

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.
ЛОМОНОСОВА»

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ



Декодирование и реконструкция экспериментальных данных времяпролетной системы TOF эксперимента многоцелевого детектора MPD на коллайдере NICA

Выполнил студент 209м группы:
Барышников Виктор Михайлович

Научный руководитель:
кан. ф.-м. наук Леонтьев В.В.

Научные консультанты:
н.с. Румянцев М.М.
кан. ф.-м. наук, нач. сектора Бабкин В.А.

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility).



nica.jinr.ru

$\sqrt{s} = 4-11$
ГэВ/н
Энергия

Окружность
кольца
коллайдера
503 м

ПАРАМЕТРЫ NICA

Спектр ядер:

от водорода до висмута, включая золото

Энергия выведенных пучков:
до 4.5 ГэВ/н

Интенсивность (в секунду):
Тяжелые ионы — $5 \cdot 10^8$
Протоны — 10^{10}

Проектная светимость:
Тяжелые ионы — $10^{27} \text{ см}^{-2}/\text{сек}^{-1}$

Легкие ядра и поляризованные
протоны и дейтроны — $10^{32} \text{ см}^{-2}/\text{сек}^{-1}$



Многоцелевой детектор MPD.

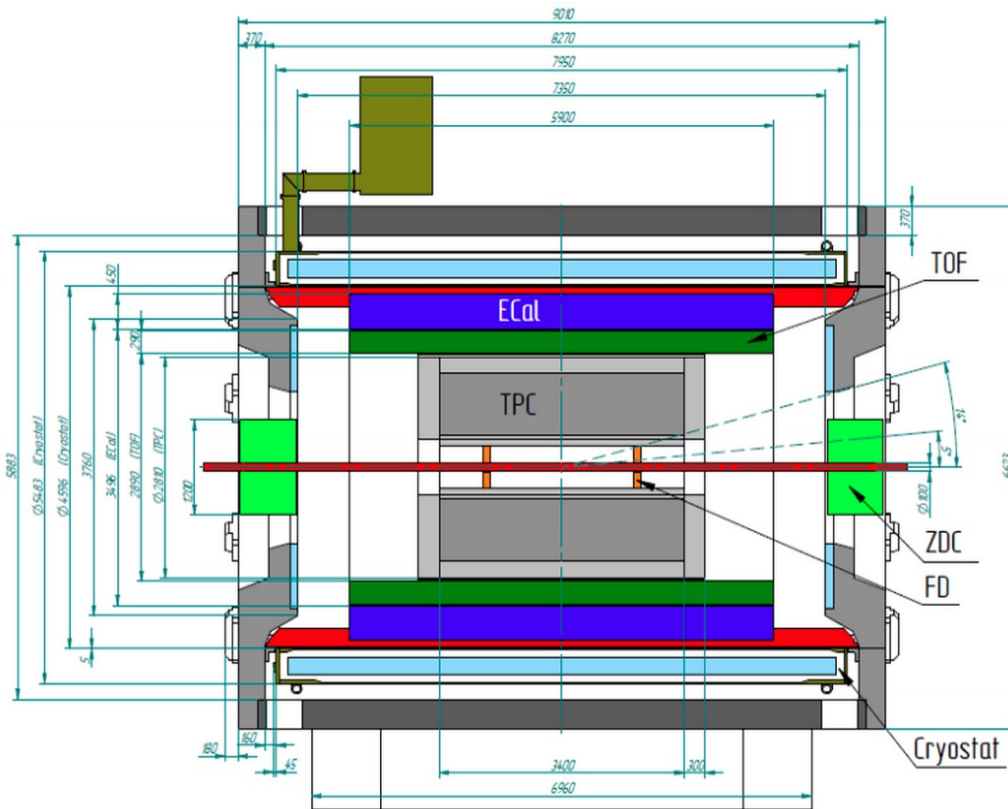


Схема детектора MPD.

Детектор включает в себя трехмерную систему трекинга (время-проекционная камера TPC) и систему идентификации частиц.

Идентификация заряженных адронов в широком диапазоне скоростей и до полного импульса 3 ГэВ/с достигается с помощью комбинирования измерений времени пролета и информации о потерях энергии (dE/dx) от TPC. Время пролета измеряется при помощи системы TOF (“стоп” время) и детектора FD (время “старта”)

Электромагнитный калориметр является частью PID-системы и его основная цель — идентифицировать электроны, фотоны и измерить их энергию с высокой точностью.

Метод времени пролета.

Рассмотрим движущуюся релятивистскую частицу со скоростью V и с массой покоя m , которая преодолет расстояние L за время t :

$$t = \frac{L}{V} = \frac{L}{\beta c}, \quad \beta = \frac{pc}{E} = \frac{pc}{\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}}, \quad t = \frac{L}{c} \cdot \sqrt{1 + \frac{m^2 c^4}{p^2 c^2}},$$

Квадрат массы частицы:

$$m^2 = \frac{p^2}{c^2} \cdot \left[\frac{t^2 c^2}{L^2} - 1 \right] = \frac{p^2}{c^2} \cdot \left[\left(\frac{\tau}{L} \right)^2 - 1 \right].$$

Дисперсия квадрата массы частицы, определяемая из времени пролета:

$$\sigma_{m^2}^2 = 4m^4 \left(\frac{\sigma_p}{p} \right)^2 + 4E^4 \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau} \right)^2 + 4E^4 \left(\frac{\sigma_L}{L} \right)^2,$$

Временное разрешение зависит от разрешений детекторов TOF (детектор конечной временной отметки) и FD (детектор начальной временной отметки), накамерной и считывающей электроники, синхронизирующих устройств:

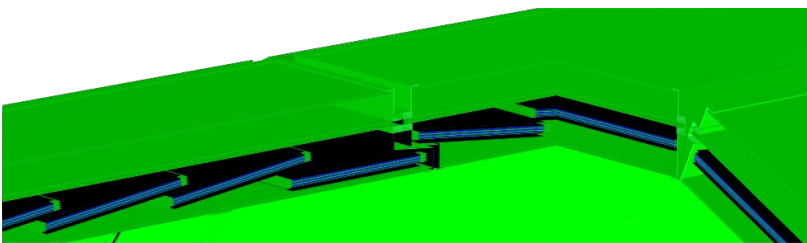
$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{TOF}^2 + \sigma_{FD}^2 + \sigma_{TOF\ FEE}^2 + \sigma_{FD\ FEE}^2 + \sigma_{TOF\ TDC}^2 + \sigma_{FD\ TDC}^2 + \sigma_{sync}^2}.$$

Таким образом, важно разработать программное обеспечение для определения времени пролета с наилучшим разрешением.

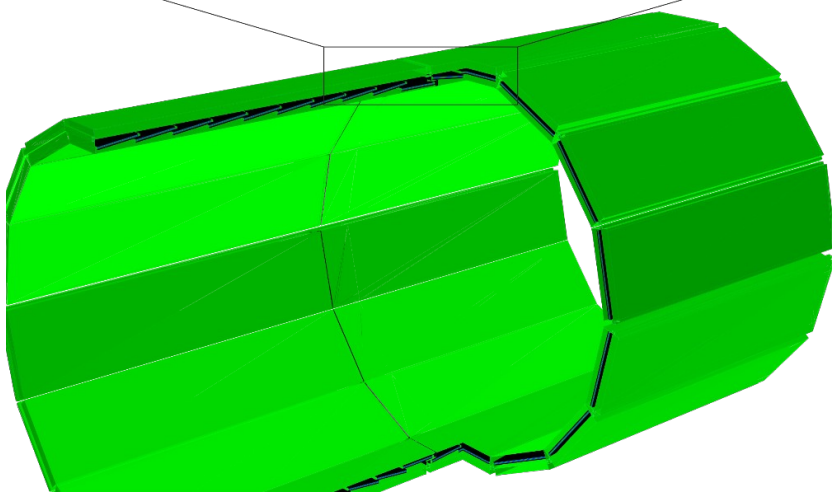
Цели и задачи работы.

- 1) Разработка программного обеспечения для декодирования сигналов детекторов системы TOF и дальнейшая их реконструкция.
- 2) Разработка программного обеспечения для получения и автоматизированного применения коррекций и калибровок системы TOF.
- 3) Разработка программного обеспечения для создания таблиц соответствий каналов электроники каналам детекторов и их тестирования.
- 4) Занесение возможных коррекций, калибровок и таблиц соответствий каналов электроники каналам детекторов в базу данных эксперимента MPD.
- 5) Анализ данных, полученных на установке тестирования модулей TOF системы, в рамках которого будут оценены характеристики системы.

Детектор TOF.



Система разделена на 14 секторов длиной $\sim 5,9$ м. Один сектор содержит два независимых модуля. Каждый модуль содержит 10 многозачорных резистивных плоских камер MRPC, накамерную электронику, кабели питания усилителей и сигнальные кабели.



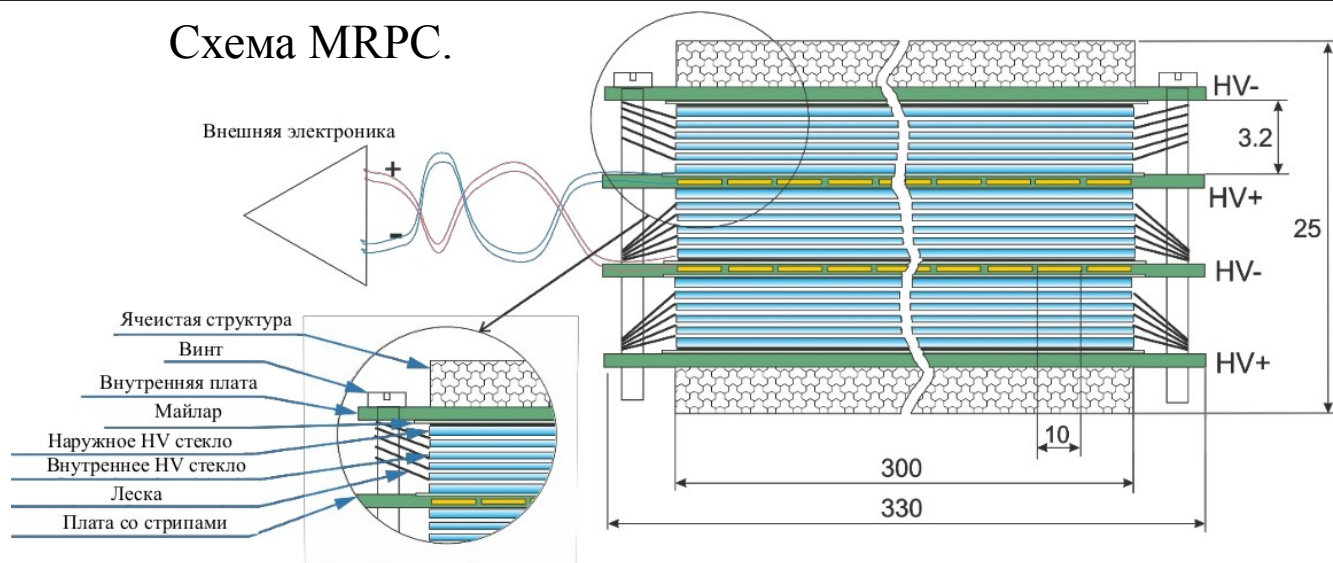
Геометрия TOF MPD.

Времяпролетная система обеспечит:

- большой диапазон псевдобыстрот $|\eta| < 1.2$;
- высокую степень детализации для поддержания общей загруженности системы ниже 15% и минимизации снижения эффективности из-за двойных попаданий;
- хорошее координатное разрешение для обеспечения эффективного сопоставления попаданий в TOF систему с треками TPC;
- высокую геометрическую эффективность и эффективность обнаружения;
- идентификацию пионов и каонов с $p_T < 1,5$ ГэВ/с;
- идентификацию (анти)протонов с $p_T < 3$ ГэВ/с;
- функционирование элементов детекторов в магнитном поле 0,5 Тл;
- временное разрешение всей системы, включая электронику, менее 80 пс.

Детектор MRPC.

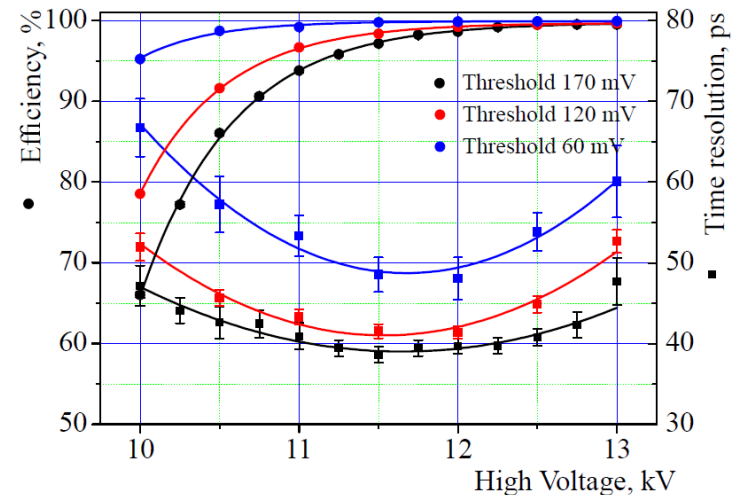
Схема MRPC.



	Кол-во детекторов	Кол-во считывающих стрипов	Активная поверхность, м ²	Кол-во FEE плат	Кол-во каналов FEE плат
MRPC	1	24	0.192	2	48
Модуль	10	240	1.848	20	480
TOF система	280	6720	51.8	560	13440

Основные параметры системы TOF.

Детектор MRPC состоит из трех блоков по 5 газовых зазоров в каждом. MRPC 24 стрипами шириной 10 мм и длиной 640 мм, которые считываются с двух сторон.



Эффективность и временное разрешение детектора MRPC для различных пороговых значений NINO.

Используемая накамерная и считывающая электроника.

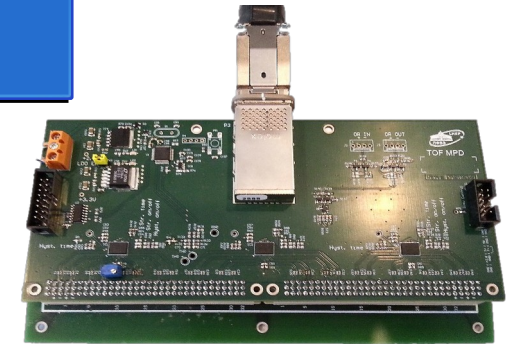
Особенности накамерной электроники TOF системы на базе ASIC NINO следующие:

- наличие конденсаторов перед входными каналами NINO платы, для считывания с двух сторон стрипа;
- Выходные сигналы типа LVDS;
- контроль и управление порогов дискриминации;
- мониторинг и управление питанием микросхем NINO;
- мониторинг температуры платы и газового пространства.

72-канальные модули ВЦП (время-цифровой преобразователь) в стандарте VME64x на базе микросхемы НРТДС, которые называются TDC72VHL, предназначены для оцифровки поступающих сигналов с выхода накамерной электроники. Ширина отсчетов ВЦП составляет ~ 23.4 пс.

ВЦП модули подключаются в крейты VME-VXS вместе с триггерным и синхронизационным модулем ТТVXS. Синхронизация модулей ВЦП в одном крейте VME-VXS осуществляется по высокопроизводительной шине VXS. Между крейтами временная синхронизация осуществляется при помощи технологии «White Rabbit», которая обеспечивает точность синхронизации лучше 10 пс.

24-канальная
плата
накамерной
электроники на
базе NINO с
выходным
разъемом СХР.



Время-цифровой
преобразователь
TDC72VHL v4 с
входными
разъемами СХР.



Крейт VME-VXS с
модулями
ВЦП, триггерным и
синхронизационн
ым модулем.



Установка для тестированию модулей времяпролетной системы.



Установка тестирования модулей
времяпролетной системы TOF.

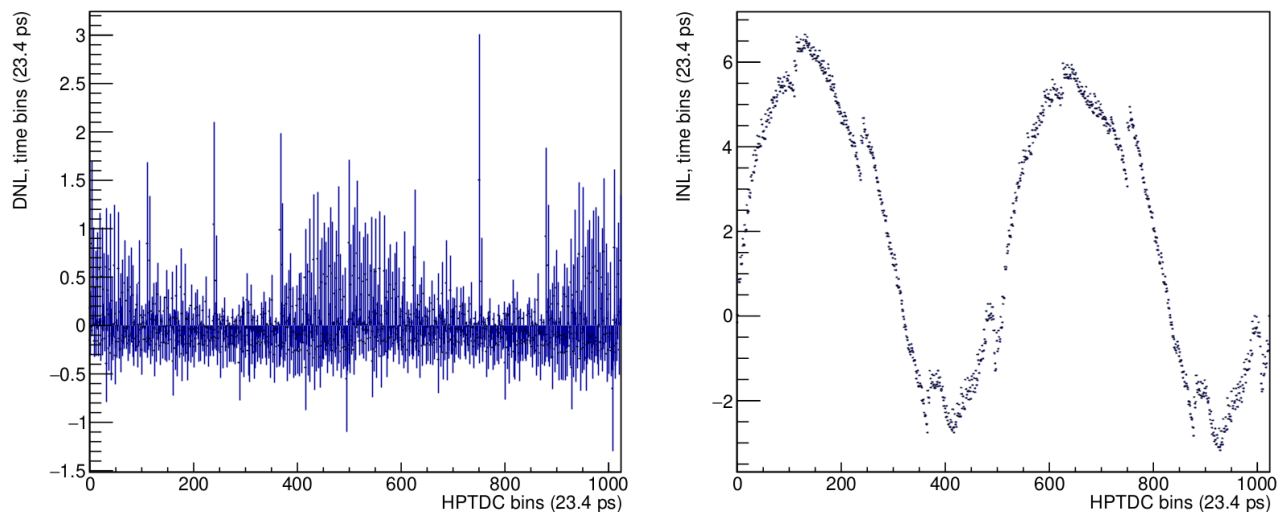


Стойки с газовой системой стенда и
система сбора данных

Калибровки и коррекции времяпролетной системы TOF.

- INL-калибровка (Integral NonLinearity) — калибровка интегральной нелинейности каналов ВЦП;
- CL-калибровка (Cable Length) — калибровка индивидуальных задержек времени в каждом канале MRPC;
- ToT-коррекция (Time-Over-Threshold) — время-амплитудная коррекция методом Time-Over-Threshold;
- TS-коррекция (Time Shift) — коррекция времени при синхронизации модулей ВЦП из разных крейтов;
- Alignment-калибровка — калибровка геометрии системы TOF.

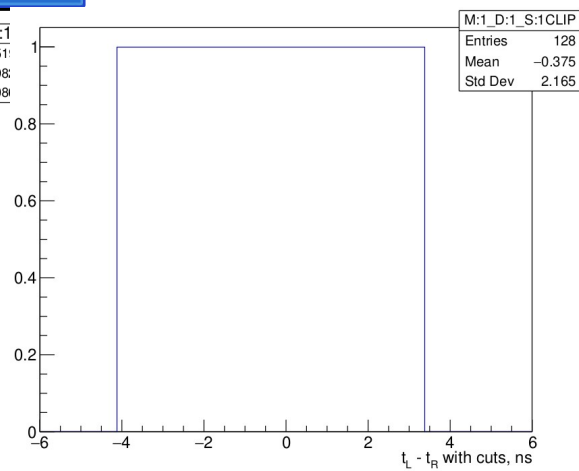
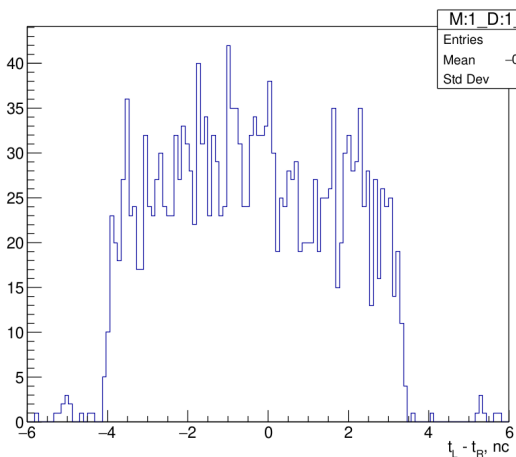
Для определения нелинейностей каналов ВЦП используется статистический тест плотности кода на основе источника случайных событий. В идеальном случае количество событий в каждом бине ВЦП должно быть одинаковым, но, вследствие нелинейности, все бины в реальности имеют разную ширину по времени, и поэтому число событий в каждом бине будет разное. Для всех бинов вначале вычисляется дифференциальная нелинейность (DNL) и после интегральная нелинейность (INL).



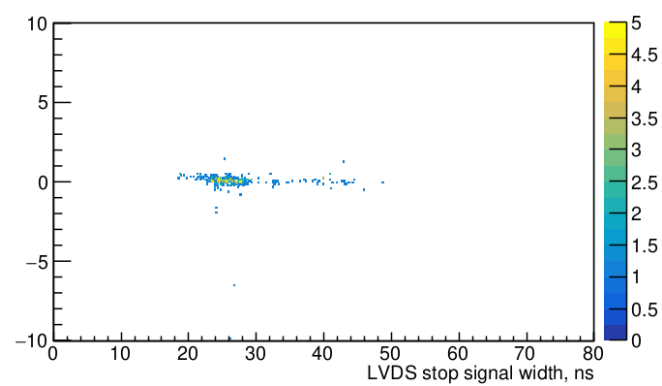
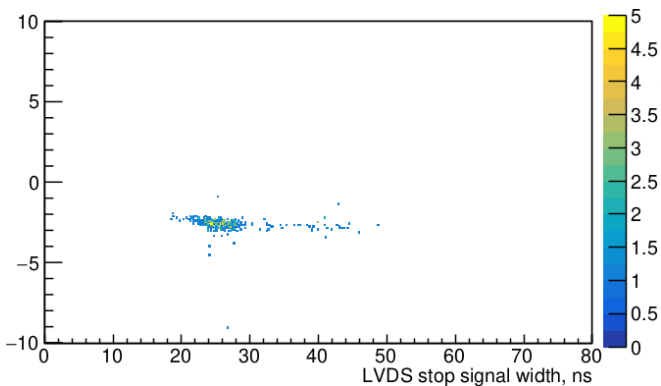
Дифференциальная нелинейность (DNL) (слева) и интегральная нелинейность (INL) (справа) одного канала (1024 бина) ВЦП TDC72VHL.

Калибровки и коррекции времяпролетной системы TOF.

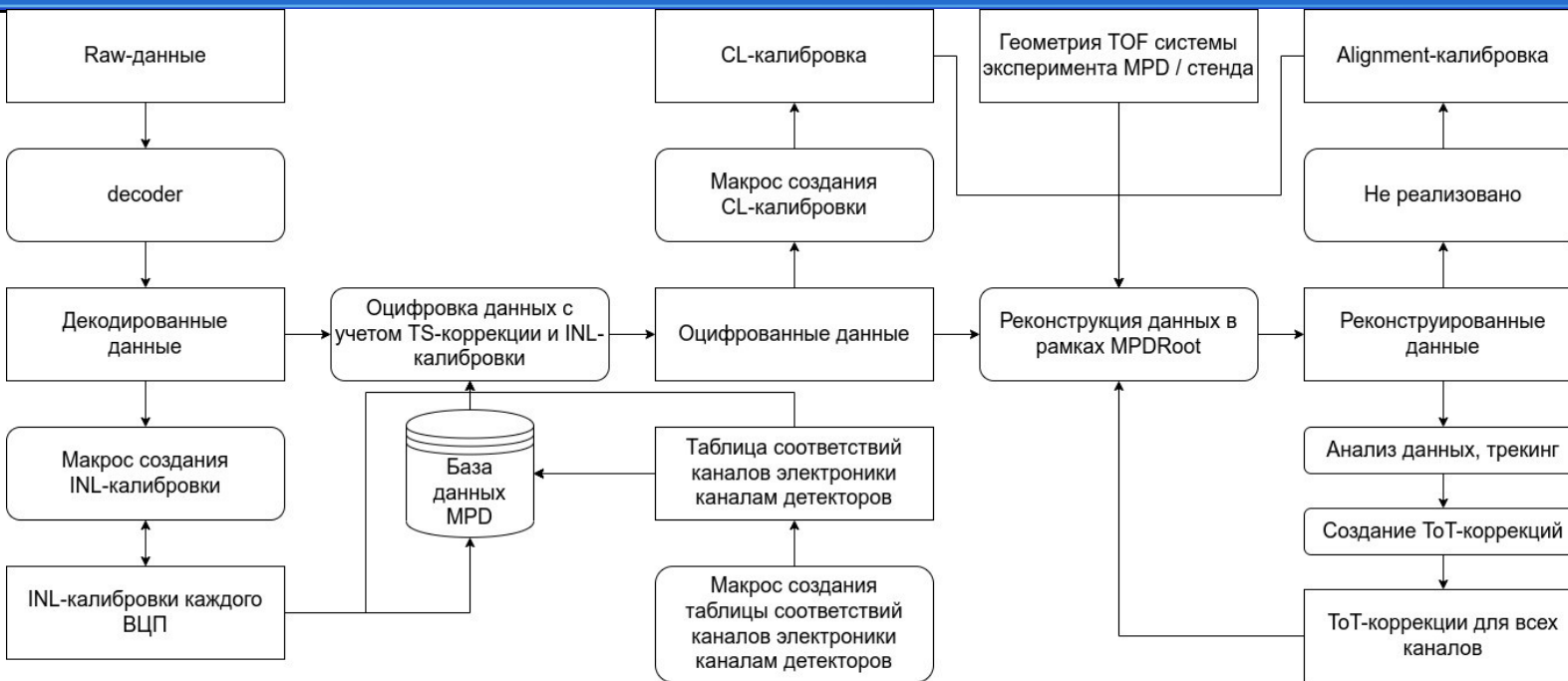
Калибровка индивидуальных задержек времени в каждом канале MRPC производится след.образом. Для каждого канала необходимо построить одномерную гистограмму «время сигнала слева минус время сигнала справа» всех принадлежащих стрипу хитов. Далее, нужно обрезать края гистограммы с малым количеством точек и после вычислить среднее значение. Вычитая эту величину из изначального времени хита мы учтем индивидуальную задержку времени.



Ширина импульса сигнала должна учитываться при измерениях времени. Это возможно реализовать с помощью метода «Time-Over-Threshold», который заключается в следующем: необходимо для каждого канала MRPC отобрать хиты и построить распределения «время - порог» от ширины импульса LVDS. Это распределение должно быть приведено к линейной форме для улучшения временного разрешения.



Программное обеспечение для декодирования и реконструкции данных, полученных на установке тестирования модулей времяпролетной системы TOF.



Основная ветка:

- декодирование данных;
- оцифровка данных с применением таблиц соответствий каналов электроники каналам детекторов и ВЦП модулей крейтам;
- автоматизированное применение INL- и CL-калибровок, TS- и ToT-коррекции из разных источников;
- реконструкция хитов.

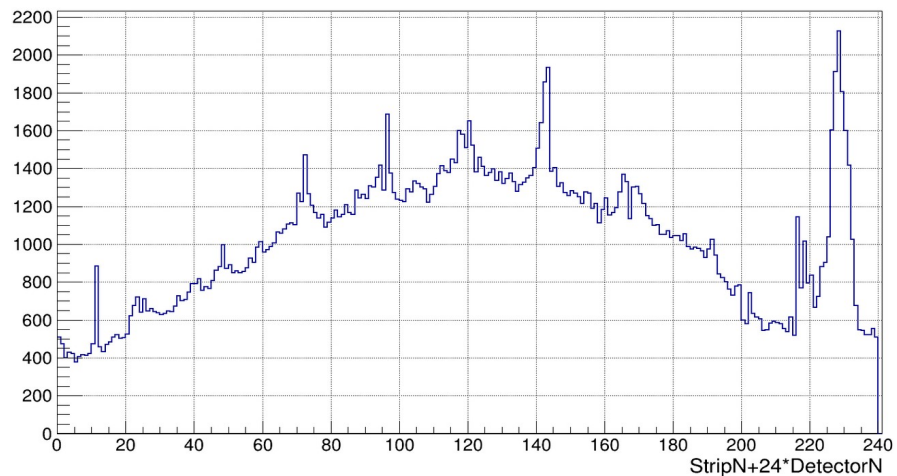
Доп. ветки:

- работы с базой данных;
- трекинг и анализ реконструированных данных

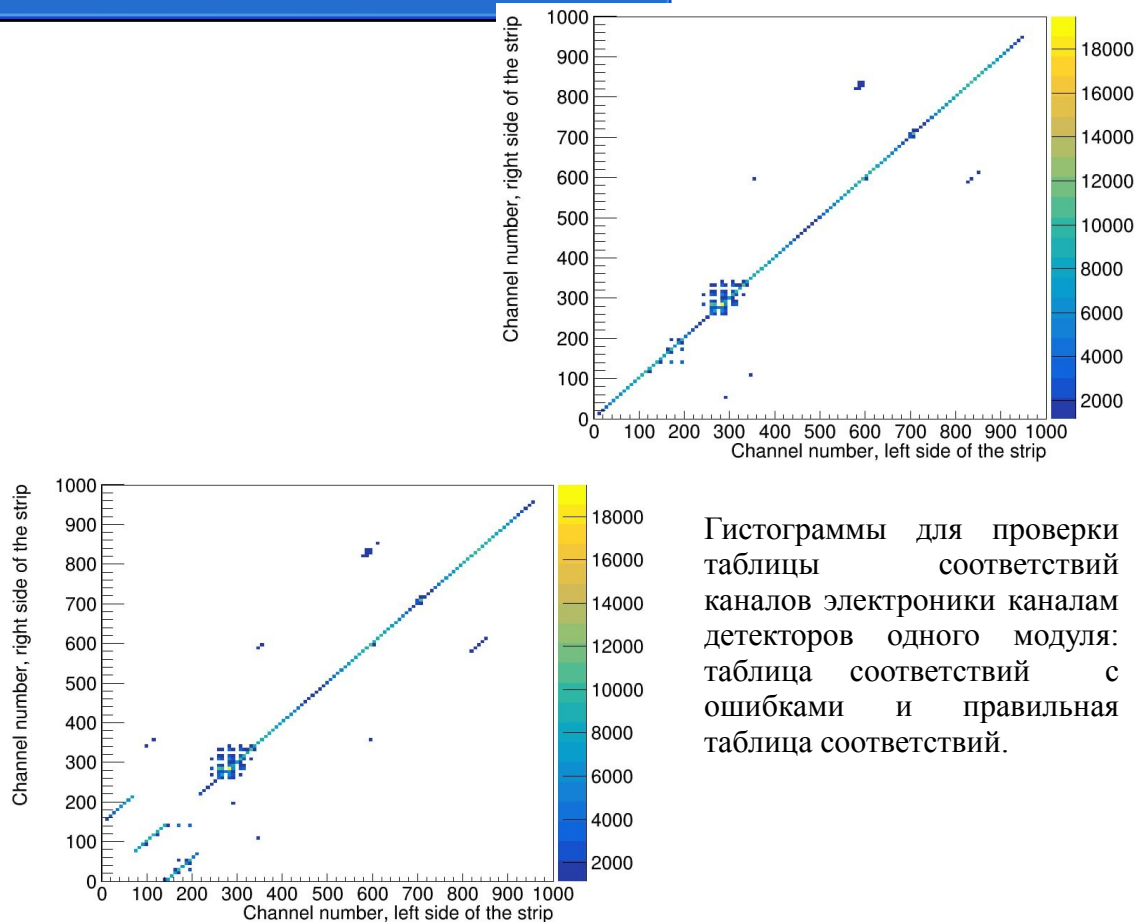
Ветки получения таблиц соответствий, геометрии, калибровок и коррекций:

- создание таблиц соответствий каналов электроники каналам детекторов и ВЦП модулей крейтам;
- получение INL- и CL-калибровок, TS- и ToT-коррекции из разных источников;
- создание геометрии TOF системы.

Результаты обработки данных. Тестирование таблиц соответствий. Проверка работоспособности каналов стенда.

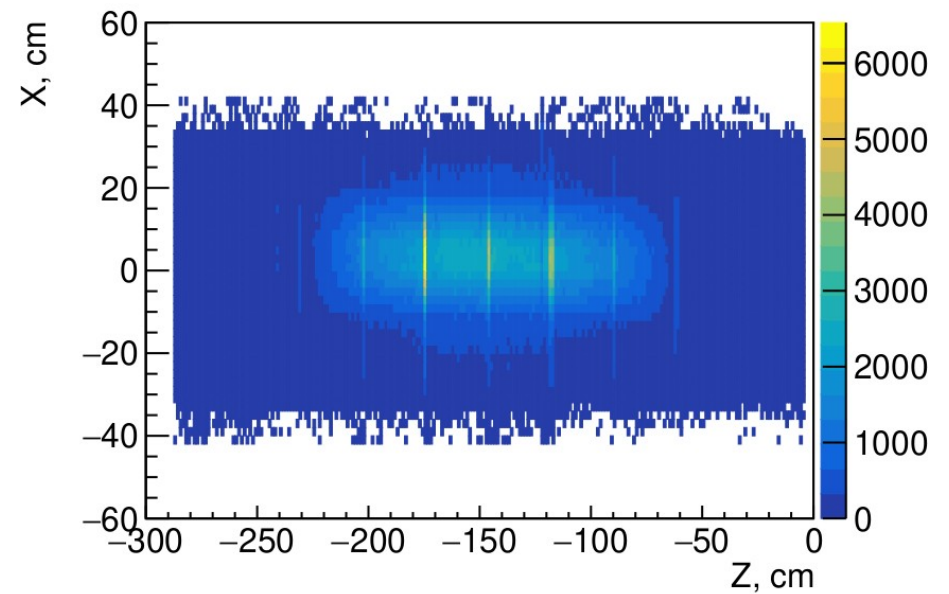
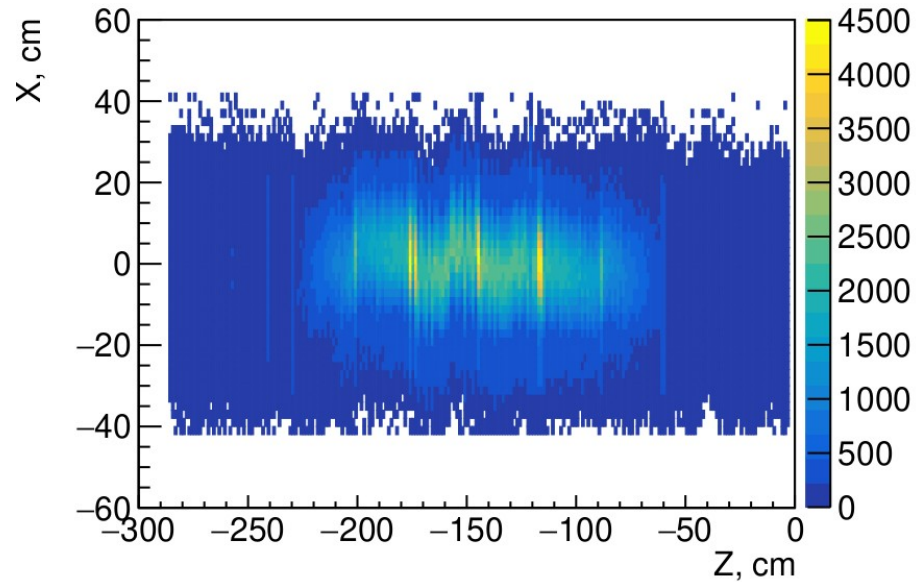


Проверка каналов в одном модуле



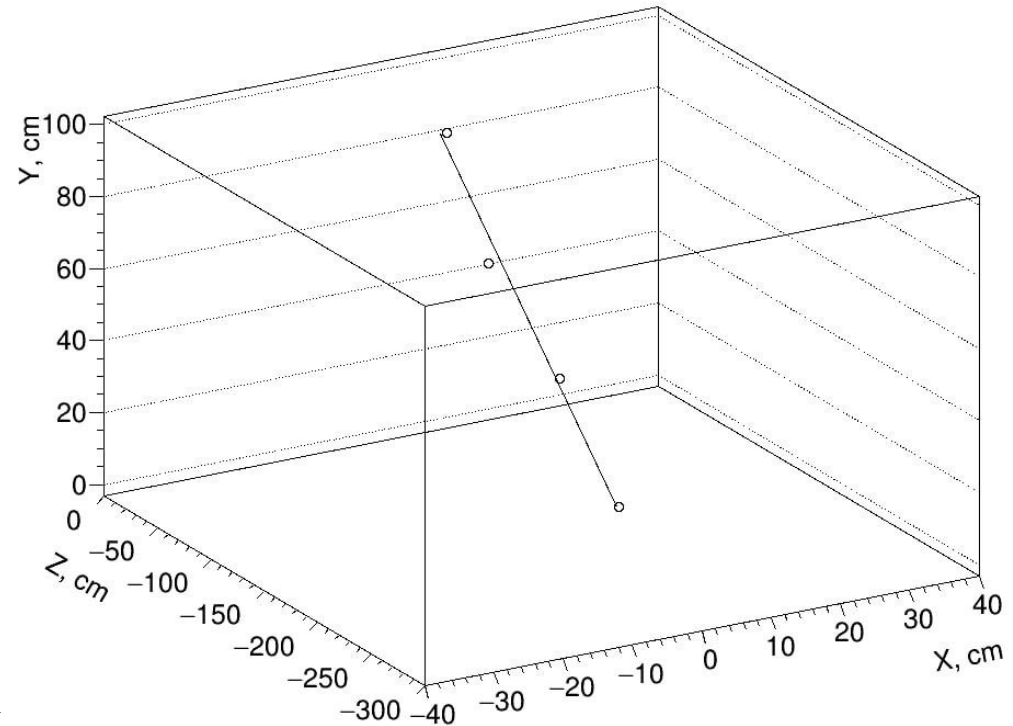
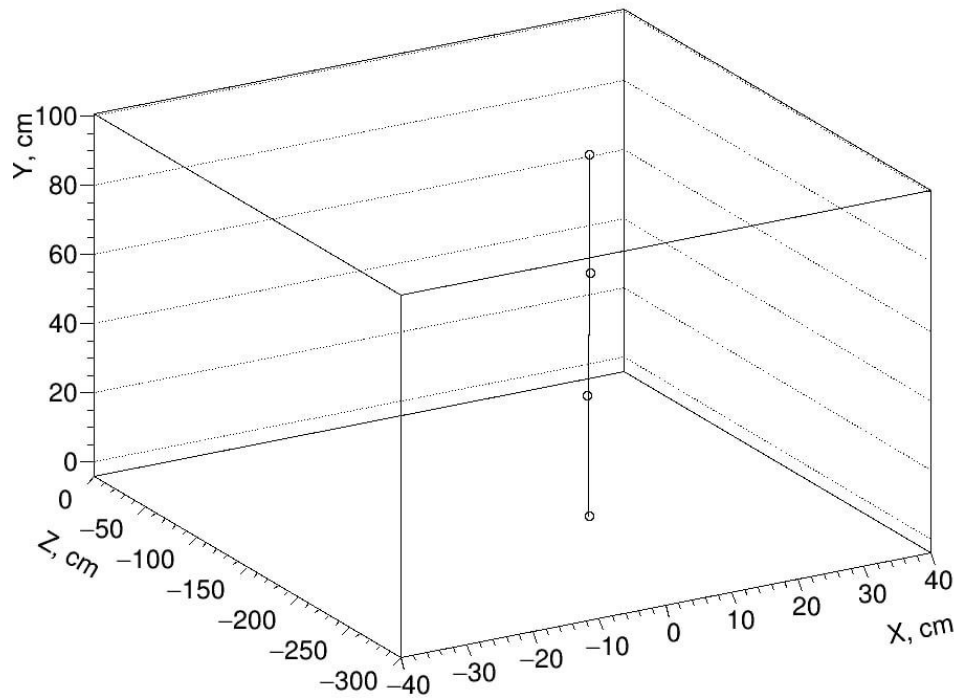
Гистограммы для проверки таблицы соответствий каналов электроники каналам детекторов одного модуля: таблица соответствий с ошибками и правильная таблица соответствий.

Результаты обработки данных. Результаты применения CL-калибровки.



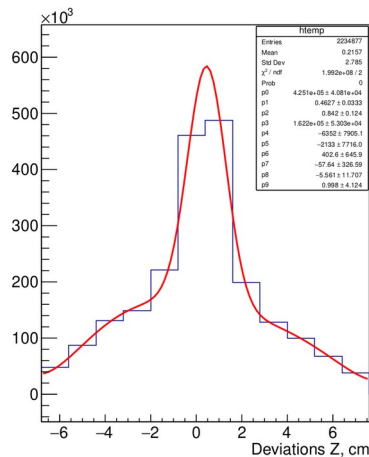
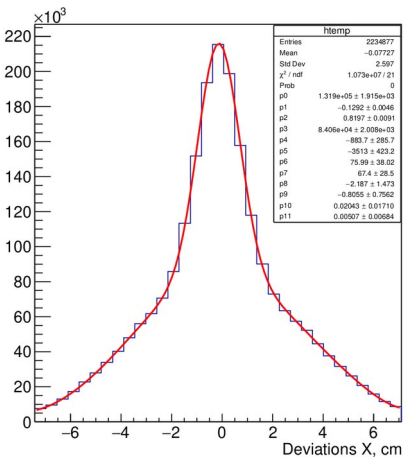
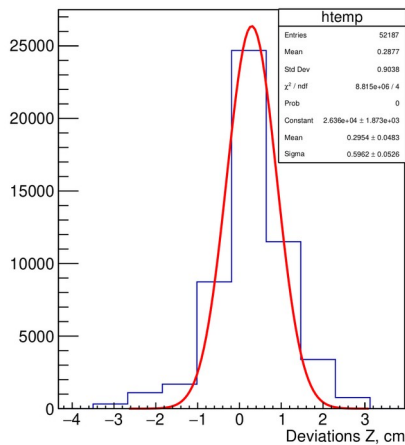
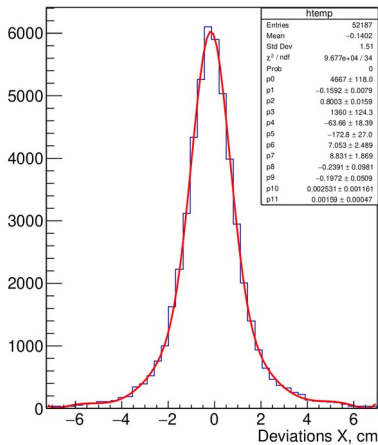
Положение хитов в модуле до и после
применения CL-калибровки

Результаты обработки данных. Вычисление характеристик детекторов TOF системы.



Реконструкция трека на основе четырех хитов из различных TOF модулей.
слева — вертикальный трек, справа — наклонный трек.

Результаты обработки данных. Вычисление характеристик детекторов TOF системы.



Отклонения точек пересечения
реконструированного трека и плоскости
соответствующего детектора от координат
соответствующих хитов этом детекторе.

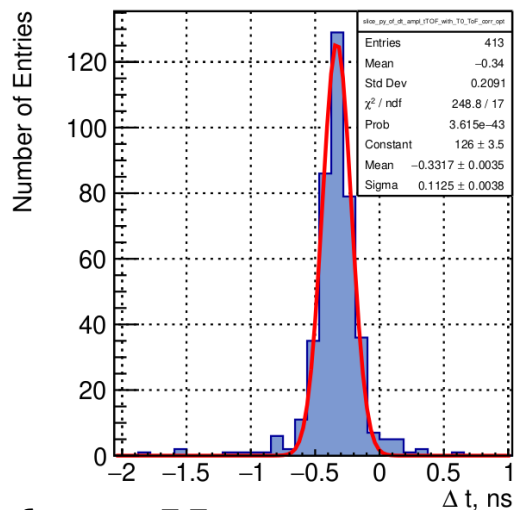
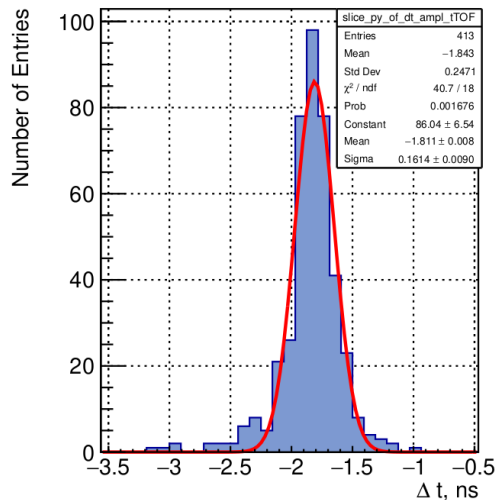
Верхние два рисунка — отклонения координат X и Z для вертикальных треков. Нижние два — отклонения координат X и Z для вертикальных и наклонных треков.

Для вертикальных треков отклонения составляют $\sigma_x \approx 0.80$ см и $\sigma_z \approx 0.60$ см. Для выборки, включающей все треки, отклонения составляют $\sigma_x \approx 0.82$ см и $\sigma_z \approx 0.84$ см

Результаты обработки данных. Вычисление характеристик детекторов TOF системы.

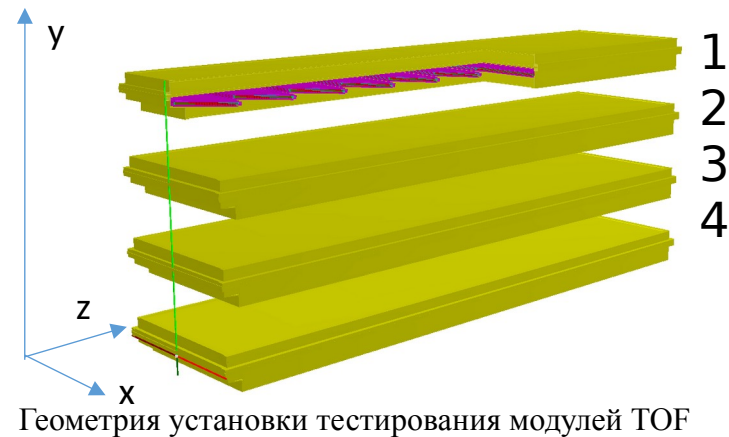
После обработки экспериментальных данных и применения CL- и INL-калибровок и TS-коррекции проведена ToT-коррекция и вычислено временное разрешение времени пролета

$$\sigma_t = \sqrt{2 \cdot \sigma_{MRPC}^2 + 2 \cdot \sigma_{TDC}^2 + 2 \cdot \sigma_{FEE}^2 + \sigma_{sync}^2}$$



Оценки разрешения времени пролета без учета ToT-коррекции и с учетом.

Для получения оценки разрешения времени одним детектором MRPC были отобраны только вертикальные треки с хитами, принадлежащими стрипам с одинаковым номером из MRPC с одним и тем же номером. Это сделано для того, чтобы за время «старта» отвечал один и тот же стрип. Временное разрешение такой времяпролетной системы составляет $\sigma_{TOF} \approx 161$ пс без учета ToT-коррекции, а с учетом $\sigma_{TOF} \approx 112$ пс



Хит из модуля №	Время старта — собственное время хита из модуля №	Стоп время — собственное время хита из модуля №
1	4	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4

Правила определения времени старта и стоп времени.

Заключение.

В данной работе описан реализованный процесс декодирования, реконструкции и обработки экспериментальных данных TOF системы эксперимента MPD с применением INL- и CL-калибровок и ToT- и TS-коррекций. Описано разработанное соответствующее программное обеспечение, методы и способы тестирования работы TOF модулей. Используемые таблицы соответствий каналов электроники каналам детекторов и INL-калибровки всех ВЦП модулей были загружены в базу данных эксперимента MPD.

После трекинга прямых треков с учетом кластеризации хитов и ограничений по координатам, амплитуде и времени были получены оценки координатного и временного разрешения детектора MRPC: для вертикальных треков отклонения составляют $\sigma_x \approx 0.80$ см, $\sigma_z \approx 0.60$ см, а временное разрешение $\sigma_{TOF} \approx 112$ пс. Результаты, за исключением σ_{TOF} , согласуются с характеристиками времяпролетной системы эксперимента MPD. Полученное временное разрешение превышает заявленное потому что, используемые экспериментальные данные набраны на космическом излучении. Стоит отметить, что оценки не носят окончательный характер и на данный момент продолжается разработка, проверка и оптимизация данного ПО с использованием нового стандарта языка C++20, в том числе и с целью беспрепятственной интеграции других детекторных систем эксперимента MPD в данный пакет.

Благодарности.

Автор хотел бы выразить благодарность научным консультантам Бабкину Вадиму Андреевичу и Румянцеву Михаилу Михайловичу за помощь в выполнении поставленной в данной работе цели, а также своему научному руководителю Леонтьеву Владимиру Викторовичу.

Автор благодарит сотрудников сектора идентификации частиц НЭОМД Лаборатории Физики Высоких Энергий.

Также автор выражает благодарность руководству ЛФВЭ Объединенного Института Ядерных Исследований и кафедры физики элементарных частиц Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Статьи, выступления и конкурсы.

Статьи

- Baryshnikov et al., «Software method of determination of the event collision time with the TOF detector of the MPD at NICA». Принята к публикации в AIP Conference Proceedings.
- Барышников и др., «Статус времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA». Учен. зап. физ. факта Моск. ун-та, No 3, 2023.
- Baryshnikov et al., «Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider». Physics of Atomic Nuclei, v. 86, No 5, 2023.

Выступления

- Устный доклад: Baryshnikov et al., «Software method of determination of the event collision time with the TOF detector of the MPD at NICA». The IV International Scientific Forum «Nuclear science and Technologies». 26.09.2022 — 30.09.2022. Республика Казахстан, г. Алматы, Институт ядерной физики (ИЯФ).
- Устный доклад: Барышников и др., «Статус времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA». XXIII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». 23.11.2022 — 24.11.2022. Россия, г. Москва, НИИЯФ МГУ.
- Устный доклад: Baryshnikov et al., «Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider». The 6th international conference on particle physics and astrophysics 2022». Россия, г. Москва, НИЯУ МИФИ.

Конкурсы

- Барышников и др., "Декодирование, реконструкция, обработка и физический анализ данных, полученных на установке тестирования модулей времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA". Победитель конкурса на лучший молодежный научно-технический проект, направление «Ядерно-физические и нанотехнологии». ОИЯИ совместно с ОЭЗ «Дубна».



Спасибо вам за ваше внимание!

Определения нелинейностей каналов ВЦП.

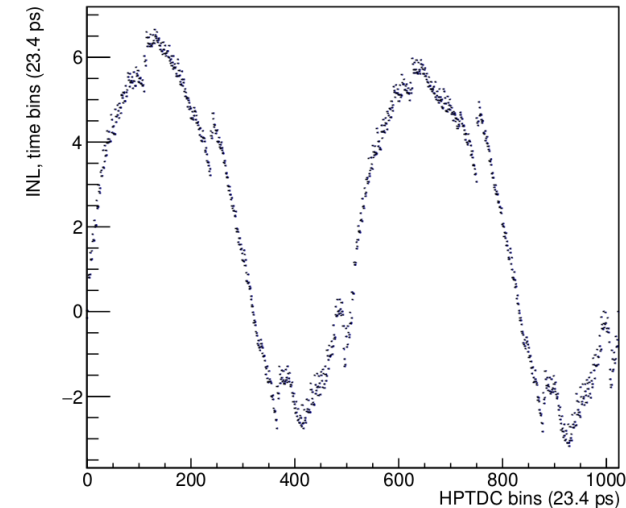
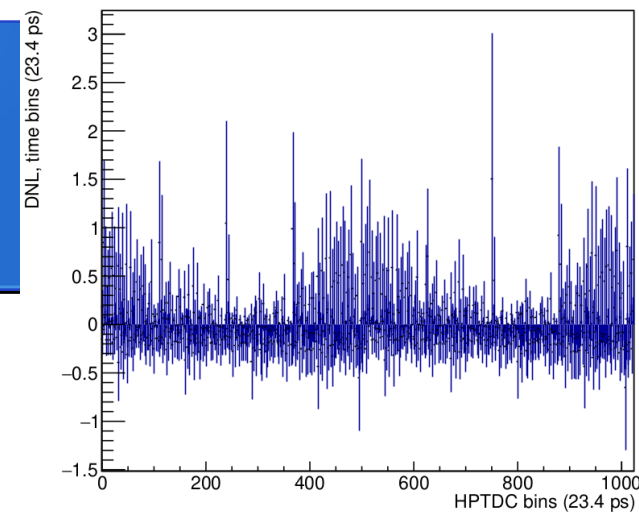
Для определения нелинейностей каналов ВЦП используется статистический тест плотности кода на основе источника случайных событий. Процедура заключается в заполнении всего цикла работы ВЦП случайно распределенными во времени событиями. Один цикл работы ВЦП (~ 24 нс = 1024 бина) заполняется распределенными случайно во времени сигналами. В идеальном случае количество событий в каждом бине ВЦП должно быть одинаковым, но, вследствие нелинейности, все бины в реальности имеют разную ширину по времени, и поэтому число событий в каждом бине будет разное. Отношение числа событий N_i в i -ом бине к среднему числу событий на бин есть дифференциальная нелинейность (DNL) для этого бина:

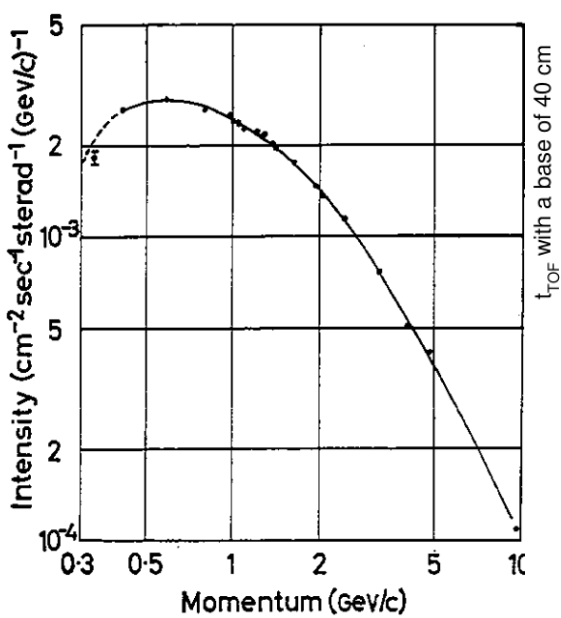
$$DNL = \frac{N_i \cdot 1024}{\sum_{i=0}^{1023} N_i} - 1$$

Если DNL меньше нуля, то и ширина бина меньше идеального, если же больше нуля, то бин шире. Интегральная нелинейность (INL) для каждого бина определяется как сумма дифференциальных нелинейностей всех предыдущих по порядку бинов, включая данный. То есть, INL есть абсолютное временное отклонение бина ВЦП от его идеального положения. Тест плотности кода является статистическим методом, поэтому, ошибка вычисления нелинейностей зависит только от точности вычисления среднего числа событий на один бин ВЦП. Таким образом, относительную статистическую погрешность определения INL можно выразить как:

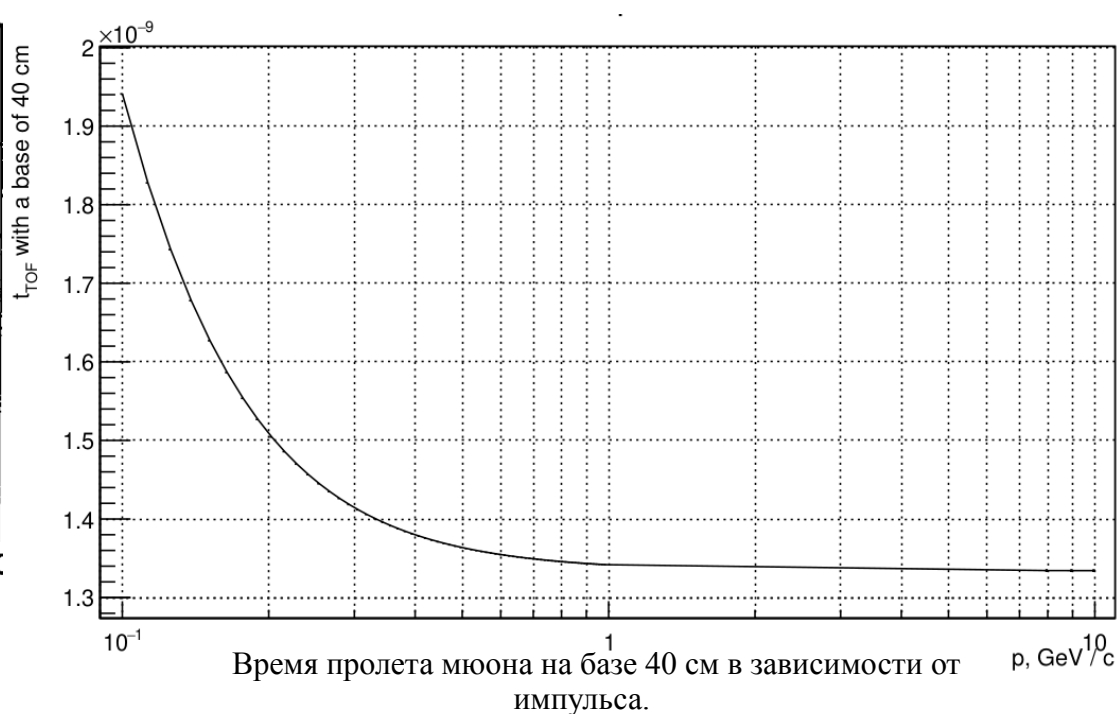
$$\sigma_{stat} = \frac{1}{\sqrt{N/1024}},$$

где N – число событий на калибруемый бин ВЦП. Для точности лучше 1% требуется статистика не менее 10^7 событий на бин.

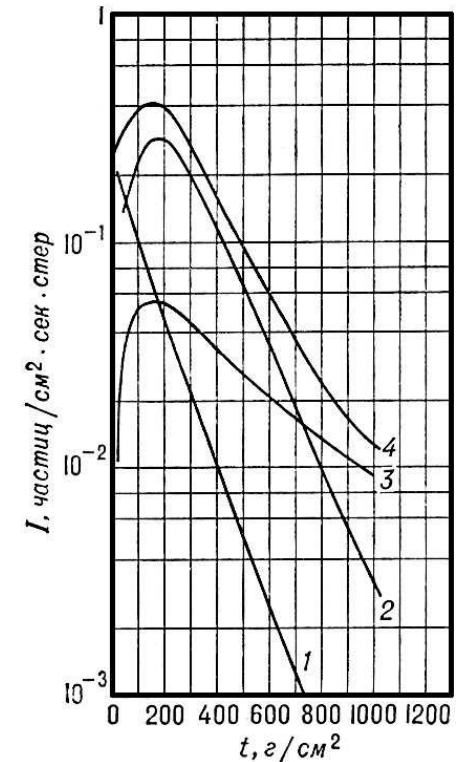




Спектр вертикальных одиночных мюонов.



Время пролета мюона на базе 40 см в зависимости от импульса.



Зависимость интенсивности I космических лучей (для 50° с. ш.) от толщины t пройденного слоя: 1 — ядерно-активная компонента (протоны и α -частицы); 2 — мягкая компонента; 3 — проникающая компонента (мюоны); 4 — полная интенсивность.

Т.к. на установке тестирования модулей TOF системы не используется какой либо существенной экранизации, будем считать что мы имеем дело с мюонами всех возможных энергий. Рассмотрим более детально спектр вертикальных одиночных мюонов и зависимость времени пролета мюона от его импульса. Как видно, мюоны с энергиями до 1 ГэВ/с будут вносить существенный вклад в временное разрешение нашей системы.