

«Методы и комплексы обработки экспериментальных данных электромагнитного калориметра ECal и времяпролетного детектора TOF MPD, полученных при тестировании элементов систем»

Докладчик
мнс ЛФВЭ
Барышников Виктор Михайлович



30 мая 2025

Общелабораторный семинар ЛФВЭ

Представленные в данном докладе материалы описывают обработку и подготовку данных, полученных в ходе тестирования элементов детекторных систем TOF и ECal. Разработанные программные решения создавались для работы на тестовых стендах, однако их архитектура позволяет адаптировать их для использования в эксперименте MPD. Используемые методы обработки данных ECal и TOF носят предварительный характер. Следует отметить, что представленная информация частично была опубликована в журналах, а также доложена на конференциях.



Этапы получения и обработки данных

Сбор данных электроники считывания
детекторных систем

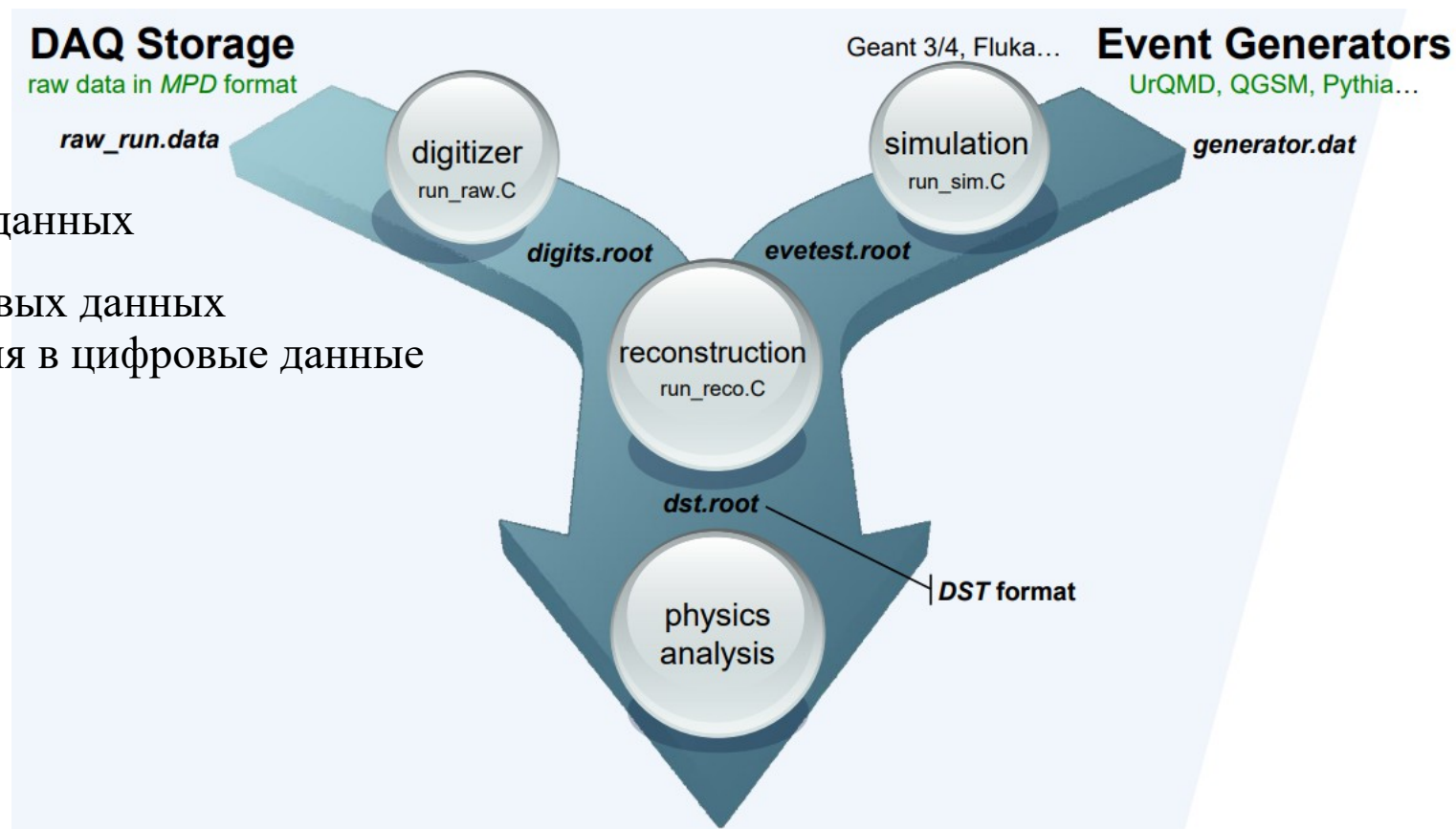
Триггерная система

Декодирование сырых данных

Преобразование цифровых данных
электроники считывания в цифровые данные
детекторов

Реконструкция хитов

Физический анализ



Обработка данных MpdRoot [mpdroot.jinr.ru]

Этапы получения и обработки данных

Сбор данных электроники считывания
детекторных систем

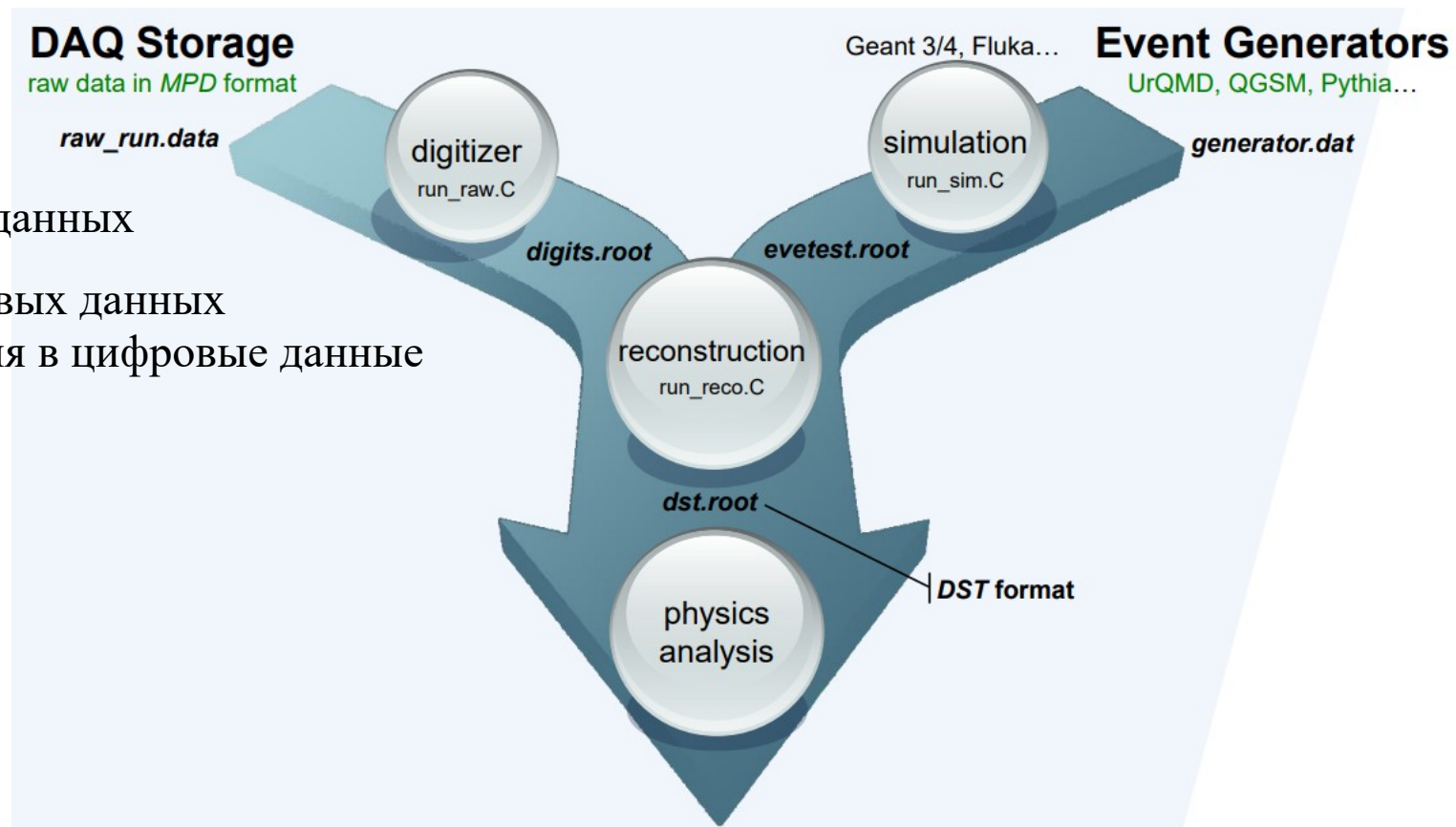
Триггерная система

Декодирование сырых данных

Преобразование цифровых данных
электроники считывания в цифровые данные
детекторов

Реконструкция хитов

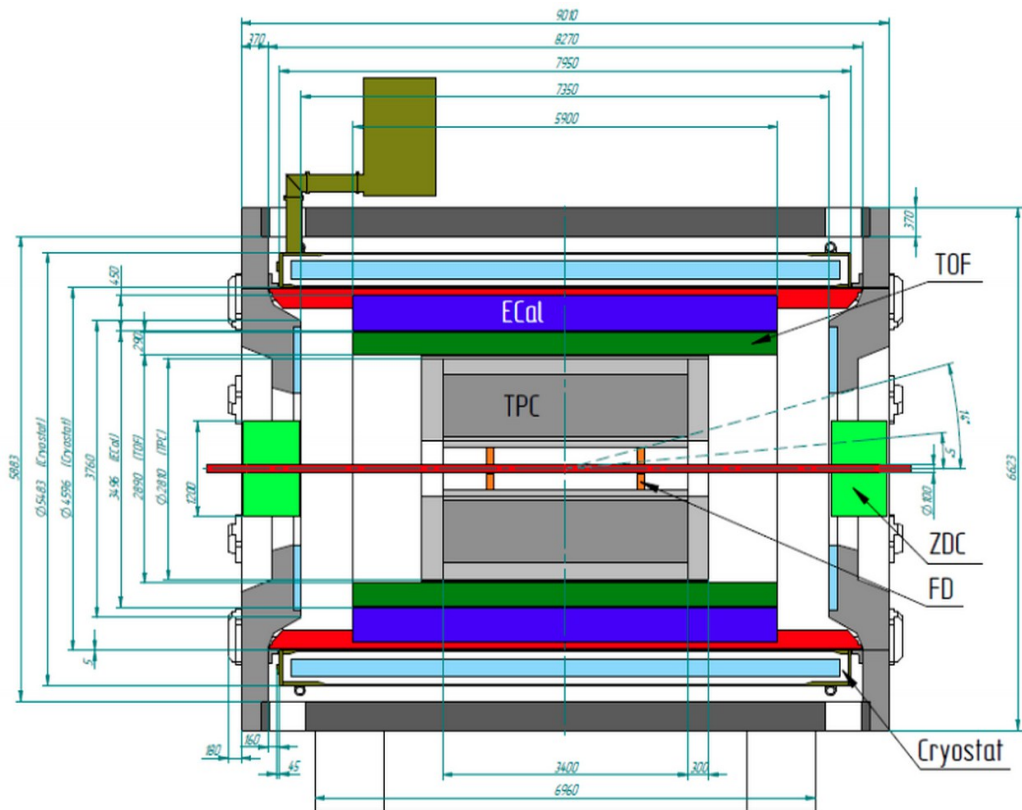
Физический анализ



Обработка данных MpdRoot [mpdroot.jinr.ru]



Многоцелевой детектор MPD

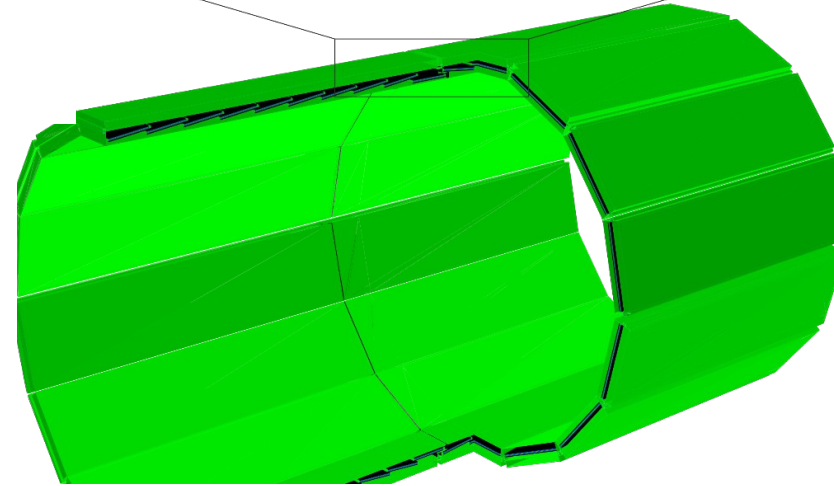
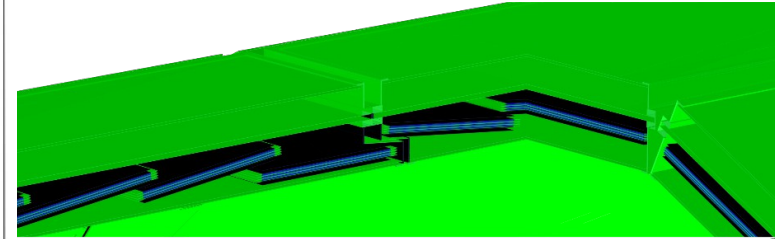
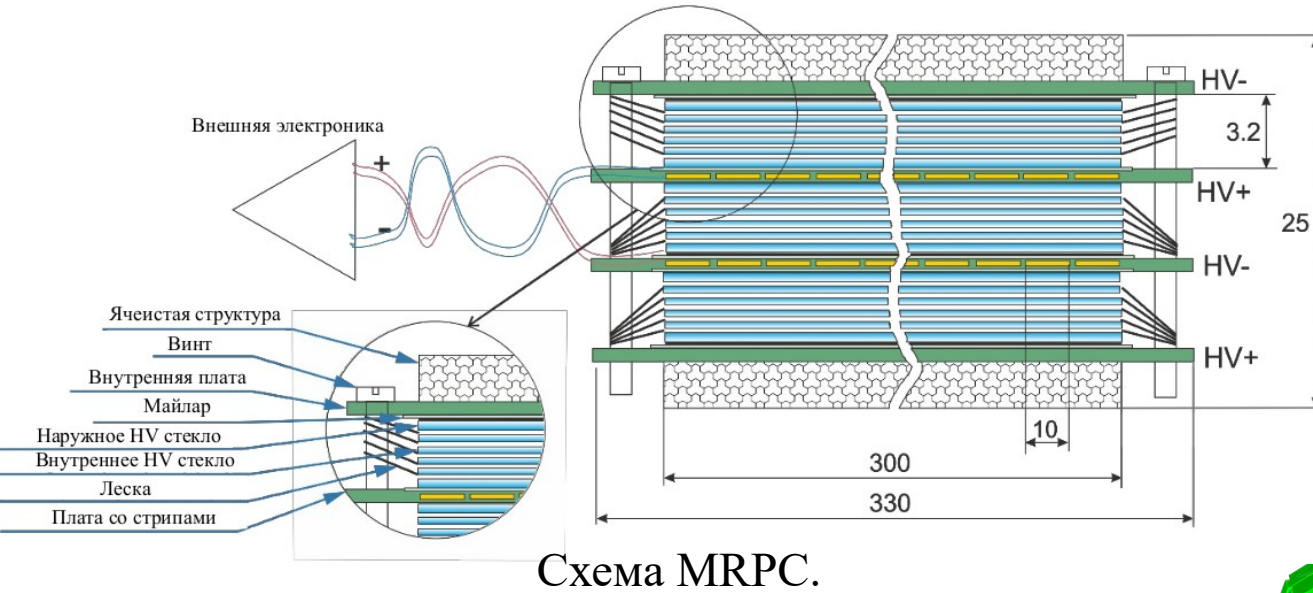


Детектор MPD включает в себя соленоид, криостат, трехмерную систему слежения и систему идентификации частиц.

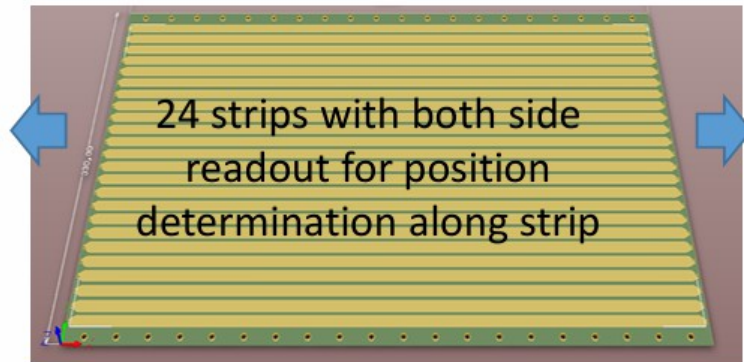
Идентификация *заряженных адронов* в широком диапазоне импульсов до 3 ГэВ/с достигается путем объединения данных измерений времени полета и информации о потерях энергии (dE/dx), получаемых с время проекционной камеры TPC. Время полета измеряется с помощью одноименной системы TOF, которая используется для определения времени «stop», и детектора FD, предназначенного для измерения времени «start».

Электромагнитный калориметр ECal является частью системы PID, и его основное назначение - *идентифицировать электроны, фотоны* и измерять их энергию с высокой точностью.

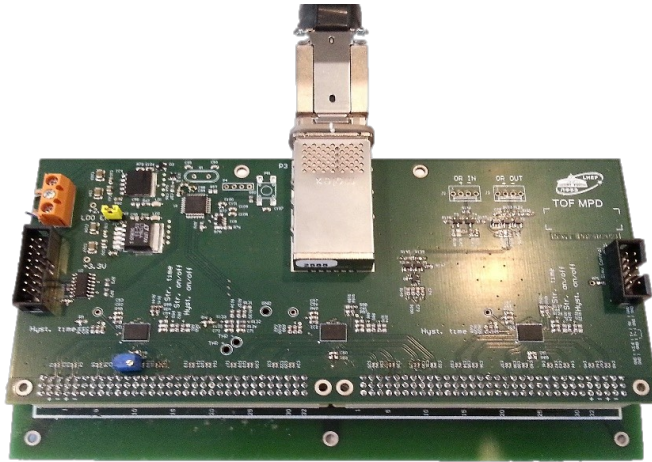
Детектор TOF



Геометрия TOF MPD.



Используемая накамерная и считывающая электроника TOF



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



Время-цифровой преобразователь TDC72VHL v4 с входными разъемами CXR.



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

	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

Установка для тестирования модулей времяпролетной системы на космическом излучении

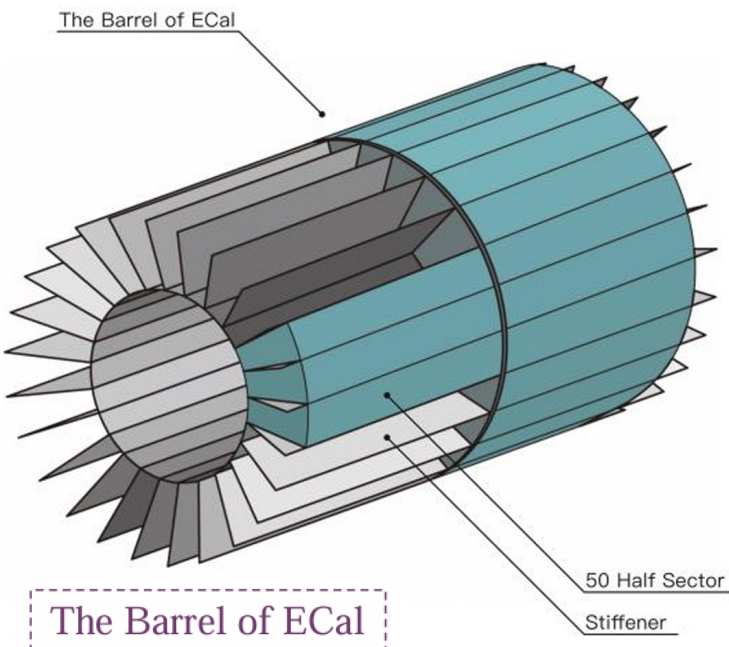


Установка тестирования модулей
времяпролетной системы TOF



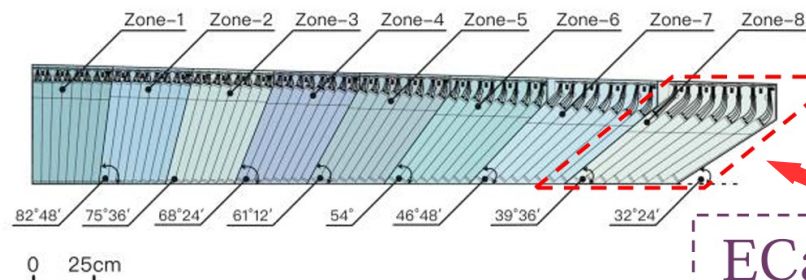
Стойки с газовой системой стенда и система сбора данных

Электромагнитный калориметр (ECal)



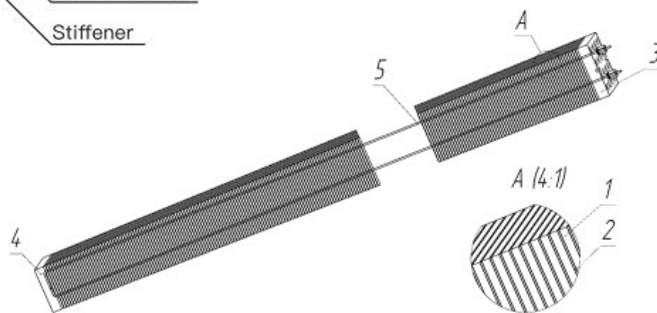
ECal 8-Zone

[The progress of ECal production in China // XIV Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility]

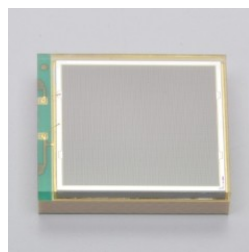
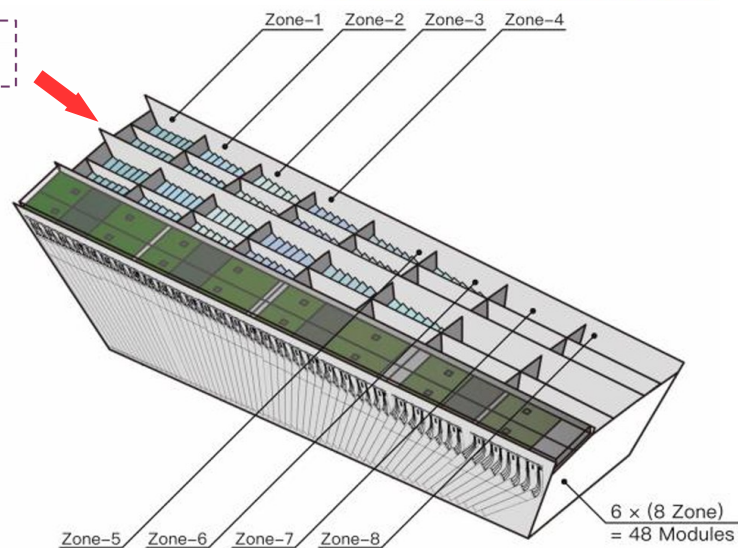


ECal Module

ECal Half-Sector



Конструкция башни без WLS: 1 - сцинтилляционная пластина, 2 - свинцовая пластина, 3 и 4 - пластиковые торцевые пластины, 5 - крепление.



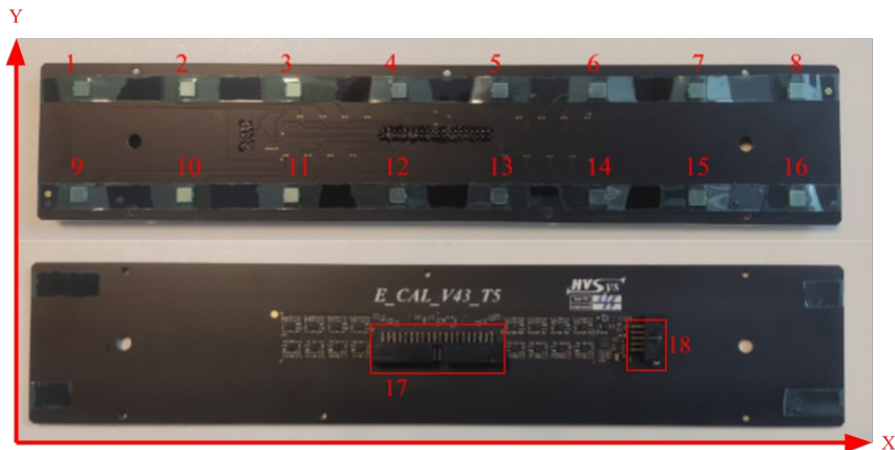
SiPM
HAMAMATSU
S13360-6025PE



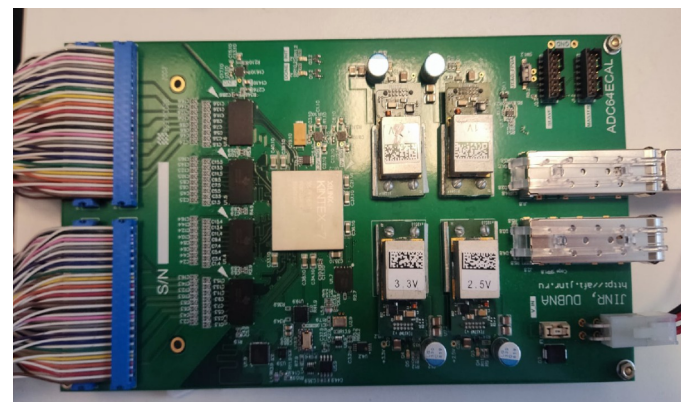
30 мая 2025

Общелабораторный семинар ЛФВЭ

Используемая накамерная и считывающая электроника ECal



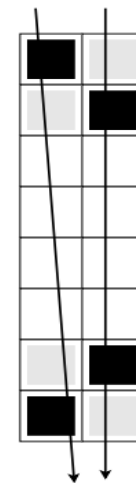
16-канальная высоковольтная плата HVSys для питания кремниевых фотоумножителей с разъемом для подключения АЦП



64-канальная плата АЦП «ADC64ECAL»

	Кол-во модулей	Кол-во каналов считывания	Активная поверхность, м ²	Кол-во плат АЦП
4 модуля	4	64	~ 0.1024	1
Сектор	96	1536	~ 2.4576	24
ECal	2400	38400	~ 61.44	600

Установки для тестирования модулей и полусекторов электромагнитного калориметра



Установки для тестирования элементов TOF и ECal

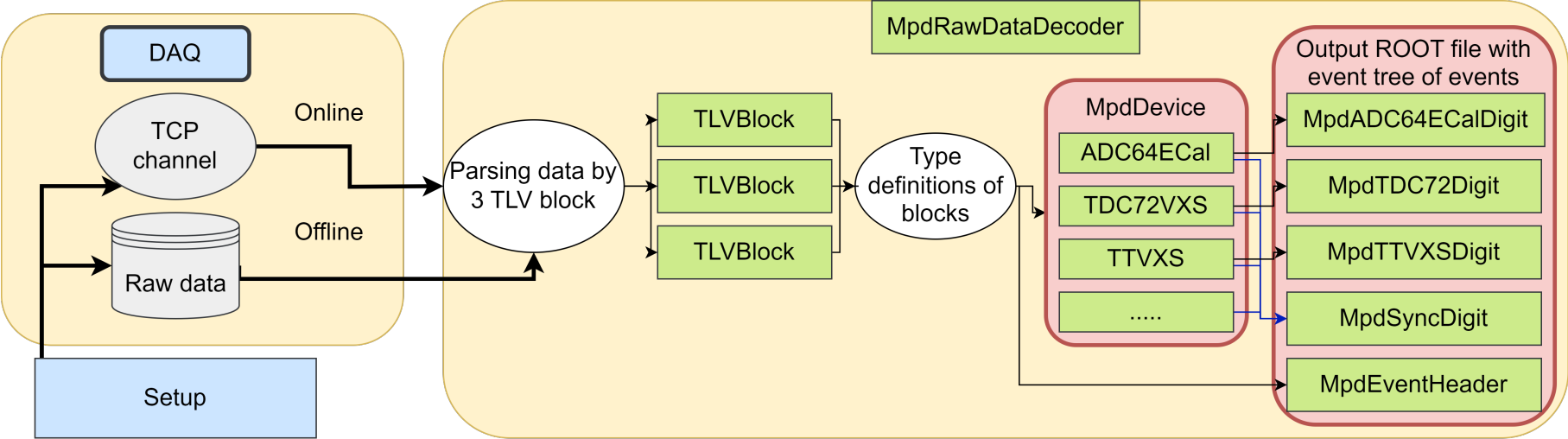
Основные задачи установок тестирования: проверка работоспособности всех каналов детекторов и электроники; проверка долговременной стабильности рабочих параметров; предварительная калибровка детекторов и электроники и измерение некоторых параметров систем.

TOF	ECal
Калибровка интегральной нелинейности каналов ВЦП	Выравнивание откликов элементов электромагнитного калориметра и преобразование сигнала в энергию
Калибровка индивидуальных временных задержек в каждом канале	Коррекция ослабления сигнала при распространении по волокнам WLS
Время-амплитудная коррекция с использованием метода «времени над порогом»	Коррекция нелинейности энергетической шкалы электромагнитного калориметра
Локальная временная синхронизация ВЦП в разных крейтах	Локальная временная синхронизация АЦП в полусекторах
Глобальная временная синхронизация	
Калибровка геометрии	

Возможные калибровки и коррекции TOF и ECal



Декодирование данных, полученных на установках тестирования элементов TOF и ECal



mpdsim;1

- MpdEventHeader.
- SyncDigit
- TDCDigit
- TTVXSDigit
- ADC64ECalDigit

TTVXSDigit

- TTVXSDigit.fUniqueID
- TTVXSDigit.fBits
- TTVXSDigit.fSerial
- TTVXSDigit.fEventTime.fSec
- TTVXSDigit.fEventTime.fNanoSec
- TTVXSDigit.fTriggerType
- TTVXSDigit.fTriggerSource
- GetTime()
- GetTriggerSource()
- HasInconsistentHash()
- IsDestroyed()
- @size

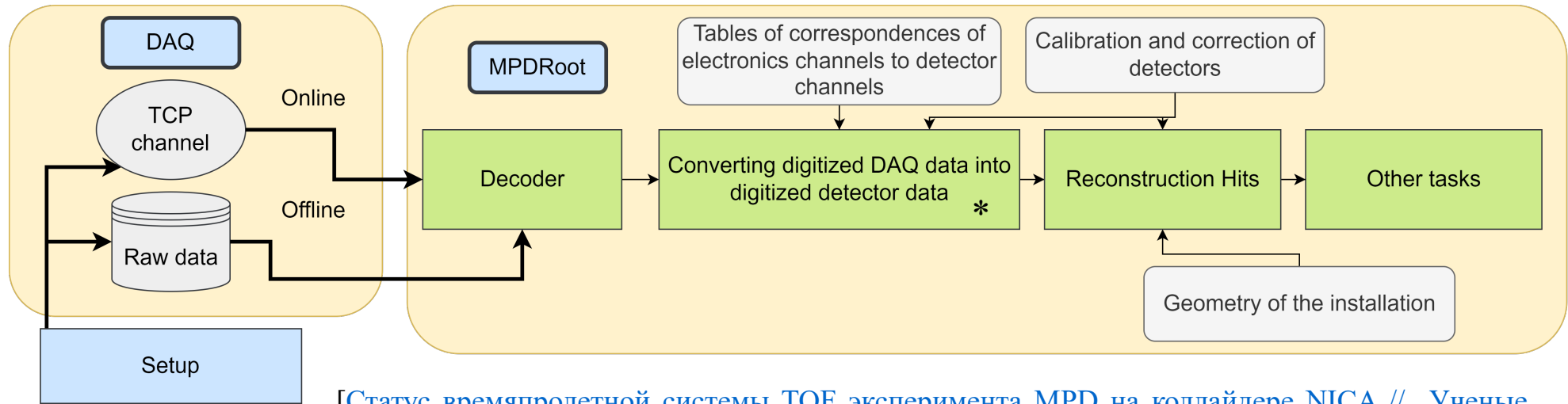
TDCDigit

- TDCDigit.fUniqueID
- TDCDigit.fBits
- TDCDigit.fSerial
- TDCDigit.fValue
- TDCDigit.fType
- TDCDigit.fChannel
- TDCDigit.fLeading
- HasInconsistentHash()
- IsDestroyed()
- @size

ADC64ECalDigit

- ADC64ECalDigit.fUniqueID
- ADC64ECalDigit.fBits
- ADC64ECalDigit.fSerial
- ADC64ECalDigit.fEventTime.fSec
- ADC64ECalDigit.fEventTime.fNanoSec
- ADC64ECalDigit.fChannel
- ADC64ECalDigit.fNsmpl
- ADC64ECalDigit.fValue
- GetTime()
- GetNSamples()
- HasInconsistentHash()
- IsDestroyed()
- @size

Преобразование цифровых данных электроники считывания в цифровые данные детекторов



[Статус времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA // Ученые записки физического факультета Московского университет 2023, №. 3]

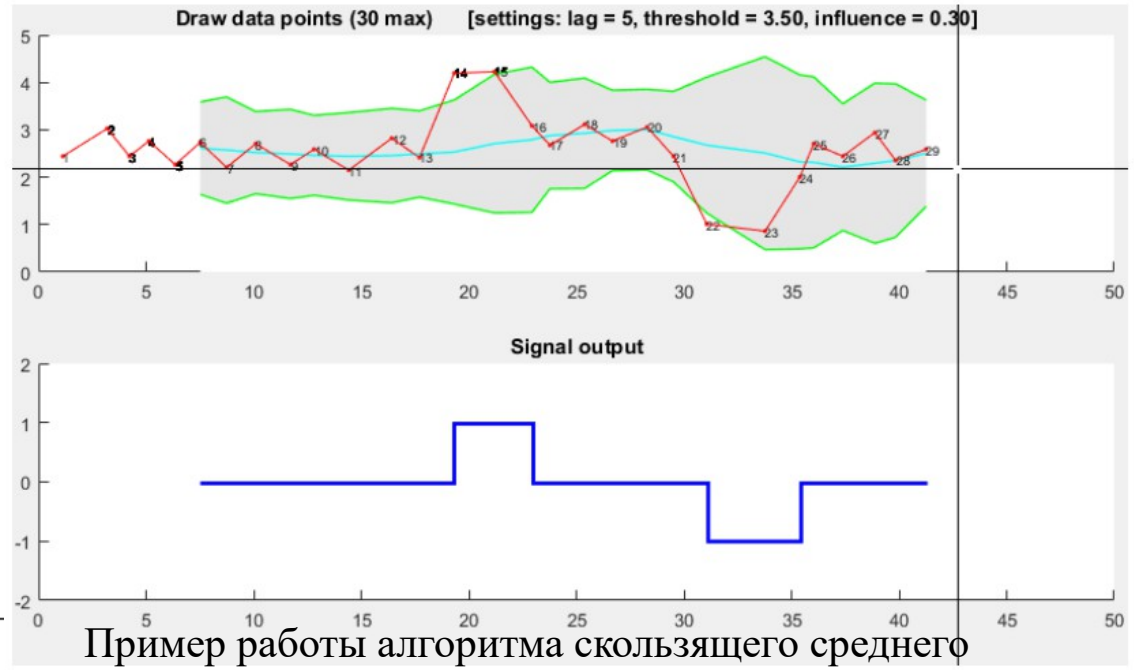
[Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider // Physics of atomic nuclei 2023, V.86 No.5, p 788-795]

* Программные модули преобразования данных для TOF и ECal разные:

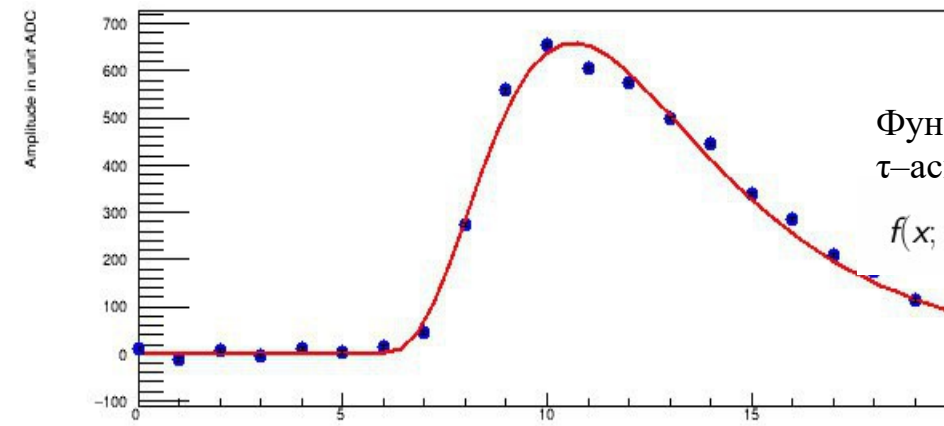
- Для детектора TOF - поиск цифровых данных ВЦП «side-to-side» и их объединение для последующей обработки.
- Для ECal – определение положения пиков на осциллограмме и их аппроксимация.

Цифровая обработка сигналов ECal, полученных при тестировании. [В разработке]

Алгоритм однократного детектирования положения и размеров пиков - комбинация скользящего среднего и порогового методов. Идея базового алгоритма заключается в вычислении среднего и стандартного отклонения в перемещающемся окне некоторой ширины L и если следующая после окна точка данных отличается от скользящего среднего на заданное число стандартных отклонений $n\sigma$ и удовлетворяет порогу, алгоритм выдает сигнал.



Пример работы алгоритма скользящего среднего



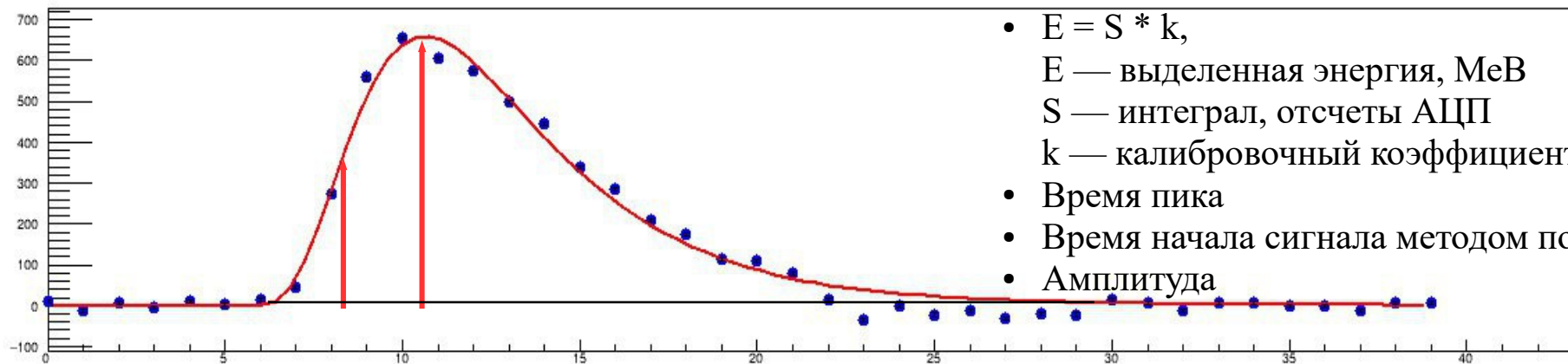
Функция Гаусса с асимметрией: n —количество точек в пике; τ —асимметрия; σ —стандартное отклонение; μ – положение вершины пика.

$$f(x; n, \mu, \sigma, \tau) = ne^{-\frac{(\log \xi)^2}{2\omega} - \frac{\omega^2}{2}}; \quad \xi = 1 - \frac{(x-\mu)\tau}{\sigma}; \quad \omega = \frac{sh(\tau\sqrt{\log 4})}{\sqrt{\log 4}}$$



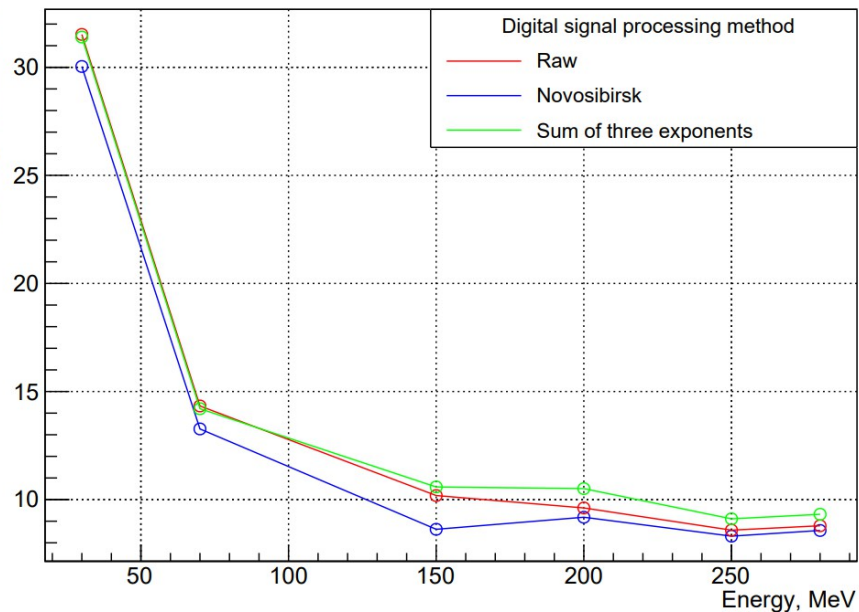
Определение физических величин по результатам ЦОС ECal. [В разработке]

Amplitude in unit ADC



- $E = S * k$,
E — выделенная энергия, MeV
S — интеграл, отсчеты АЦП
k — калибровочный коэффициент
- Время пика
- Время начала сигнала методом порога
- Амплитуда

Energy resolution, %

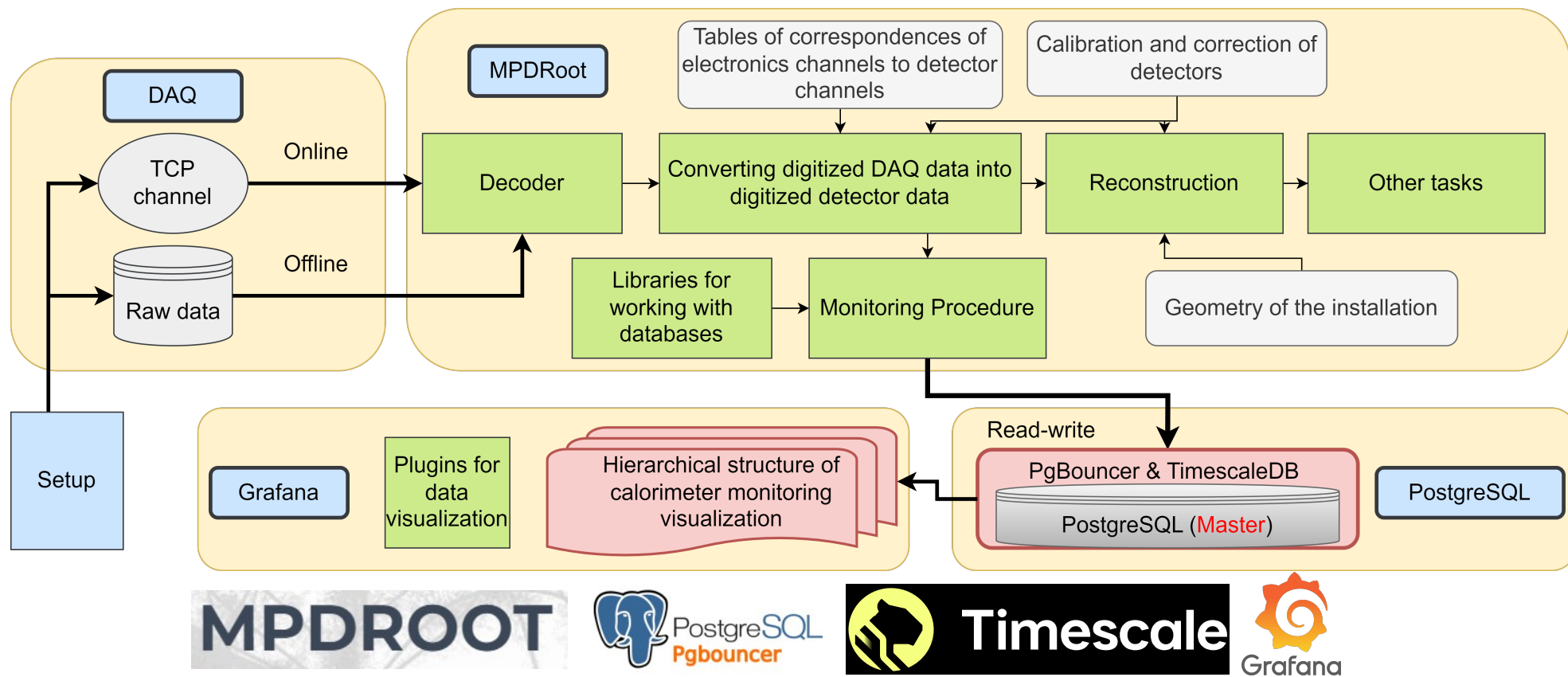


На рисунке показано предварительное энергетическое разрешение одного из модулей ECal на квазимонохроматичном пучке электронов без каких либо корректирующих поправок. Разрешение определяется как отношение дисперсии распределения отклика модуля к энергии. Энергетическое разрешение, достигнутое при использовании в качестве аппроксимирующей функции Гаусс с асимметрией превосходит результаты как обычной обработки без использования фитирующих функций, так и результаты с использованием суммы трех экспонент в области низких энергий.

[Digital signal processing models for the ECal of MPD/NICA experiment //ЭЧАЯ*]



Онлайн мониторинг стабильности каналов (башен) ECal. [В разработке]



MPDROOT

PostgreSQL
PgBouncer

Timescale

Grafana

[Разработка онлайн мониторинга электромагнитного калориметра ECal эксперимента MPD на коллайдере NICA // Материалы конференции ВНКСФ–282024, Т.1.]

[Slow-Control System of the Electromagnetic Calorimeter at MPD/NICA Detector // Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Thirty-first Annual Seminar NPC'S'2024, V.30 pp. 69-78]

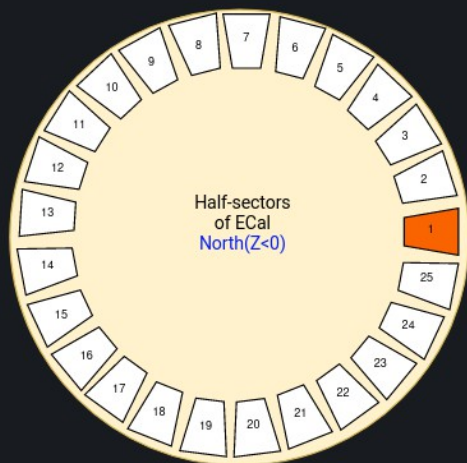


30 мая 2025

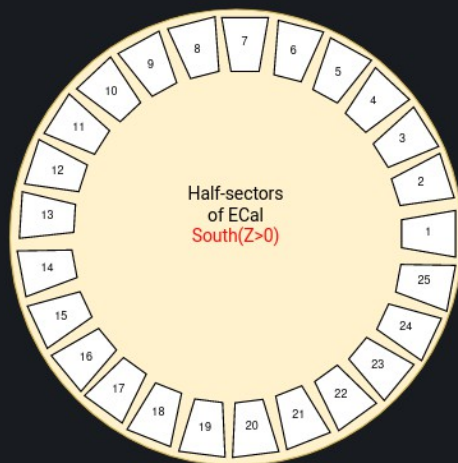
Общелабораторный семинар ЛФВЭ

Онлайн мониторинг стабильности каналов (башен) ECal. [В разработке]

North Half-Sectors (Half_sector = 1)

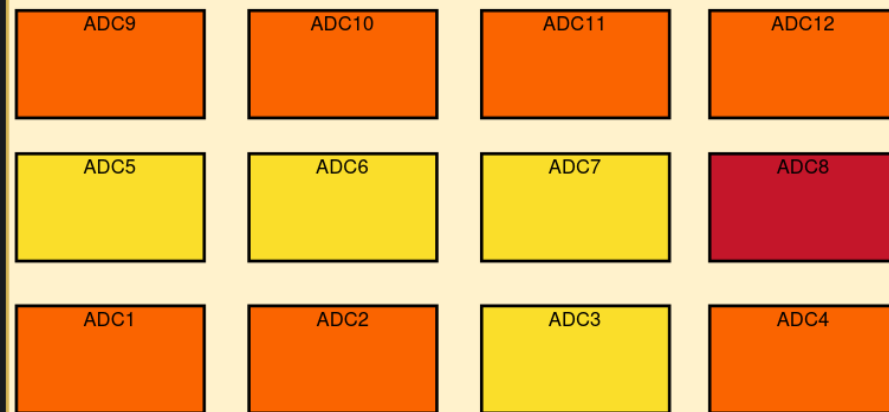


South Half-Sectors (Half_sector = 2)

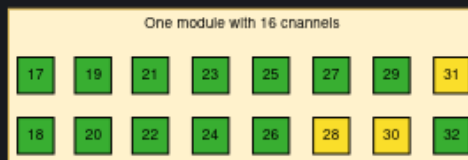


Period: 1. Run: 20. Sector: 1. Half_sector: 1

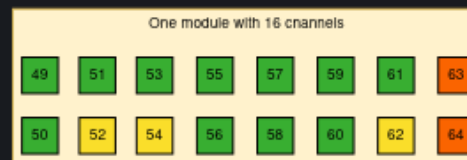
Half-sector (1-768 channels)



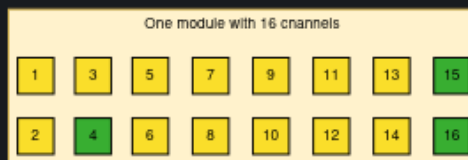
Module with 17-32 channels



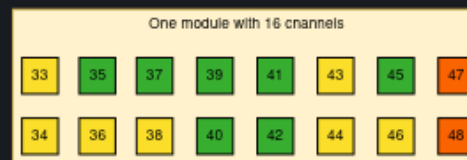
Module with 49-64 channels



Module with 1-16 channels



Module with 33-48 channels



Онлайн мониторинг стабильности каналов (башен) ECal. [В разработке]

ECal monitor / ADC panel

Run: 0 + 349 + 350 + 352 + 353 + 354 + 356 + 358 | time_quantity_min: 10 | time_quantity_hour: 1 | type: COSMIC | time_aver: 1h

> Info row. Period: 0. Run: 0 + 349 + 350 + 352 + 353 + 354 + 356 + 358. Sector: 1. Half_sector: 1. ADC: 11. (2 panels)

> Main row: stability. Period: 0. Run: 0 + 349 + 350 + 352 + 353 + 354 + 356 + 358. Sector: 1. Half_sector: 1. ADC: 11.

Average signal - norm signal by time interval

Y-axis: Average signal (integral), %

X-axis: Time interval

Legend:

- ch47
- ch48
- ch49
- ch50
- ch51
- ch52
- ch53
- ch54
- ch55
- ch56
- ch57
- ch58
- ch59
- ch60
- ch61
- ch62
- ch63
- ch64

Module with 17-32 channels

One module with 16 channels

17	19	21	23	25	27	29	31
18	20	22	24	26	28	30	32

Module with 33-48 channels

One module with 16 channels

33	35	37	39	41	43	45	47
34	36	38	40	42	44	46	48

Module with 1-16 channels

One module with 16 channels

1	3	5	7	9	11	13	15
2	4	6	8	10	12	14	16

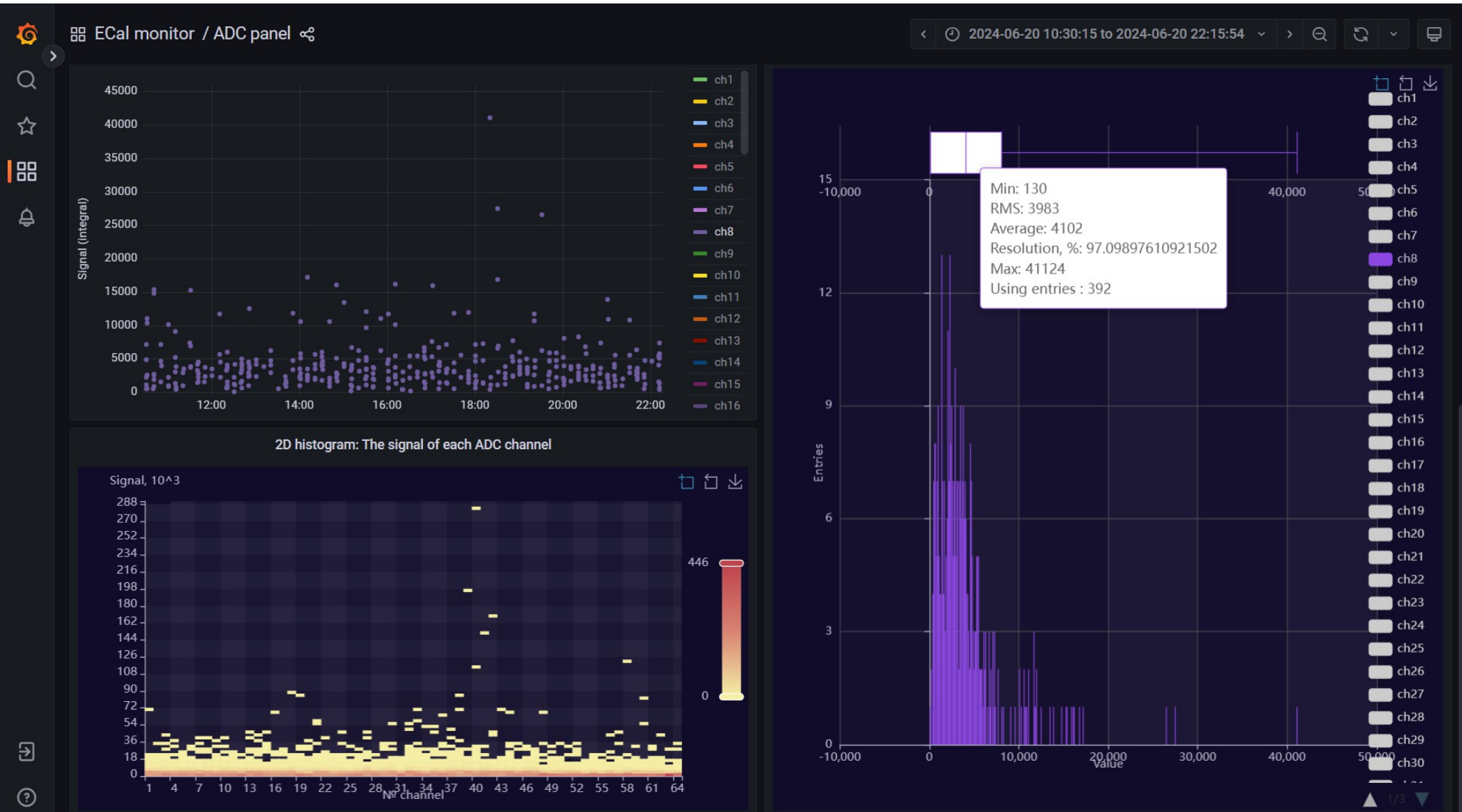
Module with 49-64 channels

One module with 16 channels

49	51	53	55	57	59	61	63
50	52	54	56	58	60	62	64

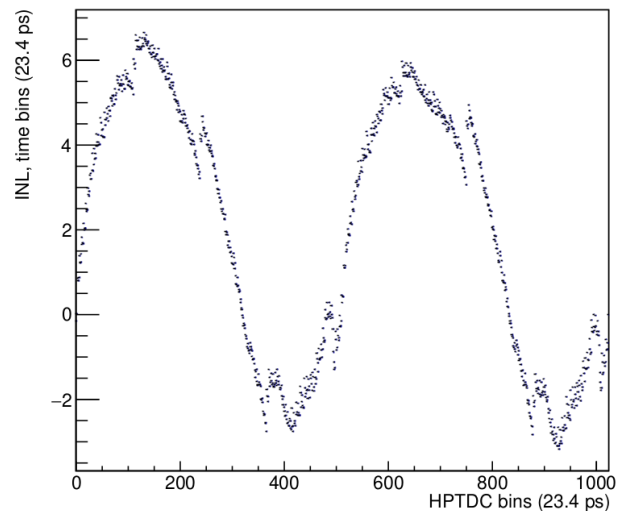
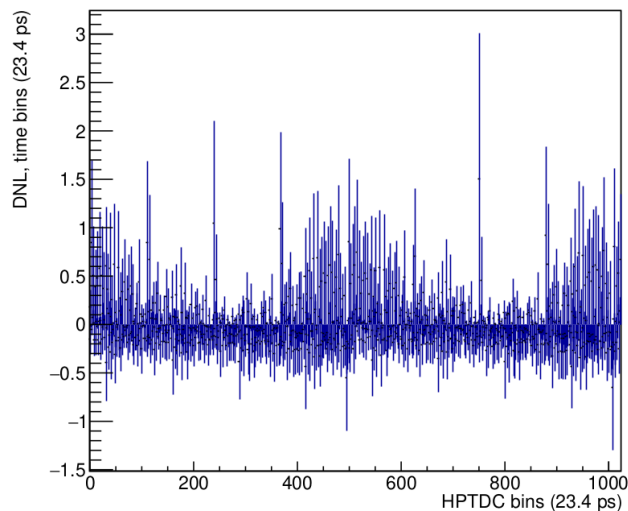
> WARNING. FOR ONLY PERIOD TIME (dt) : $(dt / t_q_hour/3600 + dt / t_q_min/60) < 150$. Main row: statistic. Period: 0. Run: 0 + 349 + 350 + 352 + 353 + 354 + 356 + 358. Sector: 1. Half_sector: 1. ADC: 11. (3 panels)

Онлайн мониторинг стабильности каналов (башен) ECal. [В разработке]



Калибровки и коррекции времяпролетной системы ТОФ.

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).

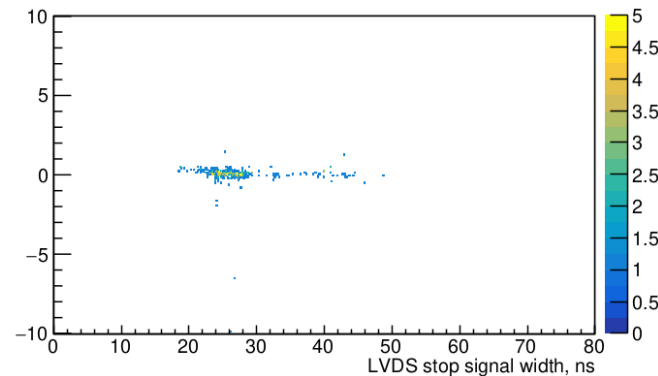
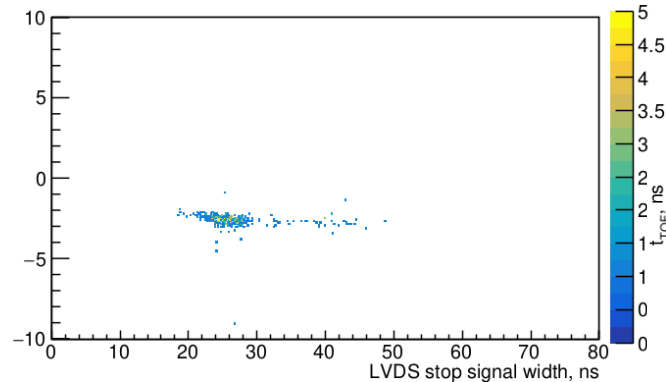
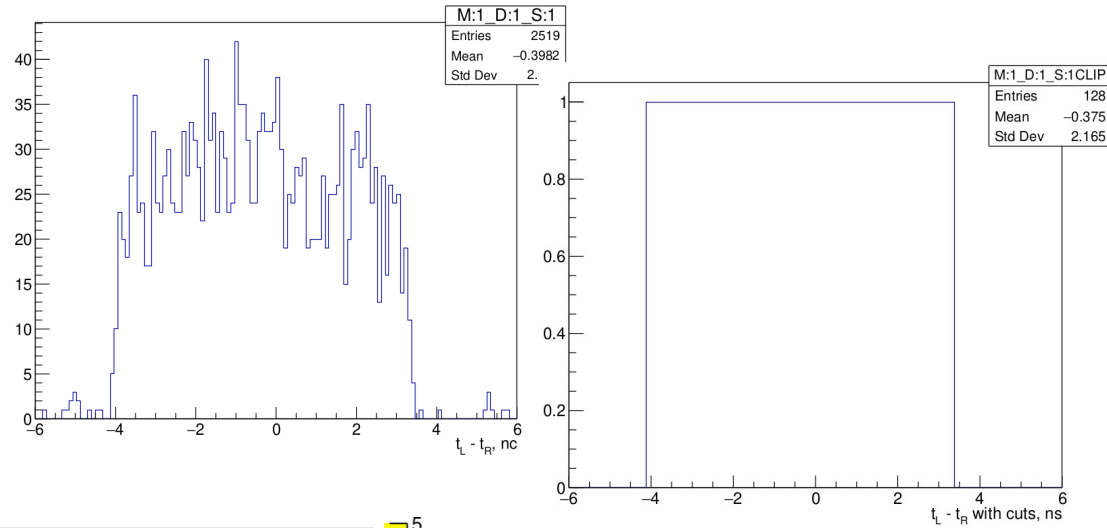


Дифференциальная нелинейность (DNL) (слева) и интегральная нелинейность (INL) (справа) одного канала (1024 бина) ВЦП TDC72VHL.

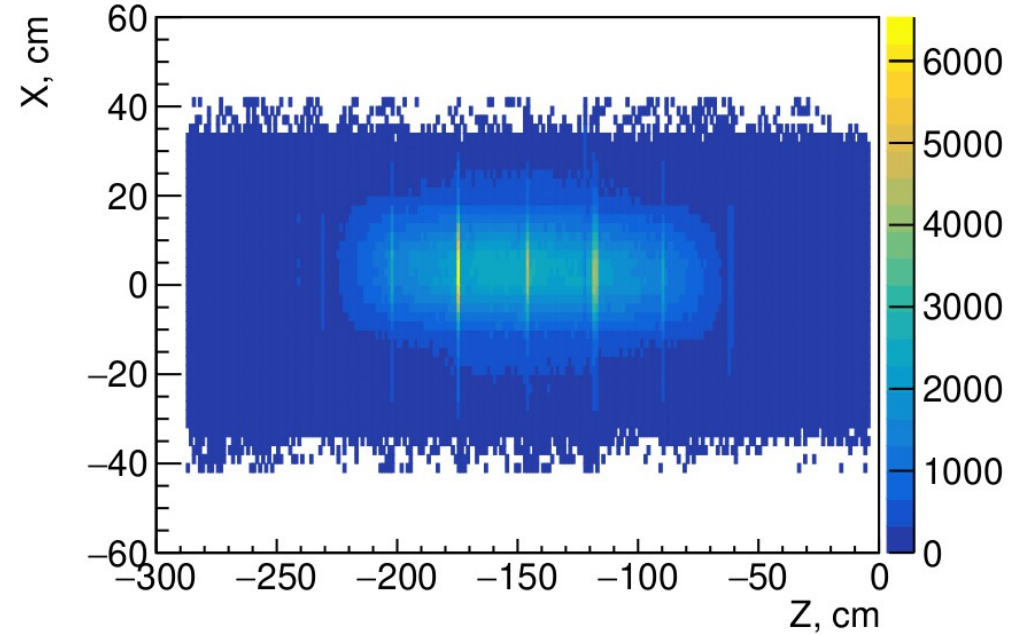
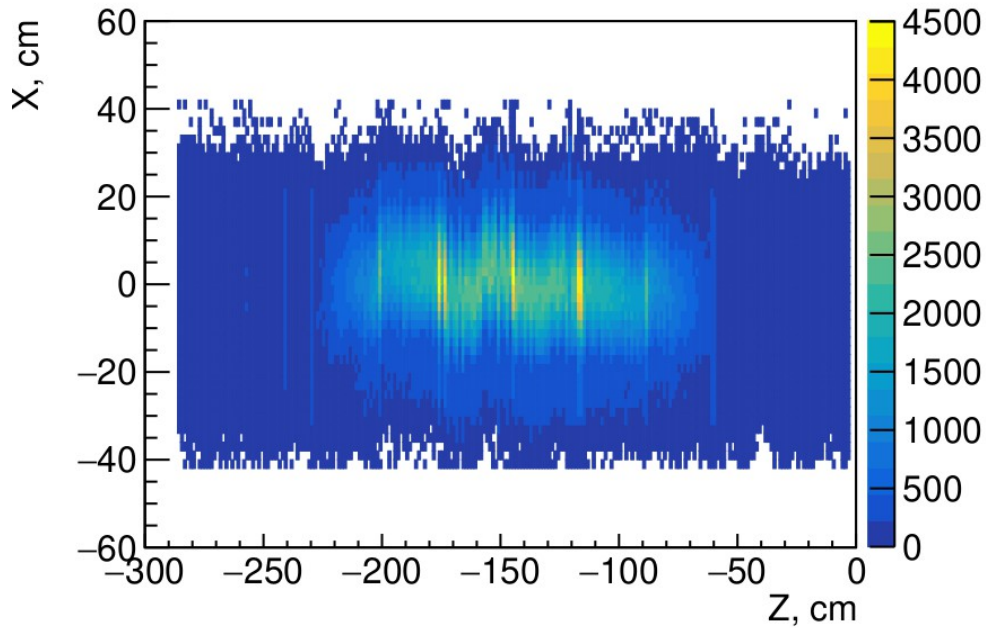
Калибровки и коррекции времяпролетной системы ТОФ.

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. Это распределение должно быть приведено к линейной форме для улучшения временного разрешения.

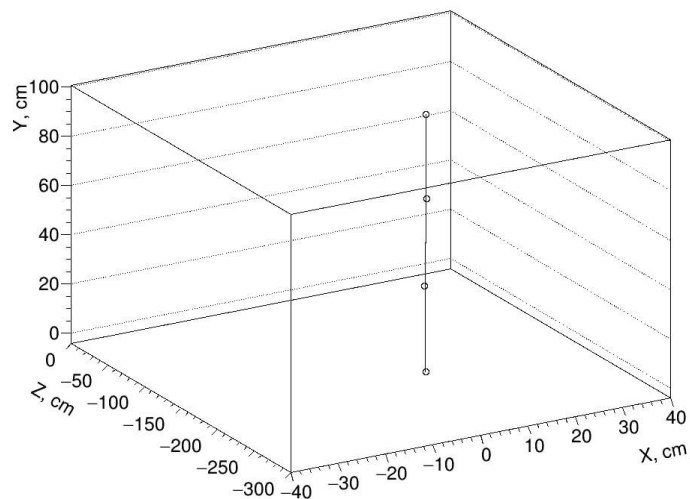
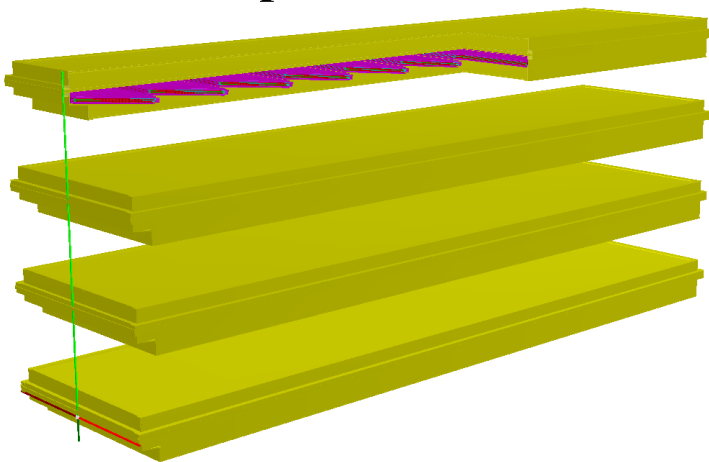


Результаты применения CL-калибровки.

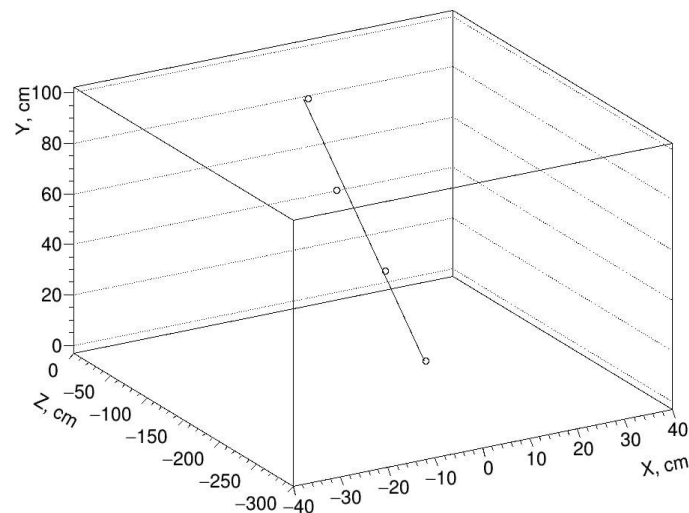


Положение хитов в модуле до и после
применения CL-калибровки

Оценка характеристик модулей TOF системы на основе данных, полученных при тестировании.

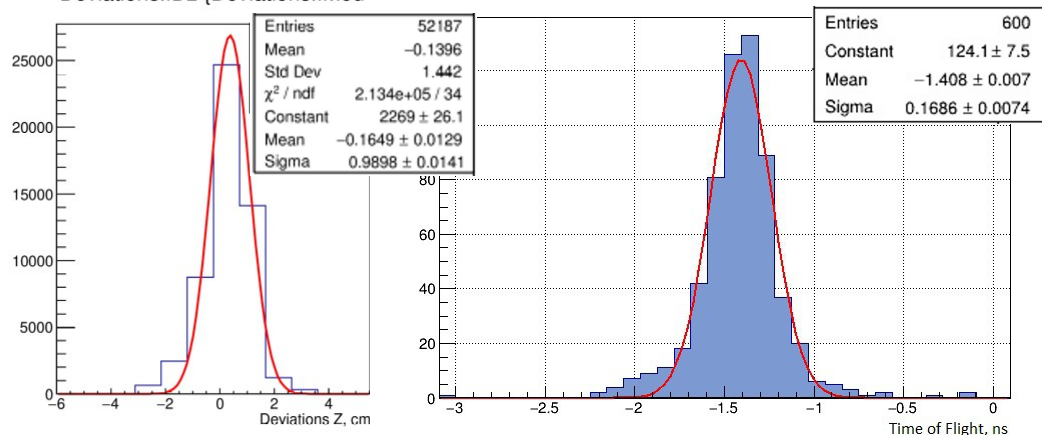


Реконструкция трека на основе четырех хитов из различных TOF модулей.

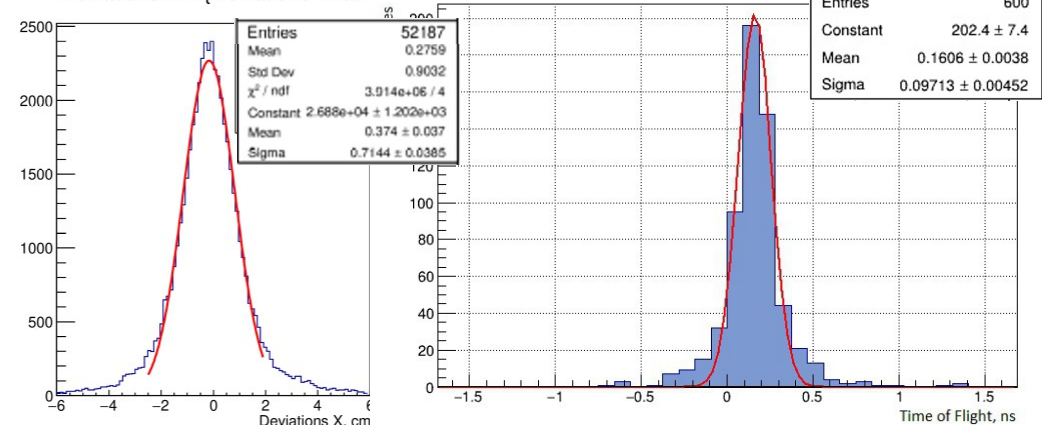


Оценка характеристик модулей TOF системы на основе данных, полученных при тестировании.

Deviations.fDz {Deviations.fMod==1}



Deviations.fDx {Deviations.fMod=}



Для TOF модуля координатные отклонения точек пересечения реконструированного трека и плоскости соответствующего детектора от координат соответствующих хитов этом детекторе составляют $\sigma_x \approx 0,98$ см и $\sigma_z \approx 0,71$ см с использованием вертикальных треков.

Для получения оценки разрешения времени были отобраны только вертикальные треки с хитами, z координаты которых совпадали. Временное разрешение такой времяпролетной системы составляет $\sigma_{TOF} \approx 169$ пс без учета ToT-коррекции, а с учетом $\sigma_{TOF} \approx 97$ пс. Это несколько хуже заявленных характеристик системы TOF из-за экспериментальных данных, собранных на установке тестирования с использованием космических лучей с широким диапазоном импульсов.

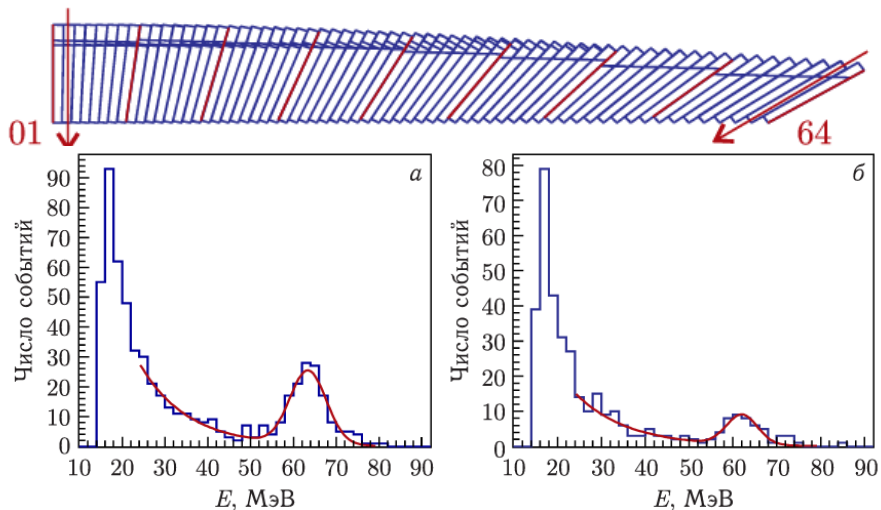
[Статус времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA // Ученые записки физического факультета Московского университет 2023, №. 3]

[Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider // Physics of atomic nuclei 2023, V.86 No.5, p 788-795]



Выравнивание откликов каналов (башен) ЕСal с помощью космических мюонов с минимальной ионизацией (MIP).

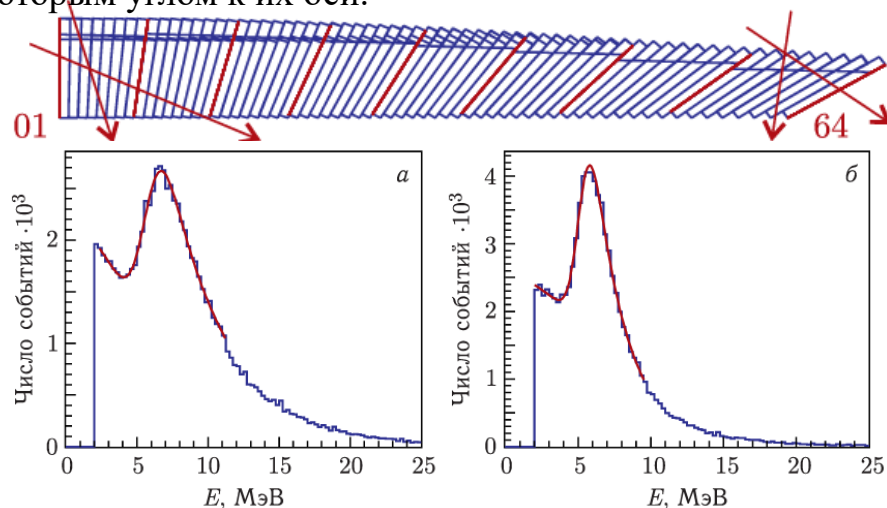
Простой метод калибровки заключается в использовании космических мюонов, проходящих вдоль оси башен.



Моделирование. Отклик башен полусектора при продольных мюонах отобранных методом «М1»*. Полусектор расположен горизонтально.

Однако, в нашем случае такой способ очень трудоемкий поскольку поперечные размеры башен малы и статистика получается очень малая. К тому же, для повернутых полусекторов статистика будет еще меньше.

В работе * был рассмотрен подход, основанный на выборе по множественности (М) срабатывающих башен: $M = 1$, «М1» - выбор "продольных" мюонов, проходящих вдоль осей башен; $M \geq 4$, «М4» – выбор мюонов, пересекающих башни под некоторым углом к их оси.



Моделирование. Отклик башен полусектора при продольных мюонах отобранных методом «М4».

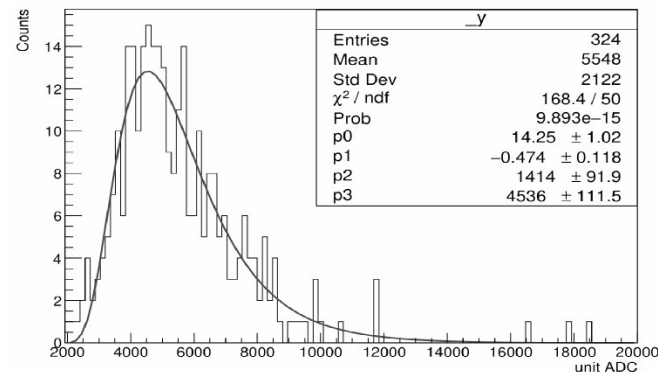
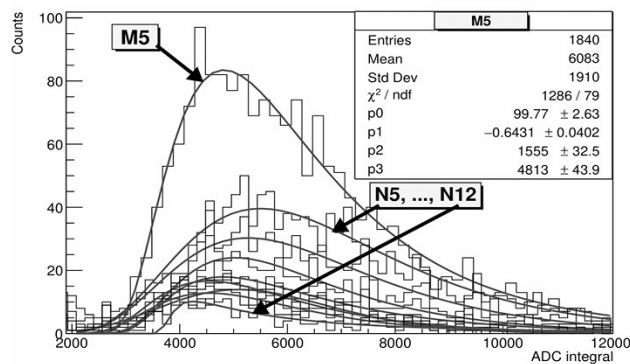
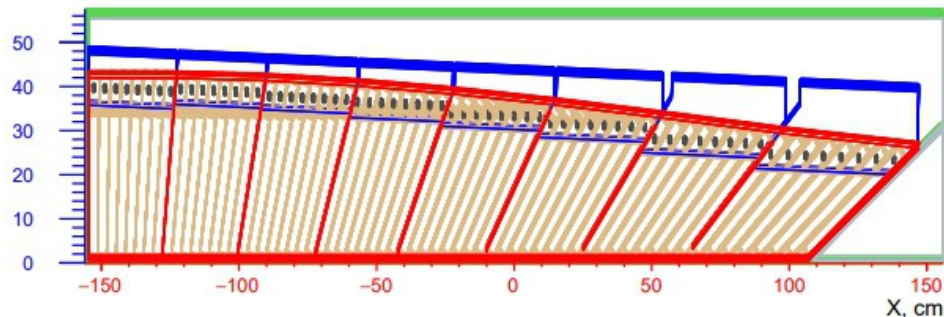
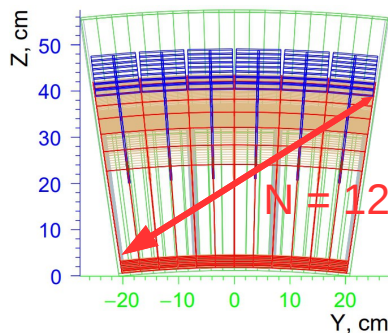
[МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ПОЛУСЕКТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА MPD/NICA НА МЮОНАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ // ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА. 2024. Т.55, вып.4. С.957–965]

Подход к повышению точности калибровки за счет использования треков космических мюонов. [В разработке]

Одной из возможностей повышения точности калибровки является замена "М4" и других аналогичных методов отбора на более строгий, путем восстановления треков вдоль одной из осей X или Y и дополнительного отбора по множественности точек.

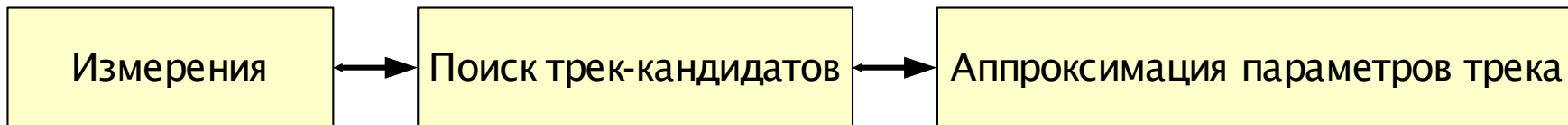
Для увеличения статистики можно использовать треки не только вдоль осей в плоскости XY. Тогда возникает проблема, связанная с расширением распределения, поскольку соответствующие таким трекам мюоны проходят разный путь в башнях и соответственно, выделяют разную энергию.

Используя зависимость сигнала от длины пути в башне, полученную при строгих ограничениях по направлению в плоскости XY, можно скорректировать полученные распределения в соответствии с зависимостью осажденной энергии от длины пути частицы методом максимального правдоподобия.



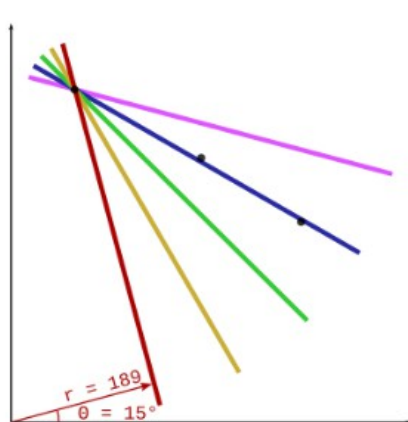
Слева показано распределение энергосигнала в башне полусектора с выбором по кратности "М5" и "N5", ..., "N12" вдоль оси Y. Справа показано распределение энергосигнала в башне с использованием метода выбора "N12" по оси Y. Для фитирования использовалась функция Гаусса с асимметрией

Алгоритм реконструкции треков космических мюонов в объеме полусектора калориметра. [В разработке]

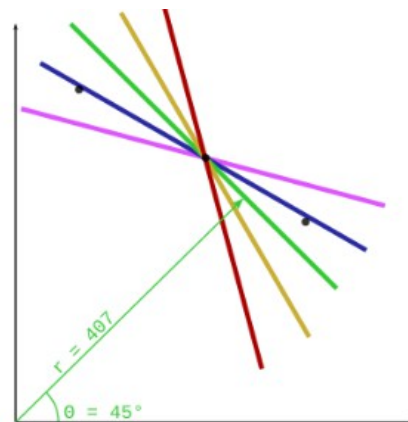


С учетом условий задачи нахождения линейных треков мюонов в полусекторе калориметра, башни которого характеризуются углами φ и θ , в качестве алгоритма поиска треков на фоне шумовых срабатываний будет использоваться глобальный двумерный метод поиска основанный на преобразовании Хафа.

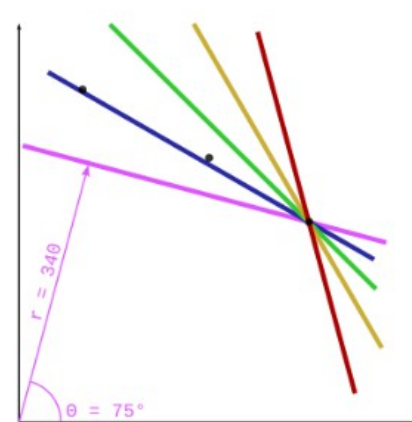
Идея метода Хафа заключается в преобразовании координатных измерений и последующим их отображении на соответствующую плоскость. Отбор трек-кандидатов подразумевает обнаружение областей с высокой плотностью на этой плоскости.



θ	r
15	189.0
30	282.0
45	355.7
60	407.3
75	429.4



θ	r
15	318.5
30	376.8
45	407.3
60	409.8
75	385.3



θ	r
15	419.0
30	443.6
45	438.4
60	402.9
75	340.1

Алгоритм коррекции треков космических мюонов в объеме полусектора калориметра. [В разработке]

Двумерные треки используются в качестве части начальных условий алгоритма реконструкции трехмерных треков. Коррекция параметров трехмерного трека достигается путём максимизации функции правдоподобия на основе ранее экспериментально определенных эталонного энерговыведения и ширины распределений и текущих двумерных координатных и энергетических измерений. Данным методом работает при предположении о линейности энерговыведения минимально ионизирующей частицы от пройденного пути.

Моделирование

Результаты полученные с использованием метода отбора по множественности точек в трек "N5", ..., "N12" вдоль осей X и Y.

Текущие измерения и расчеты

Ожидание

Трехмерный трек

Функция максимального правдоподобия

$$l_{ref,i}$$

$$E_{ref,i}$$

$$\sigma_{ref,i}$$

$$E_i \quad l_i$$

$$E_{exp,i} = \frac{E_{ref,i} \times l_i}{l_{ref,i}}.$$

$$\sigma_{exp,i}(E) = \sigma_{ref,i} \times \sqrt{\frac{l_i}{l_{ref,i}}} l_{ref,i}.$$

$$(a_x; a_y; a_z)^T + t(b_x; b_y; b_z)^T$$

$$L_n(\hat{a}_y, \hat{a}_z, \hat{\gamma}, \hat{b}_z) = \prod_i^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{exp,i}} \times \exp\left(-\frac{[E_i - E_{exp,i}]^2}{2\sigma_{exp,i}^2}\right)$$

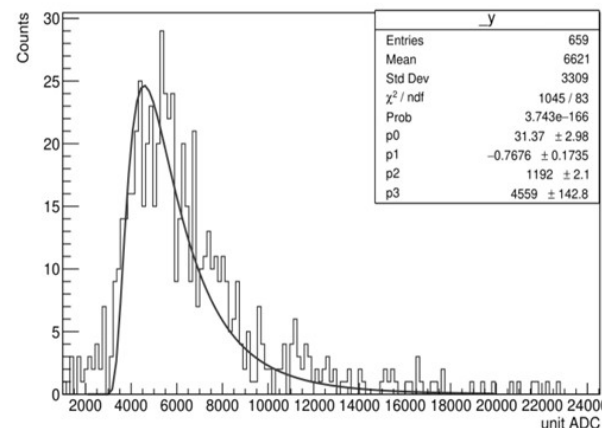
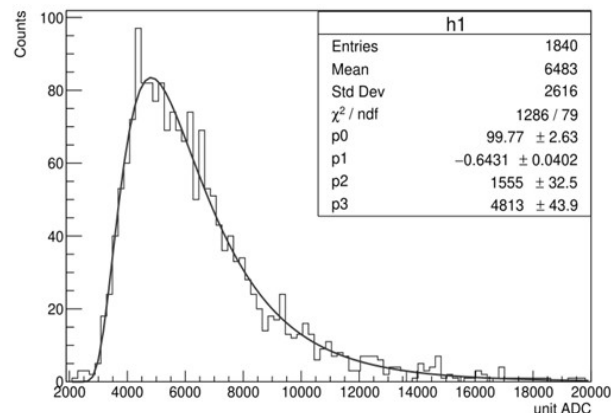
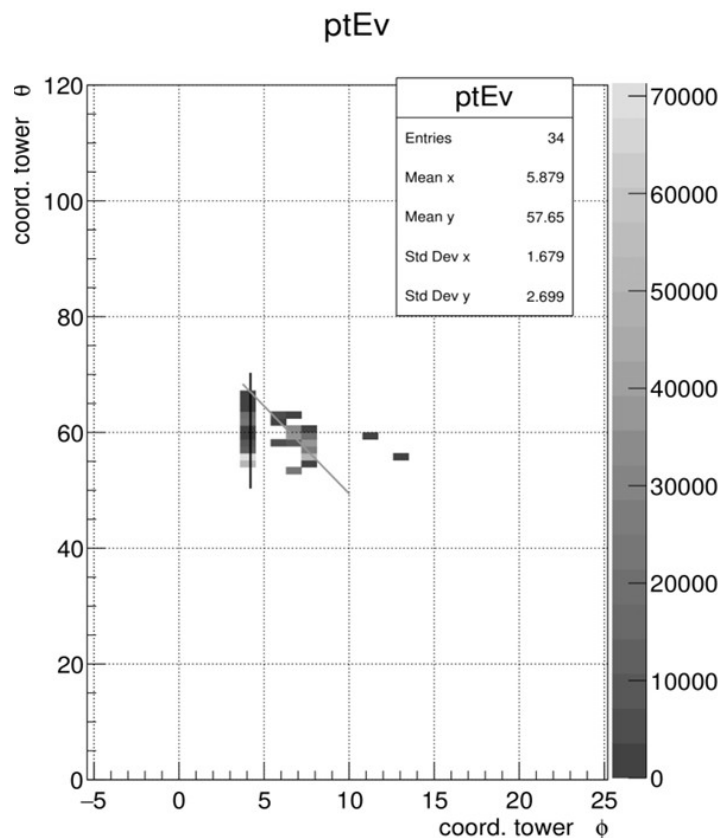
$$\gamma = \arctan \frac{b_x}{b_y}$$

$$(\hat{a}_y, \hat{a}_z, \hat{\gamma}, \hat{b}_z) = \arg \max[\ln(L_n)].$$



Реконструкция и коррекции треков космических мюонов в объеме полусектора калориметра. [В разработке]

Результаты применения данного метода демонстрируют возможность улучшения предварительного выравнивания откликов башен ECal путем уменьшения ширины распределений энерговыведения космических мюонов в башне при отборе поперечных к оси башен треков. Так, по сравнению с методом «M5» метод отбора «N12», при котором угол скорректированных треков составлял до 30 градусов относительно оси X, позволил уменьшить ширину распределения в ~ 1.3 раза при уменьшении статистика в ~ 2.8 раза.



Справа— пример реконструкции треков в одном событии с 34 хитами. Слева представлены распределения энерговыведения мюонов в одной башне при различных способах: сверху- отбор «M5» вдоль оси X полусектора; внизу- отбор по множественности хитов в скорректированных треках «N12», угол которых составлял до 30 градусов относительно оси X.



Заключение

- Разработана система обработки данных, полученных в ходе тестирования элементов детекторных систем TOF и ECal. Разработанные программные решения создавались для работы на тестовых стендах, однако их архитектура позволяет адаптировать их для использования в эксперименте MPD.
- Проведен анализ экспериментальных данных с установки тестирования TOF. Получены оценки координатного разрешения при отборе вертикальных треков: отклонения составили $\sigma_x \approx 0,8$ см и $\sigma_z \approx 0,6$ см. Для выборки, включающей все треки, отклонения составили $\sigma_x \approx 0,9$ см, $\sigma_z \approx 1,0$ см. X и Z – оси плоскости модуля времяпролетной системы.
- Разработана система онлайн мониторинга откликов башен ECal. Архитектура состоит из нескольких блоков: онлайн обработка данных в MPDRoot, передача и хранение данных в базе данных PostgreSQL, визуализация и постобработка в Grafana. Для ускорения работы с базой данных была проведена модернизация в ходе которой были добавлены расширения, такие как TimescaleDB, PgBouncer. При проверке стабильности откликов башен одного полусектора были выявлены нелинейные изменения отклонений усредненных по времени значений от соответствующих эталонных значений некоторых откликов башен установки.
- Ведется разработка и оптимизация алгоритмов цифровой обработки сигналов для электромагнитного калориметра ECal MPD.
- Ведется разработка методов калибровки электромагнитного калориметра. Предложен метод, включающий в себя алгоритм реконструкции треков мюонов, в основе которого итеративное преобразование Хафа, и алгоритм коррекции треков по зависимости выделенной энергии от пройденного пути в башне с использованием метода максимального правдоподобия для предварительного выравнивания откликов башен ECal MPD.



Семинар выполнен в рамках отчета по стипендии им. А.М. Балдина для молодых ученых и специалистов ЛФВЭ(2024) по серии работ:

- [Разработка онлайн мониторинга электромагнитного калориметра ECal эксперимента MPD на коллайдере NICA // Материалы конференции ВНКСФ–282024, Т.1.]
- [Slow-Control System of the Electromagnetic Calorimeter at MPD/NICA Detector // Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Thirty-first Annual Seminar NPCPS'2024, V.30 pp. 69-78]
- [Статус времяпролетной системы TOF эксперимента MPD на коллайдере NICA // Ученые записки физического факультета Московского университет 2023, №. 3]
- [Bayesian Approach to Particles Identification in the MPD Experiment // Journal of instrumentation 2024, V.19.]
- [Status of the Time-of-Flight System of the MPD Experiment at the NICA Collider // Physics of atomic nuclei 2023, V.86 No.5, p 788-795]
- [Status of the Time-of-Flight and ECal Particle Identification Systems of the MPD Experiment at the NICA Collider // Moscow University Physics Bulletin 2024, V.79, pp. 33-38.]
- [МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ПОЛУСЕКТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА MPD/NICA НА МЮОНАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ // ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА. 2024. Т.55, вып.4. С.957–965]
- [Digital signal processing models for the ECal of MPD/NICA experiment //ЭЧАЯ*]
- [Реконструкция треков космических мюонов внутри полусектора электромагнитного калориметра ECal MPD/NICA для выравнивания откликов башен // Письма ЭЧАЯ*]

