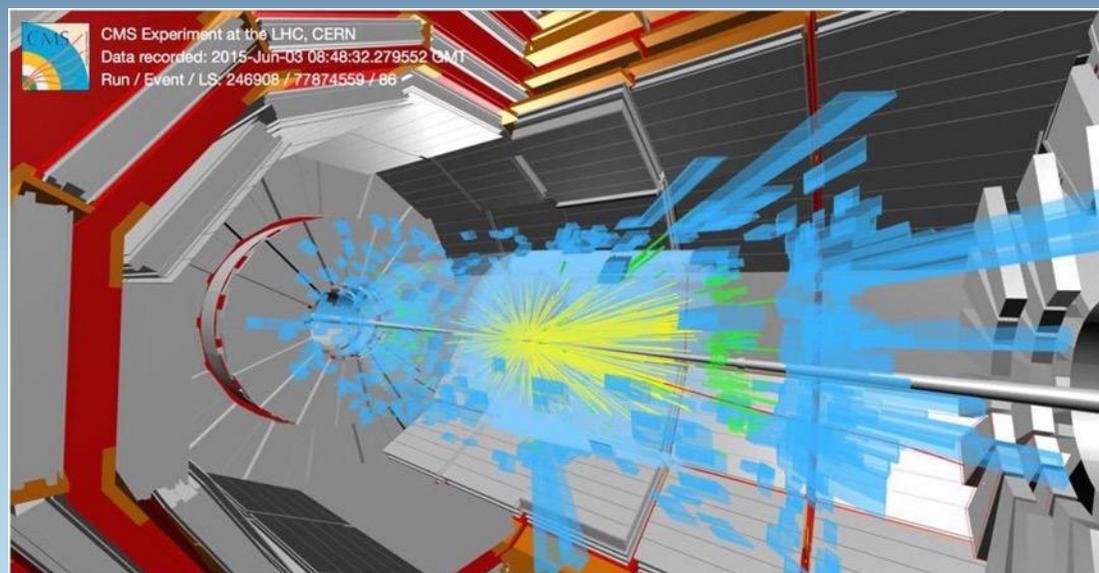


Создание экспериментального комплекса передней мюонной станции установки Компактный мюонный соленоид

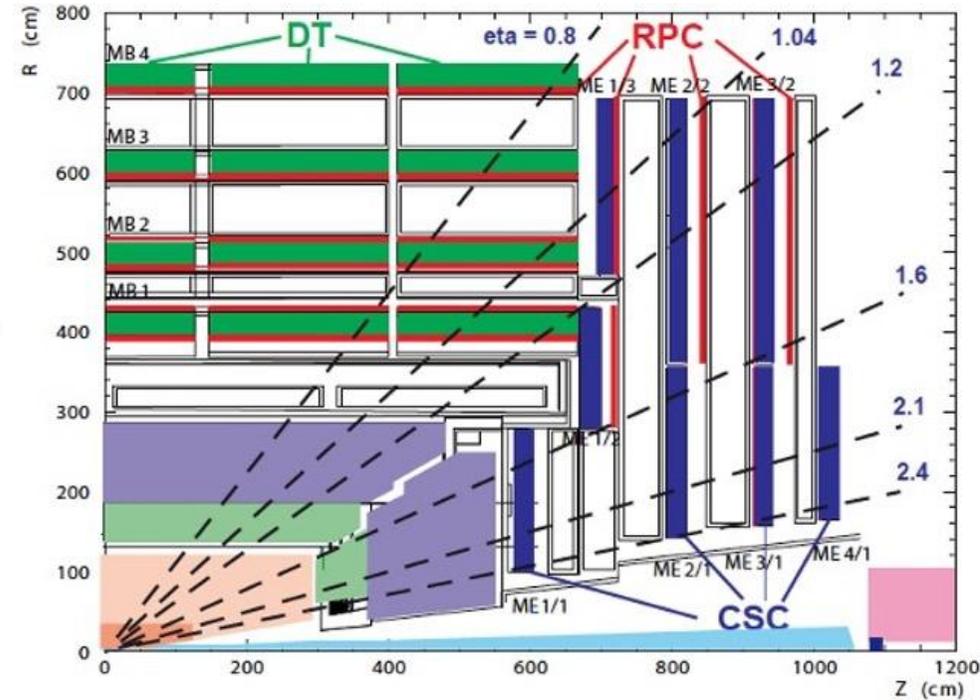
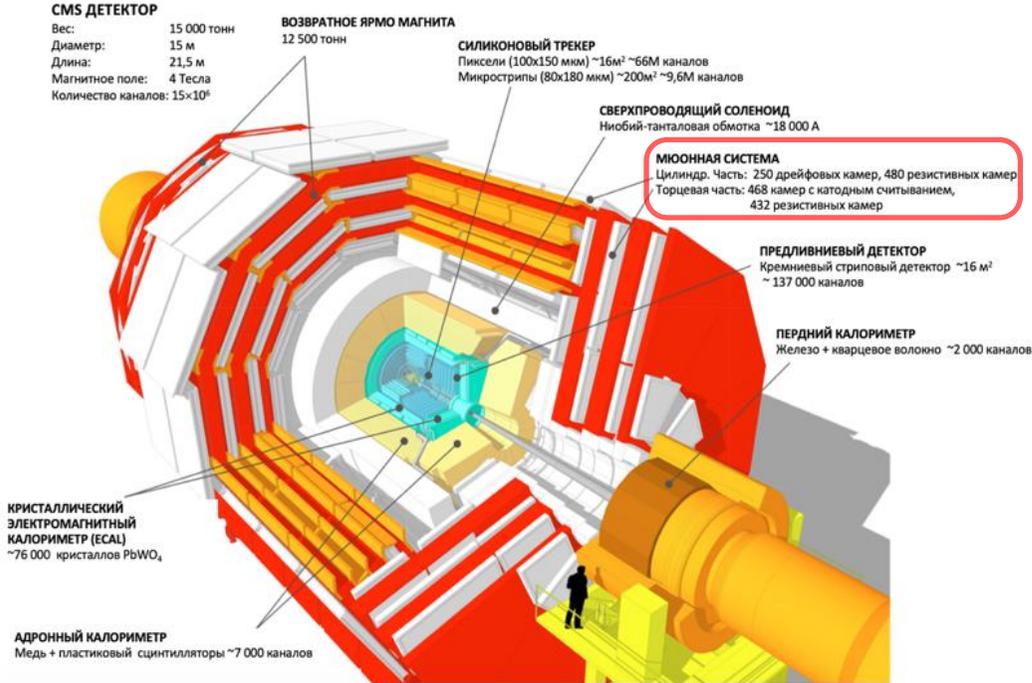


Каржавин В.Ю.

*Специализированный семинар «Релятивистская ядерная физика
и поляризационные явления им. А.М. Балдина» № 786.*

ОИЯИ 5 ноября 2020 г.

Компактный мюонный соленоид (CMS)



Мюонная система состоит из 3 типов субдетекторов

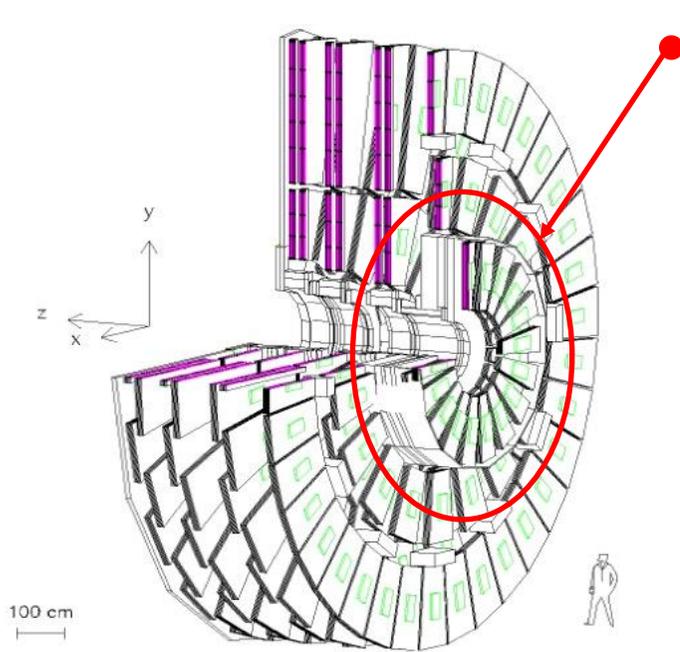
В цилиндрической части ($|\eta| < 1,3$):

4 слоя из 250 дрейфовых камер (DT) и 480 камер с резистивными пластинами (RPC)

В торцевой части ($0.9 < \eta < 2.4$):

4 мюонные станции ME1- ME4 из 468 катодно-стриповых камер (CSC) и 432 камер с резистивными пластинами (RPC)

Передняя мюонная станция ME1/1



36 камер с катодным считыванием
(72 камеры на 2 торцевых частях)

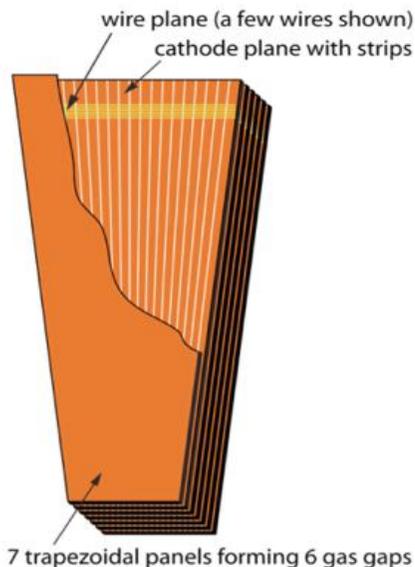
Условия эксплуатации

- Сильное аксиальное маг. поле ~ 4 Т
- Наивысшие в мюонной системе загрузки ~ 1 кГц/см² (~ 100 кГц на канал электроники)
- Высокий уровень радиационного фона:
 - нейтронный флюенс $\sim 10^{12}$ Гц/см²
 - интегральная доза облучения ~ 15 кРад
- Высокая степень интеграции на камере
- Сложный доступ для обслуживания и замены детектора

Основные требования CMS к детекторам ME1/1

- Пространственное разрешение $\sigma_x \leq 75$ мкм (≤ 185 мкм на плоскость)
- Временное разрешение $\sigma_t \leq 4$ ns
- Прецизионное совпадение восстановленной координаты трека с внутренним треккером
- Возможность выработки локального триггера
- Идентификация локального трека с моментом взаимодействия пучков в коллайдере
- Детекторы и электроника должны обладать способностью противостоять высокому радиационному фону и необходимой защитой от процессов старения

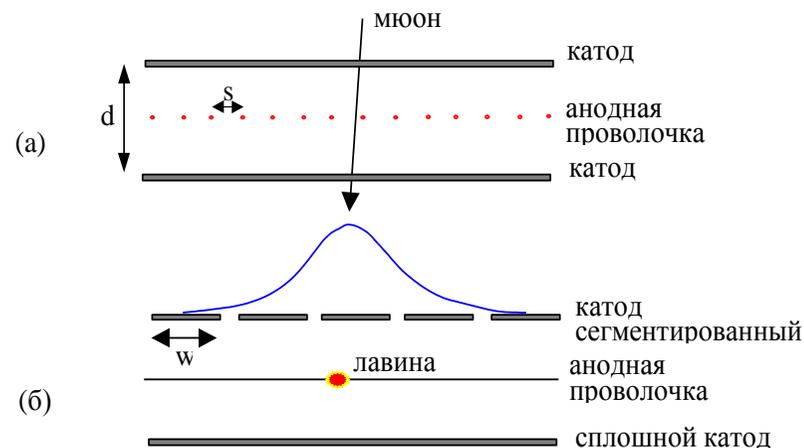
Камеры с катодным считыванием



Камеры с катодным считыванием выбраны в качестве базовых детекторов торцевой мюонной системы, поскольку они сочетают в себе следующие необходимые свойства:

- точное измерение координаты частицы до 40 мкм
- временное разрешение ~ 3 нс
- наличие быстрого сигнала для триггирования
- загрузочная способность до 3 кГц/см²
- возможность работы в сильном магнитном поле ~ 4 Т

- Камера состоит из 6 газовых зазоров, в которых натянуты анодные проволочки (под напряжением ~ 3.0 кВ)
- Информация с анодных проволочек дает R координату и временную отметку
- Информация с радиальных катодных стрипов дает φ координату
- Координата трека определяется распределением заряда на стрипах и сигналом с проволочек



- (а) сечение камеры перпендикулярно анодным проволочкам;
(б) сечение камеры перпендикулярно катодным стрипам.

Создан ряд прототипов катодно-стриповых камер и электроники считывания мюонной станции ME1/1

Параметры прототипов камер

Прототип	P0	P1	P2	P3	P4
Количество плоскостей, шт.	4	6	6	6	6
Зазор, мм	2.5	2.5	2.5	2.8	3.5
Шаг стрипов (верх/низ), мм	5	5	5	7.8/3.15	5.8/4.1
Шаг проволочек, мм	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Диаметр проволочек, мкм	30	30	30	30	30
Рабочее напряжение, кВ.	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0
Угол наклона проволочек, град.	-		25	22	29
Размер плоскости, м	0,5 x 0,5	0.9×0.65×0.45		1.705×0.663×0.34	1.62×0.61×0.301
Форма катодных стрипов	Прямоугольная		Радиальная		

Проведены комплексные методические исследования

Экспериментально изучено:

- координатное и временное разрешение детекторов;
- влияние магнитного поля на характеристики детекторов;
- триггерные свойства камер с катодным считыванием информации;
- влияние электромагнитного сопровождения, индуцируемого мюонами и вероятность образования δ -электронов в плоскости камеры;
- загрузочная способность камер и быстродействие электроники
- оптимизированы параметры и конструкция камер.

Предложены и экспериментально доказаны методы компенсации эффектов, влияющих на деградацию характеристик камер

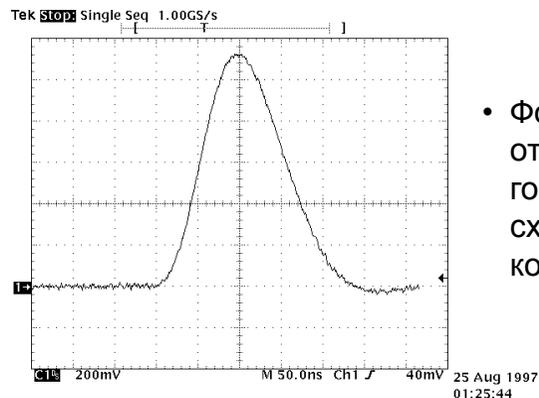
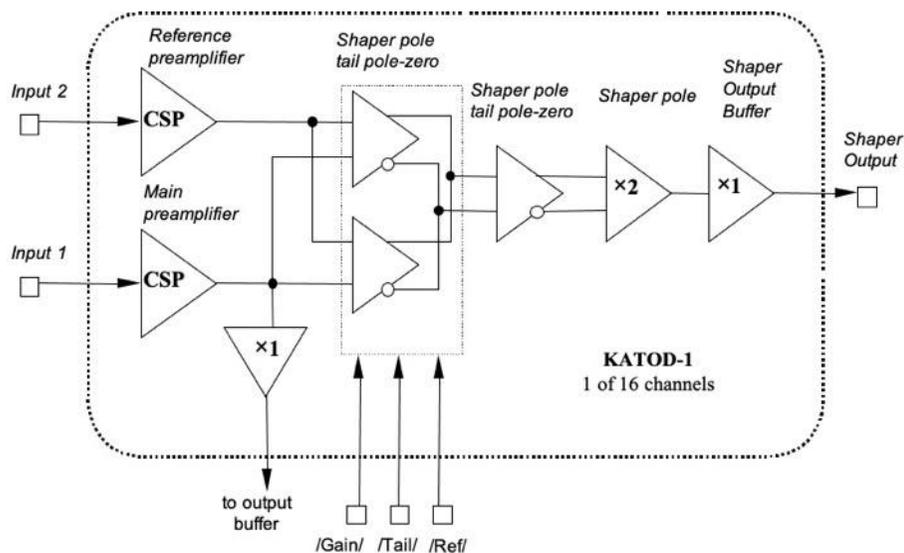
- Влияние неоднородного аксиального магнитного поля <4 Т компенсировано поворотом анодных проволочек на угол относительно вертикальной оси камеры
- Для работы в условиях высокого уровня фоновых загрузок ~ 1 кГц/см² стрипы разделены по вертикали на 2 части и считываются с 2 сторон
- показано, что наличие 6 плоскостей в мюонных камерах является оптимальным для эффективной реконструкции трека мюона при наличии электромагнитного сопровождения

Создана электронная аппаратура для исследований характеристик прототипов детекторов

- Совместно с Национальным центром физики частиц высоких энергий (НЦФЧВЭ) г. Минск, разработаны и изготовлены специализированные интегральные схемы для считывания анодной, катодной и триггерной информации
- Параметры микросхем оптимизированы с учетом особенностей конструкции камеры и условий ее эксплуатации в установке CMS
- На базе изготовленного комплекта интегральных схем создана электронная аппаратура для исследований характеристик прототипов детекторов мюонной станции ME1/1

Регистрация информации с катодных стрипов

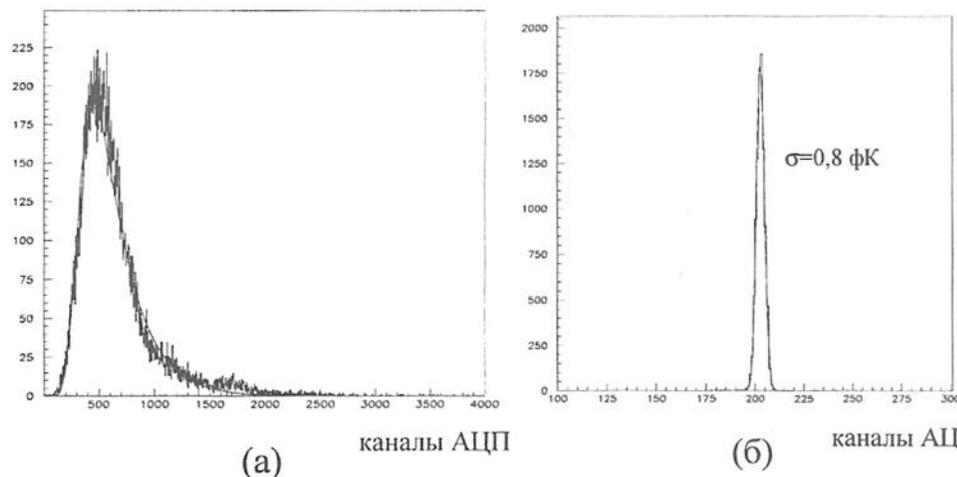
КАТОД 1 - 16-канальный предусилитель-формирователь с регулировками коэффициента усиления и компенсации длинной компоненты токового сигнала с камеры



- Форма Гаусса с небольшим отрицательным выбросом, что говорит о хорошей работе схемы компенсации длинной компоненты сигнала с камеры

Форма выходного сигнала ИС КАТОД 1 (РЗ, мюоны 225 ГэВ)
Время формирования: 100 нс

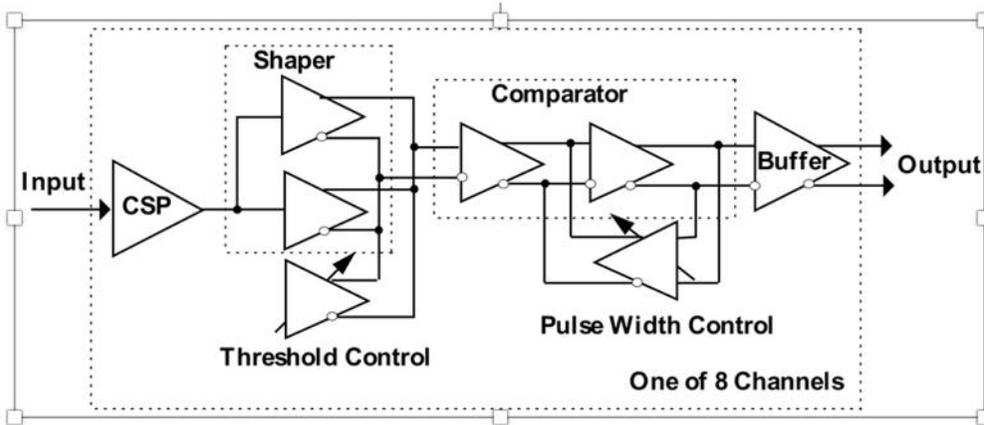
Количество каналов	16
Коэффициент преобразования	(1÷5) мВ/фК
Шум (ENC r.m.s)	2400+12 э/пФ
Время пика сигнала (Сдет = 150пФ)	100 нс
Время базовой линии сигнала	600нс
Наводка с канала на канал	< 1 %
Нелинейность	1 %; (0 ÷ 1.5) В
Потребление по питанию	25мВт/канал



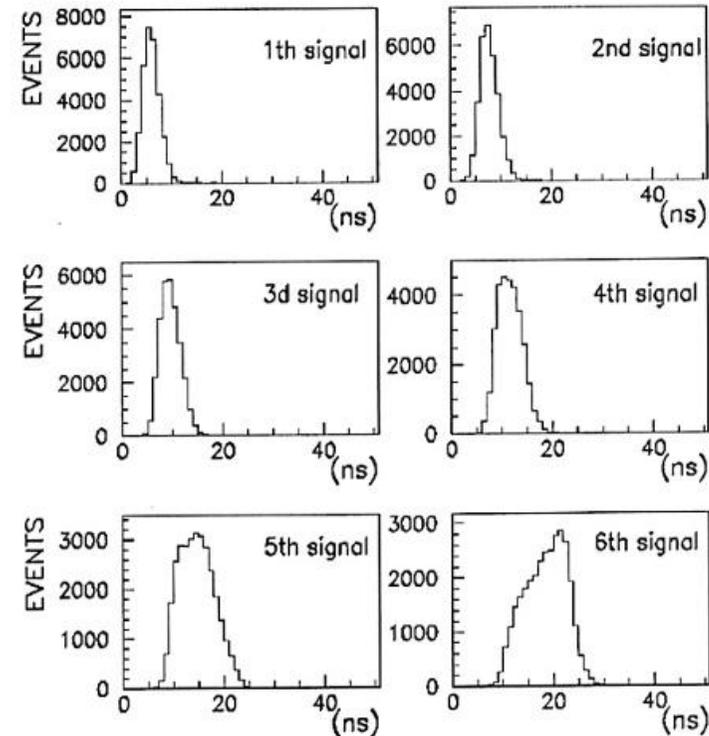
(а) - распределение заряда на катодных стрипах прототипа РЗ
(б) - уровень шумов канала ИС КАТОД-1

Регистрация информации с анодных проволочек

АНОД- 8-ми каналный предусилитель-формирователь-дискриминатор ($T_{\phi}=15$ нс) с регулировками порога и длительности выходного импульса



Временные спектры анодных сигналов, последовательно приходящих с 6 плоскостей камеры

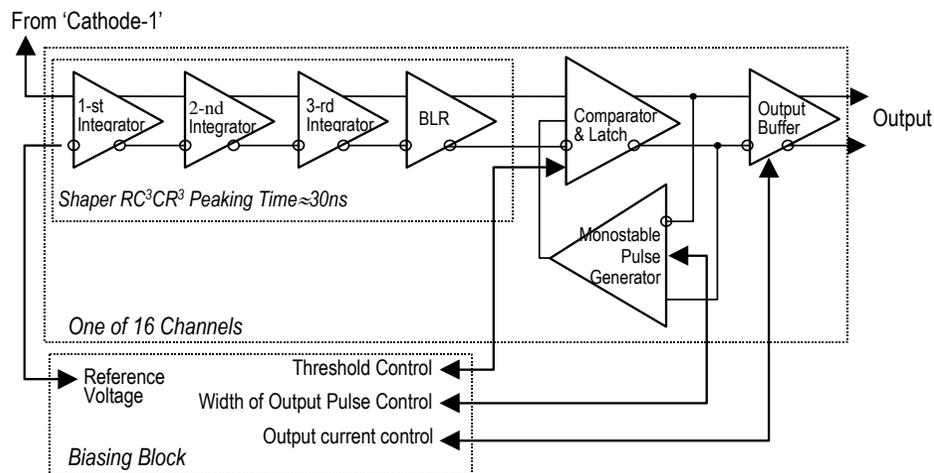


Количество каналов	8
Коэффициент преобразования	10 мВ/фК
Шум (ENC r.m.s)	1600+20 э/пФ
Время формирования	15 нс
Время распространения сигнала	7 нс
Длительность выходного сигнала	30 ÷ 150 нс
Двух импульсное разрешение	100 нс
Порог дискриминатора	5 ÷ 50 мВ
Потребление по питанию	25 мВт/канал

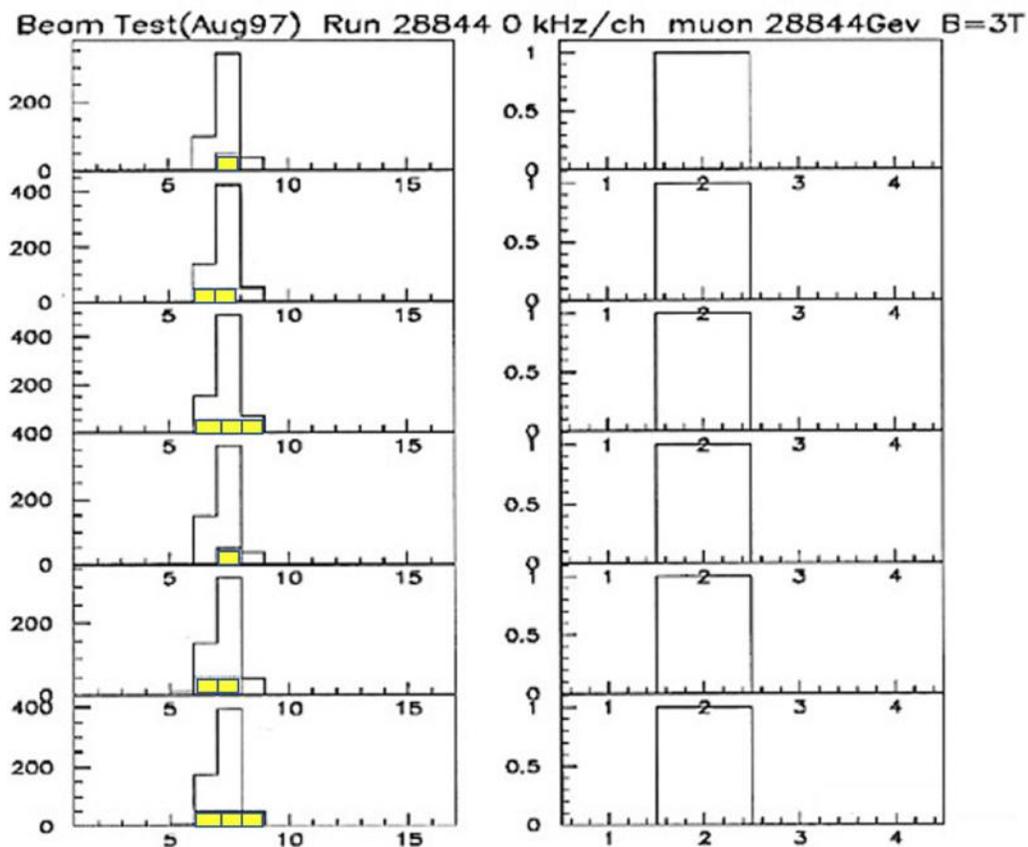
Первый и второй сигналы могут использоваться в логике локального триггера и служить временной меткой события, а мажоритарное совпадение сигналов с 6 плоскостей обеспечит идентификацию трека с временем взаимодействия пучков в коллайдере за время < 30 нс

Вывод триггерной информации с катодных стрипов

КАТОД 3 - 16-ти канальный формирователь - дискриминатор быстрого канала, ($T_{\phi}=30$ нс) с регулировками порога и длительности выходного импульса.



Типичный вид события, зарегистрированного при облучении прототипа P3 на пучке H2 ЦЕРН



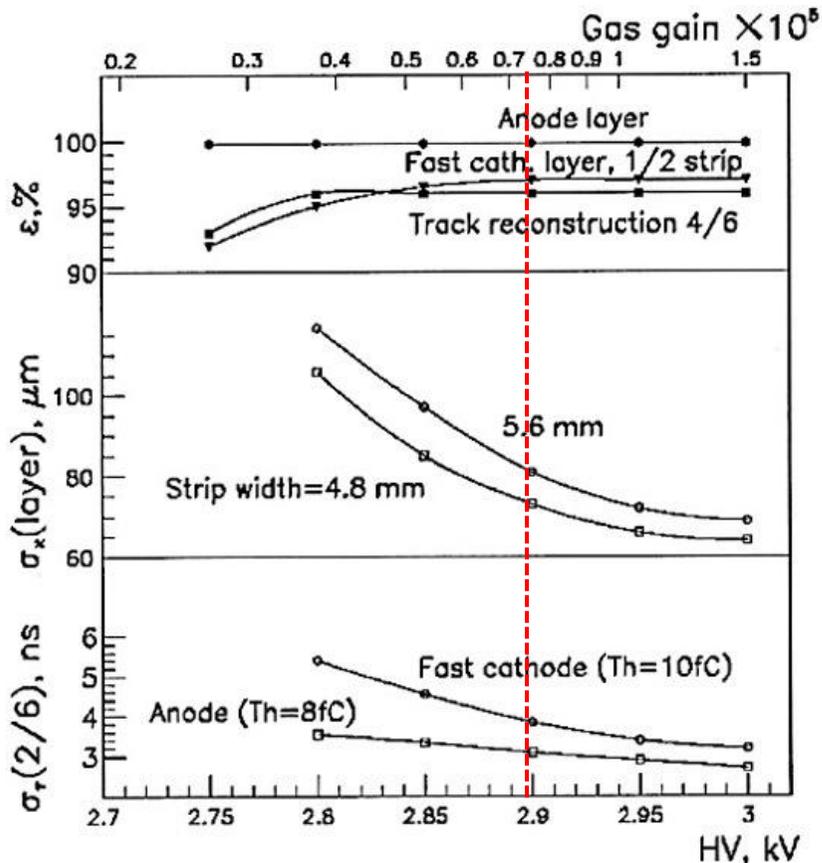
Количество каналов	16
Шум ($ENC_{r.m.s}$)	7000 э
Время формирования	30 нс
Время распространения сигнала	15 нс
Длительность выходного сигнала	30 ÷ 80 нс
Порог дискриминатора	2 ÷ 50 мВ
Потребление по питанию	30 мВт/канал

Результаты экспериментальных исследований характеристик прототипа Р4

Данные получены с электроникой регистрации, разработанной на основе специализированных ИС КАТОД 1, КАТОД 3 и АНОД.

Газовая смесь $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{CF}_4$ (30/50/20)

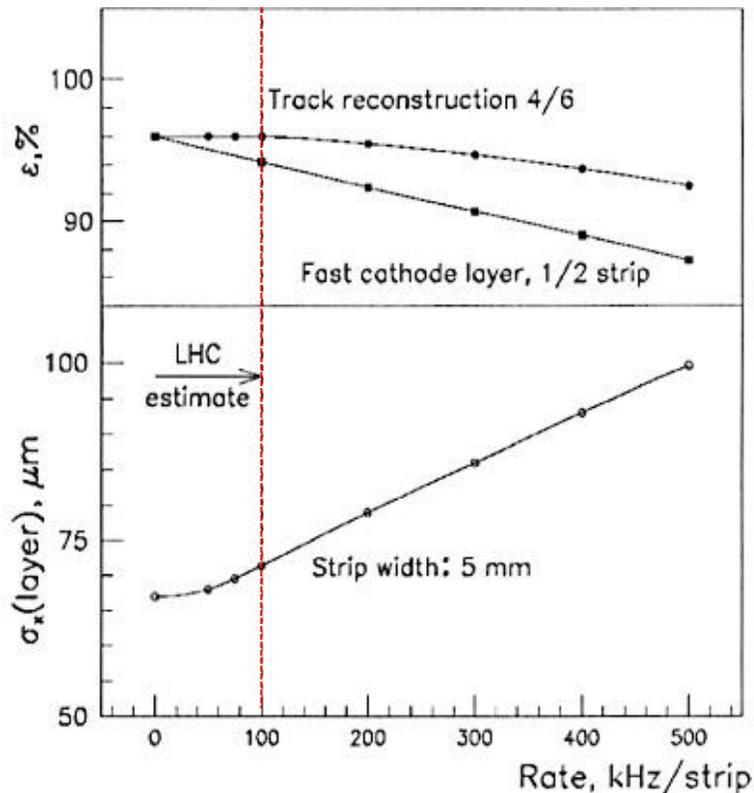
Высокое напряжения на камере $U=2.9$ кВ



- Газовое усиление:
 $G \sim 7 \times 10^4$ ($U=2.9$ кВ)
- Координатная точность 1 плоскости камеры:
 $\sigma_x \sim 80$ мкм
- Эффективность реконструкции мюонных треков:
не хуже $\epsilon \sim 96\%$
- Временное разрешение анодного канала:
 $\sigma_t \sim 3$ нс при эффективности регистрации $\epsilon \sim 100\%$
- Временное разрешение быстрого катодного канала:
 $\sigma_t \sim 4$ нс при эффективности регистрации $\epsilon \sim 97\%$

Исследование нагрузочной способности прототипа P4

Устойчивость работы детектора и электроники считывания информации при фоновых нагрузках ~ 100 кГц/стрип - одно из важнейших условий CMS для мюонной станции ME1/1



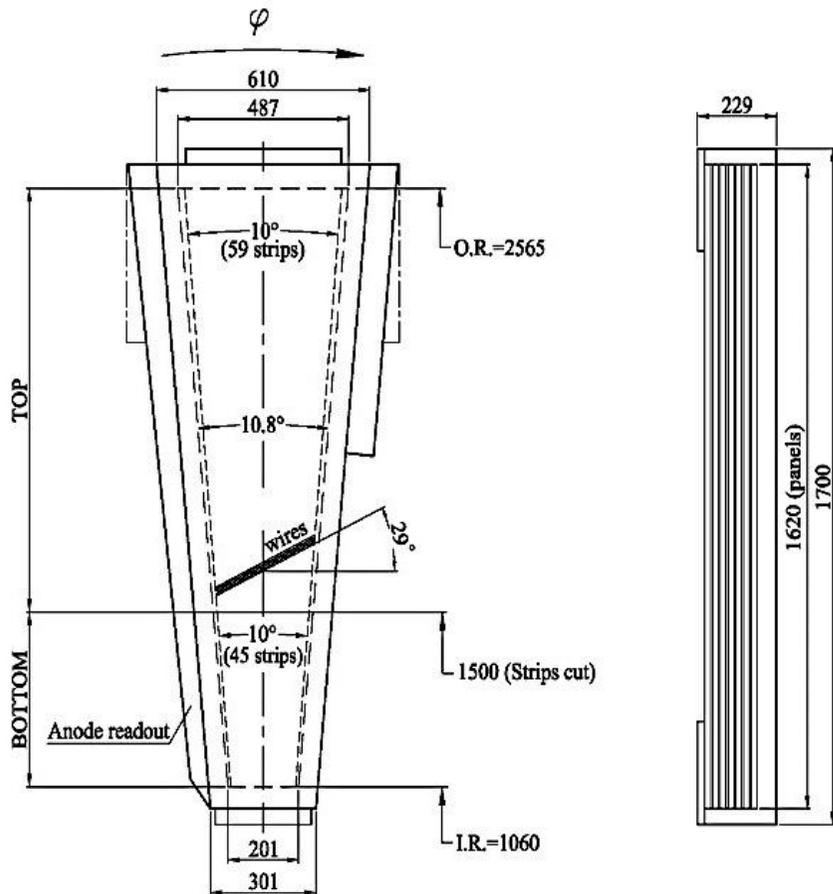
При фоновых нагрузках 100 кГц/стрип

- Координатное разрешение плоскости ~ 70 мкм
При увеличении нагрузок до 500 кГц/стрип (фактор 5), разрешение деградирует ~ 100 мкм (в пределах допустимого для камер ME1/1)
- Эффективность восстановления трека по 4 плоскостям, при нагрузках ~ 100 кГц/стрип, составляет $\sim 96\%$
- Эффективность регистрации треков с точностью 1/2 ширины стрипа, с помощью быстрого катодного канала, не менее 95%

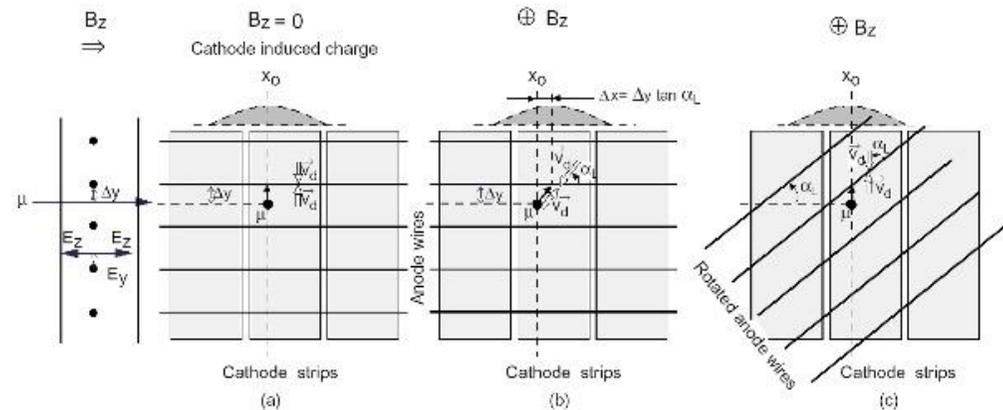
Экспериментально измеренные параметры предсерийного прототипа P4 полностью соответствуют требованиям CMS к мюонной станции ME1/1, что позволило принять решение начать серийное изготовление детекторов

Изготовление камер мюонной станции ME1/1

- Камера ME1/1 имеет трапецеидальную форму и представляет собой сектор $\varphi=10^\circ$
- Стрипы образуют естественную систему координат по φ , проволочки дают радиальную координату
- Для уменьшения загрузки катодных каналов регистрации стрипы камер станции ME1/1 разделены по вертикали на 2 части и считываются независимо с двух сторон камеры



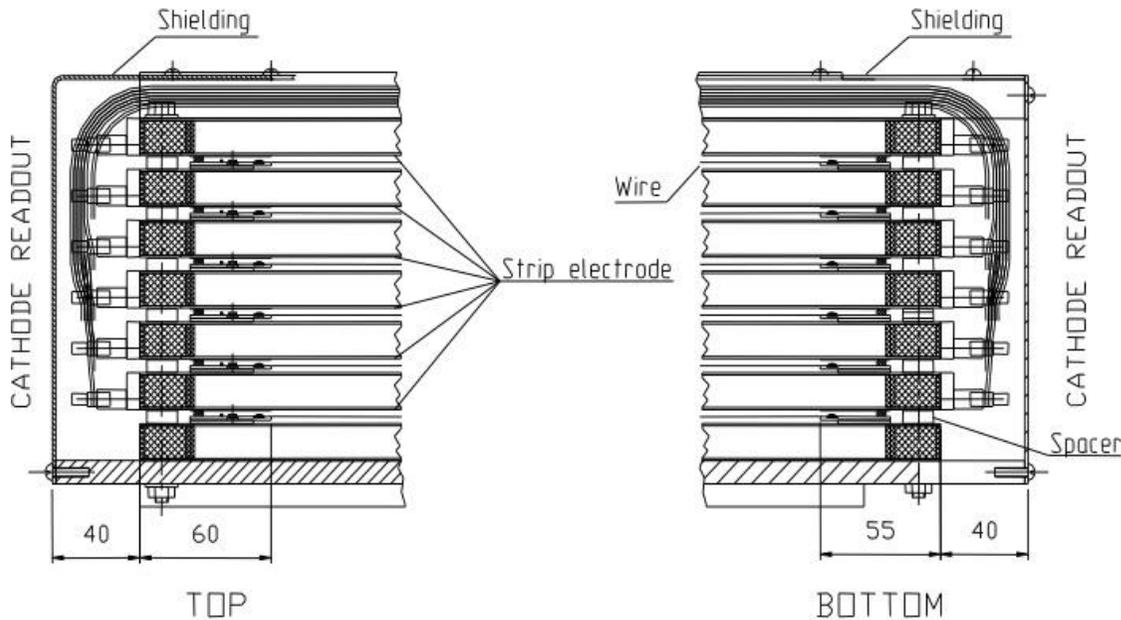
- Для компенсации влияния магнитного поля анодные проволочки повернуты на угол α (угол Лоренца) относительно вертикальной оси камеры. Для камер ME1/1 оптимальный угол $\alpha = 29^\circ$ ($B < 4T$)



Под действием магнитного поля электроны, дрейфующие к анодной проволоке, сносятся, что приводит к потере координатной точности

Конструкция и параметры камер ME1/1

- Основа камеры - самоподдерживающиеся панели с сотовым заполнением из листов фольгированного стеклотекстолита толщиной 0,8 мм (покрытие меди одностороннее 18мкм)
- 6 зазоров (7 мм) образованы двумя катодными электродами – сплошной и стрипованный (стрипы на поверхности фольгированного стеклотекстолита)



- Основными требованиями к конструкции панели являются: жесткость конструкции, плоскостность, и точность сборки плоскостей

Основные параметры камеры ME1/1

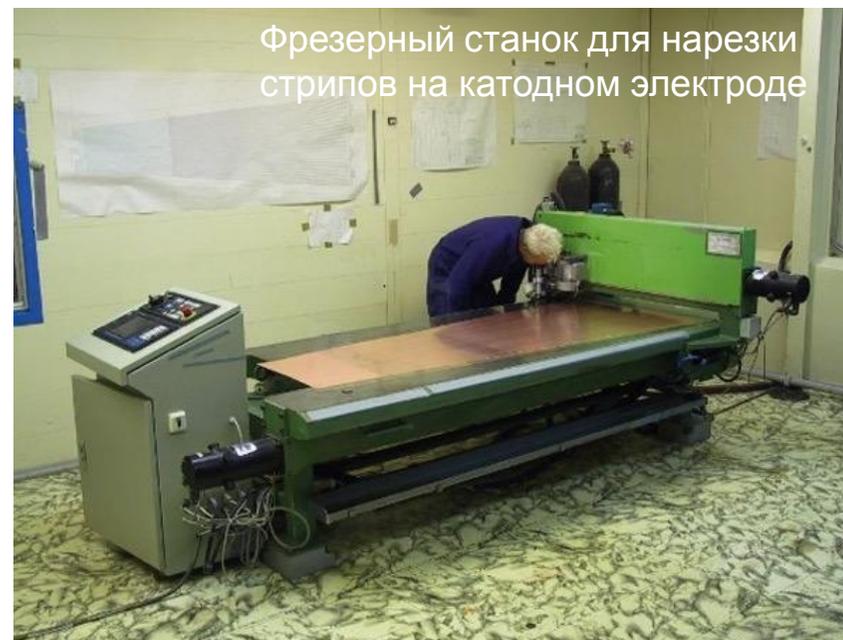
Камера	Кол-во плоскостей		6
	Внутренний радиус	м	0.965
	Внешний радиус	м	2.665
	Количество катодных каналов		480
	Количество анодных каналов		288
	Газовый объем	л	25
	Вес с электроникой	кг	135
Плоскость	Расстояние анод-катод	мм	3.5
	Высота	м	1620
	Ширина нижней части	м	0.301
	Ширина верхней части	м	0.610
	Толщина	мм	15
	Площадь	м ²	0.73
	Чувствительная зона	м ²	0.52
Катодные стрипы	Форма стрипов		Радиальная
	Кол-во каналов в верх. части		64
	Кол-во каналов в нижней части		48
	Шаг стрипа в верхней части	мрад	2.33
	Шаг стрипа в нижней части	мрад	3.88
	Длина стрипа в верх. части	мм	1065
	Длина стрипа в нижней части	мм	440
Анодные проволоочки	Диаметр проволоочки	мкм	30
	Кол-во проволоочек		587
	Шаг проволоочек	мм	2.5
	Кол-во каналов		48
	Проволок в канале (кроме 1 и 48)		11
	Угол наклона проволоочек	град	29

Изготовление катодного электрода

- Для “нарезки” стрипов на плоскости катодного электрода был специально спроектирован и изготовлен автоматизированный фрезерный станок
- Радиальная форма стрипов фрезерована алмазным диском толщиной 0,35 мм

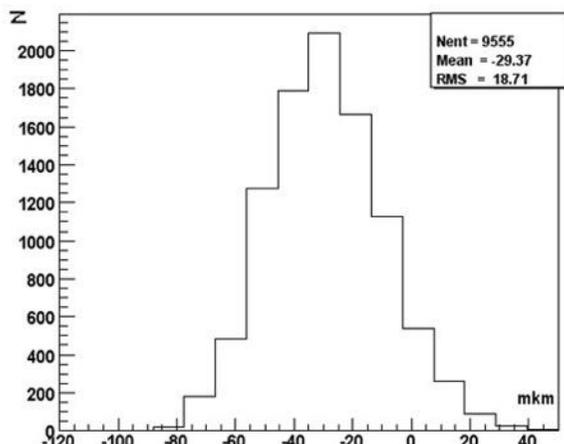
Параметры катодного электрода

Параметр	Верх CSC	Низ CSC
Форма стрипа	Радиальная	Радиальная
Длина стрипа	1065 мм	440 мм
Количество стрипов	80	48
Угол стрипов	2.33 мрад	3.88 мрад
Ширина стрипа	6.0 мм	4.1 мм
Ширина пропила между стрипами	0.4±0.05 мм	
Глубина пропила между стрипами	0.2 мм	
Плоскостность электрода	≤ 0.1мм	
Максимальное смещение стрипа	50 мкм	



Фрезерный станок для нарезки стрипов на катодном электроде

Контроль разброса толщин панелей



- Номинальное значение толщины панели 15 мм
- Разброс относительно среднего значения ~19 мкм
- Максимальное смещение стрипа 50 мкм
- Всего измерено 273 панели (по 35 точек на каждой).

Контроль качества нарезки стрипов

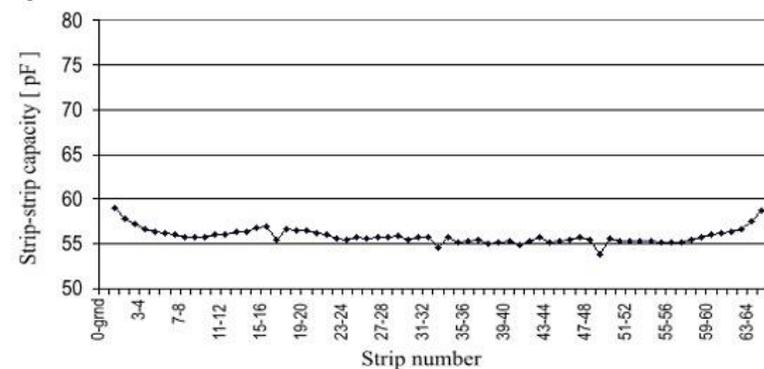
- Качество нарезки стрипов и расстояние между стрипами контролировалось с помощью измерения емкости между ними



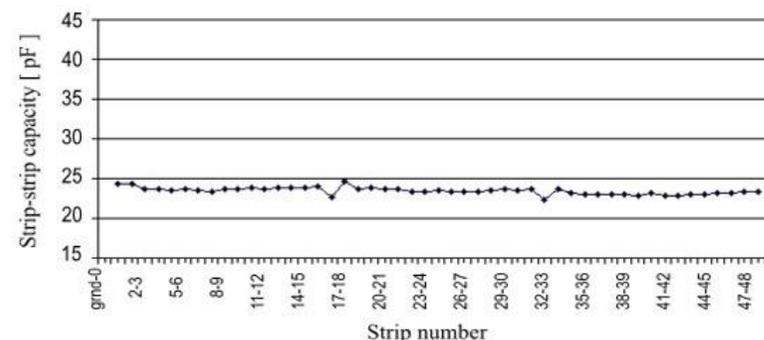
Разброс емкости между стрипами для верхней и нижней частей панели

Panel/Electrode No 556-70-B507

Top:



Bottom:

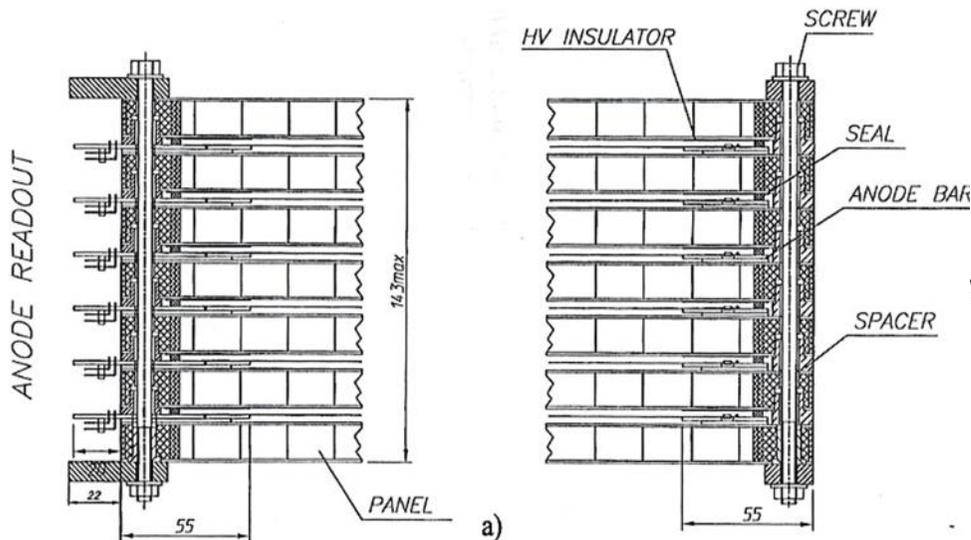


- Значение емкости первого и последнего стрипов увеличивается по причине влияния заземления по контуру камеры.

Конструкция анодного электрода

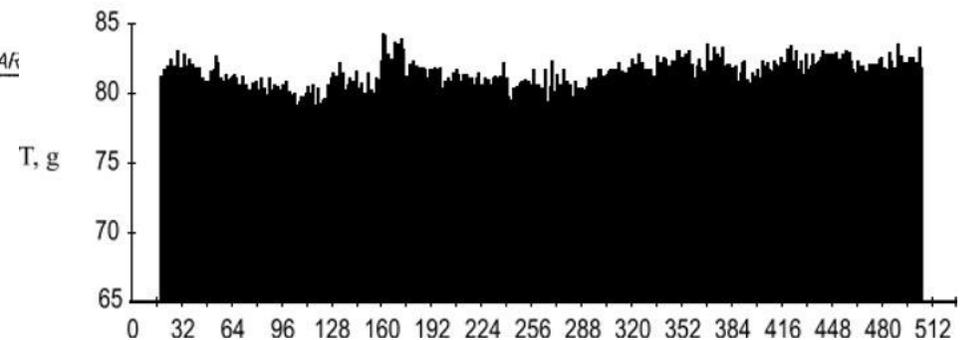
- Анодный электрод (анодные проволоочки) размещен в середине газового зазора
- Диаметр анодных проволоочек 30 мкм
- Чтобы уменьшить количество каналов электроники считывания, анодные проволоочки объединены в группы по 11 (кроме 1 и 48 канала) шириной 2.5÷5,2 см
- Предел упругости проволок 125 г
- Натяжение на разрыв ~160 г
- Рабочее значение натяжения проволоки 80 ± 5 г

Сечение камеры вдоль проволоочек



Проверка натяжения анодных проволоочек после распайки

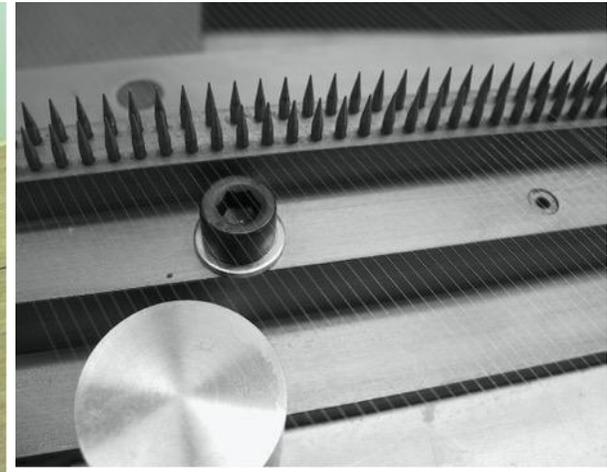
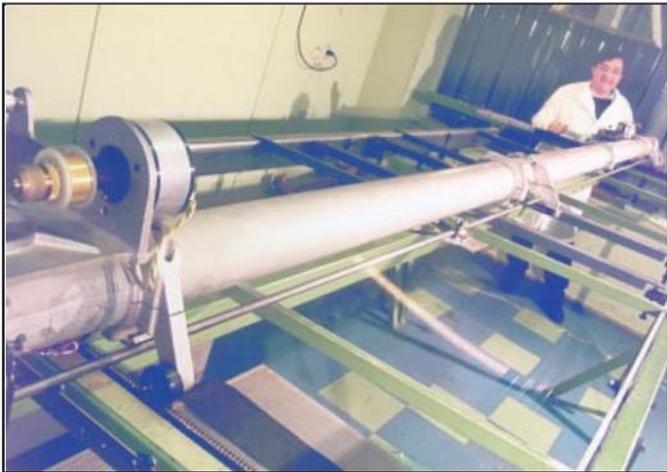
TENSION FOR LAYER ($\langle T \rangle = 80.77$, RMS = 1.346)



Разброс относительно среднего значения rms= 1,3 г

Изготовление анодного электрода

- Рабочее значение натяжения проволоки обеспечивается специальной намоточной машиной
- Рама для переноса проволочного массива с намоточной машины на анодный электрод камеры
- Прецизионный сепаратор для позиционирования проволочек массива на середину ламелей при распайке (шаг 2,5 мм, с точностью ± 25 мкм)



Сборка камеры ME1/1

Точность сборки

- На каждой панели имеются 4 референсных отверстия, в которые вставлены прецизионные втулки с отверстиями диаметром $\varnothing=10^{+0.016}$ мм
- Точность расположения референсных втулок, относительно оси симметрии камеры, не превышает 10 мкм
- В референсные втулки вставлен прецизионный штифт диаметром $\varnothing=10^{-0.01}$ мм, обеспечивающий выравнивание плоскостей камеры



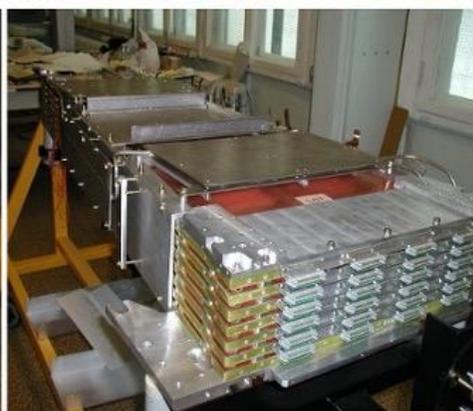
Проверка камер после сборки

- Герметичность газовых систем всех камер проверена методом заполнения газом. Согласно техническому проекту, при избыточном давлении газа 10 мбар, утечка не должна превышать 0,44% от общего потока газа <0.25 см³/мин
- Герметичность систем охлаждения проверялась:
 - на заводе-изготовителе водой под давлением ~25 бар
 - после установки на камеру при давлении 10 мбар (полное отсутствие утечки)
- Все камеры проходили тренировку с высоким напряжением 3.0 кВ, с газовой смесью Ar/CO₂ (40:60)

Установка систем охлаждения и кабелей на камеру

Система охлаждения электроники считывания

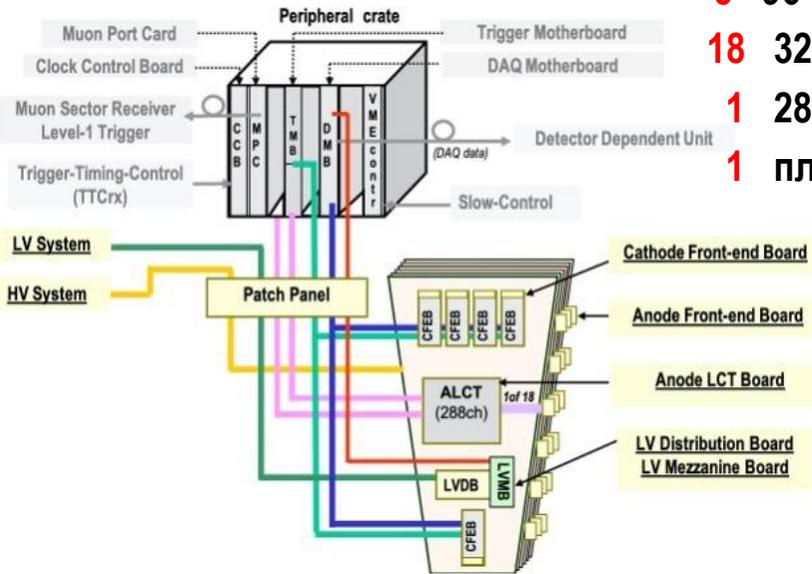
Разводка катодных и анодных кабелей



После монтажа системы охлаждения и кабелей, на камеру устанавливались платы считывания информации

Монтаж электроники считывания

- 5 96-канальных плат считывания информации с катодных стрипов (CFEB)
- 18 32-канальных плат считывания информации с анодных проволок (AFEB)
- 1 288-канальная плата анодного локального триггера (ALCT)
- 1 плата распределения низковольтного напряжения (LVDB)



Высокая степень интеграции на камере ME1/1

- ограниченная площадь поверхности камеры
- жесткие ограничения на габаритные размеры



Интеграция электроники



Камера ME1/1 в собранном виде

Проверка работоспособности камер и электроники считывания

Каждая камера проходила стандартный набор тестовых испытаний, который подразделялся на 2 основные группы *

1. Проверка работоспособности электроники (без высокого напряжения):

- проверка функций медленного контроля (управление коммутацией низковольтного питания электроники, чтение токов и напряжений);
- снятие шумовых характеристик анодных и катодных каналов;
- проверка работы компараторной логики;
- измерение порогов регистрации (тестовый сигнал).

2. Тесты с высоким напряжением на камере:

- снятие шумовых характеристик;
- проверка работоспособности электроники в тестах с космическими мюонами;
- контроль коэффициента газового усиления и эффективности регистрации камеры.



Автоматизированный стенд для проверки характеристик камер ME1/1



Стенд для тестирования камер ME1/1 с космическими мюонами

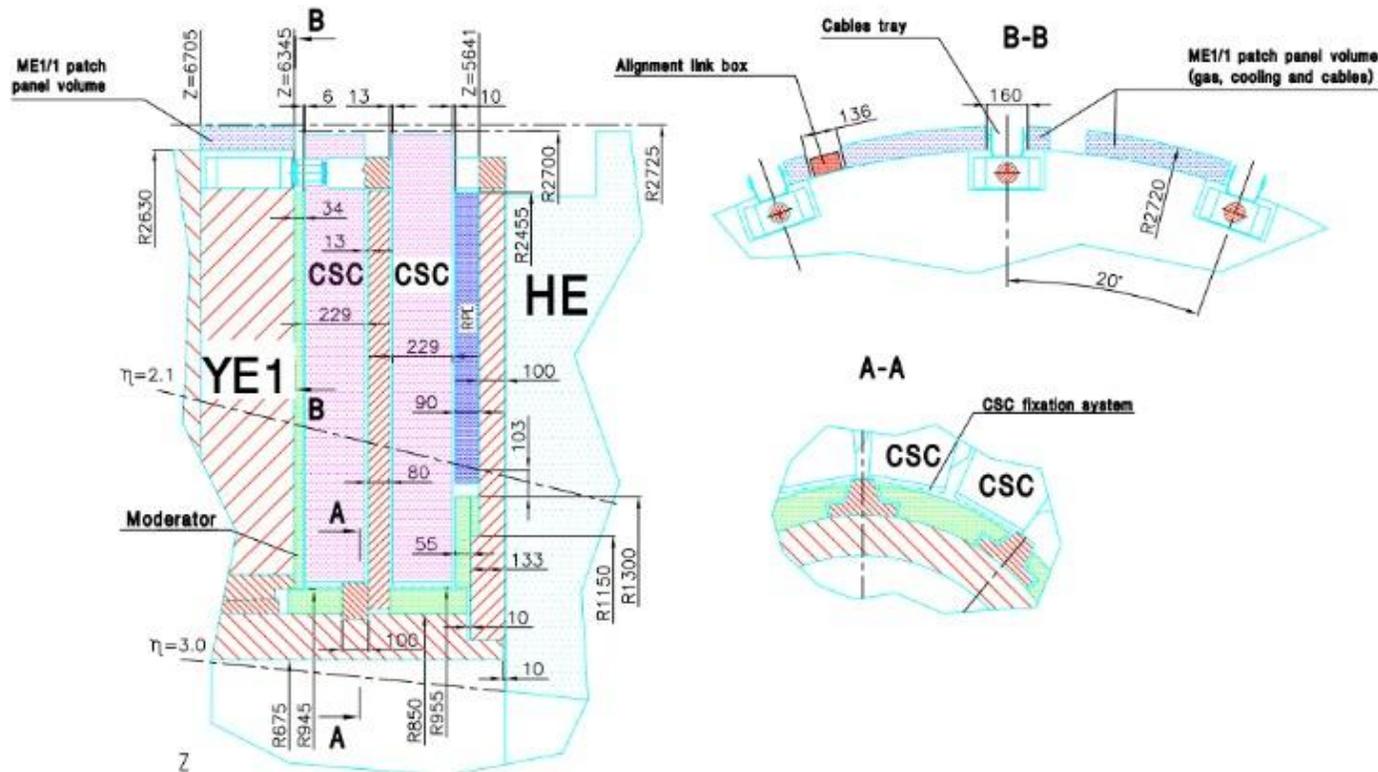
Тесты для проверки характеристик детекторов и электроники считывания*

Номер теста	Название	Краткое описание
9	Управление и контроль питания электроники	Проверка коммутации низковольтного питания электроники на камере, чтение токов и напряжений (с LVDB через LVMB).
11	Шумовая характеристика каналов AFEB	Поиск шумящих проволочек и коротких замыканий при триггировании с одной плоскости.
12	Проверка контактов и наводки с канала на канал AFEB	Срабатывание на всех группах проволочек при подаче сигнала на стрип.
13	Пороги и аналоговый шум AFEB	Срабатывание при изменении порога для 2 амплитудах тестового импульса.
14	Задержка сигнала ALCT-AFEB	Настройка задержек прихода сигналов с AFEB на ALCT.
15	Пьедесталы и шум CFEB	Набор данных со случайным триггером для изучения шумов и пьедесталов CFEB
16	CFEB проверка контактов	Подача однократного импульс на все проволочки и проверка отклика на стрипах.
17	Калибровка аналоговых каналов CFEB.	Подается сигнал на входы CFEB и сканируется форма выходного сигнала при изменении задержки. Контроль наводки с канала на канал.
17b	Контроль усиления CFEB	Подается сигнал на CFEB с изменяющейся амплитудой для измерения коэф. усиления.
19	Калибровка каналов компараторов. Тест порога и аналогового шума.	Измерение порога и шумов компаратора при изменении порога при 2 амплитудах тестового импульса.
21	Тест логики компараторов	Для проверки логики полу-стрипа подается сигнал на триплеты стрипов.
25	Триггер ALCT	Проверка частоты ALCT триггера для разных уровней совпадения: 1,2,3,4,5 и 6 плоскостей
27	Набор статистики на космике	Статистика на космике, для исследования координатной точности, эффективности, газового усиления и т. д.

*) более подробная информация о тестах приведена в резервных слайдах

Сборка комплекса мюонной станции ME1/1

Два слоя ME1/1 камер и один слой RPC камер, оснащённых электроникой, кабелями и сервисными коммуникациями, расположены в зазоре 70 см между адронным калориметром HE и железным диском YE1

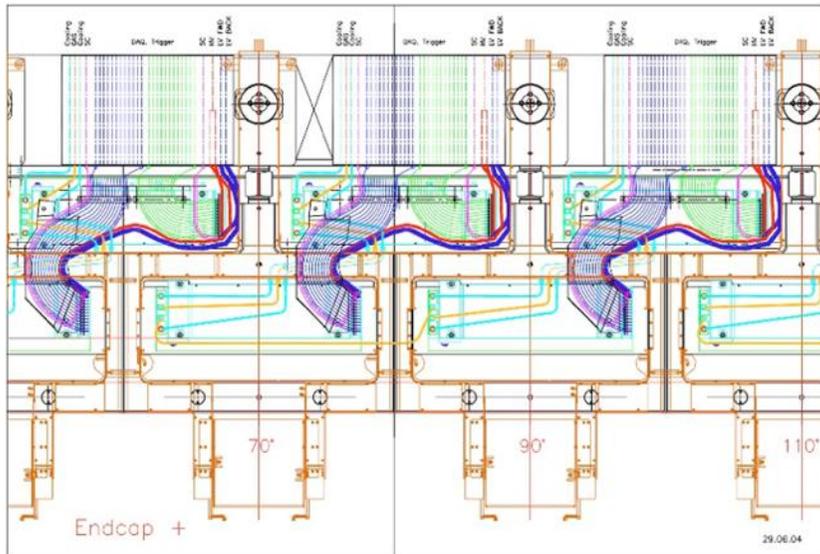


Расположение ME1/1 определяет жесткие ограничения на геометрические размеры камер, а также специальные требования к интеграции всех субдетекторов в районе расположения мюонной станции ME1/1

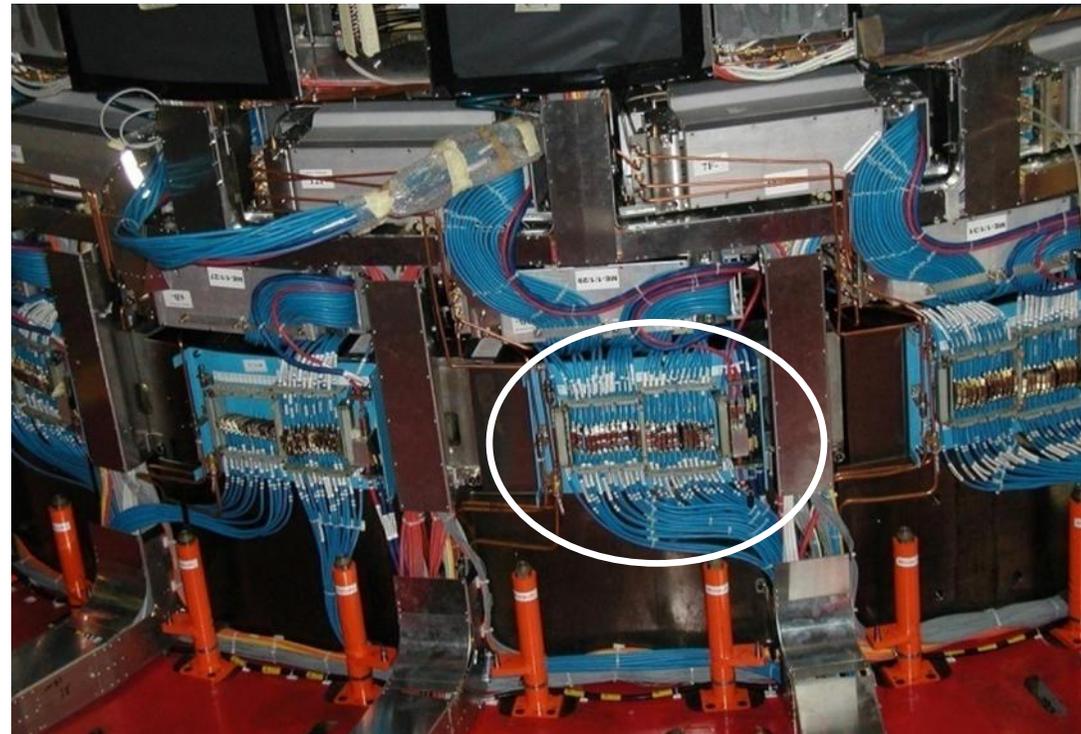
Расположение камер мюонной станции ME1/1 в экспериментальной установке

Для монтажа детекторов и доступа к ним во время обслуживания разработаны:

- специальные треи, позволяющих проложить кабели и коммуникации вокруг слотов для установки камер ME1/1;
- коммутационные панели для разъединения разъемов кабелей и газовых и водяных труб.



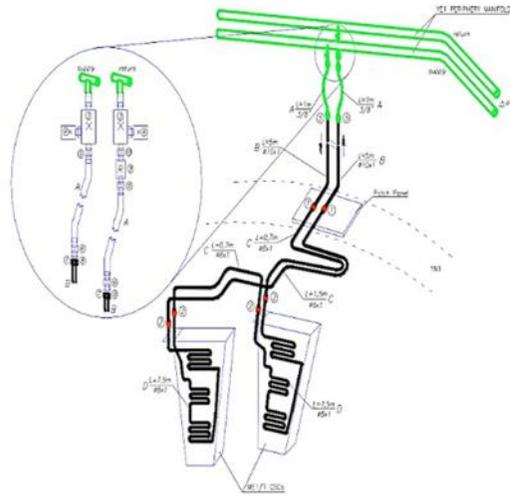
Общий вид разводки кабелей в зоне расположения камер ME1/1



На каждой части торцевой мюонной станции установлено по 18 панелей

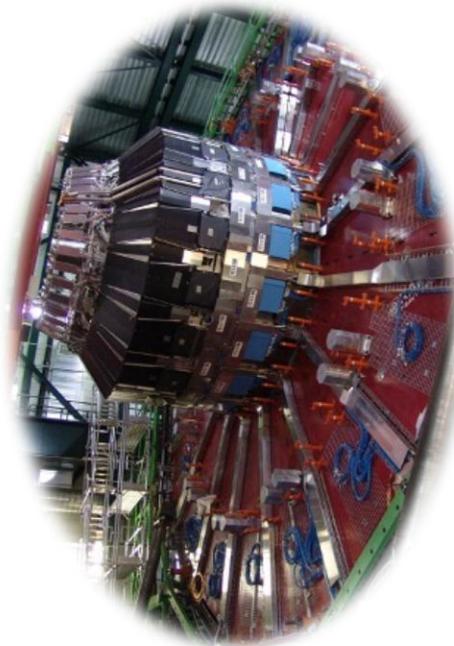
Субсистемы комплекса мюонной станции ME1/1

Система охлаждения

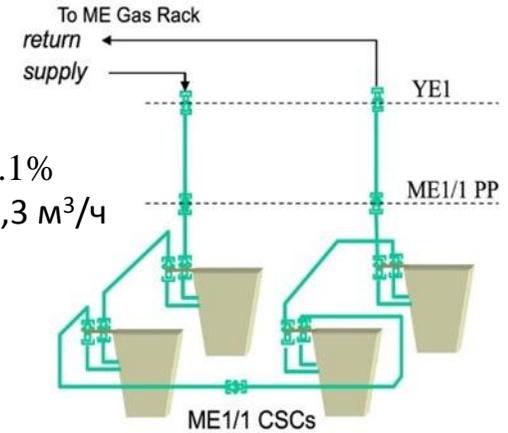


Один канал - 2 CSC
 Всего - 36 каналов
 Рабочее давление $P \sim 4$ бар
 Температура $T = 19 \pm 2^\circ\text{C}$

Один канал - 4 CSC
 Всего - 18 каналов
 $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{CF}_4$ (40/50/10)
 Средняя стабильность 0.1%
 Скорость циркуляции $\sim 6,3 \text{ м}^3/\text{ч}$

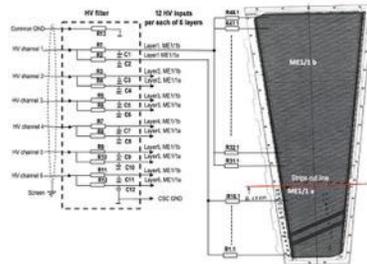


Газовая система



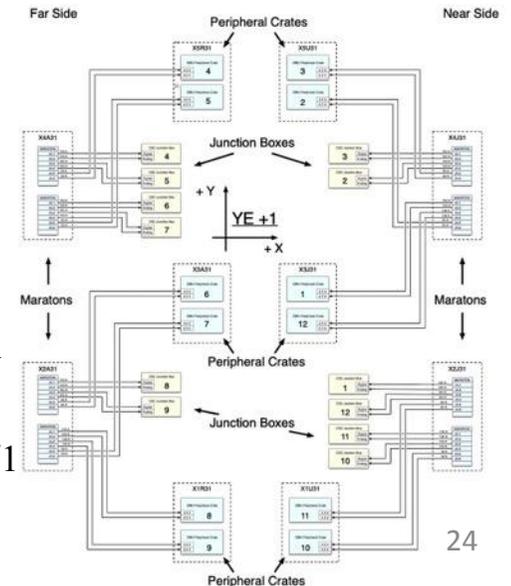
Низковольтная система

Высоковольтная система



Всего 432 канала
 2 крейта SY1527 CAEN
 16 источников (28 кан.) 1733BP
 $U = 1 \div 4000 \text{ В}$, $I = 1 \div 200 \text{ мкА}$

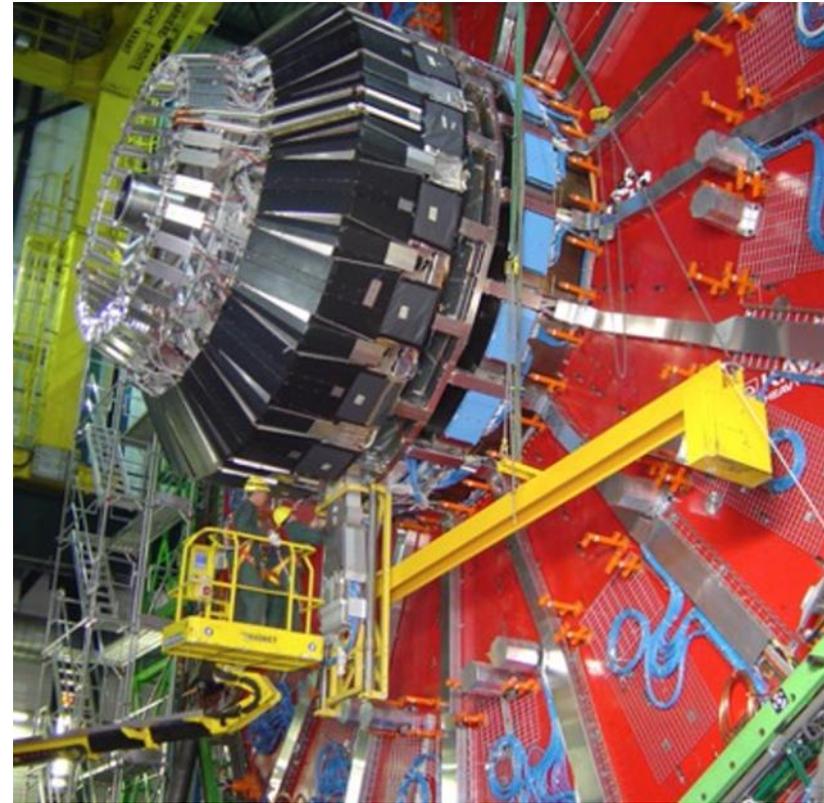
CSC LV Power Distribution
 Maraton -> Junction Box & Peripheral Crate Cabling
View from Jura side
 Revised 23 May 12



16 источников MARATON
 $P = 3.6 \text{ кВт}$, $I = 10 \div 600 \text{ А}$
 216 CSC включая 72 ME1/1
 24 периферийных крейта

Сборка мюонной станции ME1/1

Разработаны специальные устройства для монтажа детекторов



- При монтаже камер в верхнюю часть мюонной станции ME1/1 «загрузочная машина» с детектором подавалась краном вертикально
- Для монтажа камер в нижнюю часть мюонной станции ME1/1 применена балка с компенсирующим противовесом

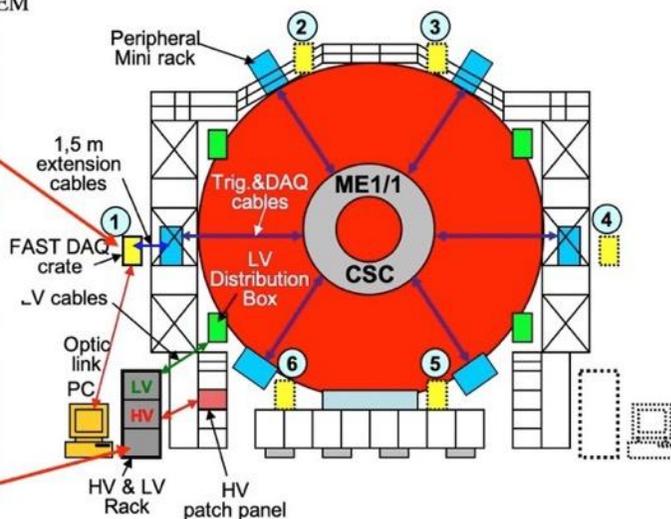
Проверка работоспособности камер после инсталляции

Работоспособность камер проверена с помощью мобильного автоматизированного стенда

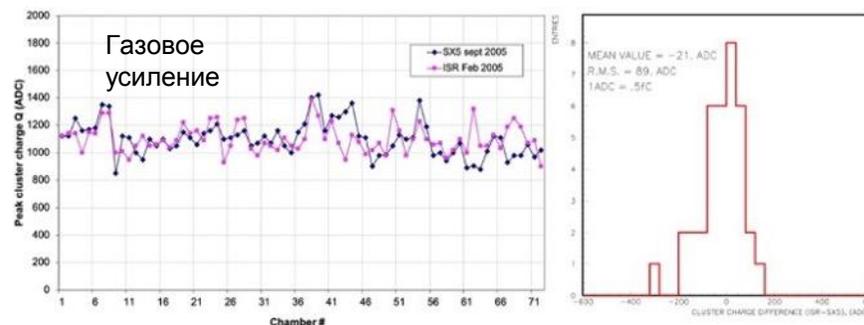
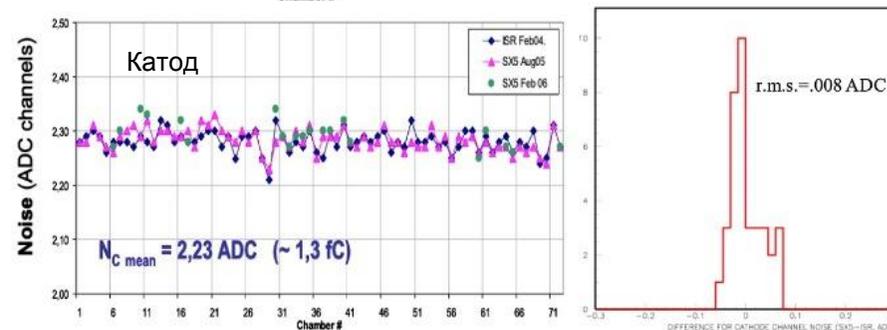
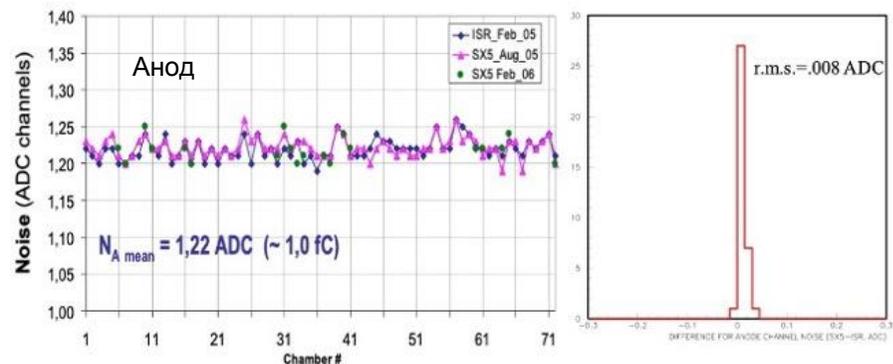
Мини VME крейт
DMB, TMB, DYNTEM



Стойка с LV и HV



Шум каналов анодной (AFEB), катодной (CFEB) электроники и величина пика заряда кластера (газовое усиление) для 72 CSC до и после монтажа

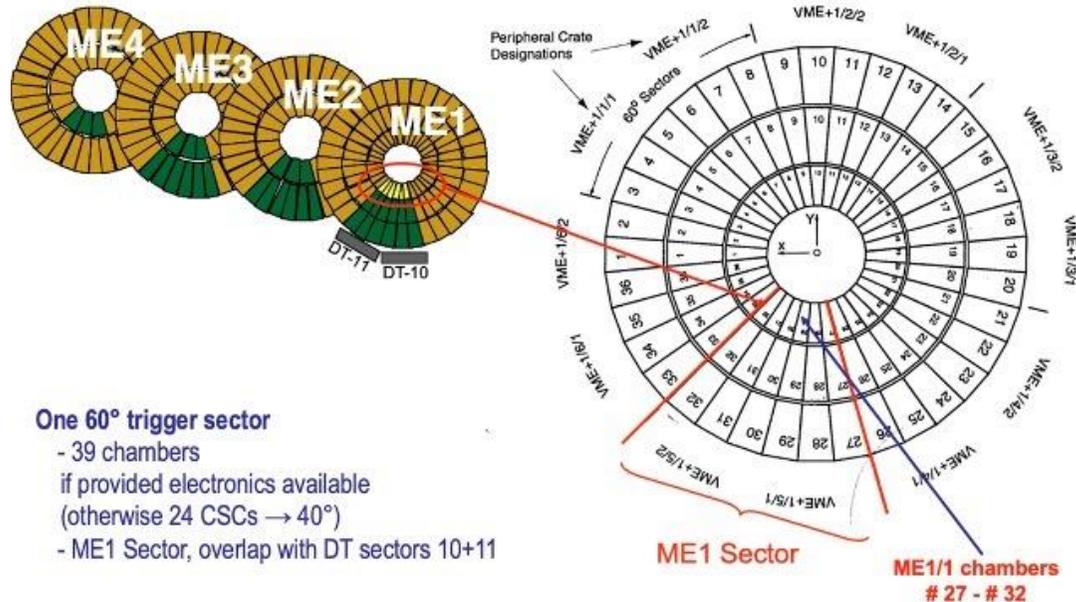


Результаты тестирования показали стабильность характеристик после инсталляции в экспериментальную установку

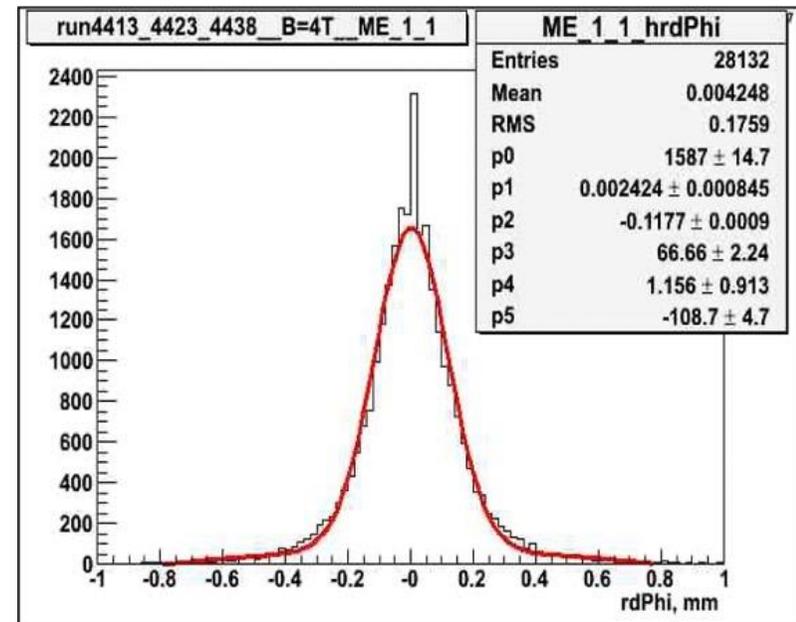
Тест субдетекторов CMS с космическими частицами в магнитном поле после сборки в наземном зале (МТСС)

Торцевая мюонная система:

детекторы 4 станций ME1/1, ME1/2, ME1/3, ME1/4, входящие в 60° сектор (1/12 CMS)



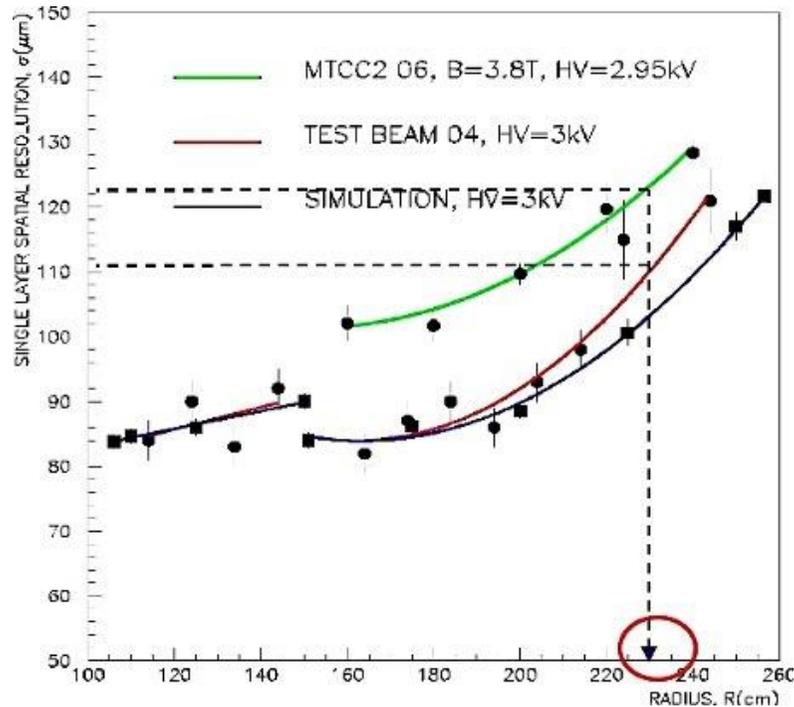
Пространственное разрешение камер ME1/1 (магнитное поле 4Т)



$\sigma=118$ мкм на одну плоскость
 (средняя величина для 6 камер)

Результаты теста МТСС

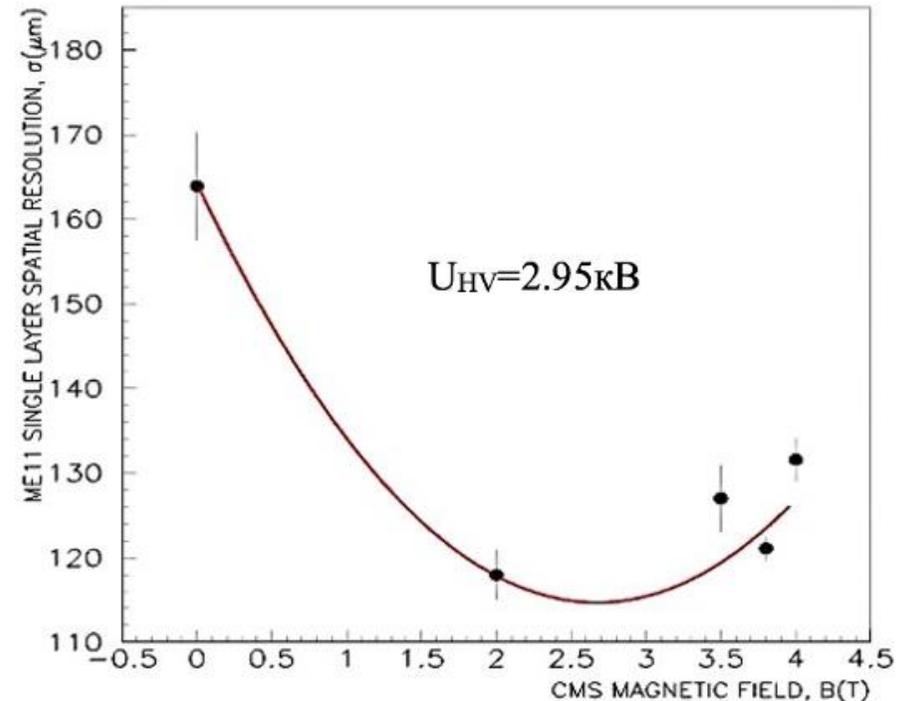
Зависимость координатной точности камеры ME1/1 от радиуса.



Результаты теста МТСС совпадают с, полученными ранее на пучке и с моделированием.

Отличие на 10 мкм для МТСС - меньшее высокое напряжение (2.95 кВ)

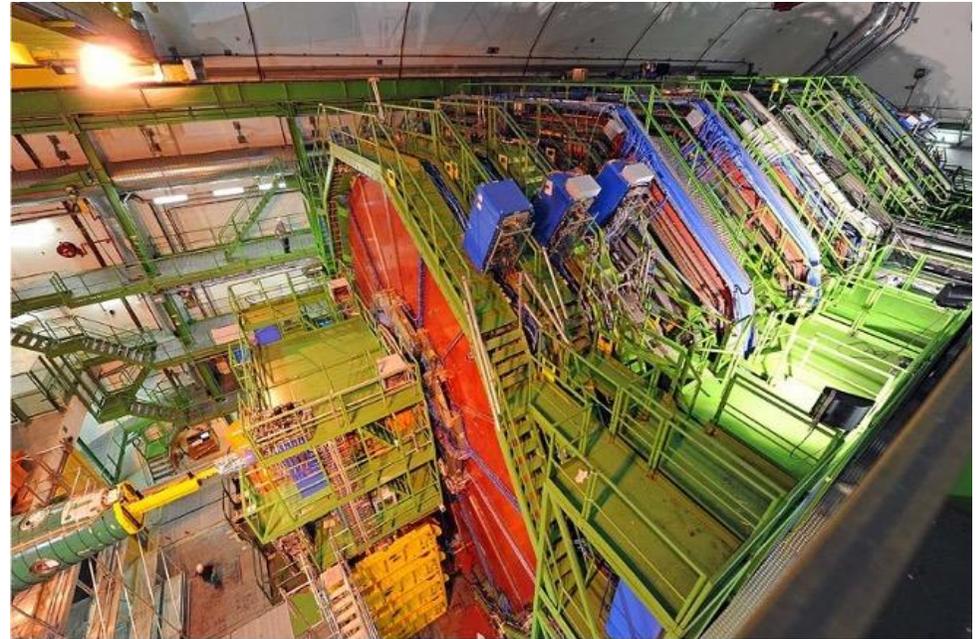
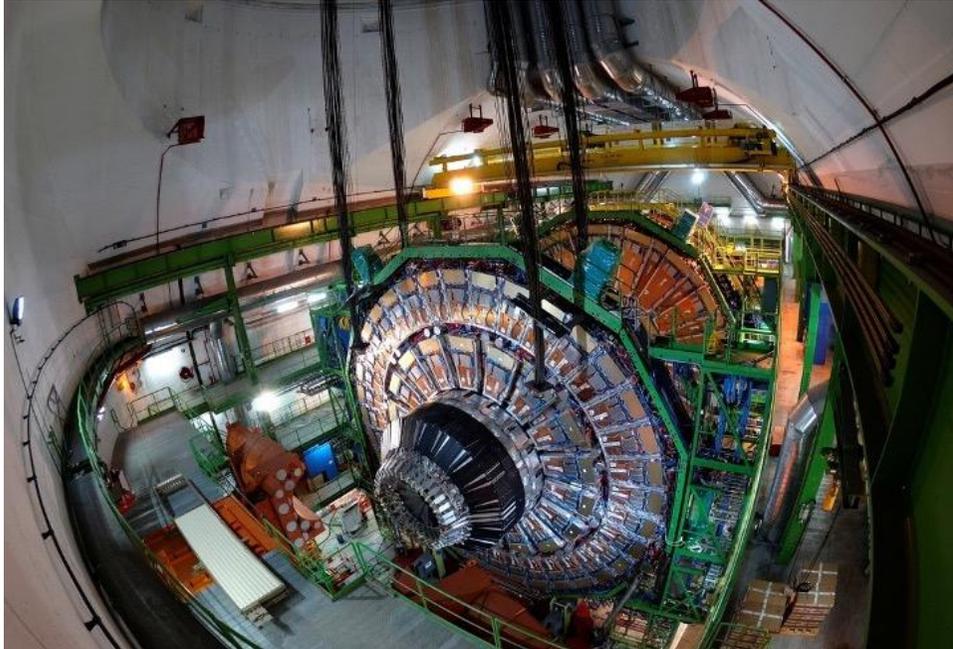
Зависимость координатной точности плоскости ME1/1 камеры от величины магнитного поля



- Лучшая координатная точность 118 мкм, соответствует значению магнитного поля 2.7 Т
- Координатная точность во всем диапазоне изменения магнитного поля 0–2.4 Т, не превышает условие проекта 185 мкм

Проверка работы детекторов мюонной станции ME1/1 после окончательной сборки в подземном зале (тест CRAFT)

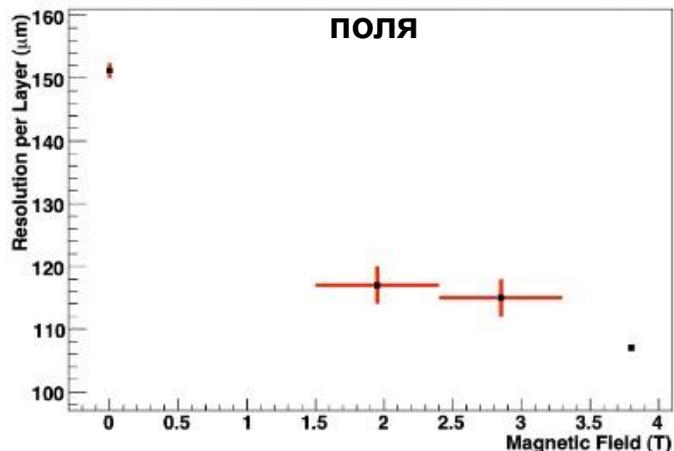
- Перед запуском установки характеристики камер ME \pm 1/1b проверены с космическими частицами при рабочем значении магнитного поля ~ 4 Т



После сборки в экспериментальном зале установка CMS перешла в состояние готовности к работе с протон-протонными столкновениями на БАК

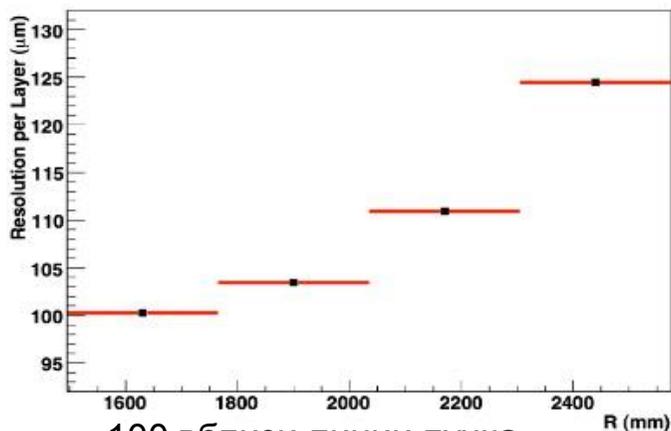
Результаты теста CRAFT

Пространственное разрешение плоскости от величины магнитного поля



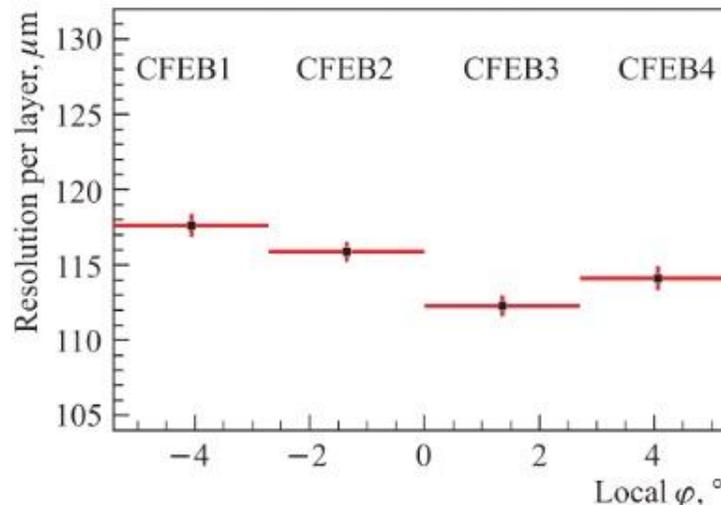
В диапазоне магнитного поля 0÷4 Т
Пространственное разрешение 110÷150 мкм

Пространственное разрешение по радиусу



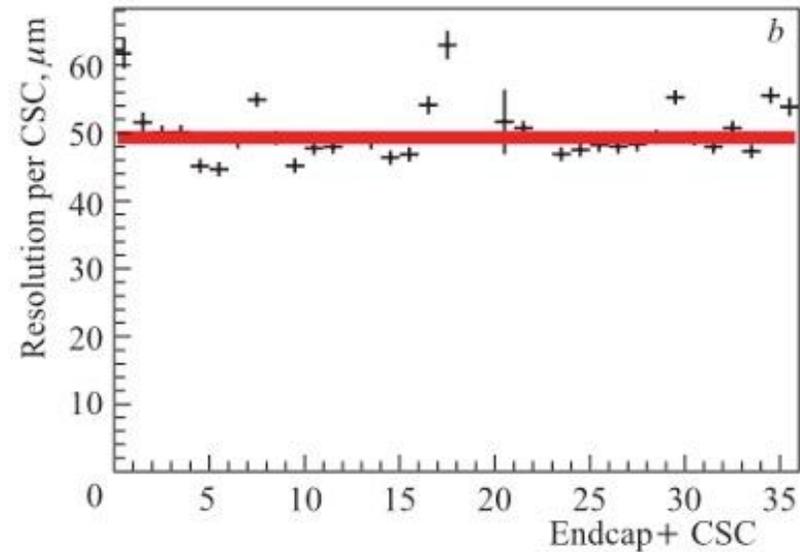
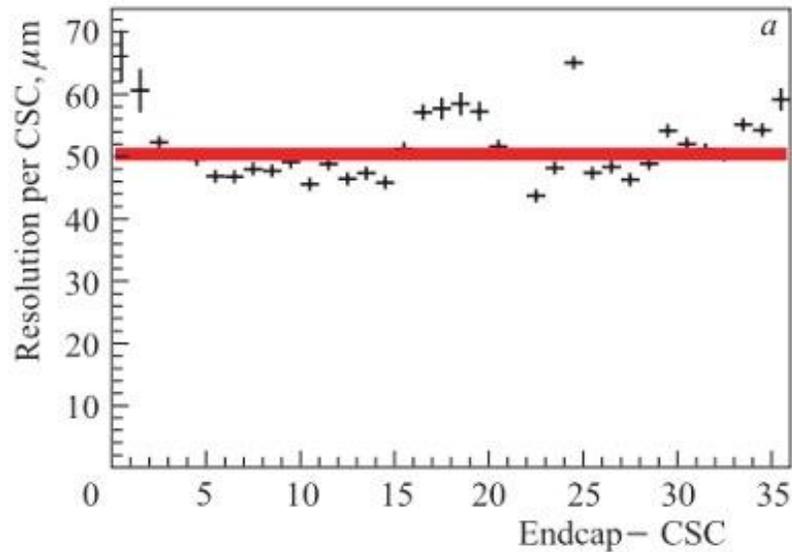
~100 вблизи линии пучка
<125 мкм по всей длине камеры
(увеличение ширины стрипа)

Пространственное разрешение плоскости по азимуту (4 области)



- В области CFEB 3 $\sigma \sim 113$ мкм (угол наклона анодной проволоки оптимальный для компенсации сдвига дрейфа электронов)
- Деградация пространственного разрешения, связанного с изменением угла анодных проволочек относительно стрипов по азимуту, незначительна, что подтверждает оптимальный выбор конструкции камер.

Среднее значение пространственного разрешения камер ME1/1b для 2 торцевых частей мюонной станции (72 камеры) составляет ~50 мкм (проектное значение $\sigma \leq 75$ мкм)



Результаты, полученные в период сеанса CRAFT, показали готовность мюонной системы CMS, включая комплекс передней мюонной станции ME1/1, к работе с протон-протонными столкновениями на БАК.

Физический запуск CMS

1 этап набора данных с протон-протонными взаимодействиями БАК

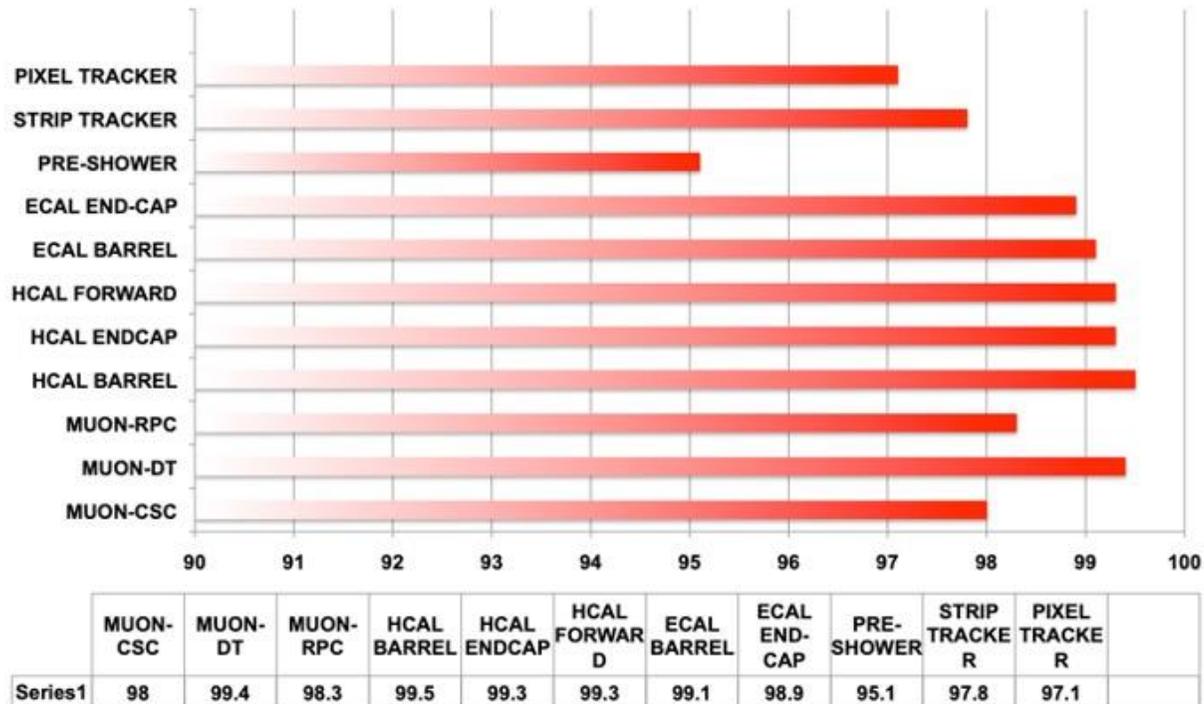
Энергия в системе центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ.

Интегральная светимость 29.4 fb^{-1}

Пиковая светимость в конце сеанса $7.7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

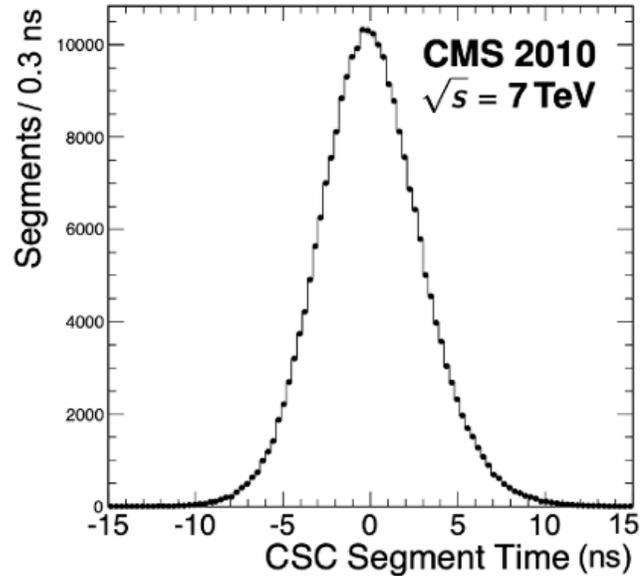
Эффективность регистрации событий $\sim 98.5\%$.

Количество работающих детекторов в подсистемах CMS в первом наборе данных



Характеристики мюонной станции ME1/1

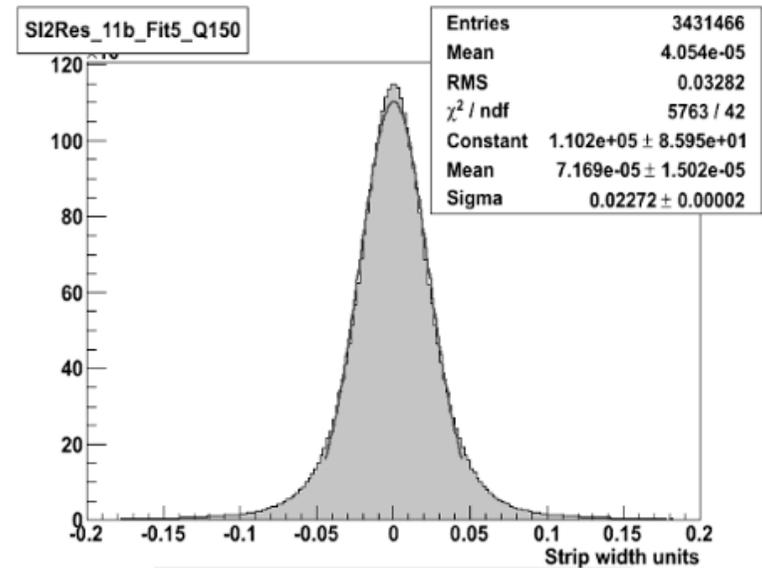
Временное разрешение **3 нс**



Временное распределение трек-сегментов в камере для мюонов с $p_T \geq 20 \text{ GeV}/c$.

Фитирование распределения функцией Гаусса дает величину среднеквадратичного отклонения $\sigma_t = 3 \text{ нс}$

Пространственное разрешение **66 мкм**



Распределение отклонения, измеренного значения координаты мюона от расчетной координаты сегмента трека в плоскости.

Пространственное разрешение плоскости:
 $\sigma_l = \text{rms} \times \text{ширину стрипа} = 0.03282 \times 5 \text{ мм} = 164 \text{ мкм}$.
Для камеры из 6 плоскостей:

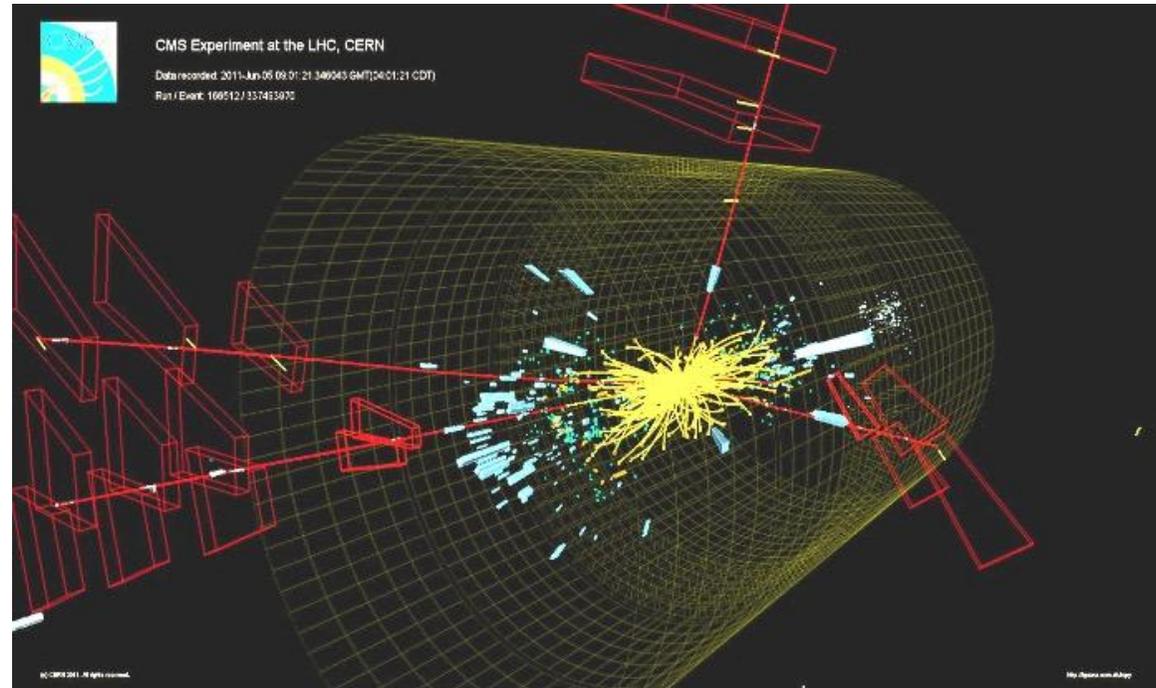
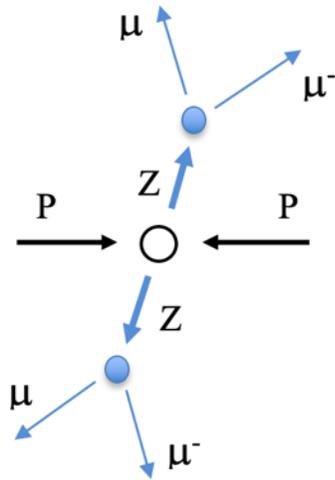
$$\sigma_{\text{ME1/1}} = \sigma_l / \sqrt{6} = 66 \text{ мкм}$$

Временное разрешение 3нс и пространственное разрешение 66мкм, измеренные с протон-протонными взаимодействиями БАК, полностью удовлетворяют проектным условиям для детекторов ME1/1

Результат 1 этапа набора данных

Одним из фундаментальных достижений в выполнении физической программы эксперимента CMS, в период первого набора экспериментальных данных, явилось открытие новой частицы бозона Хиггса.

Пример «золотого» события распада бозона Хиггса, с 4-мя мюонами в конечном состоянии.



- Ключевую роль в прецизионных измерениях координат трека мюона играют детекторы передней мюонной станции ME1/1, которые обладают уникальными характеристиками.
- Максимально близкое расположение мюонной станции ME1/1 к точке взаимодействия пучков, которое обеспечивает сшивку частей трека, восстановленных в мюонной системе и трекаре, а также его экстраполяцию в точку взаимодействия.

Программа модернизации БАК

Программа модернизации БАК нацелена на повышение интегральной светимости

Параметр	LHC проектная светимость	HL-LHC повышенная светимость	HL-LHC предельная светимость
Пик светимости ($10^{34}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)	1.0	5.0	7.5
Интегральная светимость (фб-1)	300	3000	4000
Пайлап	~30	~140	~200

В режиме HL-LHC

Интегральная светимость возрастет в 10 раз

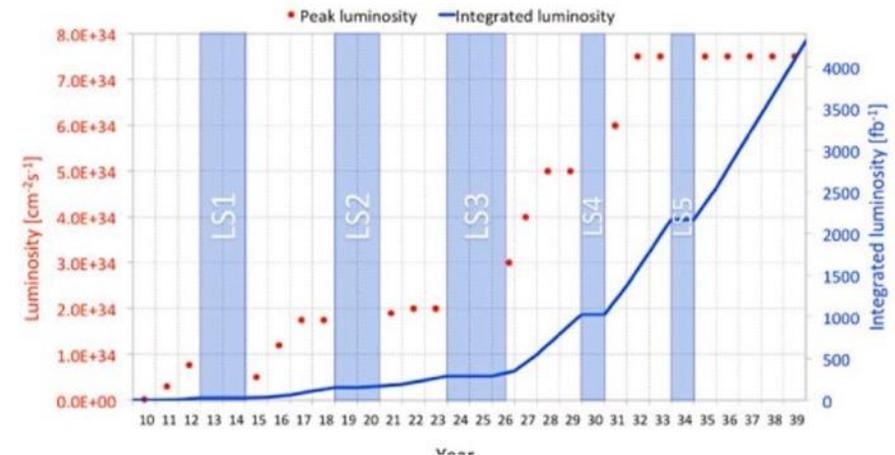
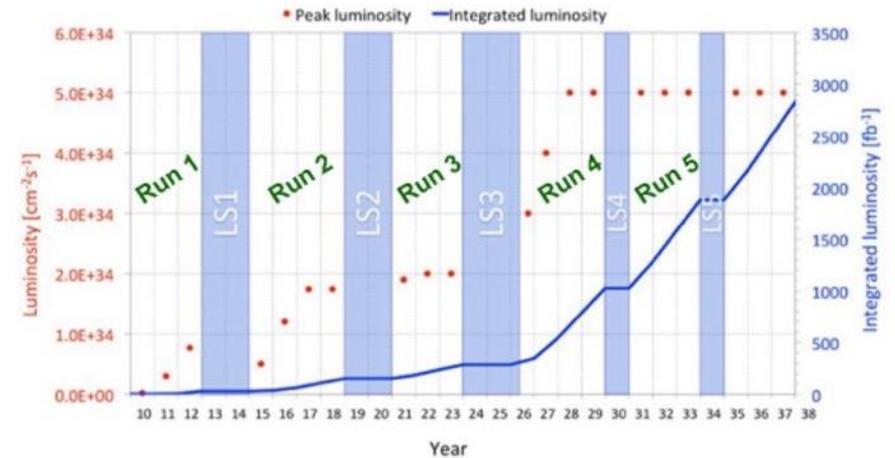
Пайлап возрастет в 5 раз

- дополнительные требования к быстродействию детекторов и электроники считывания

Модернизация в периоды LS1 и LS2 нацелена на надежную и эффективную работу в проектном режиме при работе БАК с полной энергией до $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и пиковой светимостью $L = 1 \div 2 \times 10^{34}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Модернизация в период LS3 нацелена на надежную и эффективную работу в режиме высокой светимости БАК $L = 5 \times 10^{34}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ при интегральной светимости 3000 фб⁻¹.

Прогнозируемая эволюция мгновенной и интегральной светимости



Задачи модернизации торцевой мюонной системы (LS1)



Изготовление 72-х камер мюонной станции ME4/2

- Расширение мюонной системы (4 станции) диапазоне: $0.9 < \eta < 2.4$
- Повышение эффективности регистрации в диапазоне $1.2 < \eta < 1.8$

Оснащение мюонной станции ME1/1 новой электроникой

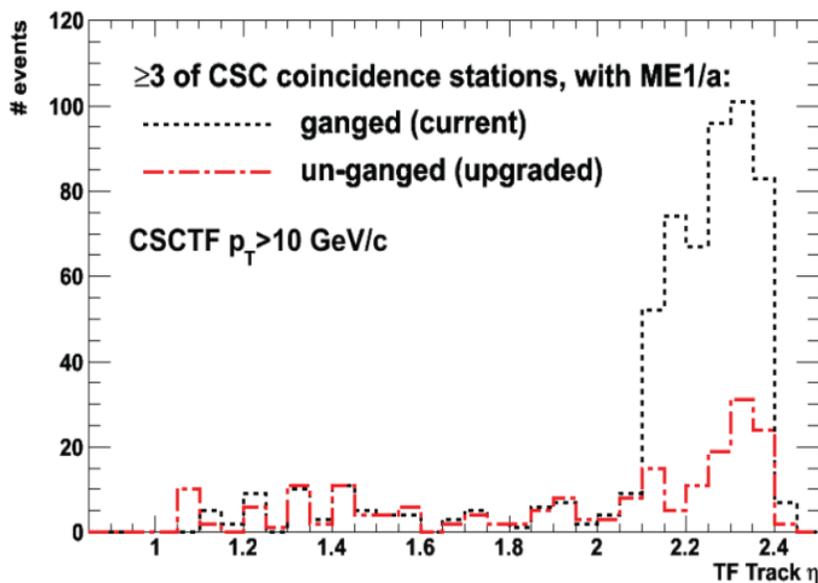
- Функционирование без мертвого времени
- Эффективная регистрация событий при больших нагрузках $2.1 < |\eta| < 2.4$
- Эффективное триггирование в области $2.1 < |\eta| < 2.4$

Демонтаж, модернизация камер, установка новой электроники и проверка работоспособности камер

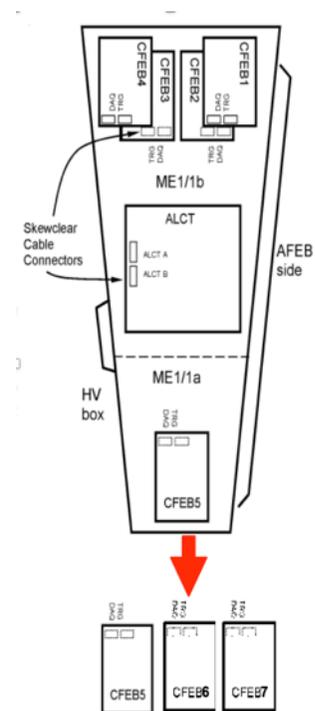
Мотивация модернизации ME1/1

Первоначальный проект мюонной станции ME1/1 был сокращен – уменьшено количество катодных плат CFEB на камере ME1/1a

- 3 стрипа объединено на один канал считывания (1 плата считывания CFEB вместо 3), что привело к 3 кратной неоднозначности при реконструкции треков.
- Каждый мюон дает 1 реальный трек-сегмент и 2 ложных
- Занятость каналов считывания ME1/1a возросла в ~ 3 раза
- Отсутствие возможности триггирования в области $2.1 < \eta < 2.4$



Эффект устранен за счет 2 дополнительных катодных плат на ME1/1a

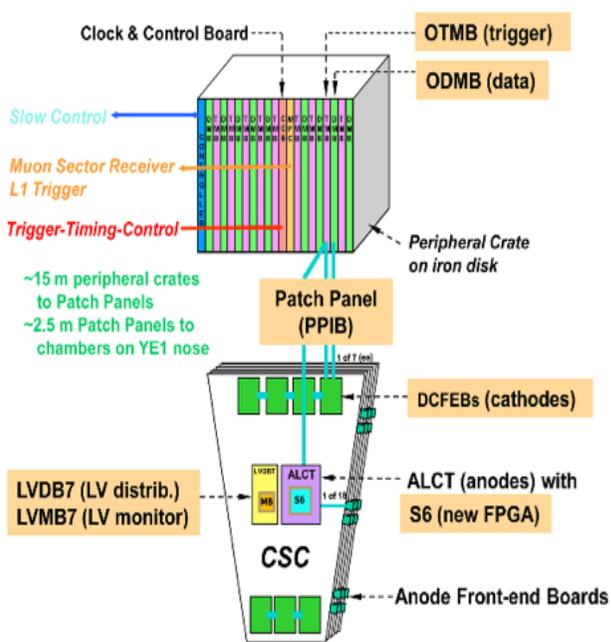


Новая цифровая катодная плата для камер ME1/1

CFEB: мертвое время при высоких нагрузках – запись в аналоговую память. Скорость чтения ~280 Мбит/с.

DCFEB (Digital Cathode Front End Board): АЦП и аналоговая память заменены на АЦП прямого преобразования и цифровую память

- Все 96 каналов непрерывно оцифровываются (без мультиплексирования). Скорость чтения ~1÷2.4 Гбит/с.
- фактически без мертвого времени



New board acronyms:

- OTMB Optical Trigger MotherBoard
- ODMB Optical Data MotherBoard
- PPIB Patch Panel Interface Board
- DCFEB Digital Cathode Front-End Board
- LVDB7 Low Voltage Distribution Board (7 DCFEb version)
- LVMB7 Low Voltage Monitor Board (7 DCFEb version)
- S6 Spartan-6 mezzanine board

CLK,L1A,JTAG...
TMB Path copper
Data Path copper

Virtex I

Trig brd2brd

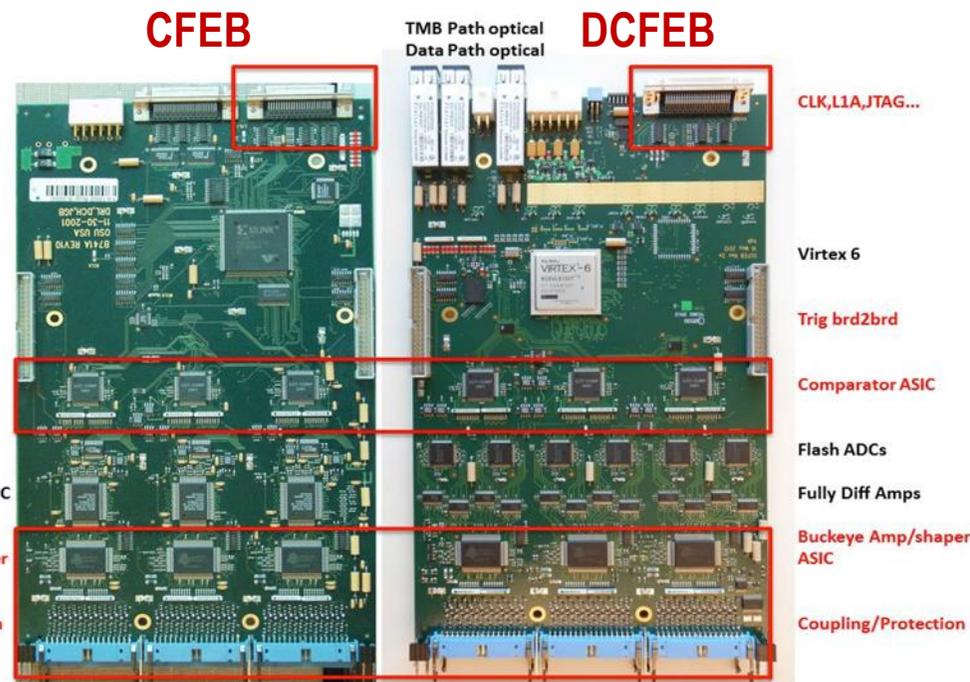
Comparator ASIC

6 Wilkinson ADCs

Switch Capacitor ASIC

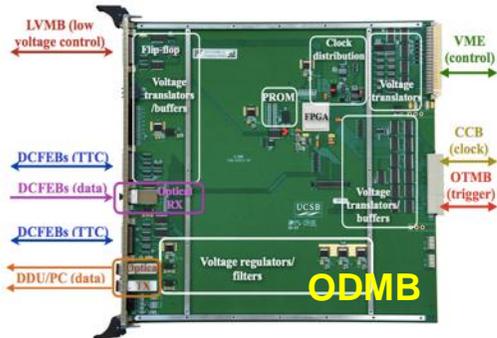
Buckeye Amp/shaper
ASIC

Coupling/Protection



Необходима замена модулей в периферийных крейтах станции ME1/1:
ODMB, TMB, ALCT мезонин карта, LVDB7, LVMB7

Модернизация электроники в периферийных крейтах мюонной станции ME1/1



DMB → ODMB (Optical DAQ Mother Board)

- замена FPGA (Virtex 6) для поддержки 7-ми DCFEB, оптические линии передачи данных



TMB → OTMB (Optical Trigger Mother Board)

- новая мезонин-карта с новой FPGA улучшает триггерную логику.
- оптические линии передачи данных



Мезонин платы ALCT (Anod Local Charge Track board)

- замена FPGA (Spartan-6) в 10 раз больше логики и в 2 раза больше быстродействие

LVDB → LVDB7 (Low Voltage Distribution Board)

- плата распределения низкого напряжения (LVDB7) обеспечивает 26 напряжений для питания 7 DCFEB и 1 ALCT



Модернизации мюонной станции ME1/1 (SX5 ЦЕРН)



ME1/1 камеры в SX5



Стенд для проверки камер после сборки



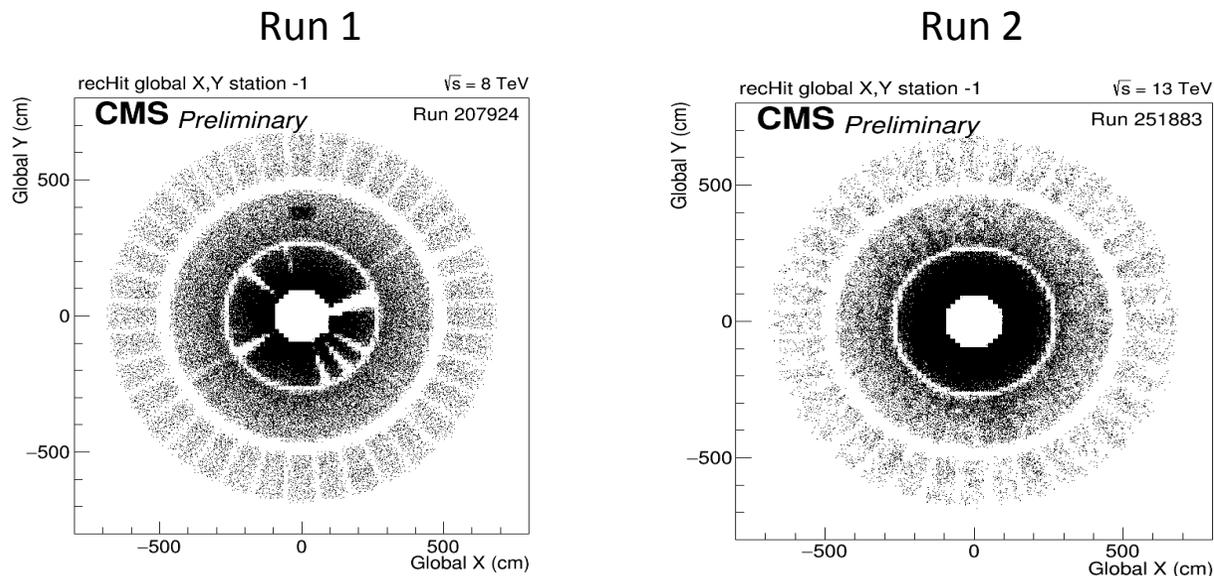
Стенд для длительной проверки камер

- 72 ME1/1 камеры извлечены, переоборудованы, проверены и повторно установлены
- Перед установкой камеры полностью проверены со стандартным набором тестов, включая длительный тест с высоким напряжением

Проверка работоспособности камер ME1/1 после модернизации

- ✓ Во втором периоде набора данных модернизированные камеры показали более стабильную работу

Загрузка событий реконструированных в камерах ME1/1
(внутреннее кольцо)

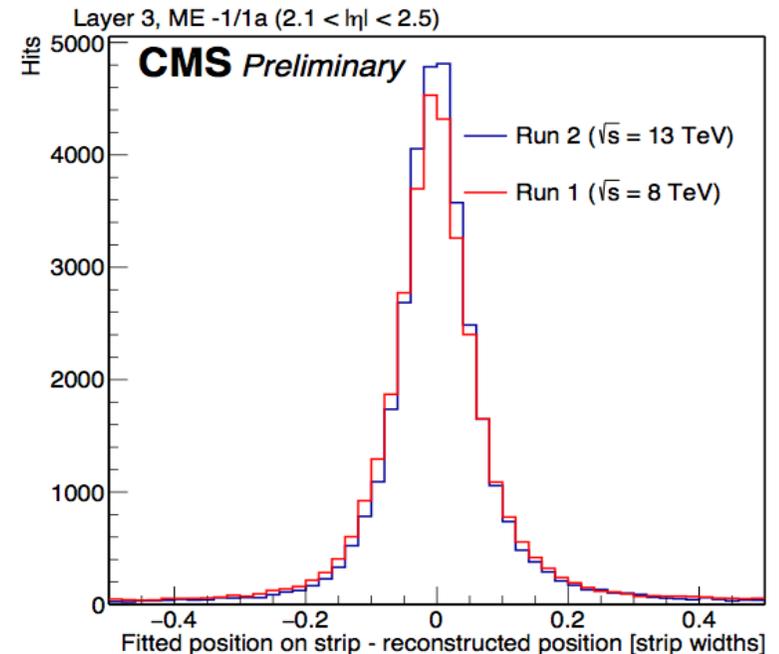


Радиальные пробелы означают, что детекторы или отдельные катодные платы (CFEB) отключены по питанию.

Результаты модернизации мюонной станции ME1/1

- ✓ Более чем в 3 раза уменьшена шумовая нагрузка канала катодной электроники считывания. В области больших загрузок $2.1 < \eta < 2.4$ обеспечена эффективность восстановления координаты трека $> 96\%$ и эффективность триггера $> 90\%$
- ✓ Экспериментально измерено значение пространственного разрешения камер ME1/1a после модернизации $\sigma = 51$ мкм
- Причина повышения точности восстановления пространственной координаты определяется уменьшением входной емкости канала регистрации (устранено объединение 3 стрипов)

Пространственное разрешение модернизированных камер ME1/1a



Run 2: $\sigma = 51$ мкм

Run 1: $\sigma = 64$ мкм

Заключение

1. Создан и введён в эксплуатацию уникальный комплекс передней мюонной станции CMS. Конструкция детекторов мюонной станции ME1/1 оптимизирована для эффективной работы в неоднородном магнитном поле до 4 Т при фоновых загрузках до 3 кГц/см².
2. Достигнуты рекордные параметры комплекса ME1/1:
 - точность реконструкции координаты мюона <75 мкм;
 - эффективность реконструкции треков >96%;
 - временное разрешение ~ 3 нс;
 - время идентификации локального заряженного трека <50 нс с эффективностью >99%;
3. В процессе создания комплекса передней мюонной станции с непосредственным участием автора диссертации решены важные методические проблемы:
 - проведены комплексные методические исследования, результатом которых явилась разработка конструкции и технологии изготовления прецизионных катодно-стриповых камер для мюонной станции ME1/1, удовлетворяющих требуемым параметрам эксперимента CMS;
 - в ОИЯИ создан участок серийного изготовления камер, изготовлено 76 шестислойных камер для мюонной станции ME1/1;
 - произведён монтаж передней мюонной станции ME1/1, состоящий из 72 камер и систем, обеспечивающих их функционирование;
 - проведена экспериментальная проверка основных характеристик комплекса мюонной станции ME1/1 в реальном магнитном поле с помощью космических частиц, показано, что физические характеристики мюонной станции ME1/1 соответствуют проектным.

4. Успешно завершён первый этап набора экспериментальных данных на установке CMS. Впервые с протон-протонными взаимодействиями БАК измерены основные характеристики детекторов мюонной станции ME1/1: временное разрешение 3нс и пространственное разрешение 66 мкм, которые полностью удовлетворяют проектным условиям CMS.
5. Успешно реализован первый этап плана модернизации комплекса передней мюонной станции установки CMS, нацеленный на обеспечение надёжной и эффективной регистрации событий и триггирования в области псевдобыстрот $2.1 < \eta < 2.4$, в режиме работы БАК с полной энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и светимостью $L = 1 \div 2 \times 10^{34} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$.

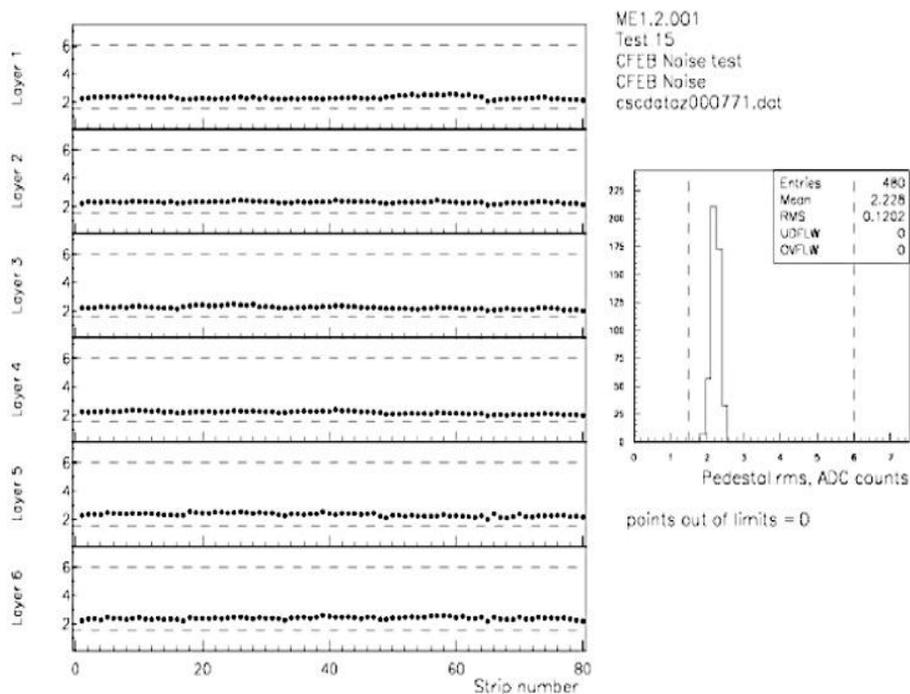
В результате модернизации камер ME1/1 в области больших загрузок:

- устранена неоднозначность определения координаты частицы и более чем в 3 раза уменьшена шумовая нагрузка канала электроники считывания, что позволило обеспечить эффективность определения координаты трека $>96\%$ и эффективность триггера $>90\%$;
- более чем на 20% улучшено пространственное разрешение камер ME1/1а ($\sigma=51$ мкм).

Резервные слайды

Шумовая характеристика CFEB

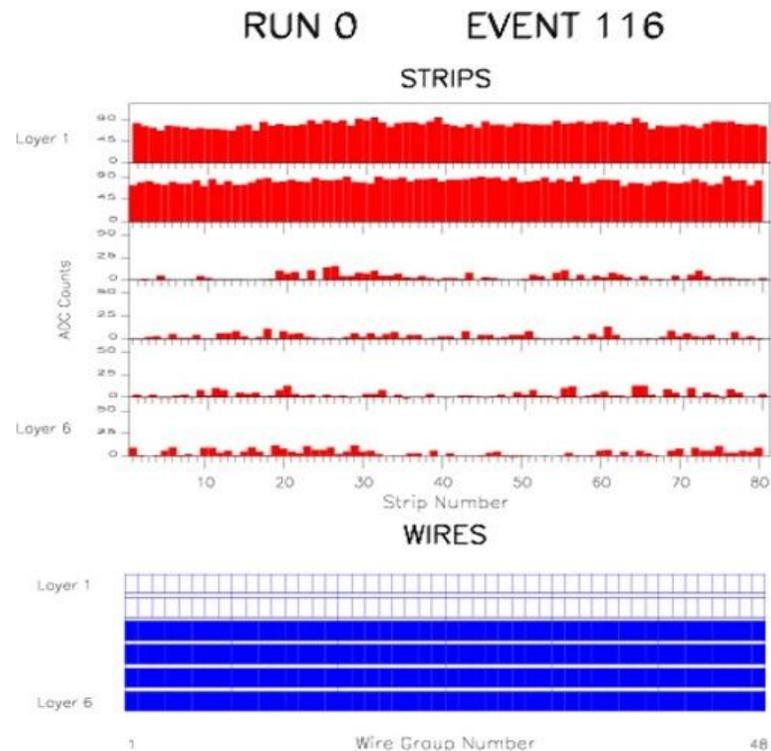
Среднеквадратичные отклонения величин пьедесталов каналов CFEB (шумовая характеристика).



Относительно равномерная картина подтверждает отсутствие внешних наводок или генерации каналов.

Проверка работоспособности каналов CFEB

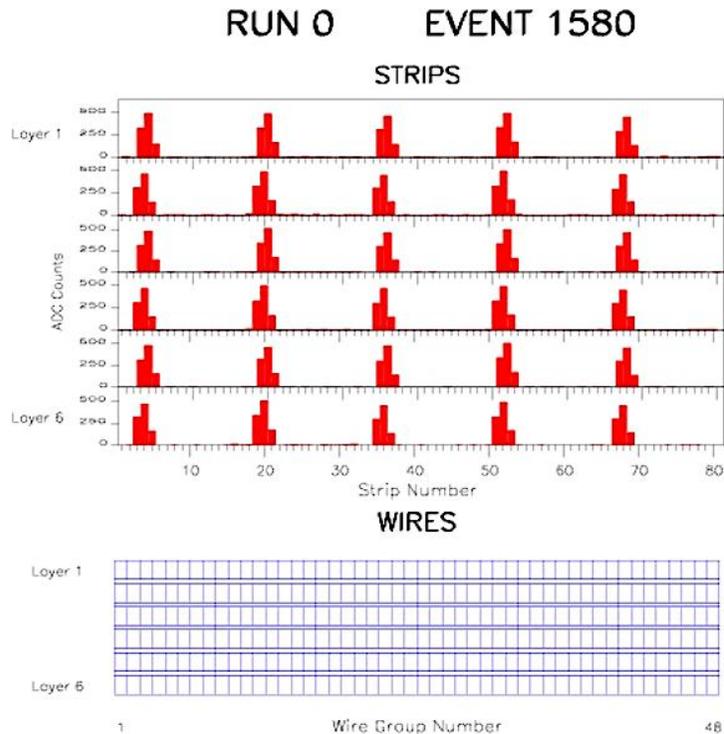
Дисплей событий проверки работоспособности каналов CFEB тестовые сигналы подавались попарно на анодные группы плоскостей



Наличие сигнала в стриповом канале свидетельствует о его работоспособности

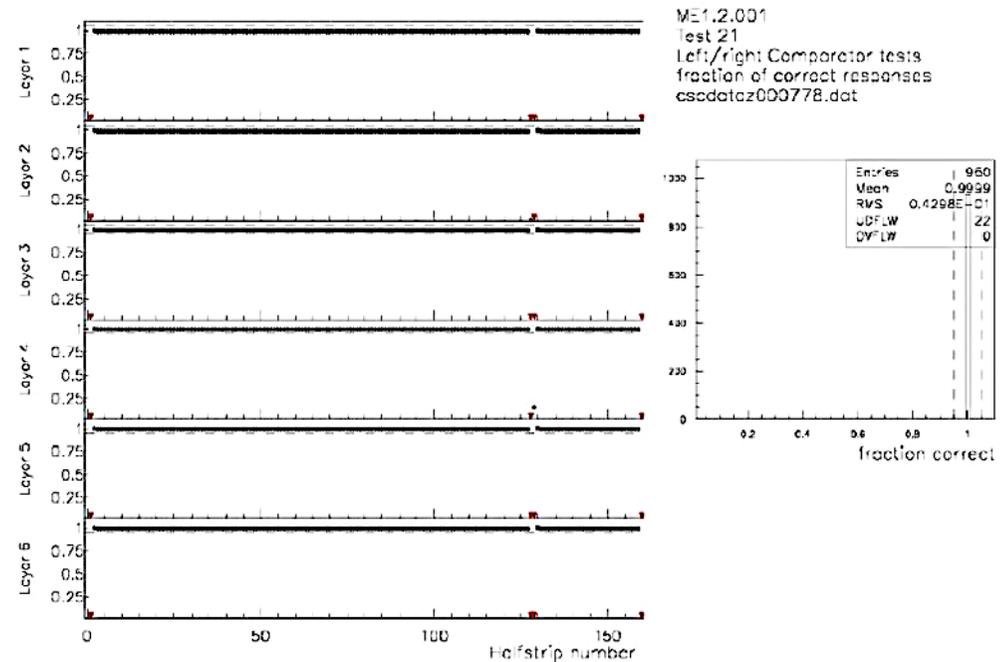
Тест логики компараторов CFEB

Дисплей события теста логики компараторов CFEB.



Подавались сигналы, имитирующие реальный кластер (3 соседних сработавших стрипа) с различным соотношением амплитуд в триаде

Теста логики компараторов CFEB



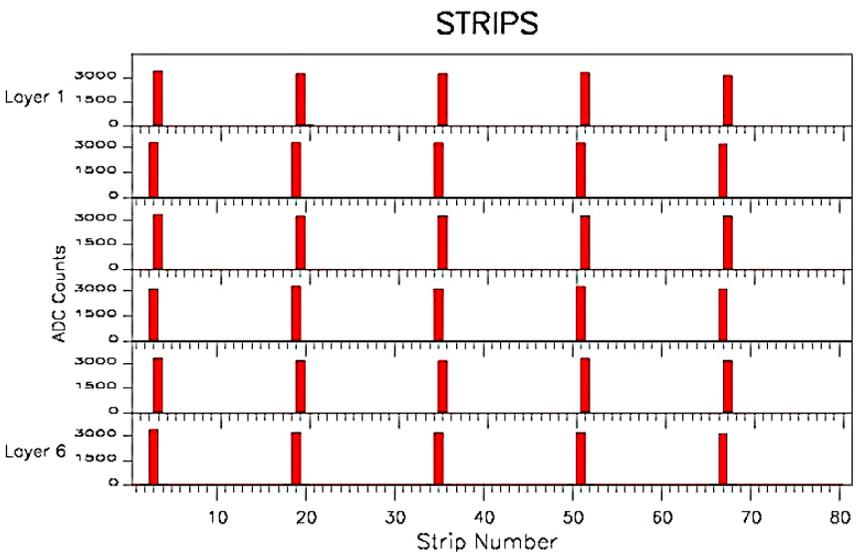
Алгоритм обнаружения центра кластера работает правильно, за исключением положений, где не может быть полноценной триады: крайних каналов и каналов на разделе CFEB4 - CFEB5.

Калибровка аналоговых каналов и каналов компараторов CFEB

Подача тестовых сигналов на каждый канал последовательно при изменении величин порогов регистрации

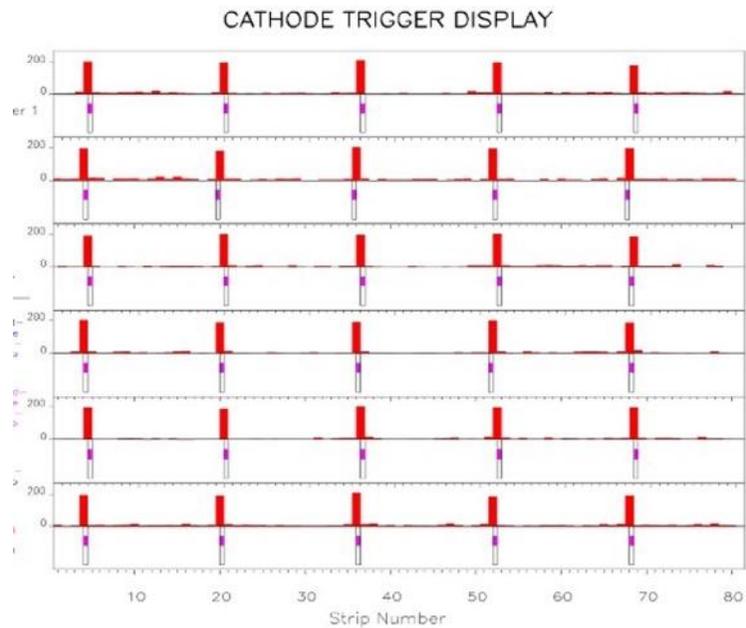
Дисплей события теста калибровки аналоговых каналов CFEB

RUN 0 EVENT 1407



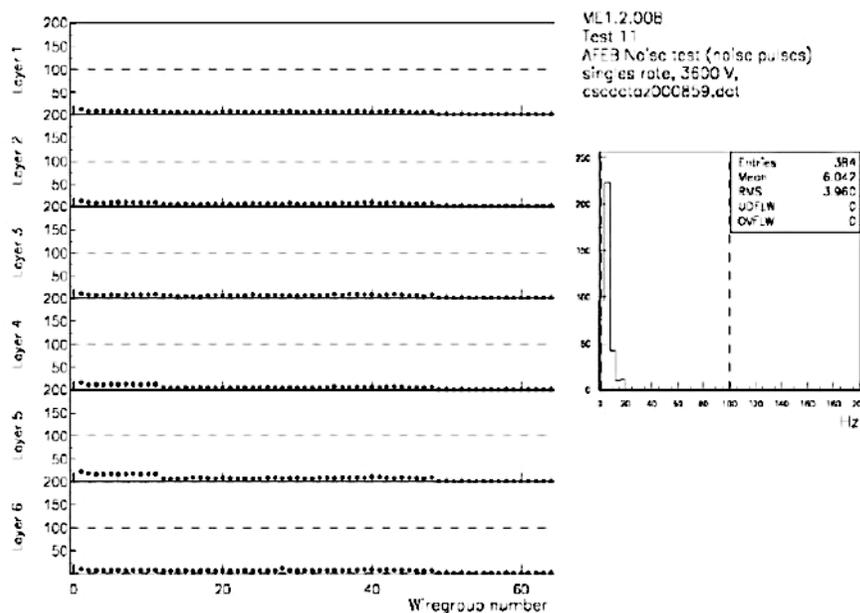
Дисплей события теста калибровки каналов компараторов CFEB

RUN 0 EVENT 6309

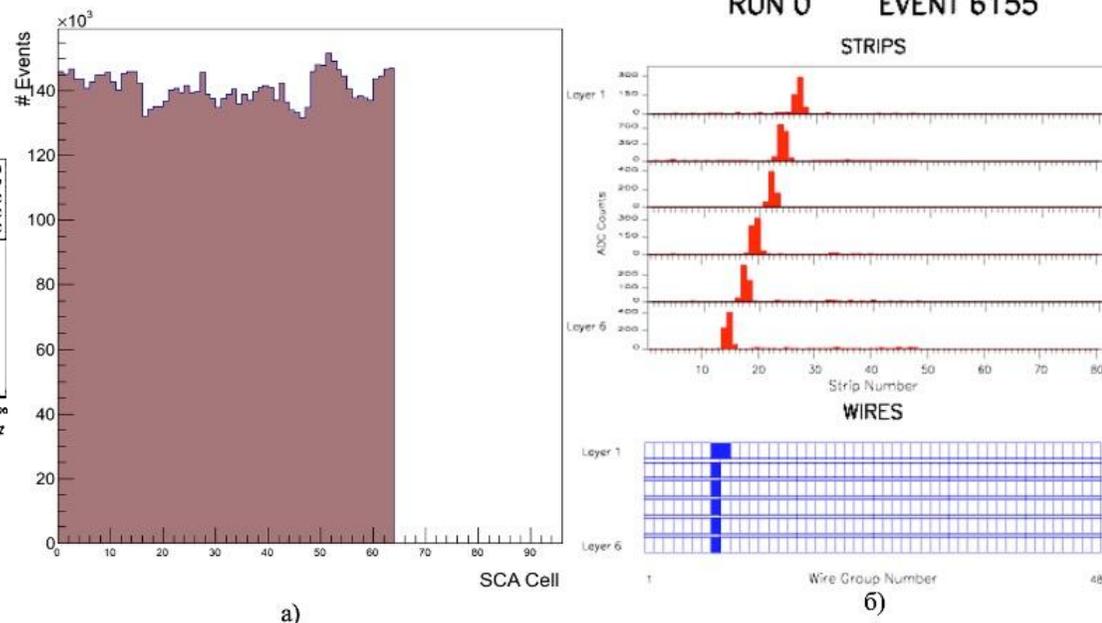


Аналоговые сигналы изображены красным, срабатывание компараторов отмечено полосой под аналоговым сигналом

Шумовая характеристика каналов AFEB



Проверка каналов работоспособности CFEB с космическими мюонами

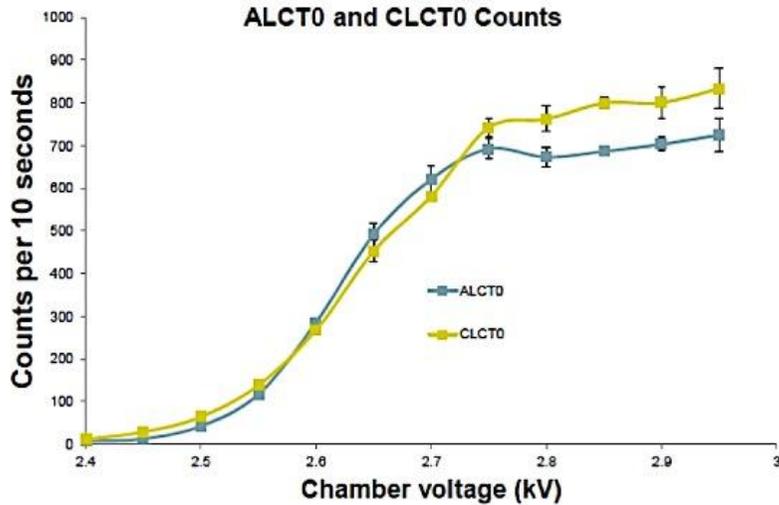


Гистограмма шумов каналов AFEB при наличии высокого напряжения на камере

Гистограмма загрузки каналов CFEB при наборе данных с космическими мюонами для одной плоскости камеры [а]

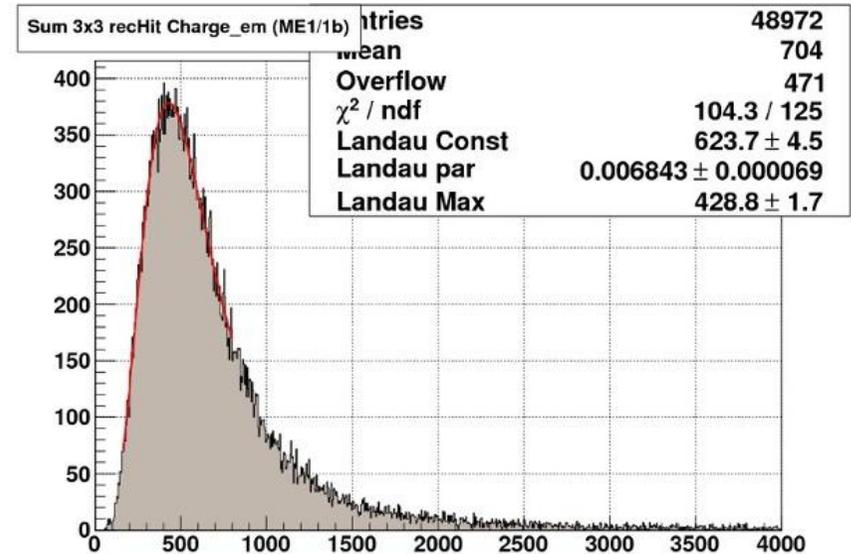
Дисплей события при наборе статистики с космическими мюонами (б)

Счетная характеристика анодного (ALCT) и катодного (CLCT) триггеров в зависимости от напряжения на камере



Выход характеристик на счетное плато указывает на начало рабочего режима работы камеры по напряжению

Распределение величины заряда кластера на стрипах камеры ME1/1 (единицы АЦП)



По положению пика распределения контролируется стабильность газового усиления в зазоре анод-катод