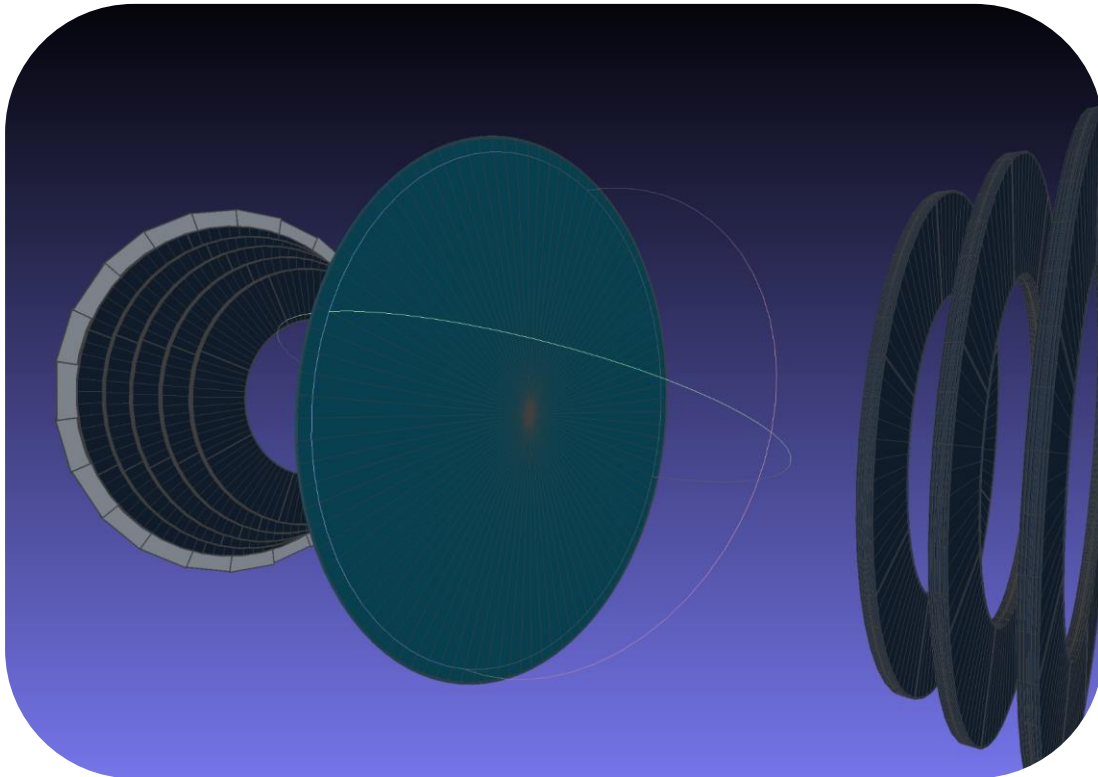


Сопоставление с измерением детектора ETOF по χ^2 :

$$\chi_{loc}^2 = \frac{(l_0^{trk} - l_0^{meas})^2}{\sigma_0^2} + \frac{(l_1^{trk} - l_1^{meas})^2}{\sigma_1^2}$$

где l_0^{trk} и l_1^{trk} - локальные координаты экстраполированного трека, а l_0^{meas} и l_1^{meas} - локальные координаты измерения детектора ETOF

14. Реконструкция и сопоставление с ЕТОФ: сопоставление по времени



Визуализация дополнительной поверхности в начале координат

Временное окно: $|\Delta t_{selected}| = 1$ нс

Цепочка реконструкции и сопоставления трека

Создание дополнительной поверхности в начале координат

Экстраполяция трека к поверхности и получение его длины: $L = L_{vertex \rightarrow start} + L_{start \rightarrow ETOF}$

Резервная оценка длины трека по расстоянию от вершины: $L = |\vec{r}_{start} - \vec{r}_{vertex}| + L_{start \rightarrow ETOF}$

Для массовых гипотез π, K, p вычисляется скорость:

$$\beta_h = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m_h^2}}$$

Вычисляется ожидаемое время полета:

$$t_{pred,h} = \frac{L}{\beta_h}$$

Выбирается минимальная по модулю величина среди трех гипотез:

$$\Delta t_{selected} = \Delta t_{h^*} \quad h^* = \arg \min_{h \in \{\pi, K, p\}} |\Delta t_h|$$

15. Контрольный запуск реконструкционной цепочки

Проверялась полная цепочка: ETOFHit → Measurement, FTD-трекинг, matching и truth-валидация

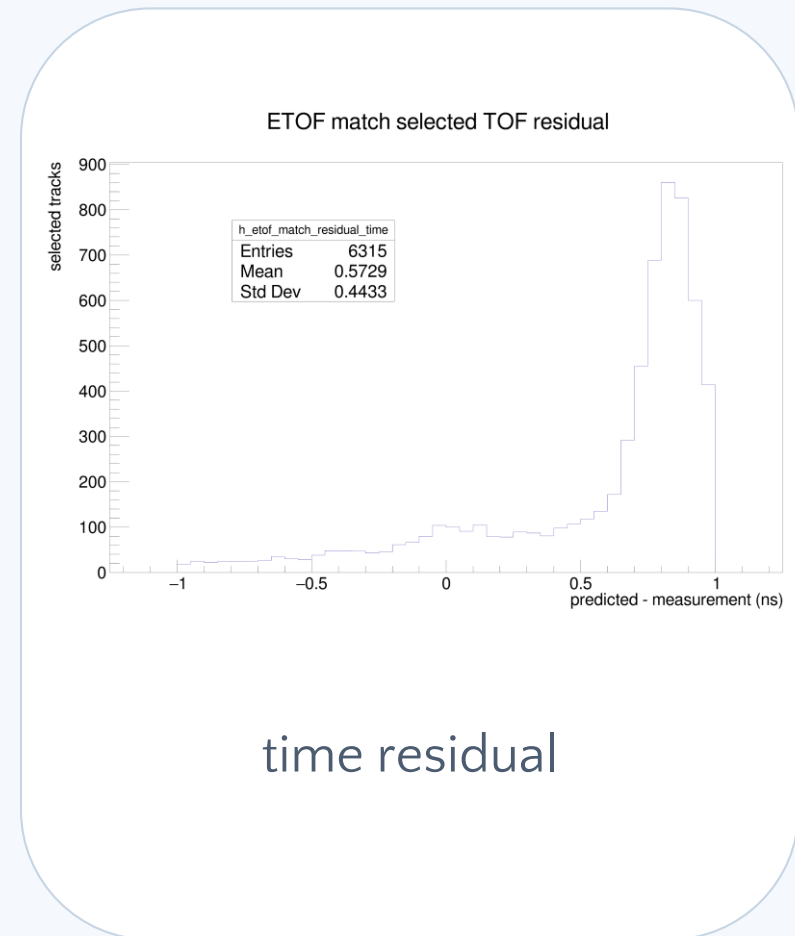
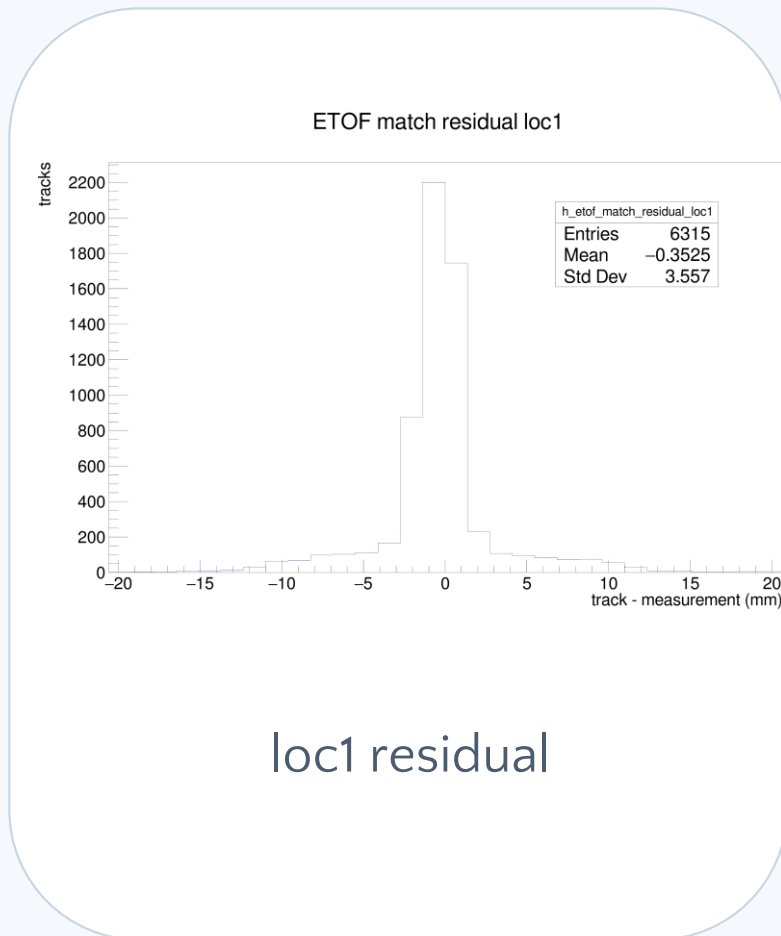
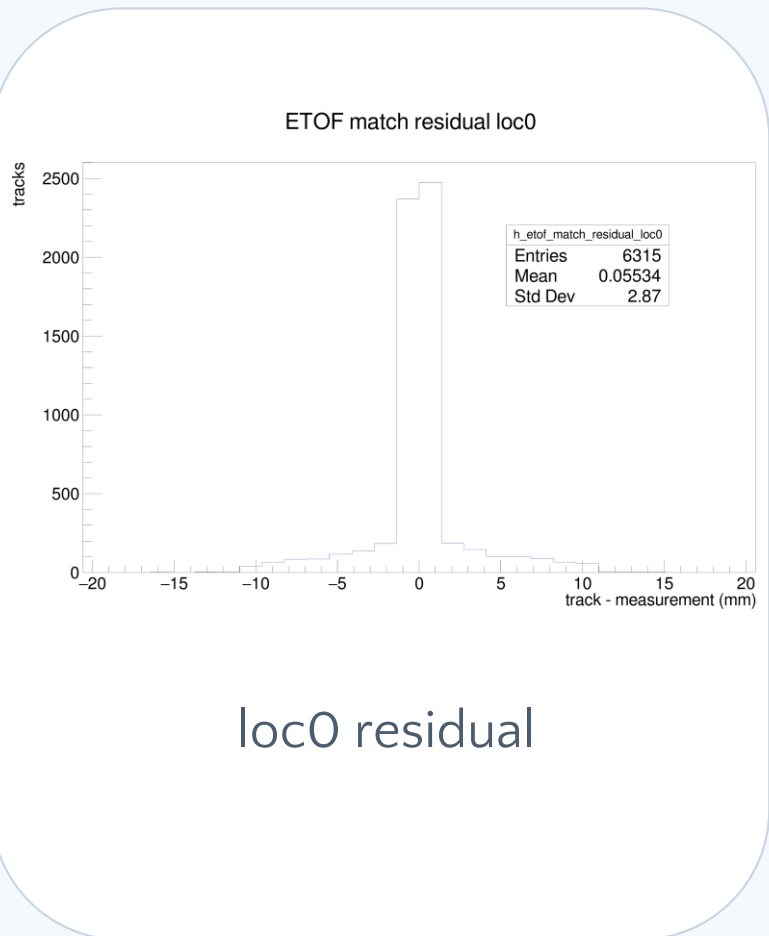
Числа контрольного запуска

Величина	Значение
ETOF MCPoints → Hit	290321
ETOF Measurement	290321
ACTS-треки в диагностике	602789
после ambiguity resolution	311789
сопоставлено с ETOF	6315
подтверждено по truth	5163
несовпадающая MC-частица	1152

5163 / 6315 ≈ 81.8% подтверждений по истинной информации

16. Распределения Residual

Невязки показывают согласованность экстраполированного трека и выбранного ETOF-измерения



17. Ограничения и дальнейшие исследования

Ограничения текущей реализации

- В ACTS перенесена не полная детальная конструкция ЕТОФ, а упрощённая модель активных плоскостей. Внутренняя структура МРПК, газовые зазоры, стеклянные пластины, электроника, детальная сегментация по стрипам, материалы на этом этапе не моделируются.
- Класс `MpdEtofHitProducerIdeal` не моделирует реальное считывание детектором, временное разрешение, эффективность, шумы, мёртвые каналы и неоднозначности срабатываний.
- В текущей реализации длина траектории для основной части сопоставлений берётся из результата пропагации от состояния трека на дополнительной поверхности в вершине к поверхности ЕТОФ.

Дальнейшие исследования

- Требуется создание полной детализированной геометрии ЕТОФ. В такой геометрии должны быть описана реальная структура модулей: размеры и положение МРПК, сегментация по считывающим стрипам, относительное расположение слоёв, материалы чувствительных и пассивных элементов.
- Следует заменить идеализированный производитель `Hit` полноценной реконструкцией, то есть перейти от идеализованного попадания на поверхность к моделированию отклика конкретного считывающего элемента.
- Необходимо подготовить более удобный формат диагностического вывода.
- Необходимо проработать алгоритмы создания треков и их сопоставления.

18. Выводы

Основные результаты

- Построена упрощённая геометрия ETOF в формате ACTS
- Реализовано преобразование данных MPDRoot в объекты ACTS
- Подготовлены Measurement, SimHit, SimParticle и truth-связи
- Выполнено построение треков детектора FTD и удаление неоднозначных кандидатов
- Реализовано сопоставление треков с измерениями детектора ETOF
- Получены контрольные распределения и графики residual для проверки результата

Работа создаёт основу для дальнейшего включения ETOF в реконструкцию ACTS и последующего использования в идентификации частиц.

Спасибо за внимание

**Интеграция торцевого времяпролётного детектора ETOF MPD
в программный пакет ACTS**

Веретенников К.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова · ОИЯИ, Дубна · 2026